ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

AgroParisTech

Ecole Doctorale ABIES

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

(AgroParisTech)

Spécialité: Economie de l'environnement et des ressources naturelles

présentée et soutenue publiquement par

Aida Nefzi

29 Mars 2012

Evaluation économique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture: étude théorique et application au cas de la Tunisie

Directeur de thèse: **Pierre-Alain Jayet**

Jury

Minh Ha Duong	Directeur de recherche, CNRS	Rapporteur
Walid Oueslati	Professeur, AgroCampus Ouest	Rapporteur
Mohamed Salah Matoussi	Professeur, Université de Tunis	Examinateur
YoussefChahed	Ag. Spécialiste, USDA	Examinateur
Pierre-Alain Jayet	Directeur de recherche, INRA	Directeur de thèse



AgroParisTech
UMR Économie Publique, Centre de Grignon
Avenue Lucien Brétignières, F-78850 THIVERVAL GRIGNON, FRANCE

À ma fille fleur de ma vie…

Remerciements

Je tiens à remercier vivement, mon directeur de thèse, Pierre Alain Jayet, pour l'intérêt qu'il a toujours montré à mon travail et tout l'effort qu'il a fourni pour que j'arrive à aboutir à cette thèse. Sa grande expérience m'a aidé à prendre du recul vis à vis des outils et des méthodes utilisés.

Je tiens, également, à exprimer mon immense reconnaissance et mon profond respect à Mohamed Salah Matoussi. Il m'a encadré durant mon mémoire de DEA et c'est grâce à ses directives que je suis arrivé à ce stade dans mes travaux de recherche.

Je remercie aussi Minh Ha Duong et Latifa Henia pour leurs encouragements, leurs explications, leurs éclairages et leurs recommandations. Je remercie Tahar Mansouri, Naceur Chaabane pour leurs encouragements. D'autres, encore, ont alimenté de près ou de loin mes réflexions lors d'intéressantes et fructueuses discussions, je remercie notamment Yadh Labane, Béchir Abidi, Mohamed Elloumi et Maaouia Mizouri. Une pensée profonde chargée d'émotion et de reconnaissance va à la défunte Aida Mechrgui, expert au ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques. Merci également aux équipes du ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques, particulièrement, l'équipe du commisariat régional de l'agriculture de Jendouba et Samia Elwaer pour sa collaboration.

Enfin, mais avant tout, mes pensées vont à mes chers parents, puisse ce travail être une goutte de gratitude dans l'océan de sacrifices qu'ils m'ont consentis. A mes sœurs qui me soutiennent depuis toujours et dans toutes les circonstances. Et surtout, à mon mari, Fathi, pour son dévouement, ses encouragements, ses réflexions et toutes les discussions fructueuses qu'on a eu, je le remercie d'être à mes côtés chaque jour et de m'apporter le soutien et le bonheur.

Sommaire

INTRODUCTION 1

Chapitre 1. Cadre conceptuel du problème de changement climatique 8

Chapitre 2. Changement Climatique et impacts sur l'agriculture : étude bibliographique 45

Chapitre 3. Changement climatique et Tunisie : étude bibliographique de la vulnérabilité du secteur agricole 81

Chapitre 4. La spécification des entrées du modèle Ricardien 114

Chapitre 5. Etude de l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne 151

CONCLUSION 191

Table de matières 273

Annexes 216

INTRODUCTION

Cette thèse se situe dans le domaine de l'évaluation des impacts économique du changement climatique. Notre point de départ est la nécessité d'évaluer l'impact du changement climatique au niveau des régions vulnérables qui dépendent de l'agriculture afin de développer des politiques de gestion durable. Afin de comprendre cete nécessité, nous proposons dans ce qui suit de rappeler le caractère urgent du changement climatique et des enjeux qui s'y rapportent sur la société. Cela débouchera sur la problématique, les objectifs et la thèse défendue.

1. Le problème du changement climatique

Le changement climatique est le résultat de l'accroissement de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La modification de la teneur en gaz dans le réservoir atmosphérique contribue à l'intensification de l'effet de serre. Ces gaz sont quasi transparents aux rayonnements solaires mais absorbent l'infrarouge et irradient à nouveau vers la terre, contribuant à maintenir une température favorable à la surface de la terre.

La plupart des gaz à effet de serre sont identifiés. Leur rôle dans la régulation du climat ne suscite pas de controverses. Cependant, l'estimation de la réponse du climat à l'accroissement de la concentration de ces gaz est complexe. Elle nécessite de modéliser l'interaction de cette augmentation avec les phénomènes présents à l'intérieur du réservoir atmosphérique.

Plusieurs modèles numériques ont été mis au point par la communauté scientifique afin d'établir les estimations détaillées de l'ensemble des réponses possibles du système climatique. Intégrant les échanges océan atmosphère, le rôle des glaces, des différents types de sols, de la végétation et tenant compte des comportements socio-économiques du futur ; ces modèles parviennent à reconstruire les grandes tendances du climat actuel et à fournir les traits dominants de son évolution.

Ces modèles s'accordent sur le fait que l'accroissement des gaz à effet de serre provoquera un changement du climat qui va se traduire principalement par un réchauffement

moyen de 1,5 à 6 degrés en 2100. Le réchauffement augmentera l'évaporation et les précipitations, surtout dans les régions tropicales et équatoriales. Les pluies seront plus fortes dans les régions où elles sont abondantes, tandis que les zones peu arrosées connaîtront des sécheresses plus sévères. Aussi, les modèles prévoient une forte augmentation des évènements extrêmes, inondations, sécheresses, fortes chaleurs, vents élevées.

1.1. Les enjeux du problème:

Les rétroactions du changement climatique sur les systèmes naturels et l'activité humaine sont nombreuses. En l'état actuel des connaissances, il apparaît que l'une des activités les plus affectées serait l'agriculture. La raison de ce raisonnement est le rapport biologique direct entre la récolte et les conditions climatiques.

Tout d'abord, les températures plus élevées permettraient des saisons de croissance des plantes et des moissons plus longues dans les régions froides et montagneuses, conduisant dans certains cas à une augmentation des récoltes et de la production. Par contre, dans les régions déjà chaudes, le changement de climat pourrait réduire la productivité. L'augmentation des vents élevées causerait la montée du niveau de la mer et par la suite de fréquentes inondations par de l'eau salée dans les deltas et les estuaires fertiles. De même, la modification du rythme des moussons, la sécheresse et par conséquent les problèmes d'alimentation des grands fleuves et les difficultés de remplissage des barrages constitueraient autant de perturbations pour les activités agricoles. Également, des concentrations plus élevées en CO_2 atmosphérique peurraient avoir une influence positive sur la photosynthèse. Au total, 10 à 20% du doublement approximatif de la productivité des cultures pendant les 100 prochaines années pourraient être attribuées à cet effet (Tans *et al.* 1990). La croissance et la repousse des forêts pourraient en être stimulées tout autant. En outre, des gains de productivité de l'ordre de 30% auraient lieu là où les éléments nutritifs et l'humidité seront adéquats pour les plantes.

Ainsi, En termes qualitatifs et abstraction faite des conditions socio-économiques beaucoup des effets du changement de climat sur l'agriculture peurraient être déduits à partir de la relation de dépendance des composantes du système agricole avec les conditions climatiques. Ces effets peurraient être favorables dans certaines régions et le contraire dans d'autres.

1.2. Objectifs

L'humanité connaîtrait un changement climatique dont les conséquences sont nombreuses et difficiles à identifier. Ces conséquences variraient d'une région à une autre. L'une des activités les plus menacées serait l'agriculture. Avec son cycle climatique naturel marqué par la variabilité, la saisonnalité prononcée et la survenue de phénomènes extrêmes, pouvant souvent atteindre une magnitude catastrophique et avec des probabilités d'apparition indiscernables, ainsi que la prédominance de l'agriculture traditionnelle, la Tunisie constituerait un exemple particulièrement intéressant.

Les politiques et institutions sont appelées à entreprendre des mesures afin de prévenir le changement climatique. Ils seront, amener à évaluer les coûts et bénéfices de telles mesures. Bien que les évaluations des coûts ne suscitent pas de controverses, celles des bénéfices devraient l'être à cause des incertitudes qui leurs sont associées. L'évaluation des impacts du changement climatique devient cruciale pour formuler des politiques appropriées au niveau international et national.

L'objectif général de cette thèse est d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne.

1.3. Thèse défendue

La Tunisie est un pays nord Africain pauvre en ressources en eau. Des régions arides à semi-arides couvrent 75% de la superficie totale. Il faudra noter aussi que la position de la Tunisie entre la méditerranée et le désert fait que son climat offre une variabilité spéciale.
À côté de la pénurie d'eau, la Tunisie est affrontée à une qualité d'eau allant de moyenne à médiocre et la salinité est souvent haute. Cette salinité varie d'année en année selon beaucoup de facteurs, principalement les précipitations. En 2025, la population de la Tunisie atteindra 13.5 Millions, conduisant à l'augmentation de l'épuisement de ressources naturelles (eau, sol, et forêt). Ceci influencerait la production agricole à long terme. (MARAH et GTZ, 2007)

L'agriculture en Tunisie est principalement extensive malgré les efforts entrepris pour son intensification. 80% des terres agricoles sont non irriguées. L'agriculture non irriguée est très vulnérable en Tunisie. En fait, le cycle climatique naturel est marqué par la variabilité, la saisonnalité prononcée. Il est aussi caractérisé par la survenue de phénomènes extrêmes, avec des probabilités d'apparition variables, qui peuvent souvent atteindre une magnitude

catastrophique. De plus, les céréales et l'arboriculture fruitière qui forment les principaux types de production agricole en Tunisie sont deux secteurs essentiellement non irrigués.

Tout ceci rend le secteur agricole de la Tunisie particulièrement vulnérable. Cependant, la réponse des écosystèmes et des agro écosystèmes, principaux intrants du secteur agricole, et leurs capacités à s'adapter comptent aussi. Dans ce sens, une analyse récente faite par ALOUI et al. (2005) sur les écosystèmes en Tunisie montre que ceux-ci sont dotés d'une stabilité ainsi que d'une résilience qui leurs permettent de revenir à l'état d'équilibre (MARAH et GTZ, 2007). Simultanément, le potentiel d'adaptation dépend des circonstances économiques, des infrastructures institutionnelles, et des stratégies et politiques adoptés. L'effet du changement climatique sur l'agriculture n'est pas simple à évaluer.

Dans notre travail nous adoptons la thèse suivante : le changement climatique pourrait affecter négativement et fortement l'agriculture tunisienne.

2. Cadre théorique et méthodologie

Beaucoup d'études se sont intéressées à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture. Ces études se sont focalisées sur les pays développés (Smith et Tirpak, 1989, et Mendelsohn et Neumann 1998). Les résultats de ces travaux sont souvent extrapolés pour le reste des pays. Cependant, il n'est pas clair que le changement climatique aurait les mêmes effets sur les systèmes agricoles partout dans le monde. Ces systèmes sont différents dans les pays en voie de développement ; ils peuvent être plus ou moins adaptables et les écosystèmes tropicaux et subtropicaux peuvent répondre différemment au changement climatique.

Quelques travaux, seulement, ont réuni plusieurs pays. Les plus connus ont été élaborés par Rosenzweig et Parry (1992) d'un côté, et Darwin et al. (1995) de l'autre. Pourtant, la plupart de ces analyses ont négligé les pays en voie de développement. En effet, les premiers auteurs ont limité leurs enquêtes aux grains, et les seconds se sont basés sur des écosystèmes représentatifs.

Généralement, on a supposé que les pays en voie de développement sont plus vulnérables au changement climatique que les pays développés à cause de la prédominance de l'agriculture à faible capital et des activités économiques affectées par le climat et de leurs climats de base relativement chauds (Dinar et Mendelsohn, 1999).

Cependant, la vulnérabilité est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa capacité d'adaptation (IPCC ; 2001). De plus, la vulnérabilité dans ces pays devrait, au contraire, nous inciter à élaborer des études complètes de l'impact du changement climatique puisque c'est là où on a le plus besoin d'agir en urgence. Ainsi, la recherche empirique dans les pays en voie de développement mérite d'être plus poussée.

2.2. Cadre méthodologique

Deux approches à considération économiques ont été souvent employées dans la littérature afin de mesurer les impacts du changement climatique sur l'agriculture: l'approche agro économique et l'approche Ricardienne.

La première modélise de façon spécifique une culture ou une exploitation agricole. Elle représente la réponse agronomique des cultures spécifiques et des variétés de cultures ainsi que le déroulement des opérations dans l'exploitation agricole, des choix de cultures et de la manière avec laquelle ces décisions affectent les coûts et les revenus des agriculteurs. Cette modélisation est faite sur la base de spécifications théoriques et d'expériences soigneusement tenues. Les cultures sont développées dans des arrangements de champs ou des laboratoires qui simulent différents climats et différents niveaux de CO_2. Les études qui ont employé cette approche incluent celles d'Adams et al. (1990), Kane et al. (1991), Kaiser et al. (1993), Reilly et al. (1994), Rosenzweig et Iglesias (1994) et Rosenzweig et Parry (1994).

Ces simulations offrent une représentation idéalisée de l'opération culturale et de l'exploitation agricole qui tend à donner des résultats forts différents des conditions du monde réel (Reilly et al., 1997). De plus, avec cette approche il serait plutôt difficile de modéliser le niveau d'adaptation de l'exploitant. En effet, d'innombrables possibilités d'adaptations sont disponibles pour l'agriculteur—changement des périodes de plantation ; des variétés de culture ; des dates de récoltes ; et des méthodes de laboure et d'irrigation—les inclure tous serait pratiquement non faisable (Dinar et Mendelsohn, 1999).

La seconde a été développée par Mendelsohn et al. en 1994. Elle consiste à examiner l'influence du climat sur le revenu net ou la valeur de la terre. Il s'agit de régresser la performance de l'exploitation agricole — représentée par la valeur de la terre ou le revenu net— sur un ensemble de facteurs environnementaux, d'inputs traditionnels (terre et travail) et de systèmes de soutien (infrastructure). Ceci permettrait de mesurer la contribution de chaque

facteur aux résultats et de détecter les effets du changement climatique à long terme sur la valeur agricole de la terre.

Contrairement à l'approche agro économique, l'approche ricardienne prend en compte implicitement les adaptations de l'exploitant. En fait, les bénéfices et les coûts d'adaptation sont incorporés automatiquement par la valeur agricole de la terre ou le revenu net.

2.3. Choix de la méthodologie de travail

Les chercheurs employant chacune des méthodes existantes conviennent généralement que le niveau auquel arrivent les agriculteurs à s'adapter aux nouvelles conditions peut être très important. Les modèles agro économiques doivent explicitement modéliser l'adaptation. L'analyste doit pouvoir déterminer quelles adaptations sont économiquement souhaitables à travers les expériences établies dans les laboratoires. Dans la pratique, il est difficile de faire de telles déterminations, et ainsi elles sont en grande partie faites de manière ad hoc.

L'adaptation implique un changement des pratiques agricoles en réponse à un changement des conditions climatiques. Elle inclut des changements des procédures de gestion, telles que la synchronisation de l'ensemencement et la moisson, l'intensification des intrants, et le changement des variétés de cultures (Rosenzweig et Parry, 1994). Naturellement, l'adaptation suppose que les agriculteurs ont accès aux pratiques et aux technologies alternatives qui sont déjà pratiquées ailleurs.

Dans ce contexte, la technique Ricardienne, en s'appuyant sur les variations en coupe instantanée de la valeur capitalisée du climat dans la terre, permet d'étudier les conséquences du changement climatique sur l'agriculture tout en intégrant les mesures d'adaptation. Ceci, tout en utilisant les données existant ; éliminant par la suite le recours à de très coûteuses méthodes qui nécessitent l'exploration des sites agricoles ou la collection de données de panel sur une longue période.

Ceci étant, nous utiliserons la méthode Ricardienne dans ce travail afin de répondre à notre objectif général d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne.

2.4. Présentation de la démarche

Ce travail de thèse s'articule en cinq chapitres. Dans le premier chapitre nous adopterons une perspective analytique afin d'examiner, de façon plus détaillé que dans cette

introduction, les concepts de base du phénomène climatique, ses enjeux et les controverses qui s'y rapportent.

Le second chapitre s'inscrit dans le cadre de recherche d'une méthodologie fiable qui répond à la problématique de notre travail, qui est l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne. L'objectif du troisième chapitre est de faire le point sur la vulnérabilité du secteur de l'Agriculture de la Tunisie au changement climatique à travers un diagnostic de l'état actuel du secteur et des systèmes à la croisée du climat et de l'agriculture. Le chapitre quatre sera consacré à la spécification du modèle et de ses entrées. Finalement, l'objectif du chapitre cinq sera de montrer comment nous allons exploiter les caractéristiques disponibles de l'agriculture tunisienne afin de pouvoir adapter le modèle ricardien pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture en Tunisie.

Chapitre 1. Cadre conceptuel du problème de changement climatique

Introduction

La menace du changement climatique est le centre d'inquiétude de la communauté internationale. Afin de comprendre cet intérêt international, il faudrait connaître la signification du terme « changement climatique ». Le sens du terme « changement climatique » est assez simple à comprendre et ne suscite plus de controverses. Cependant, ses causes, sa magnitude ainsi que les impacts de ces changements sur le bien-être humain et l'environnement sont très discutés. Dans ce chapitre nous proposons une revue de la théorie du changement climatique.

1.1. Contexte du changement climatique : spécification du phénomène et de ses origines

Les recherches climatiques datent du 20ième siècle. Au départ, ces recherches consistaient essentiellement en la détermination de statistiques de différents paramètres climatiques tel que les précipitations, la température, la vitesse des vents, etc.

Depuis, les recherches météorologiques ont progressé et les climatologues ont commencé a examiné les processus physiques et chimiques caractérisant le système climatique. C'est à partir de là qu'on a commencé à constater l'existence de perturbations climatiques considérables provenant de l'océan pacifique équatorial.
Afin de déterminer les causes de ces perturbations, les climatologues sont partis de la structure même du système climatique. La température moyenne à la surface de la terre est maintenue à un niveau égale à 15°C grâce à un équilibre énergétique entre les différentes sources d'énergie ; la terre, l'atmosphère et le soleil. Entre en jeu la composition chimique de l'atmosphère, la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le

protoxyde d'azote (N_2O), notamment, qui laissent passer la lumière du soleil qui réchauffe la surface du globe et absorbent une partie de cette chaleur. En l'absence de ces gaz, la plus grande partie de la chaleur pénétrant dans l'atmosphère terrestre serait directement réémise dans l'espace, et la température moyenne de la Terre serait de -18°C. On a désigné ce phénomène naturel par « effet de serre », l'atmosphère jouant le rôle des vitres d'une serre. Si on augmentait l'épaisseur de ces vitres, la serre se réchaufferait. Cette constatation a permis aux climatologues de conclure une relation de causalité entre l'accroissement des gaz à effet de serre d'origine anthropique dans l'atmosphère et les perturbations climatique. D'où la qualification des gaz supposés contribuer aux perturbations climatiques, de gaz à effet de serre.

La confrontation des observations de l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère et celle des paramètres climatiques a permis aux climatologues d'expliquer ce rapprochement. Dans ce qui suit nous explicitons de manière synthétique cette méthode.

1.1.1. Evolution de la teneur en gaz

L'exploration de la concentration des gaz depuis le palier de l'époque préindustrielle montre que celle-ci s'est accrue dans le réservoir atmosphérique. Les gaz à effet de serre, le CO_2 et le CH_4 notamment, ont contribué en grande partie à cette augmentation.

- La teneur en CO_2 est passée de 270ppm[1] à 370ppm. Le taux annuel de croissance est de l'ordre 0.4% ; durant la décennie quatre-vingt-dix ce taux a varié de 0.2% à 0.8%. Une grande partie de ces fluctuations est d'origine anthropique, on estime que les trois-quarts sont dus à la combustion des carburants fossiles, et que le reste est dû à la déforestation.
- La concentration du CH_4 a presque doublé depuis 1750. Sa progression annuelle a fluctué durant la décennie quatre-vingt et a ralentie durant la décennie de quatre-vingt-dix. Plus de la moitié des émissions de ce gaz sont dues à des phénomènes anthropiques tels que ; l'agriculture, l'exploitation du gaz naturel ou les décharges contrôlées.
- Les autres gaz à effet de serre continuent aussi à augmenter dans l'atmosphère de façon irréversible mais à des quantités plus faibles.

[1] ppm (parties par millions), ppb (parties par milliards), ppt (parties par trillion), est le ratio du nombre de molécules de gaz à effet de serre sur le nombre total de molécules d'air sec. Par exemple 300ppm signifie 300molécules de GES par million de molécules d'air sec.

Le tableau suivant résume l'évolution des différents gaz à effet de serre depuis l'époque préindustrielle.

Tableau 1.1 évolution des différents gaz à effet de serre

	CO_2	CH_4	N_20	CFC-11	HFC-23	CF_4
Concentration préindustrielle (1750)	280 ppm	700 ppb	270 ppb	0	0	40 ppt
Concentration en 1998	365 ppm	1745 ppb	314 ppb	268 ppt	14 ppt	80 ppt
Changement du taux de concentration	1,5ppm/an	7 ppb/an	0,8ppb/an	1,4ppt/an	0,55 ppt/an	1 ppt/an
Temps de séjour atmosphérique		12 ans	114 ans	45 ans	260 ans	>50 000 ans

{Les données représentées dans le tableau sont construites à partir des données fournies dans le troisième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ; Groupe de travaille I, « changement climatique 2001 : les bases scientifiques physiques ». IPCC [PDF] http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_third_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm}

Ce tableau montre que l'accroissement des gaz à effet de serre dans l'atmosphère s'est accentué avec l'évolution des activités humaines. Or, les activités humaines conduisent au rejet dans l'atmosphère de gaz qui, soit existaient naturellement (CO_2, CH_4, N_2O), soit n'existaient pas comme les composés chlorés et certains hydrocarbures. Ces observations ont permis aux experts de constater que l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est due en particulier aux activités humaines.

1.1.2. Evolution potentielle du climat

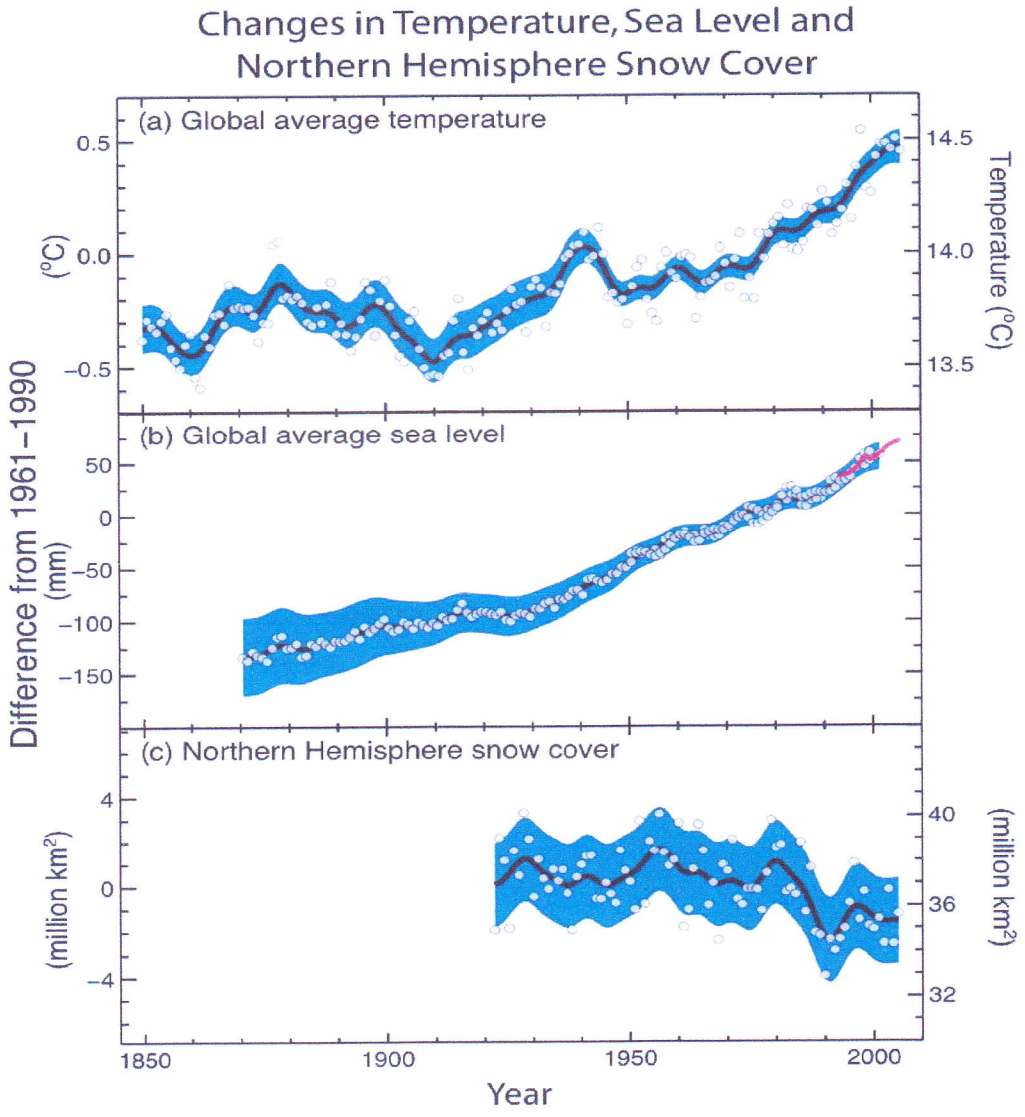
Les données sur les différents paramètres climatiques (quatrième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; « changement climatique 2007 : les bases scientifiques physiques ») font apparaître une tendance à la modification du climat.

Ainsi, en observant la figure 1.1. on constate une augmentation de la température moyenne comprise entre 0.3 et 0.6°C depuis 1860. Les accroissements les plus significatifs ont été enregistrées durant le 20ième siècle ; les années 90 ont été les plus chaudes, 1998 surtout. La couverture neigeuse a été réduite de 10% depuis 1960. Parallèlement à ce réchauffement, on a assiste à une augmentation du niveau de la mer. On estime que la moyenne globale du niveau de la mer a augmenté de 0.1 à 0.2m durant le 20ième siècle. Ce

phénomène est attribué en grande partie à l'augmentation de température du globe. En effet, d'une part, le réchauffement contribue à l'expansion du volume des océans résultant de variations de densité de l'eau de mer causées par des variations de température et de salinité. D'autre part, le réchauffement cause la déglaciation, ce qui décharge l'eau dans l'océan.

On a également assisté à d'autres modifications climatiques tel que l'accroissement des précipitations de 0.5 à 1% par décennie durant le 20ième siècle dans les continents de l'hémisphère nord, l'Est de l'Amérique du Nord et du Sud, le Nord de l'Europe et le centre de l'Asie, et la diminution du niveau des précipitations dans le Sahel, les zones méditerranéennes, l'Afrique Australe et l'Asie du Sud. On a également observé une hausse des fréquences et de l'intensité des évènements extrêmes (des sécheresses et des canicules).

Figure 1.1. Évolution de la température, du niveau de la mer et de la couverture neigeuse de l'hémisphère du nord.



Source : Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; Groupe de travail I, 2007, « changement climatique 2007 : les bases scientifiques physiques ». IPCC [PDF]. 29 Janvier 2007.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm
Les Changement observés de (a) la moyenne globale de température; (b) la moyenne globale du niveau de la mer (les données modélisées sont en bleu et ceux observées sont en rouge) (c) la couverture neigeuse de l'hémisphère du nord des mois de Mars- Avril. Tous les changements sont relatifs aux moyennes de la période de base 1961-1990. Les courbes homogènes représentent les moyennes des valeurs chaque décennie alors que les cercles montrent des valeurs annuelles. Les surfaces ombrées sont les intervalles de l'incertitude estimés d'une analyse complète d'incertitudes connues (a et b) et de la série du temps (c).

1.1.3. Interprétation du rapport entre l'accroissement des GES d'origine anthropique et le changement climatique

La plupart des gaz à effet de serre sont identifiés. Leur rôle dans la régulation du climat ne suscite pas de controverses. Cependant, le rapport entre climat et accroissement de la concentration de ces gaz est complexe et a suscité beaucoup de controverses pendant longtemps. La confrontation des observations de l'évolution de la teneur en gaz d'un côté et celle du climat d'un autre côté (voir les deux paragraphes précédents) tendent à confirmer non seulement une relation de causalité entre l'accroissement des gaz à effet de serre et le changement climatique mais aussi que à l'origine de l'augmentation de ces gaz sont les activités humaines. Aujourd'hui, les spécialistes authentifient l'accroissement des gaz à effet de serre d'origine anthropique comme principale source du changement climatique en plus de la variabilité naturelle. Ils estiment que le CO_2, par sa contribution de 65% à l'augmentation totale de l'effet de serre, est connu pour principal responsable de la hausse de température. L'effet du CH_4 n'est pas négligeable non plus, son accroissement contribue à hauteur de 26% à l'augmentation totale de l'effet de serre. Avec un effet plus important, La vapeur d'eau, est responsable d'un effet de serre permettant d'accroître la température de notre milieu ambiant de plus de 30%. Pour établir des estimations plus détaillées de l'ensemble des réponses possibles du système climatique aux accroissements des gaz à effet de serre, les climatologues effectuent des simulations numériques des effets combinés ou indépendants de forçage naturel ou/et anthropique en utilisant des simulateurs météorologiques du climat « modèles climatiques ».

1.1.3.a. Les modèles climatiques : l'accroissement des gaz à effet de serre est à l'origine du changement climatique

Les modèles climatiques forment des outils importants permettant d'interpréter les observations ainsi que les interactions entre les composantes climatiques, et d'estimer les évolutions à venir. Ce sont des modèles numériques qui intègrent une suite d'interprétations physiques des composantes climatiques ainsi que leurs différentes interactions essentielles pour reconstruire les grandes tendances climatiques semblables aux observations réelles. Ces modèles spécifient la luminosité solaire, la composition atmosphérique et d'autres agents du

forçage radiatif[2]. Ils permettent de simuler l'ensemble des réponses possibles de l'atmosphère, l'océan, la surface terrestre et la glace marine aux différentes variabilités internes, naturelles et anthropiques. Les inputs de ces modèles comprennent à la fois des variables naturelles (telle que : les changements dans le rayonnement solaire) et des variables anthropiques (telle que : les émissions de gaz à effet de serre).

L'influence des accroissements de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est mesurée par le concept de forçage radiatif. Ainsi, l'augmentation des GES dans l'atmosphère produit un forçage radiatif positif dû à l'accroissement de l'absorption et de l'émission de radiation infrarouge. Cet effet est appelé intensification de l'effet de serre. Ce phénomène conduirait, en absence de toute autre interférence à l'augmentation de la température.
La contribution de ces gaz à l'augmentation de la température ne se fait pas avec la même intensité. Elle dépend de l'augmentation de leurs concentrations dans le réservoir atmosphérique, des propriétés relatives de leurs molécules, de leurs capacités (ou forçage radiatif) à absorber le rayonnement infrarouge ainsi que de leur temps passé dans l'atmosphère après émission. Dans un travail de Nordhaus (1991), une étude sur la contribution des GES au réchauffement globale est réalisée. Il s'agit du potentiel de réchauffement instantanée (c'est à dire l'impact relatif sur le réchauffement par unité de concentration) et total, des principaux GES vers le milieu de 1980. Le résultat montre la dominance de l'impact du CO_2 dans le réchauffement globale par rapport aux autres GES.

De plus, le système climatique est complexe et à l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre se superpose d'autres phénomènes : les rétroactions, provoquées notamment par la vapeur d'eau, la fonte de la calotte glacière et le comportement des nuages. En effet, si le forçage radiatif correspondant à un éventuel doublement de la concentration de CO_2 était de $4Wm^{-2}$, la température augmenterait de 1.2°C (avec une marge de confiance de ±10%), en l'absence de tout autre changement. Elle augmenterait de 1.6 en présence des rétroactions dues à la vapeur d'eau. De plus, l'augmentation de la température provoquerait la modification de la couverture neigeuse des continents ou des mers ce qui entraînerait une altération de surface, et devenue plus sombre la terre absorberait davantage de la chaleur ce

[2] Le forçage radiatif peut être défini comme la perturbation imposée à l'équilibre entre les différentes ressources d'énergie. Ainsi une augmentation dans la luminosité du soleil est décrite comme un forçage radiatif positif qui tend à réchauffer la terre. Cette mesure est exprimée en Watts par mètre carré (Wm^{-2}). Les forçages radiatifs peuvent survenir à cause des changements du sol et de la variation dans les productions solaires.

qui augmenterait l'effet de serre. Si ces rétroactions s'ajoutent à celles de la vapeur d'eau la température augmenterait de 2.5°C. On estime que l'effet total de ces phénomènes amplifie la température de 1.5 à 4.5°C.

On montre ainsi que l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère tend à réchauffer la surface du globe. Ce réchauffement causerait des changements climatiques pour l'ensemble des paramètres du climat car il déclenche une modification des circulations atmosphériques et des autres sous-systèmes du système climatique.

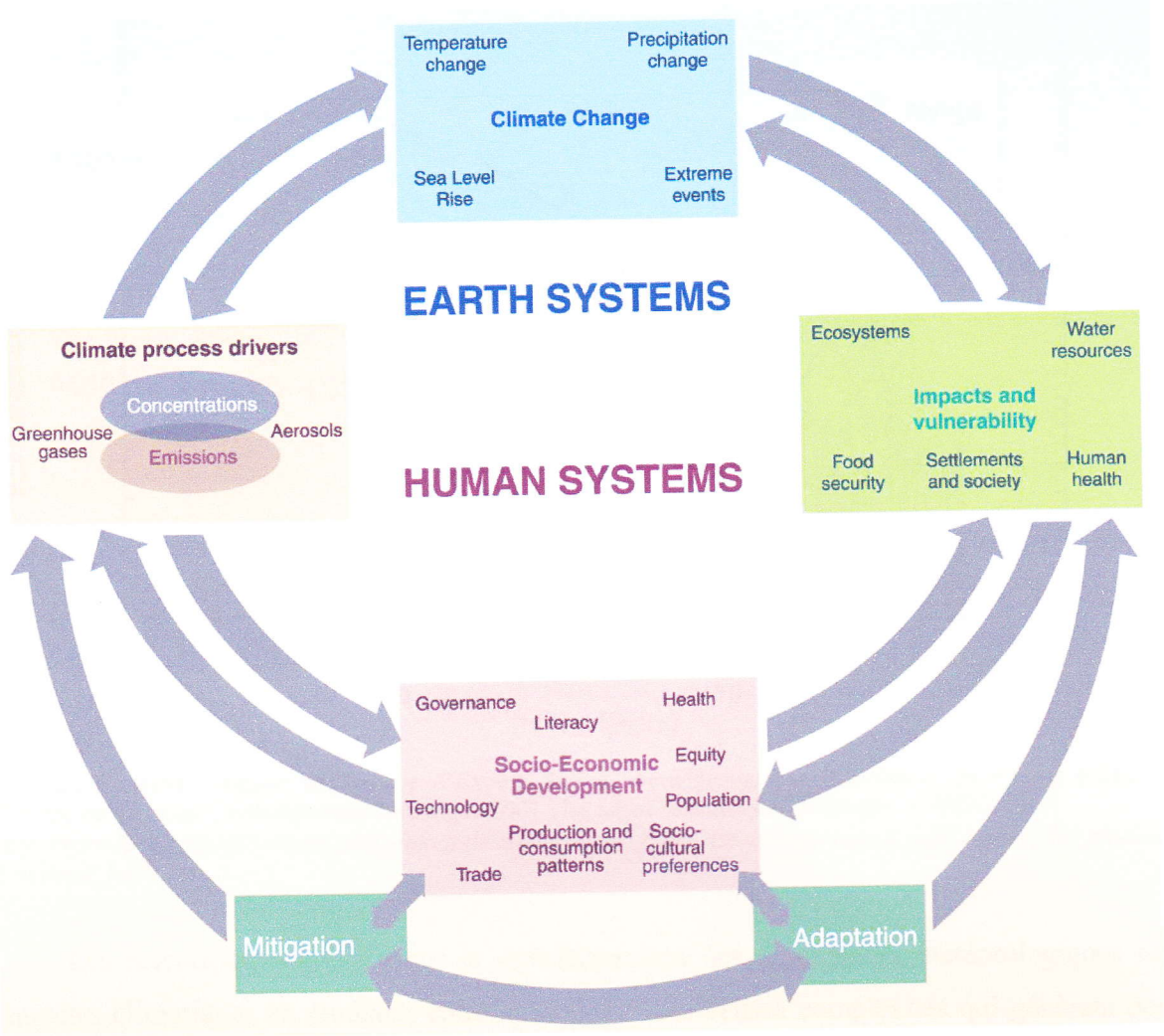
1.1.3.b. Les controverses sur les modèles climatiques

Les résultats des modèles climatiques sont discutés. Comme la plupart des modèles numériques les simulations des modèles climatiques sont considérées comme non robustes même par ceux qui les ont créés. D'une part, elles dépendent du niveau de compréhension des phénomènes et processus physiques, géophysiques, chimiques et biologiques responsables de la variabilité naturelle du système climatique, ainsi que des changements futurs brutaux tel que la variabilité de l'activité solaire ou les éruptions volcaniques intenses. Cependant, ces aspects sont très complexes, incertains, instables et présentent une très grande difficulté dans leur modélisation. Élucider ces incertitudes nécessiterait de bien connaître les phénomènes présents à l'intérieur du réservoir atmosphérique ainsi que les différentes composantes du système climatique. Néanmoins, les experts reconnaissent que les modèles climatiques omettent certaines composantes telles que les effets des nuages ainsi que leurs interactions avec les radiations et les aérosols[3], l'exclusion de certains effets régulateurs de l'équilibre des bilans globaux ou les difficultés d'estimation des capacités d'absorption des océans.

D'autre part, ils sont limités par l'étendue de leurs calculs ainsi que la difficulté d'interprétation de leurs résultats. Les simulations correspondent à une présentation de la circulation fondamentale à l'échelle planétaire, de la variabilité saisonnière et des structures de température avec une validité qualitative, mais certaines contradictions demeurent encore.

[3] Les aérosols sont des particules solides et liquides dont le diamètre est compris entre le millimètre et la dizaine de micromètre. Les activités industrielles et l'utilisation des sols– principalement, brûlage de biomasse et utilisation des combustibles fossiles, augmentent la concentration des aérosols dans l'atmosphère.

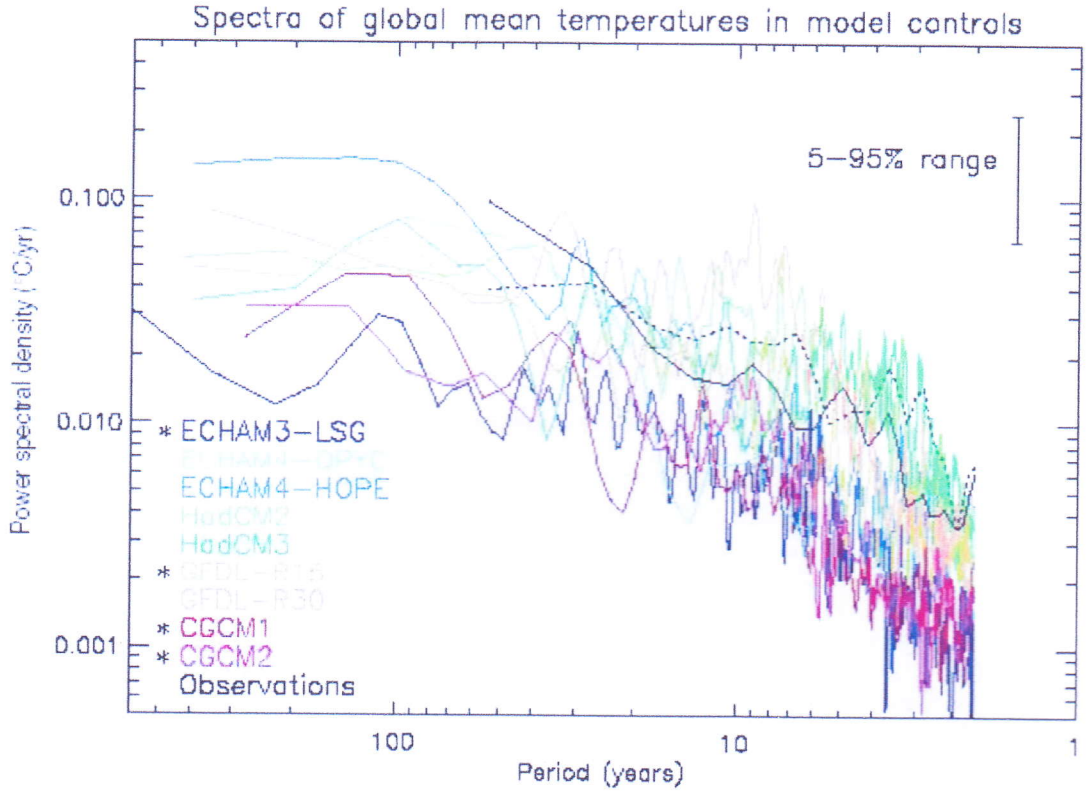
Figure 1.2. Complexité des interactions entre les composantes des systèmes climatique et terrestre



Source : Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; Groupe de travail I, 2007, « changement climatique 2007 : les bases scientifiques physiques ». IPCC [PDF]. 29 Janvier 2007.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm

Bien que les modèles nécessitent encore des ajustements, ils permettent un équilibre stable entre les différentes composantes sur des temps très long (de l'ordre du millénaire) avec libre échange de chaleur et d'eau. Ils exposent les aspects dominants de la variabilité intrinsèque de manière comparable aux observations réelles (figure 1.3). Ils montrent que les réponses de la température globale moyenne aux forçages correspondent approximativement aux mesures enregistrées tout le long du siècle dernier.

Figure 1.3. Spectre de température moyenne de modèles et des observations



Source : Troisième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ; Groupe de travaille I, « changement climatique 2001 : les bases scientifiques physiques ». IPCC [PDF] *http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_third_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm*

Les scientifiques poursuivent le développement des simulateurs météorologiques ou modèles climatiques en étudiant, entre autres, les nombreuses complexités qui génèrent des incertitudes inévitables. Les modèles actuels incluent de plus en plus de paramètres et permettent d'élaborer des simulations de plus en plus fiables. Les plus récents sont les modèles de circulation générale Atmosphère Océan (MCGAO, ou MCG), appelés également modèles couplés. La confiance en ces modèles est de plus en plus forte.

1.2. Prise en charge du problème du changement climatique par la communauté internationale

1.2.1. Organisation de la réaction internationale : naissance de la Convention Climat

A la fin des années 1970 et durant les années 1980, une série de conférences scientifiques intergouvernementales mettant l'accent sur les éventuels risques de perturbation de l'atmosphère et des mécanismes climatiques, se sont succédé.

Encadrée 1.1. Chronologie des conférences qui ont jalonné la prise de conscience du changement climatique.

* 1979. **Première conférence mondiale sur le climat à Genève.**
Octobre 1985. **Conférence mondiale sur le climat de Villach** (Autriche). Elle aboutit au consensus suivant : le résultat de l'accroissement des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère pourrait avoir comme effet une augmentation de la température moyenne « *supérieure à toute température connu dans toute l'histoire humaine* » dans la première moitié du siècle prochain. Les experts affirmèrent aussi que « (...) *la compréhension de la question de l'effet de serre est suffisamment développée que les scientifiques et les décideurs politiques devraient commencer à la collaboration active d'explorer l'efficacité des politiques et des ajustements* ».
* 22 mars 1985. **Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone.** Placé sous l'égide de l'Organisation des Nations Unies ONU à Vienne. Les Etats parties s'engagent à protéger la couche d'ozone et à coopérer scientifiquement afin d'améliorer la compréhension des processus atmosphériques. Cette convention ne contient aucun dispositif contraignant, mais prévoit que des protocoles spécifiques pourront lui être annexés.
* 10 Mars 1987. **La Commission mondiale sur l'environnement et le développement**, publie le **Rapport Brundtland** ayant pour titre ***Notre Avenir à Tous***. Ce rapport définit la politique nécessaire pour parvenir à un « *développement durable* ». Le rapport définit le concept ainsi : « *Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* ».
* 16 septembre 1987. **Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone.** Les Etats parties prennent la décision d'interdire la production et l'utilisation des CFC (chlorofluorocarbones, *Ce sont des gaz industriels stables contenant du chlore, du fluor et/ou du brome sous les noms commerciaux de fréons et halons. Ils ont été utilisés pour la première fois en 1928 comme liquide réfrigérant.)* Responsables de l'amincissement de la couche d'ozone d'ici à l'an 2000.
* 1988. **Conférence de Toronto**

Ces conférences ont contribué à sensibiliser la communauté internationale à la question. Les participants se composaient de responsables gouvernementaux, de scientifiques et de

spécialistes de l'environnement. Parmi ces réunions, nous pouvons retenir comme repères : la conférence mondiale sur le climat tenue à Genève en 1979 et celle tenue à Toronto en Juin 1988.

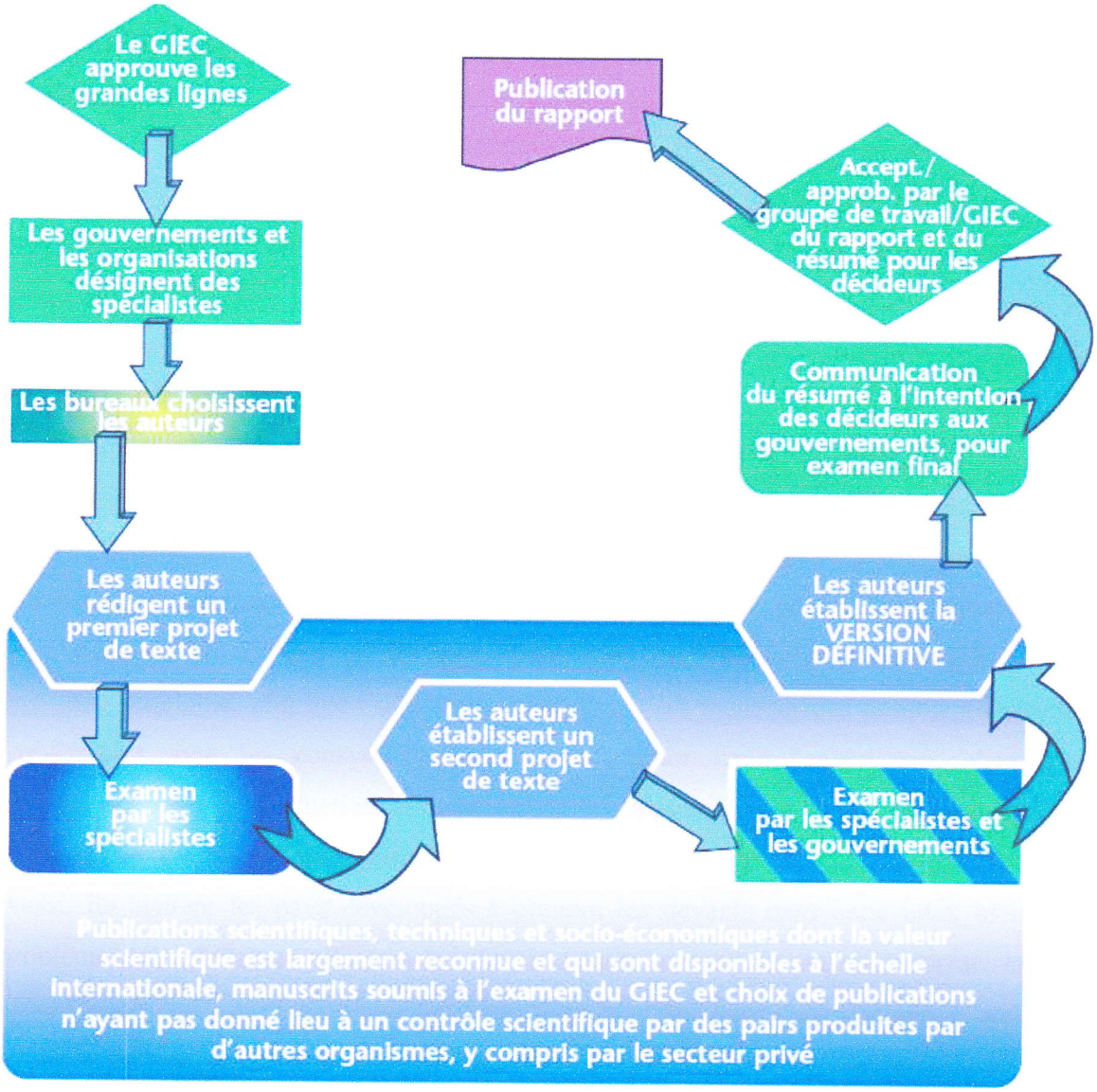
La première constitue la première trace d'inquiétude de la communauté scientifique. Elle a reconnu que le changement climatique est « *un problème sérieux* », et a abouti à un lancement d'un Programme de recherche Climatologique Mondial (PCM), confié à l'Organisation météorologique mondiale (OMM), au Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et au Conseil international des unions scientifiques (CIUS).

La deuxième s'est tenue sous le titre « *l'atmosphère en évolution : implications pour la sécurité du globe* ». Au cours de cette conférence, les scientifiques ont mis l'accent sur les effets averses d'une dégradation de l'atmosphère et plus précisément sous l'angle des enjeux de sécurité globale. En conclusion, ils affirmèrent que « *l'humanité mène non intentionnellement une expérience mondiale incontrôlée dont les conséquences ultimes sont de l'ordre de grandeur d'une guerre nucléaire* ». Finalement, ils recommandent de réduire pour 2015 les émissions de CO2 de 20%, par rapport à leur niveau de 1988.

C'est aussi en 1988 que l'une des principales actions marquant la reconnaissance de la communauté internationale du dossier climat a été entreprise. Les pays membres de l'OMM et du PNUE décidèrent de mettre en place un mécanisme intergouvernemental pour étudier le changement climatique en tant que phénomène sociopolitique, et non plus seulement en tant que phénomène climatique. Ainsi, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, ou IPCC en anglais) fut créé conjointement par les deux institutions onusiennes le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE, ou UNEP en anglais) et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, ou WMO en anglais), en Novembre 1988, avec pour mission de dresser un état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques pertinents pour la compréhension des changements climatiques induits par l'homme, et d'étudier les impacts potentiels des changements climatiques et les différentes options d'atténuation et d'adaptation du problème. Le GIEC fut divisé en trois groupes de travail consacrés pour le premier à l'étude du climat, pour le second à l'adaptation des écosystèmes et des économies au changement climatique, et pour le troisième à l'évaluation économique des politiques de prévention de ce changement. Il produit régulièrement des rapports et des publications. La préparation de tous les rapports et publications du GIEC suit une procédure stricte et rigoureuse convenu par le groupe. En effet, chaque rapport n'est publié qu'après être examiné trois fois. Avant tout, la plupart des recherches considérées dans les rapports ont été publiées dans les revues à comité de lecture.

Les auteurs sélectionnés par le GIEC établissent des projets de chapitres. Ensuite, chaque projet de chapitre est largement revu par un groupe de milliers de scientifiques et techniciens internationaux spécialistes du domaine, ainsi que par les organisations non gouvernementales et internationales et par la suite par les gouvernements. Les auteurs tiennent compte des observations des gouvernements et des spécialistes afin de développer la version finale du rapport qui contient le texte intégral des évaluations scientifiques et socioéconomiques. Celle-ci est finalement présentée à une session du groupe de travail approprié pour une acceptation. Lors de cette session seul le résumé destiné aux décideurs est rediscuté ligne par ligne. Son approbation signifie qu'il est cohérent avec toute l'évaluation scientifique et technique. Quand aux autres chapitres, ne pouvant pas être approuvés ligne par ligne à cause de leurs volumes, ils sont seulement acceptés ce qui signifie que les différents groupes de travail jugent qu'ils sont des comptes rendu complets, objectifs et équilibrés du sujet. Le rapport est finalement publié sous forme de trois volumes. Ce très long processus assurerait que les rapports soient objectifs, transparents, et basés sur la meilleure information disponible dans le monde.

Figure 1.4. Les étapes principales de l'établissement des rapports du GIEC



Source : GIEC (2007), « procédures ». IPCC [PDF]. 29 Janvier 2009.
*www1.ipcc.ch/pdf/ipcc-faq/ipcc-**procedures**-fr.pdf*

Cette reconnaissance fut confirmée au sommet de la terre à Rio en 1992, où cent quatre vingt huit Etats ont adopté la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). L'organe décisionnel suprême de la CCNUCC est sa Conférence des Parties (CP, COP en anglais). Elle est aussi dotée d'un secrétariat, financé par les Nations Unies, dont le siège se trouve à Bonn en Allemagne. La CP est le lieu où les pays ayant ratifié la convention se rencontrent chaque année pour examiner la mise en application de la Convention, prendre des décisions pour les développements futurs de la Convention et négocier de nouveaux engagements substantiels. Le rôle du secrétariat de la CCNUCC est

d'assister la Conférence des Parties et les organes subsidiaires. Il accomplit plusieurs fonctions telles que organiser les sessions de négociation, suivre l'évolution des émissions de CO_2 dans chacun des pays, donner des conseils sur les questions techniques à la demande des Parties, etc.

Même si le cahier des charges de la convention climat n'était pas encore complet à cette date, elle posa l'objectif et les principes de l'action contre les changements climatiques et dressa un ensemble d'engagements à destination des parties à la convention. L'objectif ultime de la convention est « *(...) de stabiliser (...) les concentrations des Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique* » (CCNUCC, 1992, article 2).

Afin d'aboutir à cet objectif, la convention climat inscrit les principes fondamentaux suivants; celui de *précaution*, de *responsabilité commune mais différenciée entre pays industrialisés et pays en développement*, d'*équité*, et celui de *droit au développement durable*. Ces principes assignent aux Parties d'intégrer la lutte contre le changement climatique dans leurs perspectives ultimes de développement, bien que beaucoup d'incertitude entourent encore le problème, afin que l'humanité puisse éviter les menaces des dommages sérieux et irréversibles, que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique et social puisse se poursuivre d'une manière durable.

Aussi, ils incitent les pays développés à prendre les devants dans cette lutte, bien que le problème soit global et affectera le plus les pays en voie de développement. Les pays industrialisés ont contribué le plus aux changements climatiques dans l'histoire et ils ont plus de capacités technologiques, économiques et institutionnelles et de ressources pour y faire face, contrairement aux pays en développement à qui le droit au développement ne doit pas être freiné sous prétexte que ce développement pourrait contribuer à accroître les changements climatiques.Cette différentiation entre pays développés et pays en voie de développement est établie de façon explicite par la Convention, qui place les États en deux annexes. Les pays de l'OCDE (sauf le Mexique) sont listés à l'Annexe II de la Convention. Cette liste complétée par les pays en transition vers une économie de marché, constitue l'Annexe I.

Plusieurs institutions ont participé aux efforts pour formuler une réponse internationale efficace au problème du changement climatique. Ces efforts sont organisés au sein du système des Nations Unies. L'Assemblée Générale, qui a un rôle de coordination et de direction dans le travail des Nations Unies, intervient relativement peu sur la question. De nombreuses autres

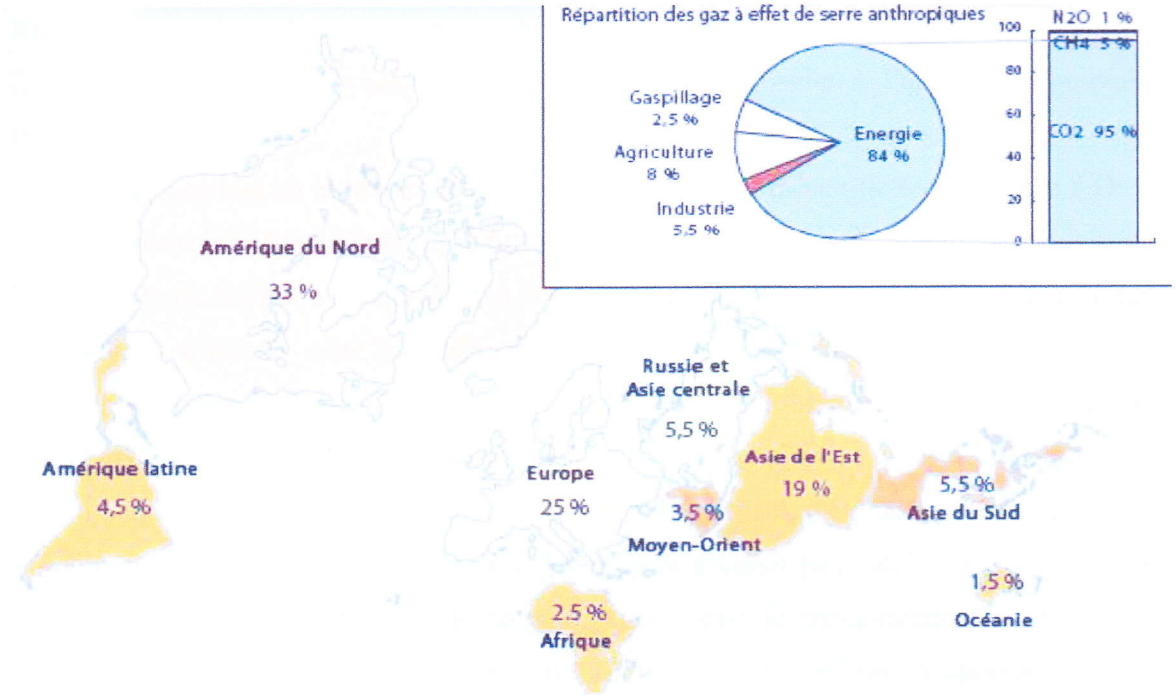
institutions facilitent le processus autour de la Convention Climat et du GIEC. Parmi les organismes gouvernementaux, nous pouvons citer par exemple l'Agence Internationale de l'Energie (International Energy Agency, IEA) ou le Conseil Mondial de l'Energie (World Energy Council, WEC). Les organisations non gouvernementales sont aussi actives et participent à la circulation de l'information.

1.2.2. Évolution du processus de négociations

Le problème fut officiellement reconnu et la communauté internationale posa les bases d'une action internationale coordonnée contre l'effet de serre en créant la Convention Climat. Bien que cette réponse internationale puisse sembler peu tangible, puisqu'elle ne prévoit aucune pénalité contre les pays qui ne réalisent pas l'objectif commun fixé, elle constitue un tournant important dans la prise de conscience internationale des risques associés au changement climatique.

Depuis, le processus de négociations diplomatiques s'est poursuivie, autour de son objectif ultime « la réduction des émissions de gaz à effet de serre » afin de le concrétiser, rythmé par les Conférences des Parties annuelles, d'un côté et les rapports scientifiques du GIEC, de l'autre. C'est en décembre 1997 à Kyoto, lors de la troisième conférence des parties (COP3), qu'on a créé un protocole dit protocole de Kyoto. Celui-ci impose aux pays industrialisés regroupés dans l'annexe B du Protocole (38 pays industrialisés : Etats-Unis, Canada, Japon, pays de l'UE, pays de l'ancien bloc communiste) de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 5,2% en moyenne d'ici 2012, par rapport au niveau de 1990. Reconnaissant leur responsabilité dans l'accumulation des GES dans l'atmosphère en ratifiant la Convention, la plupart de ces pays se sont engagés dans le protocole. Toutefois, un groupe de pays conduits par les Etats-Unis, reconnu pour être l'Etat le plus émetteur de GES (voir figure 1.5), a exigé de créer un marché international de quotas d'émissions échangeables. Un tel marché permettrait à chaque pays industrialisé de satisfaire ses besoins non pas en limitant ses émissions mais en achetant à l'étranger un surplus de droits à émettre.

Figure 1.5. Contribution des régions et des secteurs aux émissions de CO_2 (cumul 1960-2004)



Source : Agence Internationale de l'Energie (Janvier 2008), « Emissions de CO_2 issues de la combustion des énergies fossiles », 2007 ; tiré de Communauté économique de l'Afrique de l'ouest (CEDEAO) et Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE), « Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'ouest : le climat et les changements climatique ». FAO [PDF]. 22 octobre 2009. *www.fao.org/nr/clim/docs/clim_080502_fr.pdf*

La mise en œuvre de ce protocole s'est avérée plus difficile que sa création même. L'allocation de permis d'émission est embrouillée par les diverses inégalités d'émissions passées et courantes, d'accroissement de la population, de capacité technique et de vulnérabilité aux impacts. De plus, en Mars 2001, le président des Etats-Unis annonça qu'il renonçait à soumettre le protocole de Kyoto à la ratification du Sénat. Les objections de celui-ci sur le protocole de Kyoto tournaient autour de la non-participation des pays en développement dans la réduction des émissions ainsi que le niveau d'engagement de réduction pris par l'administration à Kyoto. Par ailleurs, l'objectif de réduction est devenu dérisoire. Le protocole obtenu après une décennie de négociations et dans lequel la communauté internationale a investi des ressources substantielles, risquait d'échouer.

A partir du 16 Février 2005, le protocole de Kyoto a finalement pris effet après avoir été ratifié par 141 pays. Ainsi les pays industrialisés, à l'exception des Etats-Unis et de l'Australie qui comptent pour plus d'un tiers des gaz à effet de serre du monde industrialisé mais qui n'ont pas ratifié le protocole, sont tenus de réduire leurs émissions de CO2 et de cinq autres gaz réchauffant l'atmosphère. Les 107 pays en développement qui ont ratifié le protocole auront de simples obligations d'inventaire d'émissions polluantes. Ainsi, ce fut le premier pas

vers la réduction des émissions de GES, certes modeste à cause de la non participation des Etats-Unis et de l'Australie, mais obtenu après de longues et difficiles négociations. L'Australie a ratifié le protocole le 12 Décembre 2007 suite à l'arrivée au pouvoir des travaillistes.

Aujourd'hui, au moment même de la rédaction de la thèse (28 Septembre au 8 Octobre) se poursuivent les négociations sur le futur accord sur le changement climatique qui remplacera le protocole de Kyoto, à Bangkok. Les négociations semblent bloquées. Elles se heurtent aux divergences d'intérêts entre les différents pays. L'objectif de stabiliser la température fixé à +2°C, signifie pour les pays en voie de développement de réduire de 15 à 30% leurs émissions d'ici à 2020 et, pour les pays développés, de 25 à 40%. Un tel objectif pèserait énormément sur la croissance et le développement des pays en développement, du coup ceux-ci sont insatisfait. D'un autre côté, le Sénat américain a annoncé qu'il n'aurait pas validé l'ACESA (American Clean Energy and Security Act), texte pour lutter contre le changement climatique, d'ici la conférence de Copenhague (Décembre 2009) où le nouvel accord sera prononcé, et ce malgré la volonté de l'administration de Barak Obama de participer aux discussions. Ainsi les Etats-Unis n'accepteraient probablement pas le traité international sur le changement climatique

La convention climat marque le point de départ symbolique d'un éventuel changement dans les préférences et les comportements des agents économiques. Cependant, la progression des négociations n'a pas atteint une avancée majeure malgré les données pessimistes sur l'évolution future du climat et les enjeux qui s'y rapportent (GIEC, 2007).

1.3. Enjeux du changement climatique : les conclusions générales du GIEC

Les rapports d'évaluation du GIEC présentent les découvertes les plus récentes dans le domaine du changement climatique en se basant sur un large éventail d'éminents travaux de recherches en la question. Ils expliquent également les incertitudes inhérentes à ces connaissances et aux estimations.

Le quatrième rapport du GIEC, publié en 2007 étant le dernier, nous nous intéressons dans ce qui suit aux informations qui en émanent sur l'évolution future du climat et les enjeux du changement climatique.

1.3.1. Évolution future du climat

Depuis la prise de conscience du changement du climat, la reconnaissance du problème a évolué avec la progression de la recherche scientifique. La position des experts est passée d'un stade de prudence à un stade de conviction. Ainsi, dans le premier volume du quatrième rapport d'évaluation du Groupe International sur le Changement Climatique (publié en Février 2007), on établit avec un « très haut degré de confiance » que les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique induisent un changement climatique bien réel. Le changement climatique est une réalité d'origine anthropique, essentiellement. De plus, un accord apparait sur ces conclusions : le rapport est accepté par une large assemblée d'experts (un réseau de 2500 scientifique qui ont travaillé durant six ans sur le rapport) et adopté à Paris en Février 2007 par la plupart des gouvernements.

En fait, les études de détection et d'attribution[4] du changement climatique se sont nettement améliorées grâce à la disponibilité ; de mesures de plus en plus fiables sur les variables climatiques couvrant des échelles de temps suffisamment longues, des simulations du changement climatique passé et future causé par les différents types de variabilité et une meilleur reconstitution de la variabilité interne du système climatique.

De plus, la comparaison faite dans le rapport du GIEC (2007) entre les projections estimées dans leur premier rapport en 1990 (augmentation de la température de 0.15 à 0.3°C par décennie) et les valeurs observées durant la période de 1990 à 2005 (augmentation de la température de 0.2°C) a renforcé la confiance en les projections de court terme.

1.3.1.a. Méthodologie d'élaboration des données du climat futur

Afin d'élaborer les projections climatiques, le GIEC s'appuie sur des scénarios de projection et des modèles climatiques, les modèles de circulation générale (MCG) notamment, que nous avons explicités ci-avant. Les modèles permettent de générer les mesures des paramètres climatiques futures en utilisant les scénarios de projections.

[4] Détecter consiste à prouver à partir de variables climatiques observées qu'un changement climatique significativement important, au sens statistique, subsiste. Attribuer est l'opération permettant de déterminer les causes de ce changement.

i) les scénarios de projection

La difficulté de prévoir les émissions futures de gaz à effet de serre (inputs des modèles climatiques) est à l'origine du développement de ces scénarios. En fait comme le souligne le GIEC dès son premier rapport en 1990, ces émissions qui induisent le changement climatique sont non seulement le résultat de systèmes dynamiques très complexes (figure 1.2) ; mais aussi la conjonction de plusieurs forces motrices telles que le développement démographique, le développement socio-économique et l'évolution technologique, qui influencent les émissions de gaz à effet de serre. Pour remédier à cette difficulté, on a recours aux scénarios SRES élaborés par le GIEC et publiés dans le « Special Reports on Emission Scenarios » (2000). Ces scénarios viennent remplacer ceux développés en 1990 et 1992 (IS92) suite à une évaluation faite par le GIEC en 1995 montrant les défaillances de ceux-ci, et suggérant la nécessité d'intégrer les modifications acquises dans la compréhension des forces motrices des émissions. Le GIEC définit les scénarios SRES par « des images alternatives de la façon avec laquelle se déroulera le futur qui sont un outil approprié pour analyser comment les forces motrices peuvent influencer les émissions futures et pour évaluer les incertitudes associées[5] » (IPCC, 2001). Ces scénarios sont basés sur des hypothèses narratives plausibles décrivant les rapports entre les différentes forces, leurs développements et l'échelle de prise de décision. Les hypothèses se décomposent selon quatre lignées A1, A2, B1, et B2 qui explorent l'évolution de la population mondiale, la protection de l'environnement, le développement économique et celui des technologies énergétiques et l'intégration, globalisation de l'économie; le groupe A1 comporte trois scénarios de référence A1F, A1B, A1T qui se décomposent selon le degré d'utilisation des énergies fossiles, le tableau suivant (tableau 1.2.) donne une description de ces six groupes de scénarios. Puisque les hypothèses décrivent des faits imprévisibles et difficilement vérifiables sur une longue période, le GIEC utilise une gamme large et diversifiée de scénarios reflétant des trajectoires différentes afin de tenir compte du degré élevée d'incertitude liées aux forces et aux émissions de GES. En effet, à partir de chaque lignée ont été développés plusieurs scénarios différents (on compte 40 scénarios SRES) en utilisant des modèles représentatifs de la méthode d'évaluation intégrée[6].

---

[5] IPCC 2001, «Special Report on Emissions Scenarios». grida [on line]. Octobre 2009. *www.grida.no/climate/ipcc/emission/*

[6] Nombreuses sont les définitions attribuées à l'évaluation intégrée, nous citons notamment celle retenue par le GIEC « l'évaluation est intégrée quand elle attire un ensemble large de domaines de connaissances qui sont représentés dans le résultat de recherches d'une seule discipline. Elle se distingue de la recherche disciplinaire pare son but d'éclairer les politiques et la prise de décision plutôt que de faire progresser les connaissances (…) »

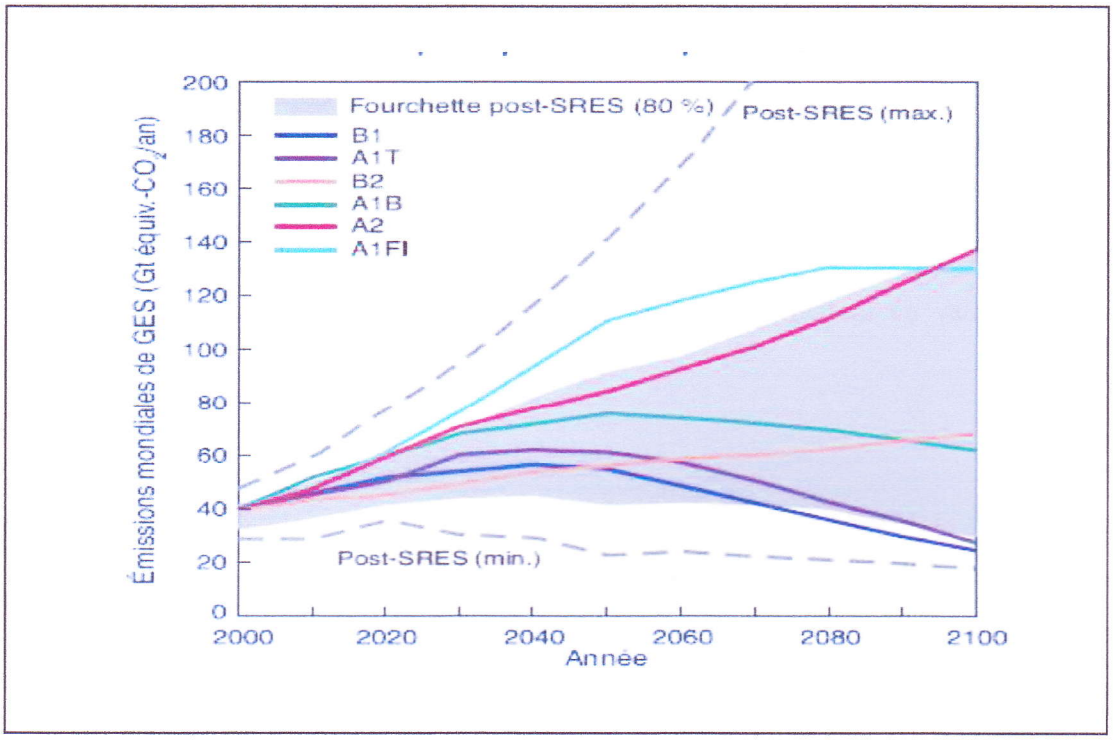
Chaque scénario résultant représente une interprétation quantitative spécifique de l'une des quatre lignées.

Tableau 1.2. Les scénarios de projections SRES.

Forces / **Scénarios**		Technologies Energétiques	Population Mondiale	Environnement	Situation Economique
A1		*Intégration rapide de nouvelles technologies plus efficace*	*Atteint son maximum au milieu du siècle et diminue ensuite*	*Solutions essentiellement technologiques pour protéger l'environnement*	*Croissance très rapide Réduction des différences régionale au niveau du revenu*
	A1T	*Exploitation des sources d'énergies non fossiles*			
	A1B	*Exploitation équilibrée des ressources*			
	A1F1	*Forte exploitation des sources d'énergies fossiles*			
A2 (scénario hétérogène)		*Progrès technologique hétérogène et lent*	*Augmentation constant*	*Divergence dans les solutions*	*Croissance par habitant fragmenté et lent. Développement à orientation régionale*
B1 (scénario convergent)		*Développement rapides des technologies propres fondées sur l'utilisation efficace des ressources*	*Atteint son maximum au milieu du siècle et diminue ensuite*	*Solutions mondiale*	*Croissance très rapide Economie orienté à la valorisation des services et de l'information*
B2 (Scénario local)		*Développement lent, et différenciés selon les régions*	*Augmentation régulière*	*Solutions régionales*	*Niveau intermédiaire de croissance économique, orienté vers les solutions locales*

Le GIEC utilise les scénarios SRES pour déterminer les niveaux d'émissions de GES qui paramètrent les modèles de cycle de carbone. La figure suivante présente des trajectoires estimées par le GIEC des émissions de GES selon les six scénarios de référence. Ceux-ci les convertissent en niveau de concentration de CO_2. Ces concentrations seront utilisées par la suite par les modèles climatiques afin de donner l'évolution des caractéristiques climatiques.

Figure 1.6. Trajectoires des émissions de GES selon les scénarios SRES.



Émissions mondiales de GES en l'absence de politiques climatiques additionnelles : six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes colorées) et intervalle au 80e percentile des scénarios publiés après le SRES (post-SRES, partie ombrée). Les courbes en pointillé délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. Les GES sont le CO_2, le CH_4, le N_2O et les gaz fluorés.
Source : Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; Groupe de travail I, 2007, « changement climatique 2007 : Rapport de synthèse ». IPCC [PDF]. 29 Janvier 2008. *www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf*

ii) les modèles climatiques

Les modèles de circulation générale (MCG) permettent de générer les mesures des paramètres climatiques futures à un niveau global. Cependant, puisque les impacts du climat se font généralement sentir à une échelle locale, les mesures des paramètres climatiques futures devraient être disponibles à un niveau régional. Le climat régional est définit comme étant un processus aléatoire contraint, à la fois, aux circulations aux échelles global et local tant au niveau atmosphérique qu'océanique et aux conditions spécifiques aux régions

Le problème est que les modèles climatiques ont une faible échelle de résolution de l'ordre de 200 à 300km. Les simulations de climat devraient se faire avec une échelle de résolution élevée afin de mener des études du changement climatique à un niveau régional. Celle-ci est définie comme étant comprise entre 20 à 50 km en général.

Plusieurs approches sont utilisées pour régionaliser les simulations climatiques comme la réduction d'échelle dynamique (permettant d'obtenir, par exemple, des modèles des climats régionaux – MCR), qui consiste à utiliser des modèles physico-dynamiques pour résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique à une échelle régionale, et la

méthode de réduction d'échelle statistique qui établit sur la base des observations une relation statistique entre les variables d'échelle fines et celles de grande échelle (prédicteurs).

Dans les travaux du GIEC, les projections régionales du changement climatique présentées sont évaluées en se fondant sur les informations disponibles concernant l'historique du changement climatique récent, la compréhension des processus gouvernant les réponses régionales et les données disponibles à partir des simulations des MCGAO et la désagrégation de ces données par l'utilisation de techniques mettant en valeur les détails régionaux.

1.3.1.b. Les incertitudes inhérentes

Le processus d'élaboration des mesures des paramètres climatiques futures est entaché d'incertitudes. En effet, dès le moment où l'on cherche à intégrer les valeurs de la concentration des GES dans l'atmosphère dans les modèles climatiques, un choix arbitraire d'un scénario de projection doit être fait. Ainsi, l'exactitude de la trajectoire d'émissions choisie dépendrait de la réalisation du scénario. Or celui-ci est lié aux comportements imprévisibles et complexes de la société.

Si nous considérions maintenant l'étape de la simulation, celle-ci nécessite non seulement l'estimation des valeurs des émissions futures de GES envisagées mais aussi la modélisation des interactions entre les circulations atmosphériques et océaniques. Cependant, celles-ci sont sujettes à plusieurs incertitudes dues au manque de connaissances sur les composantes chaotiques du système climatique et terrestre (comme par exemple les nuages) ainsi que leurs interactions. En effet, les modélisations sont fondées sur des hypothèses fortes sur les phénomènes physiques et des simplifications importantes des processus régissant le climat. Le passage à la régionalisation des données prévues par les modèles climatique est un processus encore plus délicat. Ceci apparait depuis le choix même de la méthodologie de régionalisation. De plus cette étape nécessite de bien modéliser la topographie des régions concernées ainsi qu'une connaissance précise du climat régional.

Depuis la publication du troisième rapport d'estimation (2001), les experts du GIEC font un état des degrés d'incertitudes associées aux différentes prévisions. Ces degrés d'incertitudes sont évalués de trois manières :

Un niveau de confiance est attribué à chaque résultat dont la valeur d'incertitude est quantitative. On distingue cinq niveaux de confiance. Chaque niveau indique le degré de

confiance dans la validité du résultat basé sur le jugement collectif des experts quant à l'exactitude d'un modèle, une analyse ou une déclaration, d'où sa représentation par une probabilité subjective comme suit :

Tableau 1.3. Classification des valeurs de l'incertitude lorsque l'incertitude est quantitative.

Probabilité	**Degré de confiance**
9 chances au moins sur 10	Niveau de confiance très élevé
environ 8 chances sur 10	Niveau de confiance élevé
environ 5 chances sur 10	Niveau de confiance moyen
environ 2 chances sur 10	Bas niveau de confiance
moins d'une chance sur 10	Très bas niveau de confiance

Le GIEC invite les experts à réserver les deux derniers niveaux de confiance aux domaines de préoccupation majeurs qui doivent être envisagés dans une perspective de risque ou d'opportunité, et la raison de leur utilisation doit être soigneusement expliquée.

Lorsque les estimations sont plutôt obtenues avec précision et qu'elles sont fondées sur un avis autorisé et une analyse statistique d'une série d'éléments probants (par exemple des observations ou des résultats de modèles), la valeur de l'incertitude est classée selon les fourchettes de probabilité comme suit :

Tableau 1.4. Classification des valeurs d'incertitude selon la probabilité d'occurrence

Fourchettes de probabilité	**Probabilité d'occurrence**
probabilité supérieure à 99 %	*pratiquement certain*
probabilité supérieure à 95 %	*extrêmement probable*
probabilité supérieure à 90 %	*Très probable*
probabilité supérieure à 66 %	*Probable*
probabilité supérieure à 50 %	*plus probable qu'improbable*
probabilité de 33 % à 66 %	*à peu près aussi probable qu'improbable*
probabilité inférieure à 33 %	*Improbable*
probabilité inférieure à 10 %	*Très improbable*
probabilité inférieure à 5 %	*extrêmement improbable*
probabilité inférieure à 1 %	*Exceptionnellement improbable*

Lorsqu'il s'agit de décrire des résultats auxquels on ne peut pas attribuer une probabilité subjective, associés généralement au cas où les connaissances seraient encore limitées, la valeur de l'incertitude est qualitative. On distingue quatre situations décrites par les experts du GIEC comme suit :

Tableau 1.5. Classification des états de connaissances faite par le GIEC.

Degré de concordance	**Nombre de preuves (observations, modèle output, théorie, etc.)**	
	Bas	*Haut*
Haut	Established but incomplete	Well-established
Bas	Speculative	Competing explanations

** «Well-established» : les modèles incorporent des processus connus, les observations sont compatibles aux modèles où plusieurs preuves appuient le résultat.* « Established but incomplete »: les modèles incorporent des processus connus bien que certains paramètres ne puissent pas être testés, les observations sont quelque peu logiques mais incomplètes ; les estimations empiriques courantes sont bien fondées mais les possibilités de changement dans le gouvernement du processus sont considérables ou bien seulement une ou quelques renseignements confirment la découverte.* « Competing explanations » : les divers modèles de représentation expliquent des aspects différents d'observations ou d'évidences ou incorporent des aspects différents de processus clés menant aux competing explanations.* « Speculative » : les idées plausibles qui n'ont pas reçu beaucoup d'attention dans la littérature ou qui sont soumises à la difficulté de réduire les incertitudes.*

1.3.1.c. Les prévisons climatiques

i) Au niveau mondial

D'un point de vue global, les résultats des travaux du GIEC parues en 2007 sont peu modifiés par rapport à celles des travaux parues en 2001 ; c'est l'incertitude qui leur est liée qui a été sensiblement réduite grâce à l'amélioration de la compréhension du système climatique. L'amélioration des modèles numériques mis au point par la communauté scientifique afin d'établir les estimations détaillées de l'ensemble des réponses possibles du système climatique, permet maintenant d'obtenir de meilleures estimations « des valeurs les plus probables » et d'évaluer les marges d'incertitude « probables » susceptibles d'être données pour les projections de réchauffement pour divers scénarios.

Selon le dernier rapport du GIEC, les émissions de GES continueraient à augmenter dans l'atmosphère. Ces émissions, augmenteraient la température moyenne globale à la surface de la terre ainsi que le niveau de la mer. L'augmentation de la température serait comprise entre +1,8°C (scénario B1) et +4°C (scénario A1F1) d'ici 2100. Ces estimations sont qualifiées des plus probables par le GIEC, des fourchettes plus larges sont estimées pour cette même variable de +1,1 à +6,4°C. Le niveau de la mer s'élèverait d'ici 2100 de 0.18 à 0.38 m dans le cas du scénario B1 le plus favorable, et de 0.26 à 0.59 m dans le cadre du scénario A1F1 le moins favorable.

Tableau 1.6. Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du 21ième siècle, à un niveau global

Cas	Variation de température (°C, pour 2090–2099 par rapport à 1980-1999) [a,d]		Élévation du niveau de la mer (m, pour 2090–2099 par rapport à 1980–1999)
	Valeur la plus probable	Intervalle *probable*	Intervalle fondé sur les modèles sauf évolution dynamique rapide de l'écoulement glaciaire
Concentrations constantes, niveaux 2000[b]	0,6	0,3-0,9	Non disponible
Scénario B1	1,8	1,1-2,9	0,18-0,38
Scénario A1T	2,4	1,4-3,8	0,20-0,45
Scénario B2	2,4	1,4-3,8	0,20-0,43
Scénario A1B	2,8	1,7-4,4	0,21-0,48
Scénario A2	3,4	2,0-5,4	0,23-0,51
Scénario A1FI	4,0	2,4-6,4	0,26-0,59

Notes :

a) Ces valeurs estimées sont établies à partir d'une hiérarchie de modèles comprenant un modèle climatique simple, plusieurs modèles terrestres de complexité moyenne et de nombreux modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO), compte tenu des contraintes d'observation.

b) La composition constante en 2000 est établie uniquement à partir de modèles MCGAO.

c) Ces scénarios sont les six scénarios SRES de référence. Les concentrations approximatives (en équivalent-CO_2) correspondant au forçage radiatif calculé pour les GES et les aérosols anthropiques en 2100 (voir p. 823 de la contribution du Groupe de travail I au TRE) selon les scénarios SRES illustratifs de référence B1, AIT, B2, A1B, A2 et A1FI s'établissent respectivement à 600, 700, 800, 850, 1 250 et 1 550 ppm environ.

d) La variation de température est calculée par rapport à 1980-1999. Il suffit d'ajouter 0,5 °C pour obtenir l'écart relativement à 1850-1899.

Source : Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; Groupe de travail I, 2007, « changement climatique 2007 : Rapport de synthèse ». IPCC [PDF]. 29 Janvier 2008. *www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf*

Le GIEC prévoit également, au niveau global, la hausse très probable des fréquences de vagues de chaleur et des épisodes de fortes précipitations.

ii) Au niveau régional

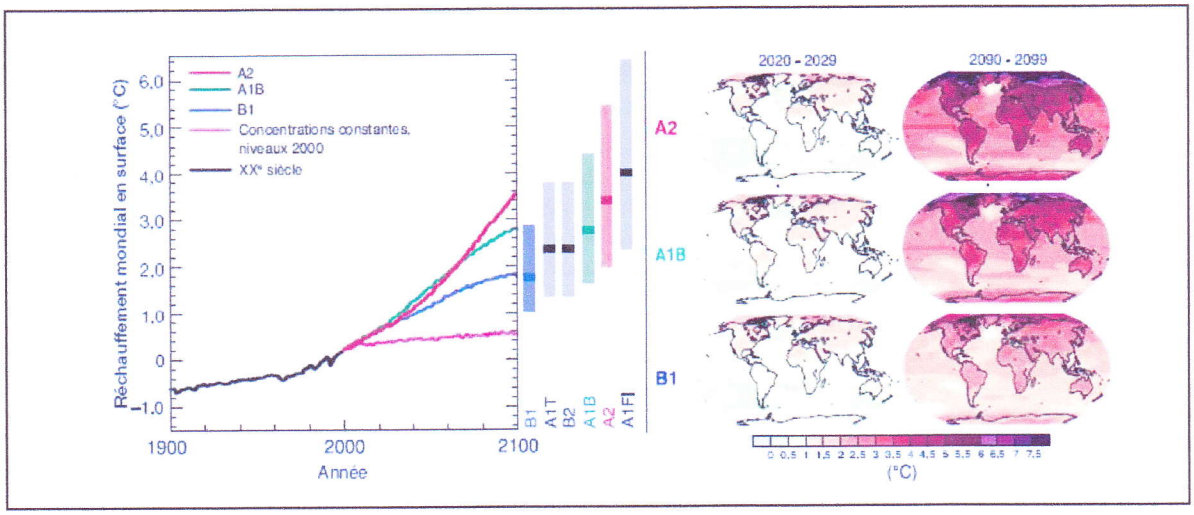
Au niveau régional, les projections du changement climatique sont fournies selon une division à une échelle continentale comme suit : Afrique, Europe, Méditerranée, Asie, Amérique du Nord centrale et du sud, Australie et Nouvelle Zélande, régions Polaires et les petites îles. Étant donné que chacune de ces régions englobe une gamme très large de climats et occupe une superficie très grande pour être utilisée comme une base de transmission des informations quantitatives sur le changement climatique régional, elles sont subdivisées en sous ensemble continentaux ou océaniques[7].

[7] Afrique de l'Ouest (AFO), Afrique de l'Est (EAF), Afrique du Sud (SAF), Sahara (SAH), Europe du Nord (NEU), Europe du Sud et la Méditerranée (SEM), l'Asie du Nord (ENA), l'Asie du Centre (CAS), plateau tibétain (TIB), Asie de l'Est (EAS), l'Asie du Sud (SAS), l'Asie du Sud-est (SEA), Alaska (ALA), l'Est du Canada, le Groenland et l'Islande (CGI), l'Ouest de l'Amérique du Nord (WNA) , le centre de l'Amérique du

Le GIEC associe aux projections du quatrième rapport un degré de confiance plus élevée que celles du troisième rapport. Les experts estiment que les modèles climatiques sont relativement satisfaisants pour prévoir le changement de température. En revanche, des incertitudes demeurent sur les résultats des projections concernant les précipitations.

Les résultats de prévision du quatrième rapport du GIEC montrent des divergences dans le réchauffement régional. Il atteindra un maximum sur les terres émergées et aux plus hautes latitudes de l'hémisphère Nord et un minimum au-dessus de l'océan Austral (près de l'Antarctique) et dans la partie septentrionale de l'Atlantique Nord, dans la continuité des tendances récemment observées.

Figure 1.7. Les projections du réchauffement régional en surface pour les périodes (2020-2029) et (2090-2099)



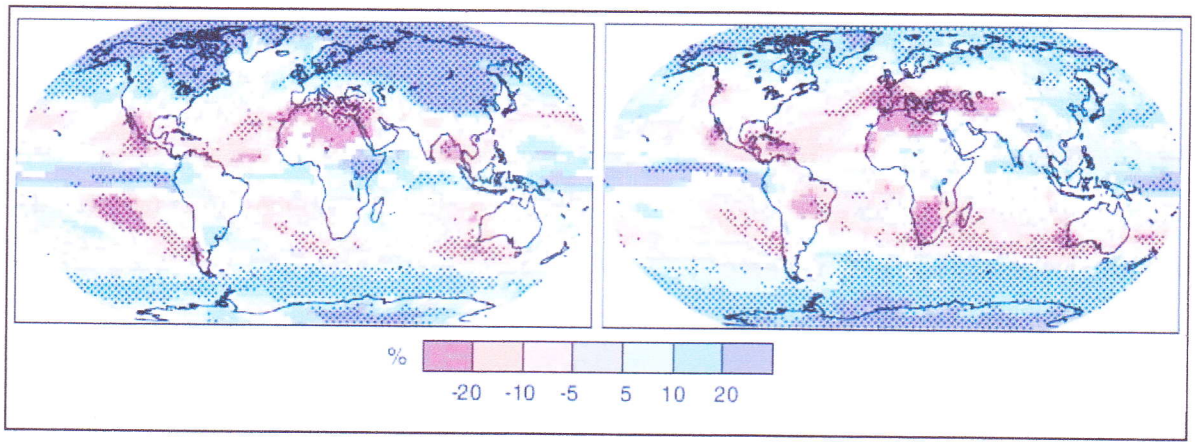
À gauche : *Les courbes en trait plein correspondent aux moyennes mondiales multi modèles du réchauffement en surface (par rapport à la période 1980-1999) pour les scénarios A2, A1B et B1 du SRES, dans la continuité des simulations relatives au XXe siècle. La courbe orange correspond au cas où les concentrations se maintiendraient aux niveaux de 2000. Les barres au milieu de la figure indiquent les valeurs les plus probables (zone foncée) et les fourchettes* probables *selon les six scénarios SRES de référence pour la période 2090-2099 par rapport à 1980-1999. Ces valeurs et ces fourchettes tiennent compte des projections établies à l'aide des modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) (partie gauche de la figure) ainsi que des résultats d'une hiérarchie de modèles indépendants et des contraintes liées à 'observation.* ***À droite :*** *Évolution projetée de la température en surface pour le début et la fi n du XXIe siècle par rapport à la période 1980-1999, selon les projections moyennes obtenues à l'aide de plusieurs modèles MGCAO pour les scénarios A2 (en haut), A1B (au milieu) et B1 (en bas) du SRES, pour les décennies 2020-2029 (à gauche) et 2090-2099 (à droite).*

Source : Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; Groupe de travail I, 2007, « changement climatique 2007 : Rapport de synthèse ». IPCC [PDF]. 29 Janvier 2008. *www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf*

Nord (CNA), l'Est de l'Amérique du Nord (ENA), l'Amérique centrale (CAM), l'Amazonie (AMZ), le Sud de l'Amérique du Sud (SSA), Nord-Australie (NAU), le Sud de l'Australie (SAU), Arctique (ARC), Antarctique (ANT), Caraïbes (CAR), l'Océan Indien (IND), le Bassin Méditerranéen (MED), Tropique de l'Atlantique du Nord (TNE), l'océan Pacific du Nord (NPA), et l'Océan pacifique du Sud (SPA).

Le GIEC fait état d'une augmentation très probable du volume de précipitation dans les latitudes élevées et d'une diminution probable dans la plupart des régions continentales subtropicales (d'environ 20% en 2100 selon le scénario A1B).

Figure 1.8. Projections des variations du régime de précipitations



Variations relatives du régime des précipitations (%) pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999. Les valeurs indiquées sont des moyennes tirées de plusieurs modèles, obtenues à partir du scénario A1B du SRES pour des périodes allant de décembre à février (à gauche) et de juin à août (à droite). Les zones en blanc correspondent aux régions où moins de 66 % des modèles concordent sur le sens de la variation et les zones en pointillé à celles où plus de 90 % des modèles concordent sur celui-ci.
Source : Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; Groupe de travail I, 2007, « changement climatique 2007 : Rapport de synthèse ». IPCC [PDF]. 29 Janvier 2008. *www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf* tiré de, Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; Groupe de travail I, 2007, « changement climatique 2007 : Bases scientifiques ».

Le GIEC prévoit aussi, avec un degré de confiance élevé, une baisse des débits annuels moyens des cours d'eau et de la disponibilité de la ressource en eau dans certaines régions sèches des latitudes moyennes et des tropiques (hausse aux latitudes hautes).

En ce qui concerne les autres phénomènes extrêmes, le GIEC indique vraisemblablement, que les cyclones tropicaux futurs, ainsi que les typhons et ouragans, deviennent plus intenses avec des vents et des précipitations plus forts.

iii) La Tunisie

Les modèles de circulation générale ne sont pas assez précis pour cette région, en ne disposant pas de modèle à maillage centré sur celle ci. Nous pouvons déduire l'évolution du climat futur de la Tunisie en se basant sur les estimations du GIEC pour la Méditerranée. En fait, les modèles de circulation générale prévoient un changement dans l'Arc Méditerranéen par une augmentation de la température et une diminution des précipitations. Ainsi, il est très

probable que la température moyenne enregistre une hausse de 3 à 4°C de, échelonnée sur la période entre 1980-1999 et 2080-2099 sur l'ensemble du continent ; c'est-à-dire une hausse 1.5 fois plus importante que celle par rapport au niveau mondial. D'un autre côté, les précipitations annuelles sont susceptibles de diminuer de -15 à -20 % au cours de ce siècle.

1.3.2. Les enjeux potentiels du changement climatique sur les systèmes humains et naturels au niveau mondial

Les enjeux ou incidences potentiels du changement climatique sur les systèmes humains et naturels sont disponibles dans le second volume du quatrième rapport d'évaluation produit par le groupe de travail II. Ce travail établit une analyse des preuves de changements observés entre 1970 et 2005 associés aux changements climatiques, par les travaux qui lui sont antérieurs, notamment le troisième rapport d'évaluation du GIEC paru en 2001, et en tire les résultats les plus solides. Aussi, il intègre les résultats de cinq ans consacrés à l'étude des impacts potentiels du changement climatique sur des secteurs et des régions, sur le potentiel d'adaptation et sur les implications pour la durabilité.

1.3.2.a. La détermination et l'anticipation des enjeux : controverses sur les méthodes

La détermination et l'anticipation des incidences du changement climatique sur les systèmes naturels et humains nécessite, comme le confirme les experts du GIEC, de faire appel à plusieurs disciplines physiques, biologiques et sociales et par la suite une variété de méthodes et d'outils. Bien qu'une large gamme d'outils et de méthodes ait été développée, certaines questions restent à ce jour au centre des préoccupations des scientifiques dès l'étape de détection et d'attribution des incidences au changement climatique.

En fait, la mise en relation des changements climatiques et des effets observés sur les systèmes naturels et humains se fait aussi en utilisant les méthodes de détection et d'attribution. L'extension des méthodes utilisées sur les changements observés dans les systèmes climatiques à des changements observés dans les systèmes physiques biologiques et humains est plus complexe. Le GIEC reconnaît que les réponses de ces systèmes aux changements climatiques peuvent être tellement amortis ou complètement confondu avec d'autres facteurs qu'il serait impossible de les détecter. Pour faire face à ces difficultés les experts du GIEC partent de l'évidence : « (…) les effets du changement du climat sont très

transparents dans les systèmes où les manipulations humaines sont éphémères » pour suggérer que : «les systèmes qui contiennent un excellent {processus de base} cohérent des effets du climat et des événements du temps, et où l'intervention humaine est minime, peuvent servir comme indicateurs des effets plus généraux du changement du climat dans les systèmes et les secteurs où ils sont aisément étudiés » (Mitchell et al., 2001)

Le choix de tels indicateurs est compliqué. La plupart des études existantes considérées par les rapports du GIEC relatives aux estimations des éventuels dommages ont tendance à se concentrer sur les conséquences les plus fermement établies du réchauffement tel que, les conséquences des températures extrêmes sur la santé, la productivité agricole et la qualité et disponibilité en eau. Les études du rapport entre le réchauffement et les changements observés dans les systèmes naturels et humains se font en utilisant les modèles climatiques ou l'analyse spatiale. Les premières consistent à comparer les changements observés aux changements résultants de trois étapes de modélisation ; en tenant compte des facteurs de forçages naturels et ceux des facteurs de forçage anthropiques séparément puis en les combinant. Les secondes établissent une comparaison entre des séries de données qui sont cohérents avec le réchauffement et celles qui ne le sont pas ; collectées dans des cellules de cinq degrés de latitude et de longitude de côté au tour de la partie du globe montrant un réchauffement ou/et un refroidissement significatif.

Ainsi, la détermination des conséquences du changement climatique sur les systèmes naturels et humains est marquée par l'incertitude à partir du moment où l'on décide de l'indicateur que l'on va désigner. En effet, le choix de la température comme indicateur est très discuté dans la littérature. Nordhaus (1993), par exemple, souligne que la moyenne globale de température, statistique sur laquelle se sont basées ces approches, a peu d'intérêt économique. Il affirme qu'on ne peut pas analyser l'impact des divers taux de réchauffement sur l'agriculture, par exemple, sans savoir quelques choses sur les changements régionaux dans les précipitations et l'humidité du sol, par exemple. Il suggère, par conséquent, d'utiliser des variables qui accompagnent ou qui sont le résultat du changement de la température tel que précipitation, niveaux de l'eau, extrêmes sécheresses ou gels et qui conduiront, selon lui, aux impacts socio-économiques.

De même, l'anticipation des incidences du changement climatique sur les systèmes naturels et humains comprend des lacunes méthodologiques que le GIEC soulève souvent dans ses rapports d'évaluation concernant les échelles de données, la validation et l'intégration de l'adaptation et les dimensions humaines du changement climatique. Ceci malgré le fait qu'un large éventail de méthodes et d'outils sont disponibles et subissent des

améliorations continues mettant davantage l'accent sur l'utilisation de modèles basés sur l'utilisation de scénarios de changement climatique transitoire, le perfectionnement des références socio économiques de base ainsi que les échelles spatiales et temporelles des évaluations et l'intégration de l'adaptation, que le GIEC décrit dans son dernier rapport. Cependant, ces modèles ont été testés à des échelles sectorielles, régionales et globales dans tous les continents et le GIEC accorde un crédit certain à leurs résultats et les prennent en considération dans ses rapports d'évaluation.

1.3.2.b. Les enjeux potentiels futurs

Dans le dernier rapport du GIEC, on trouve une sélection des principaux impacts du changement climatique attendus au cours du XXIème siècle au niveau des systèmes, des secteurs et des régions. Là encore, identiquement au travail qui concerne les incertitudes sur le changement climatique, les experts du GIEC, ont traité les incertitudes quant à la détermination et l'anticipation des conséquences du changement climatique sur les systèmes naturels et humains et estimé les biais dans les jugements. Les conclusions présentées dans la section précédente sont affectées d'un degré de confiance élevées.

Dans les systèmes terrestres on prévoit que le réchauffement et la diminution des précipitations auront des retombés sur la forêt boréale, les régions montagneuses, les écosystèmes de type méditerranéen et les forêts pluviales tropicales. Les écosystèmes marins (les mangroves et marais salants) et côtiers (les récifs coralliens et la biome des glaces de mer) seront, également, sensiblement touchés, soumis à de multiples contraintes, notamment, à cause de l'acidification des océans due à l'augmentation des concentrations en CO_2 et des modifications régionales dans la distribution des organismes marins liée à l'augmentation des températures de l'eau. De même, les ressources en eau seront particulièrement modifiées dans certaines régions sèches des latitudes moyennes et dans les zones tropicales sèches, à cause de la modification de la pluviosité et de l'évapotranspiration, ainsi que dans les zones tributaires de la fonte de la neige et de la glace. Dans le secteur agricole, on prévoit autant de modifications particulièrement aux basses latitudes, sous l'effet de la raréfaction des ressources en eau. Le changement climatique affectera également les basses terres littorales, par suite de la menace d'une élévation du niveau de la mer et du risque accru de phénomènes météorologiques extrêmes. On envisage aussi que l'état sanitaire des populations disposant d'une faible capacité d'adaptation sera sensiblement affecté.

Au niveau des régions, on estime que les plus menacées seront, l'Arctique, à cause de la vitesse du réchauffement et de ses incidences sur les systèmes naturels et les collectivités humaines; l'Afrique, vu la faible capacité d'adaptation et les effets projetés; les Petites îles, en raison de la forte exposition de la population et de l'infrastructure aux effets projetés ; et les Grands deltas asiatiques et africains, étant donné la densité de population et la forte exposition à l'élévation du niveau de la mer, aux ondes de tempête et aux inondations fluviales.

1.3.3. Scepticisme sur les conclusions du GIEC

Les conclusions du GIEC ne font pas souvent l'unanimité. Il y a des scientifiques[8] {Mike Hulme (Décembre 2009) ; Vincent Courtillot (Octobre 2009) ; Marcel Leroux, etc.} qui contestent surtout le fait que l'effet de serre provoqué par l'homme soit le responsable du réchauffement climatique. Ces contestations sont parfois supportées par les médias qui ont tendance à mettre l'accent sur les aspects controversés. On aime bien, par exemple, présenter une dualité où l'on met l'accent sur les désaccords entre deux grandes idéologies, tout en oubliant parfois de comparer l'ampleur, le support et la crédibilité réelle de chacune d'elles. Pourtant, le fondement scientifique du problème est beaucoup moins controversé. Comme on a vu précédemment, les données scientifiques disponibles justifient les inquiétudes actuelles concernant les changements climatiques et leurs effets potentiels. Ces controverses sont marginalisées par la communauté internationale. En fait, presque tous les gouvernements se sont ralliés au consensus scientifique établi dans la quatrième réunion d'évaluation du Groupe International sur la primauté de la responsabilité humaine sur les facteurs naturels dans le réchauffement climatique global à travers les émissions des gaz à effet de serre. Le Rapport Stern[9] sur l'économie des changements climatiques, vient confirmer les conclusions du GIEC.

Globalement, les scientifiques et la communauté internationale ont confiance en la validité scientifique des motifs invoqués pour s'inquiéter des changements climatiques et du potentiel de risques appréhendés. Ils reconnaissent que les incertitudes se situent surtout au niveau des effets détaillés des changements climatiques, principalement l'ampleur et le

[8] Existe une liste longue de scientifique spécialistes qui contestent les travaux du GIEC. Ils présentent leurs déclarations et travaux dans des conférences ou sur des sites internet. L'intéressé peut se référer au site www.pensee-unique.fr/paroles.html.

[9] « Le rapport Stern sur l'économie du changement climatique est un compte rendu sur l'effet du changement climatique et du réchauffement global sur la planète rédigé par l'économiste Nicholas Stern pour le gouvernement du Royaume-Uni. Publié le 30 octobre 2006, ce rapport de plus de 700 pages est le premier rapport financé par un gouvernement sur le réchauffement climatique mené par un économiste et non par un météorologue. » Wikipedia [on line]. 14 décembre 2009. http://fr.wikipedia.org/wiki/Rapport_Stern

rythme des changements. C'est d'ailleurs pourquoi ils ont recommandé l'adoption immédiate de mesures préventives visant à ralentir le rythme des changements climatiques. Dès le rapport du GIEC de 1995, les scientifiques font justement une affirmation similaire : « Bien que l'on ne puisse quantifier avec exactitude la nature et l'ampleur des changements climatiques et de leurs impacts, il apparaît évident que des changements et des impacts sont déjà amorcés et qu'ils se poursuivront. Il faut donc agir maintenant afin de limiter les dégâts, tout en considérant une gamme d'incertitude que les scientifiques prévoient de réduire au cours des prochaines années ».

1.3.4. Evaluation monétaire des conséquences

Posséder une évaluation monétaire de ces impacts peut s'avérer particulièrement utile surtout pour comparer les coûts de prévention du changement du climat aux bénéfices attendus. En fait, avec l'évolution de la reconnaissance du phénomène et la multitude des projets proposés, l'action se trouve confrontée aux conflits des différents acteurs impliqués (les pouvoirs publics, les citoyens, les industriels et les experts) dans la décision. De tels projets impliquent des investissements énormes. Choisir un projet parmi d'autres, nécessiterait d'évaluer les coûts et bénéfices de tous les projets. Bien que les évaluations des coûts puissent ne pas susciter de controverses, celles des bénéfices qui sont liées aux conditions du futur lointain susciteraient ces controverses. D'un côté, les coûts peuvent être définis en termes de coûts d'opportunité (associés à la restriction des activités industrielles ou commerciales, par exemple) ; alors que les bénéfices sont définis relativement à leurs effets sur les améliorations du bien-être des individus, ou relativement aux impacts du changement climatique évité.

Une évaluation monétaire des dommages liés au changement climatique serait ainsi nécessaire. Les techniques d'évaluation des dommages sont nombreuses et variées dans la littérature. Nous avons retenu quelques études publiées adressant les impacts globaux du changement climatique. L'évaluation de l'impact économique du changement climatique, généralement utilisé, est égale au montant par lequel le climat d'une période donnée affecterait la production ou le PIB de cette même période. Les composantes spécifiques incluses dans ces études sont, essentiellement, l'augmentation du niveau de la mer, les changements de température liés à la demande de chauffage et de climatisation, les conséquences des

températures extrêmes sur la santé, les changements estimés dans la productivité agricole ainsi que la qualité et les disponibilités en eau.

Pour évaluer les dommages on commence par séparer les dommages marchands – faisant références aux impacts sur les activités ou les secteurs produisant des biens et des services marchands, des dommages non marchands c'est-à dire, les impacts sur l'environnement, la biodiversité et la santé…

Dans le cas des biens marchands, une évaluation monétaire se fait généralement, sur la base des prix du marché ajustés (pour corriger les distorsions du marché) grâce à des méthodes simples. Une approche traditionnelle d'estimation d'impact, couramment utilisée, s'appuie sur la fonction de production empirique pour prédire les dégâts économiques. Cette approche adopte une fonction de production spécifique et évalue les impacts en faisant varier une ou plusieurs variables telles que la température, les précipitations et les niveaux de dioxyde de carbone.

D'une autre part, évaluer des biens non marchands dans une métrique commune, en général monétaire est très difficile à faire. Une très vaste littérature consacrée à la question révèle des procédures qui s'appuient sur les dispositions à payer des individus pour un bien ou service environnemental (Mohan Munasinghe et Ernst Lutz ; 1995). Cette approche peut conduire à des biais dès lors qu'elle revient à affirmer qu'un dommage n'a pas le même prix selon qu'on est riche ou pauvre. En effet, la disposition à payer de l'individu dépend du revenu de l'agent considéré.

L'évaluation des dommages non marchands soulève, en particulier le problème de l'évaluation des effets directs sur le bien-être de l'individu. En effet, il y a certainement une interaction entre le climat et le bien être de l'individu. Maddison et Bigano (2000), par exemple, montrent que les plus hautes températures de l'été réduisent le bien-être des italiens. Une évaluation monétaire de l'impact du changement climatique sur le bien être de l'individu serait particulièrement utile pour savoir si les coûts de prévention du changement climatique étaient justifiés par les bénéfices.

L'agrégation de plusieurs dégâts dans une évaluation unique, appropriée pour fournir des renseignements au sujet de la magnitude des dégâts prévus sur une échelle globale forme pourrait s'avérer particulièrement intéressante pour les responsables politiques (GIEC, 2002). Dans la plupart des études, les effets sont estimés et valorisés secteur par secteur et groupés

pour former ensuite une estimation de tous les changements dans le bien être social ce qui est connu comme l'approche *« énumérative »* (Cline , 1994 et Tol et Frankhauser , 2002).

Les études présentées par le second rapport du GIEC et ses sous actuels références (Cline 1992, Frankhauser 1995, Nordhaus 1991, Tol 1999a ...) prévoient que les dommages potentiels seront compris entre 1.5% et 2.5% du PIB mondial pour un doublement de la concentration atmosphérique. Bien qu'elles servent de référence, ces chiffres sont contestables. En effet, la fourchette de 1.5% à 2.5% du PIB n'inclut pas les risques de surprises climatiques et de non-linéarité dans les adaptations des sociétés au changement climatique. Finalement, l'ensemble des tentatives d'estimation faite selon l'approche « énumérative » reconnaissent que les pays en voie de développement seront les principales victimes du changement climatique car leurs économies sont plus fragiles et plus dépendantes des milieux naturels, tandis que certains pays froids pourraient globalement en bénéficier du fait de l'augmentation de leurs rendements agricoles par exemple. Un courant de recherches récemment développées montre que ces résultats sont inconsistants. Ces recherches sont fondées sur la base des faiblesses de la méthode « énumérative ».

Dans ce cadre Frankhauser et Tol (2002), par exemple, critiquent à travers leur travail le fait que cette méthode ignore les « interactions dynamiques ». Ils expliquent que les études énumératives s'intéressent à une période unique du temps et cherchent comment le climat observé affecte le bien-être social dans cette période particulière dans le temps. Ainsi, ils ignorent les effets inter temporels, et négligent de fournir des renseignements sur la manière avec laquelle le changement du climat peut affecter la production dans le plus long terme. Ce travail attire l'attention sur certains effets dynamiques à travers lesquels le changement climatique peut affecter la croissance économique et par conséquent la production future. Les auteurs explorent, en particulier, la direction des deux variables; épargne et accumulation du capital suite au changement climatique en partant d'un modèle d'évaluation intégrée[10] élaboré par Nordhaus (1994). Ils distinguent les deux effets dynamiques suivants:

- Avec un taux d'épargne constant, une production inférieure dû au changement du climat mènera à une réduction proportionnelle dans l'investissement lequel à son tour diminuera la production future (effet d'accumulation du capital).

[10] "Évaluation intégrée" veut dire que *nous associons des connaissances provenant d'un grand nombre de disciplines pour donner des éclairages qu'il ne serait pas possible d'obtenir par la recherche disciplinaire traditionnelle* (GIEC, 1995).

- Si le taux d'épargne est flexible, les agents précoces peuvent changer leur comportement d'épargne pour s'accommoder aux futurs impacts du changement climatique. Cela changera aussi les perspectives de croissance [11](effet d'épargne).

L'ensemble des simulations faites dans ce papier suggère que :

- L'effet d'accumulation du capital et l'effet d'épargne sont, tous les deux négatifs, c'est à dire, face aux changements climatiques les ménages augmentent plutôt la consommation courante que l'épargne pour compenser les futurs dégâts ce qui affectera le taux de croissance économique.
- Les effets indirects sont relativement plus grands que les plus petits effets directs; les effets indirects sont ainsi relativement plus grands pour les mécanismes de croissance les plus fréquents dans les pays les plus riches. Ainsi, les études Enumérative sous-estiment les impacts du changement climatique surtout dans le cas des pays riches.

Conclusion

Depuis la fin du XXème siècle, le climat se trouve au cœur des préoccupations environnementales. Il s'agit d'un système adaptatif hautement non linéaire et complexe, possédant des interconnexions étendues inter et intra composantes. Ce système a fait l'objet de plusieurs conférences et sommets intergouvernementaux sous l'égide des Nations Unies. Ceux-ci ont contribué à la sensibilisation de la communauté internationale sur les éventuels risques de perturbation de l'atmosphère et des mécanismes climatiques et par suite à la création du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et d'un traité, qui est le centre de discussions continues, visant la stabilisation des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique qui sont amplement démontrées (rapports d'évaluation du GIEC) pour être responsable de ces perturbation.

Aujourd'hui, plus de cent quatre vint huit Etats du monde s'accordent sur la base d'un large consensus scientifique pour dire que l'humanité connaîtra un changement climatique résultant de l'accroissement de la concentration de gaz à effet de serre dans le réservoir atmosphérique. Ces nations déploient leurs efforts afin de mettre en place une gestion

[11] D'un côté, les taux des économies peuvent croître parce que les agents souhaitent dédommager le déficit dans le revenu futur. De l'autre côté, le changement climatique pourrait réduire la productivité du capital et, face à un taux de rendement du capital inférieur, les agents préféreraient, éventuellement, consommer plus aujourd'hui. (Tol et al, 2002).

adaptative et des principes préventifs pour faire face aux éventuelles perturbations climatiques et à leurs conséquences défavorables possibles.

Cependant, les estimations de l'évolution future du climat et de ses conséquences sont entachées d'incertitudes. Nous identifions principalement deux niveaux : des incertitudes au niveau de l'identification des modifications du régime climatique et d'autres au niveau des impacts de ces modifications sur les écosystèmes et les systèmes humains. En fait, d'un côté, la réponse du climat à l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre est complexe. Elle dépend de l'interaction de cette augmentation avec les phénomènes présents à l'intérieur du réservoir atmosphérique, ainsi que tous les autres systèmes naturels et humains en interférence qui présentent de potentielles trajectoires de dépendance en évolution continue. De l'autre côté, les estimations de l'évolution future du climat et des conséquences du changement climatique au niveau global omettraient plusieurs considérations locales qui rendraient les évaluations économiques approximatives, inégales et inachevées.

La question économique qui se pose face aux incertitudes exogènes et endogènes porte sur cette imprécision qui justifierait des décisions de prévention et de lutte contre le changement climatique surtout en présence des conflits d'intérêt des différents acteurs économiques impliqués (les pouvoirs publics, les citoyens, les industriels et les experts) dans la décision. En fait, ce type de politiques de régulation implique des engagements crédibles et forts. Ainsi, malgré la volonté des nations d'agir contre le fléau, l'action se trouverait bloquée en l'absence d'une information plausible sur sa magnitude et ses conséquences. La nécessité de recourir à des évaluations pointues s'impose, afin de comprendre l'image entière des effets du changement climatique dans une région. Dans ce cadre, nous avons choisit d'évaluer l'impact du changement climatique sur le secteur agricole en Tunisie.

Chapitre 2. Changement Climatique et impacts sur l'agriculture : étude bibliographique

Introduction

De par ses liens avec les facteurs de l'environnement, essentiellement le climat, il semble évident que le changement climatique affecte la production agricole, déterminant la performance du secteur agricole à différents niveaux. Dans ce chapitre, notre objectif est de démontrer l'importance qu'occupe l'agriculture dans les débats scientifiques sur les impacts du changement climatique. Pour aboutir à cet objectif nous proposons une revue bibliographique des études qui traitent les relations entre le changement climatique et la production agricole. Ces études peuvent être réparties en deux courants. Le premier consiste à étudier les liens entre le changement climatique et l'agriculture de manière générale en dehors du contexte économique. Les travaux menés dans ce cadre permettent d'identifier les principaux impacts sur l'écophysiologie de la plante et les régions de production.

Le deuxième, analyse la relation entre la production agricole et l'environnement à l'échelle régionale prenant en compte le contexte économique. Les études de l'impact du changement climatique sur l'agriculture à considération économique sont essentiellement basées sur trois types d'estimation quantitative : la simulation des modèles agro-économique (ex ; Adams et al. 1988, Adams et al. 1990, Adams et al. 1993, Adams et al. 1999; Easterling et al. 1993; Kaiser et al. 1993; Rosenzweig and Parry 1994), l'analyse des zones agro-écologiques (ex ; Fisher et van Velthuizen ; 1996), et la méthode Ricardienne (ex ; Mendelsohn, Nordhaus et Shaw 1994, 1996, 1999 ; Dinar et al. 1998).

Sommairement, nous pouvons décrire ces méthodes en les classant suivant les deux approches de Reilly (1997) et Kurukulasuray et Rosenthal (2003). Ainsi, les estimations quantitatives sur les impacts du changement climatique sont fondées principalement sur des études expérimentales et transversales. L'approche expérimentale comprend la méthode de simulation agro-économique, telle qu'elle est appliquée dans les premières études de Parry et al (1988), Adams (1989), et l'analyse des zones agro-écologiques développée par la FAO en collaboration avec l'Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués (IIASA).

Elle consiste en une modélisation structurelle de la réponse agronomique des cultures, des décisions de gestion économique des agriculteurs et souvent des aspects environnementaux. Cette modélisation est réalisée grâce aux modèles de cultures. L'analyse transversale telle qu'elle est appliquée dans la méthode ricardienne développée par Mendelsohn et al. (1994) modélise la dépendance de la réponse observée des cultures et des agriculteurs aux variations de climat.

Dans ce qui suit nous expliciterons tous ces propos en détail sur la base de ce classement. Nous commençons par explorer les impacts potentiels du changement climatique sur l'agriculture. Ensuite, nous nous intéresserons à l'approche expérimentale et finalement, l'approche transversale.

2.1. Les impacts potentiels du changement climatique sur l'agriculture

Comprendre les liens entre le système agricole et le changement climatique constitue un défi pour les chercheurs. Une quantité considérable de travaux ayant discuté les impacts potentiels du changement climatique sur l'agriculture en termes qualitatifs est disponible depuis les années 80 avec les travaux de Callaway et al. (1986), Deker et al. (1986). Pour fixer des références, nous avons mené des recherches sur le portail d'informations scientifiques scirus[12]; nous avons choisi les travaux classés les plus importants par le portail : le travail de Rosenzweig et Hillel « Potential impacts of climate change on agriculture and food supply » publié dans la revues Consequences en 1995, l'ouvrage « Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects ...», publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) en 1997, les deux contributions du deuxième groupe de travail du GIEC de 2001 et 2007 «Impacts, Adaption and Vulnerability » et le travail de Tubiello et al. « Crop and pasture response to climate » publié dans la série scientifique multidisciplinaire « Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) » en 2007. Ces travaux ont été choisis surtout parce qu'ils offrent une explication détaillée et générale des liens entre le changement climatique et l'agriculture, en rassemblant les travaux d'experts internationaux spécialistes de la

[12] C'est un moteur de recherche global scientifique spécialisé dans la littérature scientifique universitaire comme Google scholar détenu et exploité par Elsevier. (www.scirus.com)

physiologie des plantes, de l'agro météorologie, de l'agrobiologie, des sciences de l'environnement, de l'agronomie, mandatés par la FAO

Dans tous ces travaux on s'accorde à dire que le changement climatique affecterait la production agricole en modifiant principalement les processus physiologiques, hydrauliques et pédologiques de la plante. L'approche d'analyse retenue dans la littérature consiste à observer les limites climatiques actuelles des cultures et à prendre en considération ces limites pour un changement prédit de climat (Reilly et al, 1997). En premier lieu, on étudie souvent les modifications des processus physiologiques qui surviendraient suite à l'augmentation de la concentration atmosphérique du CO_2, de la température ainsi que de l'intensification du cycle hydrologique qui leur est associée, les experts du FAO ajoutant les effets de l'augmentation de l'ozone troposphérique O_3, et du rayonnement ultraviolet UV-B provenant de l'épuisement de l'ozone stratosphérique. Dans ce qui suit nous rappelons les liens communément reconnus afin d'identifier les impacts potentiels du changement climatique sur le système agricole à travers une étude bibliographique.

2.1.1. Les effets de l'accroissement du CO_2 sur la production végétale

Généralement, on prévoit que l'accroissement du CO_2 aurait des effets positifs sur la production végétale. D'abord, les experts qualifient le CO_2 de fertilisant et estiment qu'un tel accroissement permettrait des gains de productivité de l'ordre de 30% ou plus là où les éléments nutritifs et l'humidité seraient adéquats pour les plantes. Ils expliquent qu'en présence d'une augmentation de la concentration de CO_2 et de conditions optimales de lumière, de température, d'éléments nutritifs et d'humidité, la production de biomasse augmenterait, particulièrement chez les plantes à métabolisme photosynthétique désigné par C_3[13], au-dessus et même en-dessous du sol.

[13] « Les plantes sont classifiées C_3, C_4 ou CAM selon les produits formés dans les phases initiales de la photosynthèse. Les espèces C_3 répondent plus à l'augmentation de CO_2, les espèces C_4 répondent mieux que les plantes C_3 à une température plus élevée et leur efficience à l'utilisation de l'eau croît plus que chez les plantes C_3. Il se peut que ce renchérissement décroisse avec le temps. Plantes C_3: coton, riz, blé, orge, haricots, tournesol, pommes de terre, la plupart des légumineuses, des plantes ligneuses et maraîchères ainsi que beaucoup de mauvaises herbes. Plantes C_4: maïs, sorgho, canne à sucre, mil, halophytes (plantes qui tolèrent le sel) et beaucoup de hautes herbes tropicales, de pâturage, de fourrage et de mauvaises herbes. Plantes CAM (Crassulacean Acid Metabolism, un itinéraire C_3 ou C_4 optionnel de la photosynthèse qui dépend des conditions): manioc, ananas, figues de barbarie, oignons, ricin » FAO (1997), «Changements du climat et production agricole. Effets directs et indirects du changement des processus hydrologiques, pédologiques et physiologiques des végétaux». FAO [on line]. http://www.fao.org/docrep/W5183F/W5183F00.htm

Des expériences dans des conditions optimales montrent qu'un doublement du CO_2 augmente la photosynthèse des feuilles de 30% à 50% dans le cas des espèces de plantes C_3 et 10% à 25% pour les espèces C_4. De plus, des valeurs plus élevées en CO_2 atténueraient les dommages causés à la croissance des plantes par des polluants tels que NO_X et SO_2 à cause des ouvertures plus petites de stomates, les pourcentages plus grands d'amidon[14] dans l'herbe amélioreraient leur qualité nutritive, impliquant moins de mélange d'aliments dans l'ensilage.

L'effet fertilisant du CO_2 pourrait aussi modifier le fonctionnement biologique du sol. D'une part, on assisterait à un manque d'éléments nutritifs tels que l'azote N et le phosphore P pour le peuplement végétal causé par la croissance végétale accrue; cette carence favoriserait les légumineuses. D'une autre part, l'accroissement en CO_2 entrainerait une compensation de la carence en éléments nutritifs par les apports supplémentaires en engrais en stimulant une croissance accrue des racines.

Ensuite, Ils établissent que le CO_2 possède la qualité d'anti transpirant, qui, à des niveaux de concentration plus élevées permettraient une consommation d'eau plus efficace du fait de la réduction de la transpiration et stimulerait la croissance végétale dans les régions sèches, améliorant ainsi la protection du sol contre l'érosion et les températures plus basses de la couche supérieure du sol ce qui produirait un "effet d'anti-désertification".

Néanmoins, il est important de souligner que les experts reconnaissent que ces conclusions sont entachées d'incertitudes liées surtout aux conditions d'expériences menées pour détecter les effets de l'accroissement du CO_2 qui ne tiennent pas en compte de la situation réelle de la ferme.

Encadré 2.1. Photosynthèse et respiration

Ces deux processus sont connus pour être fondamentaux à la survie et la croissance des végétaux. En effet, la photosynthèse permet en présence de lumière, d'eau et de dioxyde de carbone de produire des sucres et de l'oxygène. L'oxygène est rejeté dans l'atmosphère alors que les sucres serviront de nourriture permettant la formation des tissus végétaux (feuilles, bois, fleurs, etc.) et de réserves d'énergies pour la plante. La respiration permet de récupérer l'énergie stockée dans les sucres et de le diffuser dans les organes de la plante permettant ainsi le maintient et la croissance des tissus végétaux.

[14] « L'amidon est un glucide complexe composé de chaînes de molécules de D-Glucose. Il s'agit d'une molécule de réserve énergétique pour les végétaux supérieurs et un constituant essentiel de l'alimentation humaine. » Amidon. (2011, novembre 10). *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. Page consultée le 14, décembre, 2009 à partir de http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Amidon&oldid=71967950.

2.1.2. Les effets de l'accroissement du rayonnement ultraviolet UV-B et de l'ozone (O3) sur la production agricole

Les experts de la FAO estiment, avec prudence, que des niveaux élevés du rayonnement ultraviolet UV-B et de l'ozone (O_3) auraient des effets néfastes sur la croissance et la productivité des cultures. D'une part, on rapporte que l'UV-B affecte la capacité des organismes du plancton[15] à contrôler leurs mouvements verticaux et à s'ajuster aux niveaux de lumière. Ainsi l'accroissement de l'UV-B aurait des effets nuisibles sur la croissance des cultures, des animaux et du plancton. On estime des réductions dans les récoltes allant jusqu'à 10% pour des valeurs expérimentales très élevées d'UV-B et ceci serait particulièrement effectif dans les plantes où l'effet fertilisant du CO_2 est le plus fort. D'autre part, les experts de la FAO prévoient que des concentrations élevées d'ozone auraient des effets toxiques sur la vie, à la fois des plantes et des animaux. Il est probable par exemple que l'ozone, en conjonction avec d'autres photo-oxydants, causent de "nouveaux types de dégâts forestiers" observés en Europe et aux Etats-Unis. Là aussi, les experts de la FAO reconnaissent que les estimations concernant les effets du rayonnement UV-B ou de l'O_3 sont entourées d'incertitudes faute de données observées et que les chercheurs se sont surtout basé sur des expositions artificielles des plantes aux radiations UV-B ou à l'O_3 sans pour autant tenir compte des conditions réelles du champ.

2.1.3. Les effets de l'élévation de la température sur la production agricole

Quant à l'élévation de la température, il est difficile de conclure que les effets sur la production agricole sont positifs ou négatifs à cause de la difficulté de séparer les effets physiologiques au niveau de la plante des effets écologiques. Une simulation spécifique à la culture et au site est ainsi conduite afin d'évaluer l'effet global "net" des augmentations de

[15] « Selon Hensen (1887), le plancton est l'ensemble des petits organismes vivants dans les eaux douces, saumâtres et salées, le plus souvent en suspension et apparemment passivement : gamètes, larves, animaux inaptes à lutter contre le courant (petits crustacés planctoniques et méduses), végétaux et algues microscopiques. » Ces organismes sont d'une importance cruciale, ils remplissent plusieurs rôles dans le cycle de la vie. Ils sont à la base de nombreux réseaux trophiques. Ils sont, aussi, à l'origine d'une biomasse considérable. De même, ils interviennent dans le cycle du carbone, via la photosynthèse, et en émettant après sa mort des molécules soufrées qui contribuent à la nucléation des gouttes d'eau, c'est-à-dire à la formation des nuages et des pluies. Amidon. (2011, novembre 10). *Wikipédia, l'encyclopédie libre.* Page consultée le 14, décembre, 2009 à partir de http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title= Plancton &oldid=71967950. /

température. Généralement, on estime que dans les régions froides et montagneuses, des températures plus élevées permettraient une décomposition accélérée de la matière organique du sol, des saisons de croissance des plantes et des moissons plus longues ainsi qu'une maturation précoce des cultures et la possibilité de remplir plusieurs cycles culturaux au cours d'une même saison conduisant à une augmentation des récoltes et de la production. Cependant, il est probable que l'élimination hivernale des ennemis des cultures sera réduite à hautes altitudes résultant en des pertes plus importantes de récoltes et en un besoin accru de pesticides. Dans les régions déjà chaudes, le réchauffement conduirait à une réduction de la productivité. Puisque, surtout pendant les mois chauds, une augmentation des températures peut accélérer la vitesse à laquelle les plantes libèrent du CO2 dans le processus de respiration, résultant une dégradation quant aux conditions pour la croissance nette.

Particulièrement, des expériences faites sur des plantes spécifiques stipulent que des températures plus hautes pourraient avoir un effet positif sur la croissance des plantes du type CAM. Elles renforceraient aussi l'effet fertilisant du CO_2 ainsi que son effet anti-transpirant sur les plantes C_3 et C_4 à moins que les plantes ne soient surchauffées.

Par ailleurs, lorsque les températures dépassent les valeurs optimales pour les processus biologiques, les cultures réagissent souvent négativement avec une forte baisse de la croissance nette et du rendement. Par exemple; si l'élévation de la température nocturne minimale dépasse la température diurne maximale (ce qui est un peu attendu à partir des projections), le stress de la chaleur pendant la journée peut être moins grave que le cas contraire, cependant, pendant la nuit on assisterait à une accélération de la respiration obscure ce qui diminuerait la production nette de biomasse et réduirait les rendements potentiels. Un autre effet important pourrait résulter des températures extrêmes conduisant au développement physiologique rapide, impliquant la maturation accélérée et la baisse de rendement. Enfin, les besoins d'irrigation de pointe seraient également en augmentation en raison des vagues de chaleur plus graves.

2.1.4. Les effets des changements dans le cycle hydrologique sur la production agricole

Le message que transmet la littérature au sujet de l'intensification du cycle hydrologique est que c'est un facteur critique dans la détermination de l'impact du changement climatique sur l'agriculture. En effet, d'un côté il est tout à fait naturel que

l'agriculture soit fortement influencée par la disponibilité en eau et d'un autre côté le changement climatique modifierait la pluviométrie, l'évaporation, le ruissellement et le stockage d'humidité du sol. Ainsi, la survenue d'un stress hydrique au cours de la floraison, de la pollinisation et du remplissage des grains est nocive pour la plupart des cultures et plus particulièrement le maïs, le soja et le blé. L'évaporation accrue du sol et la transpiration accélérée dans les plantes elles-mêmes créent du stress d'humidité. Par conséquent il sera nécessaire de développer des variétés ayant une plus grande tolérance à la sécheresse. Aussi, l'évaporation intensifiée augmenterait le risque d'accumulation de sel dans le sol. Cependant, des incertitudes subsistent autour de ces modifications. Même si l'on s'accorde sur l'augmentation des précipitations, par exemple, on est toujours sceptique quant à leurs intensités et leurs distributions spatiales. Autant dire que, là aussi, il est difficile de déduire que les effets seront positifs ou négatif. D'une manière générale, on estime que l'augmentation des précipitations dans les régions subhumides à semi-arides amplifierait la croissance des plantes, ce qui améliorerait la protection de la surface du sol et accroîtrait la production agricole pluviale. Toutefois des pluies supplémentaires pourraient compromettre l'assèchement et le stockage des récoltes dans les régions déjà humides. Par ailleurs, si l'augmentation des précipitations s'intensifie, la qualité et la quantité des ressources en terres et en eaux déclineraient, notamment du fait de l'augmentation du ruissellement, de l'érosion, des processus de dégradation des sols, de la fréquence des inondations et, probablement, des sécheresses. Parallèlement, des précipitations supplémentaires peuvent créer d'autres sites de stockage dans les rivières, lacs et réservoirs artificiels (sur l'exploitation agricole ou au niveau du sous-bassin) au bénéfice de l'approvisionnement rural en eau, d'une agriculture irriguée plus étendue ou plus intensive et des pisciculture à l'intérieur des terres dans certaines régions. Dans le même temps, certaines terres peuvent être mises hors de l'irrigation (avec perte de l'investissement préalable considérable) dans les régions où l'on prévoit une diminution des précipitations. Dans certaines régions semi-arides, par exemple, la demande en eau pour l'irrigation devrait augmenter en présence d'un climat plus chaud et d'une concurrence accrue sur les ressources en eau, entre l'agriculture et les régions urbaines ainsi que les utilisateurs industriels ; de plus, la baisse des nappes phréatiques et l'augmentation continue d'énergie nécessaire pour pomper l'eau pousserait à la pratique d'une irrigation plus couteuse et des investissements supplémentaires pour les barrages, les réservoirs, les canaux, les puits, les pompes et la tuyauterie pour développer des réseaux d'irrigation dans de nouveaux endroits.

Les effets sur les ressources en eau et la répartition de l'eau des rivières et lacs internationaux peuvent aussi être très importants, surtout du point de vue politique.

2.1.5. Les effets d'autres facteurs sur la production végétale au titre du changement climatique

Plusieurs autres facteurs peuvent agir sur l'agriculture au titre du changement climatique. Nous citons comme exemple les impacts de la variabilité accrue du climat, comme les inondations et la sécheresse, ainsi que l'élévation du niveau de la mer.

Les premiers, sont susceptibles d'augmenter significativement les pertes de production, au-delà des estimations fondées uniquement sur les changements dans les variables climatiques. L'Europe par exemple a connu un événement climatique extrême au cours de l'été 2003, avec des températures allant jusqu'à 6°C au-dessus des moyennes et des déficits des précipitations allant jusqu'à 300 mm. Les pertes économiques non assurées pour le secteur de l'agriculture dans l'Union européenne ont été alors estimés de 13 milliards d'euros. Ainsi, la production agricole est également soumise aux incertitudes conduites par les événements extrêmes. Il serait donc important de quantifier la fréquence de ces évènements et d'identifier leurs impacts potentiels sur les écosystèmes. Cependant, peu d'analyses se sont intéressées aux effets de la variabilité accrue du climat sur la production végétale.

L'élévation du niveau de la mer peut, aussi, avoir des conséquences graves sur l'agriculture, surtout dans le cas des basses terres côtières. On estime qu'une telle augmentation pourrait, par exemple, entraver le drainage des eaux de surface et des eaux souterraines, et pousser les eaux de mer à s'infiltrer dans les estuaires et les aquifères.

2.1.6. Discussion : incertitudes irréductibles

Ainsi, beaucoup des effets du changement de climat sur l'agriculture peuvent être déduits à partir de la relation de dépendance de la production agricole vis-à-vis des conditions climatiques. Ces effets peuvent être favorables dans certaines régions et défavorable dans d'autres.

Toutefois, ces effets sont contestables. D'abord, comme nous l'avons transmis tout au long de cette section, il est difficile de mener des expériences sur les effets isolés des divers

facteurs climatiques, à cause de la complexité des processus de développement au niveau de la plante ainsi que des interactions entre ces différents facteurs.

De plus, si l'étude des effets des différents facteurs climatiques au titre du seul changement climatique sur l'agriculture est de plus en plus avancée et améliorée, ces facteurs ne se réalisent pas séparément mais plutôt simultanément. En fait, au niveau des différents processus de la plante, ces facteurs interagissent et parfois sont antagonistes. Dans la littérature, on s'intéresse de plus en plus à l'étude conjointe de ces différents facteurs et avec d'autres facteurs afin d'appréhender l'impact final du changement climatique sur la production végétale. La liste des interactions est longue, les facteurs fréquemment étudiées dans la littérature sont : le CO_2[16], la température et les précipitations. Généralement, on estime que le changement climatique projeté pour les décennies à venir modifie et limite les conséquences directes du CO_2 sur les cultures et les espèces végétales des pâturages. On estime, par exemple, qu'une température élevée pendant la période critique de la floraison d'une culture peut diminuer les effets positifs du CO_2 sur le rendement en réduisant par ailleurs le nombre de grains, leur taille et leur qualité et augmente la demande en eau pendant la période de croissance. Par ailleurs, les effets projetés demeurent incertains surtout parce qu'ils dépendent de manière significative du scénario considéré.

En plus, la culture est soumise aux effets écologiques de son environnement et à l'intervention humaine. En fait, l'agriculteur a toujours essayer d'ajuster son exploitation aux conditions climatiques et aux autres facteurs de l'environnement en variant le mélange des cultures, les dates de plantation et de moisson, le programme d'irrigation, ou par le renouvellement complet des cultures et l'application d'engrais et pesticides, atténuant ainsi les effets potentiels du changement climatique. L'évaluation de l'ampleur des effets du changement climatique au niveau de la culture est alors d'autant plus limitée que les changements ne se produisent pas de manière brutale et que ces effets ne se produisent pas dans un cadre fixe mais dans un cadre soumis à un forçage économique et technologique. Ainsi traiter la culture indépendamment des autres systèmes serait une approche trop fragmentaire. Les risques associés au changement de climat se situent dans l'interaction de plusieurs systèmes à variables multiples qui doivent être considérées ensemble et qui ne sont pas stables à travers le temps.

---

[16] Le CO_2 étant à la fois un facteur déterminant dans les études du changement climatique (comme nous l'avons précisé plus tôt) et de l'agronomie comme étant un élément nécessaire à la nutrition et la croissance de la plante (photosynthèse et respiration) ;

Dans la littérature, plusieurs approches ont été développées afin d'agréger la réponse des plantes à l'échelle régionale tout en prenant en considération les forçages économiques et climatiques. Dans ce qui suit nous présentons les approches les plus connues.

2.2. L'approche expérimentale

Dans cette approche, on a recours aux modèles de cultures pour mener l'étude prospective des impacts du changement climatique sur l'agriculture. Il est donc nécessaire d'examiner le fonctionnement de ces modèles afin de comprendre comment les changements climatiques peuvent être pris en compte. Pour cela nous proposons une présentation et un rapide historique des modèles de cultures, puis nous examinons l'utilisation de ces modèles dans les études d'impacts du changement climatique sur l'agriculture.

2.2.1. Conception et chronologie de développement des modèles de cultures

Plusieurs modèles de cultures existent dans la littérature. Dans ce paragraphe, nous offrons une synthèse examinant les principes de base des modèles de cultures, ainsi que leurs applications au changement climatique.

2.2.1.a. Conception des modèles de cultures

La conception des modèles de cultures consiste en une simulation du système sol-couvert végétal-atmosphère reposant sur le fonctionnement carboné des plantes. Le rapport entre la conception des modèles de culture et la réponse de la plante au CO_2 est lié au rôle important qu'occupe celui-ci dans la croissance de la plante. Ainsi, dans la majorité des études on utilise les modèles de cultures pour déterminer l'effet simultané d'un accroissement futur du CO_2 sur les cultures. En fait, l'effet positif de l'accroissement du CO_2 sur la production végétale est assimilé depuis bien longtemps (1770-1850) et a été largement exploité à une échelle commerciale dans l'amélioration de la productivité agricole, à partir des années 1930[17].

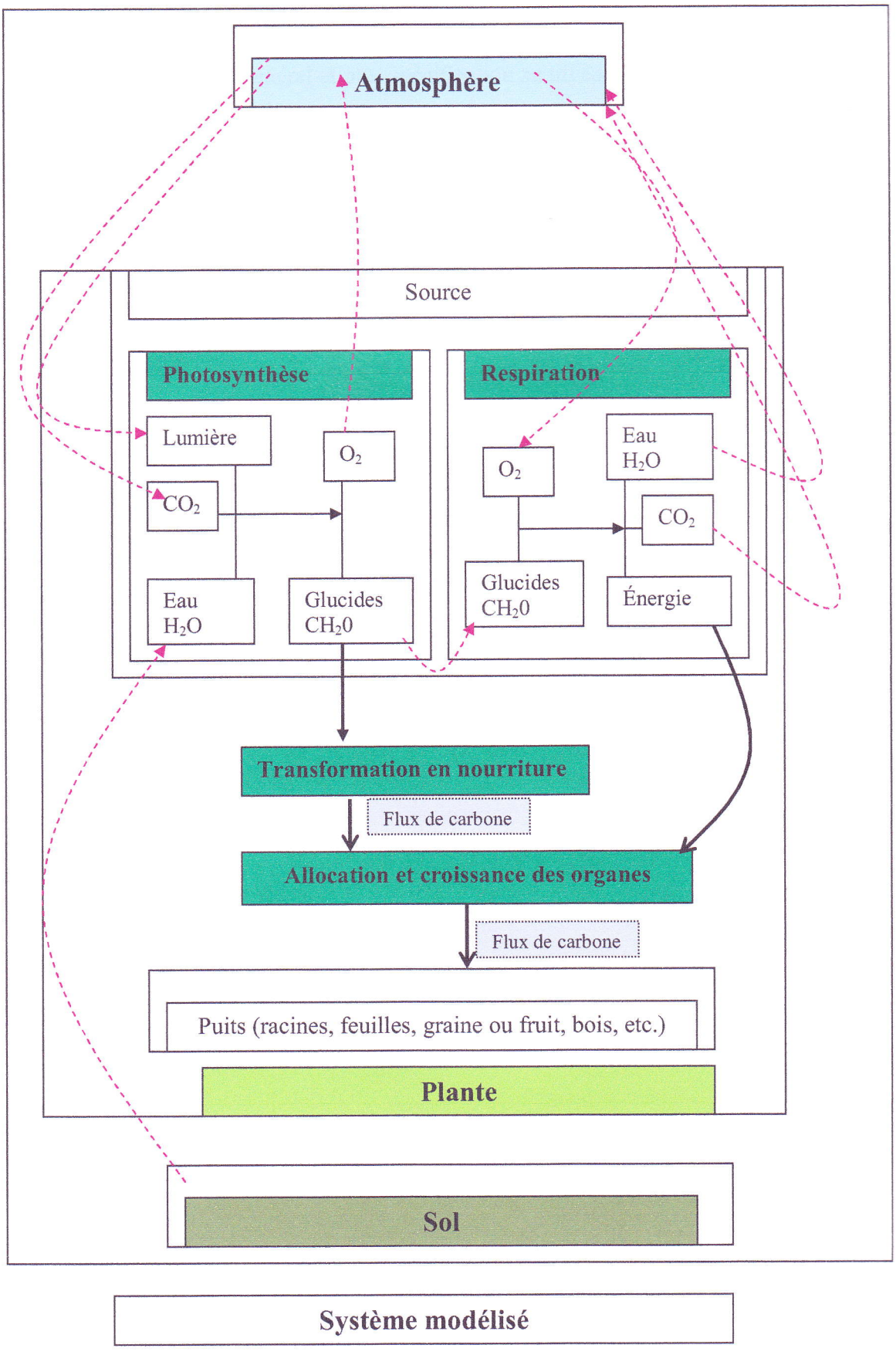
[17] Nederhoff E.M. (1994), « Effects of CO_2 on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops», Ph.D. thesis, Wageningen, ISBN 90-5485-318-2; cité dans, Tubiello F.N., Ewert F. (2002),

Ces modèles comportent des éléments différents. Tubiello et Ewert (2002) montre qu'« ils peuvent être regroupés de manière sommaire par: (i) la phénologie des plantes en fonction de la température accumulée et de la photopériode, (ii) la photosynthèse et la respiration, l'équilibre de l'eau, les N-absorption et distribution ainsi que les effets d'autres facteurs, (iii) le partage, l'accumulation de biomasse et de l'organe de croissance. [18]». Dans la figure suivante nous illustrons, de manière générale, le fonctionnement des modèles de culture en se basant sur le travail de Brisson et al. (2009).

«Simulating the effects of elevated CO_2 on crops: approaches and applications for climate change», European Journal of Agronomy, volume18, issues 1-2, 57-74. 07 Décembre 2007. Elsevier [PDF]. linkinghub.elsevier.com/retrieve/PII/S1161030102000977

[18] Tubiello F.N., Ewert F. (2002), «Simulating the effects of elevated CO_2 on crops: approaches and applications for climate change», European Journal of Agronomy, volume18, issues 1-2, 57-74. 07 Décembre 2007. Elsevier [PDF]. linkinghub.elsevier.com/retrieve/PII/S1161030102000977

Figure 2.1. Principe du fonctionnement des modèles de cultures



2.2.1.b. Chronologie de développement

La mise en équation de la réponse des cultures aux différentes conditions de son environnement au niveau général et plus spécification au niveau de la concentration de CO_2 a exigé le recours aux résultats d'expériences détaillées, à pas journalier, faites sur des cultures ou/et des variétés de cultures dans des sites spécifiques qui se situent à la fois dans les principales régions de production et dans celles qui sont vulnérables à basse, moyenne et haute latitudes ou dans des laboratoires sous des conditions contrôlées ou semi-contrôlées. Au fur et à mesure que les moyens de mesure et d'observation évoluaient et que la compréhension de la phénologie et l'écophysiologie des plantes s'améliorait, on introduisait de plus en plus de processus simulant les interactions entre les différentes composantes du système modélisé. Dans le tableau suivant nous dressons les principaux processus développés dans les modèles de cultures, selon le travail de Tubiello et Ewert, (2002). Cette évolution, a donné naissance à des modèles de cultures répondant à des préoccupations pointues et d'actualité

Tableau 2.1. Les principaux processus développés dans les modèles de cultures

Epoque	Principaux processus développés	Références
Débuts du 20ième siècle	Développement de modèles de la photosynthèse au niveau de la feuille : description des courbes de réponses photosynthèse-lumière.	Blackman (1919)
1950-1960	Développement de calcul au niveau du couvert végétal : intégration de l'interception de la lumière et des taux d'assimilation de carbone.	Monsi et Saeki (1953); De Wit (1965); Duncan et al. (1967); Hesketh et Baker (1967)
Les années 70	Développement et application du concept « efficacité de l'utilisation du rayonnement » (en anglais radiation-use efficiency ; RUE) et estimation et application de la « maintenance de la respiration » ; aux modèles de croissance de la couverture végétale.	Sinclair et al. (1976); Monteith (1977); Norman (1979) Penning De Vries (1975); De Wit (1978)
Les années 70 et débuts des années 80	Développement des premiers modèles de la photosynthèse considérant le CO_2 comme variable explicite : introduction d'hyperboles décrivant la dépendance de la photosynthèse des feuilles sur la lumière et la concentration de CO_2 ; échelonnées au niveau de la couverture végétale. Publication des modèles biochimiques de photosynthèse intégrant les effets directs du CO_2 sur la photosynthèse au niveau des feuilles.	Acock et al. (1971); Thornley (1976); Acock et al. (1978), Charles-Edwards (1981); Acock et Allen (1985); Goudriaan et al. (1985) Charles-Edwards (1981); Farquhar et al. (1980); Farquhar et von Caemmerer (1982); Ball et al. (1987)
Depuis les années 80	Amélioration des échelles d'étude du niveau de la feuille ou de la cellule au niveau de couverture végétale ; introduction des distributions d'azote affectant la capacité de photosynthèse des feuilles ; raffinement des interactions température-CO_2 et eau-CO_2 ; etc.	Long (1991); Boote et Loomis (1991); Norman (1993); Boote et al. (1997)

En effet, les premiers modèles ont été créés dans le but d'améliorer la compréhension de la croissance des cultures dans les conditions offertes par leur environnement permettant une adaptation des cultures aux besoins et par la suite une optimisation de leur rendement et de leur qualité {SUCROS (Bouman et al., 1996), ARCWHEAT (Weir et al., 1984) et WOFOST (Van Diepen et al. 1989)}. Pour les construire on a exploité les travaux sur la photosynthèse et la respiration de Wit et al. (1970).

Ensuite, on a intégré les opérations agricoles afin de créer un système d'aide à la décision à l'agriculteur, avec les combinaisons agronomiques, techniques et économiques qui

permettraient d'atteindre une production potentielle ou un niveau de profitabilité potentielle {les modèles GOSSYM / GLICYM (Whisler et al., 1986, McKinion et al., 1988), CERES (Ritchie et Otter, 1985) dont dérive le modèle australien APSIM (McCown et al. 1996), SOYGRO (Jones *et al.*, 1989) et la famille de modèles CROPGRO (Boote et al., 1998, Jones et al., 2002)}. De nos jours, on assiste au développement de modèles de culture à préoccupations agro-environnementales {EPIC (Williams et al., 1984), CROPSYST (Stockle et al., 1994), STICS (Brisson et al., 1998, 2003, 2009)}.

2.2.2. Méthodologie d'application des modèles de cultures dans les études de l'impact du changement climatique sur l'agriculture

2.2.2.a. Présentation de la méthodologie

L'application des modèles de culture dans l'étude de l'impact du changement climatique est réalisée en liant ceux-ci à d'autres modèles développés dans des disciplines différentes, notamment, la climatologie, l'agronomie et l'économie. L'objectif de cette approche interdisciplinaire est d'améliorer la compréhension des effets interactifs biophysiques et socio-économiques pouvant résulter du changement climatique. Les modèles en question sont employés dans un enchaînement causal depuis les déterminants des émissions de gaz à effet de serre jusqu'aux impacts économiques du changement climatique sur la culture spécifiée.

Généralement, les modèles de cultures sont utilisés pour estimer l'impact physique de variations dans les conditions climatiques ou l'accroissement de CO_2 en termes de rendement à l'échelle d'une région et pour un scénario climatique. Le choix des modèles de culture dépend du type de plante et des processus simulés par le modèle. La famille de modèles de simulation CERES (CERES-MAICE, CERES-WHEAT, CERES-SOYBEAN…) sont les plus employés (Adams et al., 1988 ; Rosenzweig et al., 1993 ; Adams et al. 1999 ; Hatch et al. 1999 ; Ching Cheng, 2002 ; Jonesa, 2003) pour étudier les effets sur la production des céréales . EPIC est aussi largement utilisé par plusieurs chercheurs dans plusieurs travaux étudiant l'impact sur les céréales, par exemple Kumar et Parikh (1998) et Allisson et al. (2006). Dans ces travaux l'utilisation d'EPIC vient aussi de la volonté des chercheurs de mettre en évidence le rôle de l'érosion du sol qui est l'un des processus simulés dans le modèle.

Comme nous l'avons explicité auparavant, ces modèles décrivent les processus géophysiques de manière exhaustive sans pour autant considérer les aspects techniques et économiques avec la même attention. Le peu d'éléments économiques de la production agricole intégrés dans ces modèles sont des données exogènes fournis, le plus souvent, par des experts ou repris depuis la littérature existante. Ceci fait que les résultats de simulation de ces modèles diffèrent fortement de la réalité. Dans ce sens, Reilly (1996) montre qu'imposer un changement de climat aux modèles de culture donnerait une estimation sur la manière dont la « production potentielle » peut changer suite au changement climatique. Par conséquent, une analyse économique de ces estimations, qui intègre plus largement les caractéristiques économiques et techniques du milieu étudié, serait préférable. Cette analyse constitue la dernière étape de l'approche expérimentale. Elle est basée, le plus souvent, sur des modèles économiques de fondement néoclassique d'équilibre partiel ou général selon les objectifs de l'étude en termes de résolution géographique et de secteur. Dans l'un des premiers travaux agro économiques, Adams et al. (1988) utilisent un modèle multi-produit d'équilibre partiel appelé aussi modèle d'équilibre spatial pour traiter les impacts du changement climatique sur le secteur agricole dans différents régions de l'Ouest des Etats-Unis. De même, Ching-Cheng Chang (2002) utilise le modèle TASM de la même famille de modèles que celui utilisé par Adams et al. (1988) pour étudier l'impact du changement climatique sur l'agriculture à Taïwan. Pour étudier l'impact du changement climatique au niveau de tous les secteurs de l'économie de l'Inde, Kumar et Parikh (1996) utilisent le modèle AGRIM qui a une structure d'équilibre générale calculable. Toujours dans l'idée de l'étude de l'impact du changement climatique sur l'agriculture au niveau de tous les secteurs de l'économie une étude plus récente réalisée par Reilly et al. (2007), utilise le modèle d'équilibre général calculable EPPA ; un modèle de commerce alimentaire mondial « *world food trade model* », pour examiner les conséquences du changement climatique aux niveaux global et régional. Rosenzweig et al. (1993) utilise le modèle d'équilibre générale calculable BLS, qui est aussi un modèle de commerce alimentaire mondial « *world food trade model* » pour étudier l'impact du changement climatique à l'échelle mondiale mais au niveau du seul secteur agricole. Ces modèles, contrairement aux précédents, reposent plutôt sur les concepts économiques traditionnels d'optimisation et d'accumulation de capital et omettent les dynamiques environnementales. Les techniques de modélisation et de résolution de ces modèles diffèrent de type programmation mathématique ou économétriques et synthétiques selon le type du modèle considéré, la portée géographique et le secteur traité. Adams et al. (1999) adoptent la technique de résolution de programmation mathématique pour le modèle

d'équilibre partiel ASM choisie pour étudier l'impact du changement climatique sur le secteur agricole. Allison (2006) utilise la technique économétrique (méthode des moindres carrés généralisées) pour étudier l'impact économique du changement climatique sur le blé au niveau de la plaine de Huang-Hai de la Chine. Hatch et al. (1999) utilisent un algorithme de programmation linéaire pour formaliser le modèle économique d'équilibre partiel PNTPLAN dans le cadre d'une étude des effets du changement climatique sur l'agriculture au Sud Est des Etats-Unis.

La principale difficulté qui caractérise cette étape de la méthodologie provient de l'internalisation des processus, en d'autres termes, la construction des fonctions de production qui font le lien avec l'économie. Les modèles de cultures sont alors utilisés pour construire des fonctions de production qui font ce lien. Il s'agit d'une trajectoire permettant de synthétiser les impacts d'un changement du climat dans une localité fixée et durant une période donnée. L'écriture de cette fonction nécessite d'abord une évaluation de l'impact physique d'une variation discrète d'une ou plusieurs variables d'intérêt dans chaque région considérée.

Dans le cas de la méthode agro économique, cette fonction est évaluation est réalisée sur la base de données obtenues grâce à des expériences soigneusement contrôlée effectuées dans des laboratoires ou des sites agricoles bien déterminés. Dans ces expériences seuls les niveaux de climat ou d'autres variables d'intérêt (comme le CO2) sont ajustés, de sorte à garder les mêmes conditions expérimentales, pour estimer les impacts sur la productivité des cultures. Dans le cas de l'analyse des zones agro écologiques, cette fonction est réalisée à partir de données physiques et techniques de production disponibles, mises en relation géographique moyennant les Systèmes d'Informations Géographiques[19] (SIG). L'observation de l'évolution des rendements de culture se fait sur la base des changements d'une zone agro écologique[20] à une autre étant donnée que chacune d'elles est définie par ses potentialités (climat et sols) et non pas en ajustant les variables d'intérêt.

---

[19] « *les systèmes d'information géographique sont de puissants outils de gestion et d'analyse de données et d'informations de base, statistiques, spatiales et temporelles requises pour fournir les éléments de décision de l'utilisation des terres; qu'ils traitent de manière souple, variée et intégrée, en produisant aussi bien des cartes, que des tableaux ou des textes.* » Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)-Service des sols - ressources, aménagement et conservation-Division de la mise en valeur des terres et des eaux de la FAO, 1997, « Zonage Agro-écologique – Directives », Bulletin Pédologique de la FAO, no. 73. FAO [document en ligne]. 25 décembre 2010. http://www.fao.org/docrep/w2962f/w2962f00.htm

[20] « *Les zones agro écologiques sont des unités cartographiques de ressources en terres, définies en termes de climat, de géomorphologie et de sol, et/ou du couvert végétal et possédant un éventail spécifique de potentiel et de contraintes pour l'utilisation des terres* ». Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)-Service des sols - ressources, aménagement et conservation-Division de la mise en valeur des terres et

2.2.2.b. Formalisation

Une formalisation de cette approche est proposée dans le travail de Dinar et al. (1998). Dans ce qui suit, nous nous basons sur cette proposition pour expliciter au mieux le principe de fonctionnement de la méthodologie expérimentale.

En fait, le modèle de culture est un modèle structurel intégrant deux phénomènes de base : le rendement Q_i de la culture i et la part de surface H_i de la culture i dans l'exploitation agricole.

À partir des résultats appropriés de la recherche agronomique, on peut admettre que le rendement par hectare d'une culture peut être exprimé en fonction du climat, du sol et de plusieurs autres inputs.

On fait alors l'hypothèse de fonctions de production indépendantes qui respecte les « bonnes » propriétés[21] ;

$$Q_i = Q_i (K_i , E) \quad i = 1,...,n \quad (1)$$

Où ; $K_i = [K_{i1},\ldots,K_{ij},\ldots,K_{iJ}]$ est le vecteur de tous les intrants pour la production de la culture i ; K_{ij} est l'input j (j = 1,...,J) utilisé pour la production de la culture i, et $E = [E_1,...,E_m,\ldots, E_M]$ est le vecteur des inputs environnementaux exogènes, tel que la température, les précipitations et le sol, communs à la parcelle de production considérée.

En outre, la formalisation de l'approche expérimentale est fondée sur la technique de la fonction de production.

On peut estimer la réponse actuelle des rendements au climat en comparant les rendements dans différentes localités (ou en ajustant les paramètres climatiques tout en gardant fixe les autres variables) :

$$Q_i = \hat{Q}_i (K_i , E) + u_{1i} \quad (2)$$

Où $\hat{Q}_i$ est le rendement estimé pour la culture i, et u_{1i} est un terme d'erreur.

La fréquence de planter une culture donnée dépend de la rentabilité relative de celle-ci, des conditions de milieu et d'autres contraintes globales. La part d'une culture donnée dans une surface d'exploitation agricole peut être spécifiée comme suit ;

$$H_i = H_i (E, Z, Q_i) + u_{2i} \quad (3)$$

Où u_{2i} est un terme d'erreur.

---

des eaux de la FAO, 1997, « Zonage Agro-écologique – Directives », Bulletin Pédologique de la FAO, no. 73. FAO [document en ligne]. 25 décembre 2010. http://www.fao.org/docrep/w2962f/w2962f00.htm

[21] La fonction de production est continue, concave admettant des dérivées partielles premières continues.

La part de surface de chaque culture dans une surface (H_i) est fonction des conditions du milieu E, de l'accès au marché (Z), et des rendements de récolte. Puisque Q_i inclut le terme d'erreur u_{ii}, ce sont les valeurs estimés de Q_i qui devraient être utilisées dans le modèle de part de culture.

À leur tour, ces résultats sont incorporés dans les modèles économiques et de circulation générale (MCG) pour prédire l'ampleur et la portée des impacts. Dinar et al. (1998) décrit le programme suivant du producteur de l'exploitation agricole.

Pour une exploitation agricole donnée, avec l'hypothèse de la maximisation du profit, l'objectif est :

$$\text{Max } \pi = \sum_i H_i \cdot \left(P_i Q_i - \sum_j w_j . K_{ij} \right) \quad (4)$$

sous les contraintes auxquelles faire face l'exploitation agricole, telle que la disponibilité en eau, les conditions du climat et du sol.

Dans ce programme (4), π est le revenu net par unité de terre, H_i est la part de surface de la culture i, P_i est le prix du marché, K_{ij} est le total de l'intrant j utilisé pour la production de la culture i, et w_j est le coût unitaire de l'intrant j.

Ainsi, en estimant le profit qui maximise le niveau d'intrants et de production pour chaque culture, on peut estimer le revenu net de chaque culture. On peut estimer le revenu net par hectare dans chaque région en combinant les revenus nets de l'ensemble des cultures. Ainsi, associer les impacts nets à travers les parcelles mènerait à l'estimation de l'impact net régional.

2.2.3. Discussions : naissance de la méthode Ricardienne

L'utilisation des modèles de culture permettrait une meilleure évaluation de la production agricole non seulement par les caractéristiques climatique et pédologique explicitées mais aussi par le nombre de processus de croissance de la plante simulés. C'est aussi la seule méthode courante capable d'inclure les effets fertilisants du CO_2 qui semblent réduire effectivement les impacts du changement climatique (Dinar et al., 1998). D'ailleurs, un postulat solide et important provenant des laboratoires et des expériences sur le terrain montre que les niveaux élevés de dioxyde de carbone ont un effet fertilisant et par conséquent

peuvent stimuler la croissance et rendre les plantes plus résistantes. Selon Reilly et al. (1996), le doublement de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère augmenterait les rendements de culture de 30% en moyenne. Bien que l'importance exacte de cette fertilisation soit encore incertaine, les résultats positifs semblent acquis dans toutes les configurations géographiques (comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre).

Par ailleurs, leur capacité à générer des fonctions de réponse qui assurent la liaison avec les modèles économique permet de tenir compte des aspects physiques, techniques et économiques de la production agricole. Ces facultés expliquent le nombre important d'études d'impact du changement climatique sur l'agriculture utilisant les modèles de cultures dans la littérature. Selon une étude réalisée par Tubiello et Ewert (2002) le nombre d'études évaluant les effets du changement climatique ou de l'accroissement de CO_2 sur la production agricole, depuis 1995, a atteint les milles publications. Cependant ces études sont le sujet de plusieurs critiques au niveau des disparités dans les cas traités et de la démarche même de l'approche.

2.2.3.a. Disparités

Ces travaux se sont plutôt concentrés sur l'étude de l'impact du changement climatique sur des cultures et des pays spécifiques. Ainsi, étant donné que chaque plante exige une expérimentation étendue et que la plupart des plantes simulées par les modèles de cultures sont les céréales, presque toutes les études se sont concentrées sur ce type de culture (Tubiello F.N. et Ewert F., 2002).

En fait, même dans les travaux qui se sont intéressés à un vaste territoire, comme le travail de Rosenzweig et Parry (1994), seules les céréales ont été considérées. Des exceptions notables existent avec l'un des travaux notoires d'Adams et al. (1999) qui inclut, en plus des céréales, les agrumes, et quelques légumineuses, en employant plusieurs modèles de cultures {CERES-MAICE, CERES-WHEAT, SIM-POTATO (Hodges et al. 1992) et GROPGRO)} pour étudier l'impact du changement climatique sur l'agriculture aux Etats-Unis. Il y a aussi le travail plus récent de Hatch et al. (1999) qui ont étudié une large gamme de cultures (des agrumes, des légumineuses, des fruits, le pâturage) du secteur agricole du Sud Est des Etats-Unis en utilisant la famille de modèles de culture CERES et GROPGRO. De plus, les cultures pérennes sont inexistantes dans les travaux utilisant les modèles de cultures. En fait, les études qui ont pour objectif d'étudier les cultures pérennes utilisent souvent des techniques économétriques par manque de fiabilité dans les modèles de cultures. Lobell et al. (2006) par exemple, qui étudient l'impact du changement climatique sur les raisins de cuve, les amandes,

les raisins de table, les oranges, les noix et les avocats utilisent des modèles statistiques de calcul de rendement.

Par ailleurs, la plupart de ces études se sont focalisées sur les pays développés, notamment les Etats-Unis (Adams et al. 1989, 1990, 1993, 1999; Easterling III et al. 1993; Kaiser et al., 1993; Cline W.R., 1992). Alors que le nombre d'applications aux pays en voie de développement est moins important (Kumar et Parikh, 1996 ; Jones et al., 2003; Allisson et al., 2006). De plus, les analyses qui ont réuni tous les pays du monde sont beaucoup moins importantes, avec Ronsenzweig et Parry (1994), Dinar et al. (1995) Reilly et Hohmann (1996) et Reilly et al. (2007). Ces travaux s'accordent sur la vulnérabilité de l'agriculture des pays en développement au changement climatique, lorsque la température est déjà élevée et l'eau insuffisante. En conclusion, un accroissement de la température rendrait beaucoup de zones agricoles moins productives et même complètement inaptes à l'exploitation agricole surtout dans le cas des exploitations agricoles à bas niveau de capital, incapable de subsister sans les nouvelles technologies et stratégies d'adaptation (Reilly, 1997). Cependant, ces résultats sont contestés à cause de la conception même et de la démarche de la méthodologie d'estimation.

2.2.3.b. les controverses quant à la méthodologie d'estimation

D'un côté, les auteurs de ces travaux s'accordent eux-mêmes à reconnaître que les résultats de simulation du changement climatique utilisant les modèles de cultures peuvent surestimer les impacts sur l'agriculture. En fait, les modèles de cultures reposent le plus souvent sur les résultats d'expériences, menées dans des conditions optimales faisant abstraction des facteurs caractérisant la ferme, tel que les parasites, les mauvaises herbes, les nutriments, la compétition sur les ressources en eau, le sol et la qualité de l'air, en d'autres termes, une représentation idéalisée de l'opération culturale. Ce problème relève surtout de la méthode agro économique puisque dans le cas de la méthode d'analyse agro écologique on suit une démarche environnementale. Dans ce dernier cas, l'étude des impacts sur le rendement intègre les conditions du milieu soigneusement étudié et la distribution géographique des zones dans les pays en voie de développement (FAO, 1992). Néanmoins, le cadre considéré est aussi normalisé pour la caractérisation du climat, du sol et des conditions du terrain pertinentes à la production agricole. Dans les deux cas, comme le souligne Reilly et al. (1997) la représentation idéalisée de l'opération culturale et de l'exploitation agricole tend à donner des résultats forts différents de l'expérience actuelle des exploitations agricoles qui fonctionnent dans les conditions du monde réel. D'un autre côté, l'évaluation de l'impact du

changement climatique passe par la superposition de modèles issus de disciplines différentes, chacun avec sa propre gamme d'inexactitude, amplifiant la portée globale de l'incertitude dans le résultat final (Rosenzweig et Parry, 1994).

D'autres critiques ont porté sur la prise en compte de l'adaptation dans le processus d'évaluation de l'impact du changement climatique et ont été relevée surtout dans les travaux de Mendelsohn et al. (1994) et Dinar et Mendelsohn (1999). Les auteurs reprochent à cette méthode de ne pas tenir compte d'un ajustement total des conditions de l'environnement par l'agriculteur. Ce point est apparu particulièrement important dans un sondage de la littérature ayant pour objectif d'évaluer l'état des connaissances en ce qui concerne les impacts du changement climatique ; Hitz et Smith (2004) affirment que dans tous les travaux sur les études d'impact, en particulier les études sur le secteur agricole, l'adaptation réduirait l'effet de la sensibilité au climat de manière significative.

Selon Dinar et Mendelsohn (1999) le principal inconvénient de l'approche fondée sur l'expérience est sa défaillance à modéliser les innombrables adaptations faites par les agriculteurs en réponse aux variations des conditions environnementales. En effet, la plupart de ces études estiment simplement l'impact du changement de température sur les rendements agricoles. Selon Kumar et Parikh (1996), la simulation des changements de rendement dans la modélisation de la structure économique suppose forcément des changements dans les niveaux de production et de prix. En fait, de tels changements provoqueraient une foule d'autres changements, tel que les mouvements de main-d'œuvre et du capital entre les différents secteurs. Les changements de rendement imposés au système sont supposés croître graduellement : si par exemple le premier changement commence en 1990, ils atteindront leur maximum en 2060. Ceci permettrait aux agents économiques d'ajuster leurs comportements tout le long de cette période. Ils concluent que, bien que, les niveaux d'adaptation spécifique au secteur de l'agriculture n'aient pas été pris en considération, les adaptations possibles par les agents économiques ont été modélisées.

D'autres modèles, autorisent des scénarios d'adaptation spécifiques. Ces scénarios comprennent les changements techniques tel que les modifications des dates de semis, les apports d'engrais, l'irrigation, les changements dans le calendrier des opérations agricoles sur le terrain, la substitution des enchaînements de culture, la mixtion des cultures et des variétés de cultures, et les technologies d'irrigation (Easterling et al., 1991 ; Rosenzweig et al., 1994 ; Kaiser et al., 1994 ; Bâti et al., 1994 ; Reilly, 1994 ; 1995 ; Reilly et al., 1996 ; Kapetanaki et Rosenzweig, 1997 ; El-Shaer et al., 1997 ; Iglesias et Minguez, 1997 ; Kaiser et al.,1999a, b). Les adaptations retenues sont fondées sur le fait que les agriculteurs utilisent les pratiques de

gestion les plus répandues et les plus efficaces propres à la région ou à la zone concernée durant la période d'étude. Pourtant, les estimations de changements dans les rendements se font pour des scénarios de changement climatique de longues périodes. Ainsi, les résultats d'estimation auraient tendance à sous-estimer certains aspects positifs (Adams et al. 1999).

Certaines options de changement technique impliquent des compétences et des moyens qui dépassent ceux de l'agriculteur. Nous citons par exemple ; l'introduction de nouvelles variétés des cultures ou de nouvelles espèces, la conservation de l'humidité du sol grâce à des méthodes appropriées de travail du sol, et l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation (Rosenzweig et Hillel, 1995) ; si ces scénarios prennent en considération l'évolution technologique, elles nécessiteraient des investissements lourds dans la recherche et le développement.

Ces scénarios sont considérés de manière hypothétique (Reilly et al.1997) indirectement au niveau de l'estimation du rendement, par la simulation des changements dans les paramètres de développement et/ou de croissance des diverses cultures. Par exemple, dans le travail de Rosenzweig et al. (1993) les simulations d'irrigation dans les modèles de cultures supposent que la capacité d'irrigation est automatique sur l'exploitation agricole quand l'eau des plantes disponible a chuté à 50% et 100% en termes d'efficacité de l'irrigation. Incorporer ces scénarios lors de l'estimation des changements dans les rendements rend l'interprétation de leurs effets difficile.

Ces critiques font que, bien que l'approche offre une lignée de base pour l'évaluation des impacts du changement climatique sur l'agriculture, les résultats présentent des biais et auront tendance à surestimer les impacts. C'est en se fondant sur les critiques au niveau de l'intégration limitée de l'adaptation que Mendelsohn et al. (1994) ont développé la méthode Ricardienne ; nous expliciterons cette réflexion dans ce qui suit.

2.3. La Méthode Ricardienne

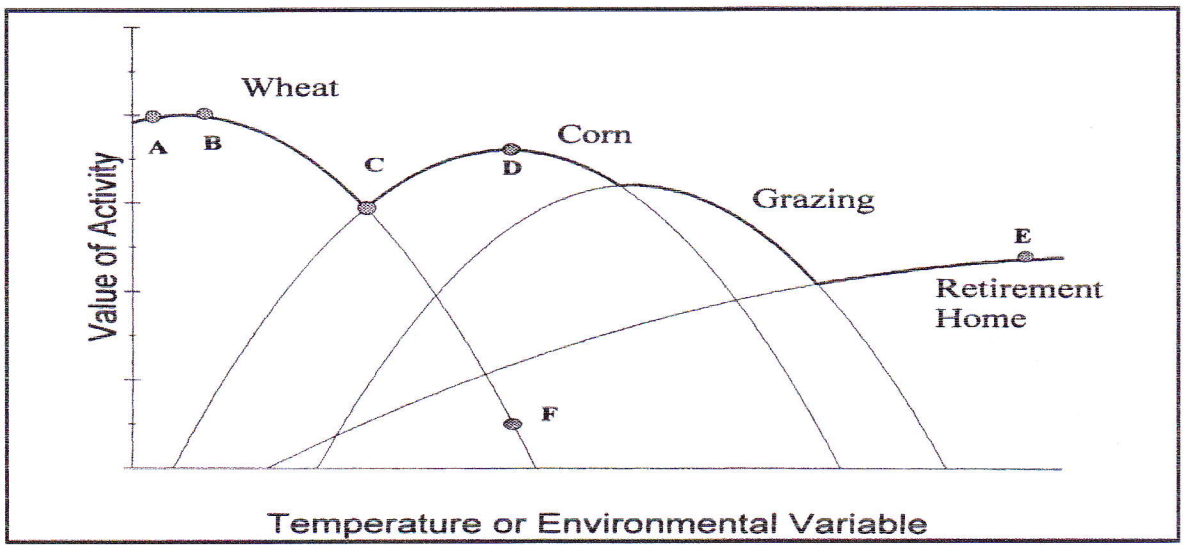
L'approche ricardienne, développée initialement pour le cas des Etats-Unis par Mendelsohn et al. (1993) examine les impacts directs des facteurs environnementaux tels que le climat sur la valeur foncière. Après avoir explicité le fondement théorique de l'approche, nous nous intéresserons à sa présentation formelle et à la technique de modélisation.

2.3.1. Fondements théoriques

Mendelson et al. (1993) ont développé cette méthode en partant du fait que la production agricole d'une région donnée ou d'une classe de sols dépendrait des prix de liquidation du marché final. Par exemple, les ajustements du marché peuvent contribuer à déplacer la production de base d'une région vers des lieux où l'avantage comparatif de ces produits s'améliore, alors que dans les zones où l'avantage comparatif baisse, le travail et le capital peuvent être déplacés de l'agriculture vers d'autres secteurs plus productifs.

Pour mieux expliciter ce principe, Mendelsohn et al. (1993) étudient le fonctionnement des fonctions de production de différentes cultures. La figure 2.3 représente les valeurs hypothétiques des outputs de quatre différents types de culture en fonction d'une seule variable environnementale (la température) sur la base de l'approche de la fonction de production (Mendelsohn et al. (1993)), dans le but d'illustrer la nature générale du biais des études qui utilisent la fonction de production.

Figure 2.3. Evolution de la fonction de production en fonction de la température



Source: Mendelsohn, Robert, William D. Nordhaus, et Daigee Shaw. 1994. "The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis." *American Economic Review* 84 (4): pp 753- 71.

Dans chaque cas, les auteurs supposent que cette approche produit une estimation exacte de la valeur économique de l'activité comme une fonction de la température. Les quatre courbes fournissent un exemple simplifié de la manière avec laquelle la valeur du « blé », de « maïs », et du « pâturage » peuvent varier suivant la température. La première courbe, par

exemple, est une fonction de la production hypothétique du blé selon la température. Elle augmente pour de basses températures (point A), atteint un maximum au point B, et décroît pour des températures élevées.

Selon Mendelsohn et al. (1993), le biais dans l'approche de la fonction de production survient parce qu'on ne tient pas compte des effets de substitution économique qui surviennent avec le changement des conditions climatiques. En fait, les auteurs évoquent la nécessité de tenir compte de l'arbitrage de l'agriculteur en tant qu'agent économique rationnel ayant à choisir entre deux options différant par leur coût d'opportunité.

Revenons à l'interprétation de la figure pour mieux comprendre cette remarque. Quand la température augmente au-dessus du point C, les fermiers qui maximisent le profit remplaceront le blé par le maïs. Avec l'augmentation de la température, le rendement du blé décroît jusqu'au point F, mais en réalité le blé ne serait plus produit; la valeur de la production est réellement beaucoup plus haut, au point D où le maïs est produit. À une température légèrement plus haute, la terre est utilisée pour la production de pâturage. Finalement, au point E, la terre sera inapte pour l'exploitation.

Les remarques que suggèrent Mendelsohn et al. (1993) à travers cette figure nous permettent d'expliquer la critique cruciale selon laquelle l'approche de la fonction de production surestimerait les dégâts du changement climatique puisque elle ne prend pas en considération la variété infinie de possibilités d'adaptation en réponse au changement climatique.

De plus, entretenir des activités d'adaptation au changement climatique est coûteux, et ces coûts constituent des impacts économiques qui peuvent augmenter la valeur des impacts du changement climatique. Cependant, si le choix de s'adapter est volontaire, les agriculteurs vont choisir d'entreprendre des ajustements quand ils sont rentables. Une manière optimale de s'adapter au changement climatique serait le renouvellement total des cultures.

Pour corriger le biais de la technique de fonction de production, Mendelsohn et al. (1993) proposent d'étudier l'impact du changement climatique sur le « *revenu du district*» ou bien la « *valeur de la terre* » au lieu des rendements des cultures spécifiques. Ils expliquent que, puisque, dans les conditions de marché concurrentiel la rente foncière sera égale au rendement net de l'utilisation optimale de la terre, mesurer directement les prix agricoles ou les revenus permettrait de tenir compte des impacts directs du changement climatique sur les rendements des différentes cultures ainsi que la substitution indirecte des différents intrants, l'introduction des différentes activités, et d'autres mesures d'adaptation possibles au changement climatique (le rendement net de l'utilisation optimale de la terre correspond à la

ligne en gras de la figure3). Ainsi la méthode ricardienne trouve son fondement dans la théorie de la rente, élaborée par David Ricardo (1772-1823) en se basant sur les principes de la raréfaction des biens et des rendements décroissants, d'où l'appellation « approche ricardienne ».

2.3.2. Cadre formel

Dans ce paragraphe nous explicitons la représentation formelle des hypothèses fondamentales de l'approche ricardienne, qui sous-tendent l'évaluation du climat tel qu'elle est illustrée par Mendelsohn et al. (1993, 1996).

Soit un ensemble de consommateurs caractérisés par des fonctions d'utilité supposées respecter les « bonnes » propriétés[22]; avec l'hypothèse que chaque consommateur cherche à maximiser son utilité, sous la contrainte budgétaire. Ceci conduit à un système de demande inverse des biens i = 1,..., n

$P_i = D^{-1} (Q_1,..., Q_i, ..., Q_n, Y)$ (5)

Où P_i et Q_i sont respectivement, les prix et quantités du bien i. Y est le revenu agrégé.

Soit un ensemble de fonctions de production respecte les « bonnes » propriétés et reliant les intrants achetés et les intrants environnementaux exogènes à la quantité de production du bien i dans un district s:

$Q_{is} = F^{is} (K_i, E)$, i=1, ..., n (6)

où, K_{is} est le vecteur de tous les intrants achetés pour la production du bien i dans le district s, E est le vecteur des intrants environnementaux exogènes, tels que la température, les précipitations et les sols, homogène sur le district considéré.

Etant donnés E, Q, et le vecteur prix w_j des K_j, la minimisation du coût implique une fonction de coût :

$C_{is} = \Phi^{is} (Q_{is}, w, E)$ (7)

où C_{is} est le coût de production et Φ^{is} est la fonction coût du bien i dans le district s et w est le vecteur des prix des facteurs.

[22] Chaque fonction d'utilité est supposée monotone, croissante et quasi-concave.

Etant donnés les prix du marché, la maximisation du profit implique la maximisation du profit de toutes les activités i dans chaque district s:

Max $[\pi(Q_{1s}),\ldots, \pi(Q_{is}), \ldots, \pi(Q_{ns})]$ avec $\pi(Q_{is}) = P_{is}\, Q_{is} - \Phi_{is}(Q_{is}, w, E) - p_s L_{is}$ (8)

où p_s est le coût annuel ou rente de la terre L_i consacrée à la production du bien i dans le district s, avec L_i hétérogène et caractérisé par E. Q_{is} est la quantité de production du bien i dans le district s, Φ_{is} est la fonction de coût de tous les inputs sauf la terre dans le district s ;

La concurrence parfaite implique une libre « entrée et sortie » ce qui conduira à un profit égal à zéro. Si la culture z est la meilleure culture à utiliser dans l'exploitation étant donnée le vecteur E alors,

$P_{zs}\, Q_{zs}^{*} - \Phi_{zs}^{*}(Q_{zs}^{*}, w, E) - p_s L_{zs} = 0$ (9) et $Q_{zs} > 0$

si la spécialisation se réalise ; $\pi(Q_{is}) < 0$ et $Q_{is} = 0\ \forall\ i \neq z$

La résolution de l'équation (9) montre que le loyer ou coût annuel de la terre est égale au revenu net :

$p_s = [P_{zs}\, Q_{zs}^{*} - \Phi_{zs}^{*}(Q_z^{*}, w, E)]/\, L_{zs}$ (10)

La valeur présente du flux des revenues courants et futures donne la valeur de la terre;

$$V_L = \int_{t=1}^{T} p_s\, e^{-rt}\, dt = \int_{t=1}^{T} \{[P_{is}\, Q_{zs}^{*} - \Phi_{zs}^{*}(Q_{zs}^{*}, w, E)]/L_{zs}\}\, e^{-rt}\, dt \quad (11)$$

Où r est le taux d'actualisation.

Le principe du modèle ricardien est décrit par l'équation (11). L'équation montre comment un facteur environnemental qui affecte la production va influencer les coûts, ce qui change le revenu net. L'accumulation à long terme des revenus nets détermine la valeur foncière. Ainsi Les changements environnementaux qui sont bénéfiques (néfastes) pour l'agriculture augmenteront (diminueront) le revenu net total et la valeur foncière globale.

La question à analyser est l'impact des changements exogènes des variables environnementales sur le bien être économique. Considérons le changement environnemental de l'état A à l'état B, qui conduit à des changements dans les inputs environnementaux de E_A à E_B. Le changement dans le bien être annuel pour une quantité donnée de terre L_s dans chaque district s est alors :

$$\Delta W = W(E_B) - W(E_A)$$

$$= \int_{0}^{Q_B} [\Sigma_i D^{-1}(Q_i)\, dQ_i - \Sigma_{is}\, \Phi_{is}(Q_{is}, w, E_B)] - [\int_{0}^{Q_A} \Sigma_i D^{-1}(Q_i)\, dQ_i - \Sigma_{is}\, \Phi_{is}(Q_i, w, E_A)] \quad (12)$$

Si les prix du marché ne changent pas suite aux résultats de changements de E, alors l'équation ci dessus se réduit à :

$$\Delta W = W(E_B) - W(E_A)$$

$$= [PQ_B - \sum_{is} \Phi_{is}(Q_i, w, E_B)] - [PQ_A - \sum_{is} \Phi_{is}(Q_i, w, E_A)] \quad (13)$$

Où P est le vecteur prix

Puisque la rente est égale au revenu, l'équation (13) peut s'écrire comme suit :

$$\Delta W = W(E_B) - W(E_A) = \sum_s [p_s^B - p_s^A] L_{is} \quad (14)$$

Où p_s^A et p_s^B sont respectivement les loyers de le district s spécifique à l'état A et B. La valeur de la variation des variables climatiques est capturée par la variation des valeurs de la terre à travers les différentes conditions environnementales.

La valeur présente de ce changement de bien être est ainsi :

$$\int_0^\infty \Delta W \; e^{-rt} dt = \sum_s [V_L^B L_s^B - V_L^A L_s^A] \quad (15)$$

À l'aide de l'équation (14), la méthode ricardienne offre un moyen d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture en autorisant l'intégration de l'ensemble des adaptations optimales.

2.3.3. Estimation du modèle

Mendelsohn, Nordhaus et Shaw (1993) ont choisi une approche transversale pour estimer le modèle développé. Il s'agit d'une analyse statistique de la performance agricole à travers les régions, en séparant le climat des autres facteurs qui permettent d'expliquer les disparités des niveaux de production entre les régions tels que, les différentes qualités de sol et les diverses conditions économiques. Dans le travail de Mendelsohn, Nordhaus et Shaw (1993), la valeur du terrain agricole, d'un côté, et le revenu net agricole, de l'autre, sont expliqués par une série de variables climatiques, économiques et géophysiques pour près de 3000 comtés aux États-Unis dans une analyse en coupe instantanée. En pratique, cela consiste à estimer une équation de la forme suivante[23], dans le cas où la variable dépendante est la valeur du terrain agricole :

$$V_j = \alpha_0 + \alpha_j E_j + \beta_j E_j^2 + \gamma_j K_j + \varphi_j K_j^2 + \omega E_j K_j + u_j \quad (16)$$

[23] La forme quadratique de l'équation est fondée sur les conclusions des travaux de construction de courbes des réponses des cultures aux conditions climatiques réalisés par les agronomes.

V_j est la valeur du terrain dans un comté j. α_j, β_j, γ_j et φ_j sont respectivement les paramètres associés au vecteur des variables climatiques E_j, E_j^2 et au vecteur des autres variables exogènes K_j, K_j^2 et ω_j est le coefficient du terme d'interaction entre climat et les autres variables exogènes, u_j est le terme d'erreur que l'on suppose suivre une loi normale centrée réduite ($u_j \rightarrow N(0,1)$).

La régression de la performance agricole (mesurée par la valeur de la terre ou le revenu net) sur l'ensemble des facteurs environnementaux, des intrants traditionnels (terre et travail), et du système de soutien (infrastructure) permet de mesurer la contribution de chaque facteur aux résultats. Cette analyse a été utilisée pour estimer les impacts agricoles potentiels du changement climatique. Les résultats suggèrent que le réchauffement occasionnera moins de dommage que prévu par les modèles agronomiques. Ce document de travail a été à l'origine des deux publications de Mendelsohn, Nordhaus et Shaw (1994 ,1996) bien reçu par une partie de la communauté scientifique.

Dans la seconde publication, Mendelsohn, Nordhaus et Shaw (1996) proposent une nouvelle application de la méthode ricardienne permettant de capturer l'impact du changement climatique, à la fois sur la valeur de l'exploitation agricole et sur la quantité de terre cultivée. Une remarque importante concernant le recours à la valeur de la terre dans les analyses est rajoutée dans cette publication. Les auteurs mentionnent qu'un tel choix de variable dépendante pourrait être une source de problèmes. En fait, la valeur de la terre est représentée par la valeur actualisée des loyers de la parcelle utilisée de manière optimale. Cependant, l'utilisation optimale courante des terrains dans l'agriculture pourrait être industrielle ou urbaine dans le futur. Afin de contrôler les influences non-agricoles, ils insistent sur la nécessité d'inclure les procurations pour le développement de la valeur des terres agricoles dans l'analyse.

2.3.4. Application aux pays en voie de développement

La méthode a été également appliquée au cas d'autre pays développés tel que l'Allemagne (Deke, 2001) et le Canada (Reinsborough, 2003) ; mais elle a été surtout appliquée au cas de plusieurs pays en voie de développement. Au départ, l'attention a porté sur l'Inde et le Brésil (Kumar et Parikh, 1998 ; Sanghi, 1998 ; Sanghi, Mendelsohn and Dinar,

1998 ; McKinsey et Evenson, 1998 ; Sanghi et Mendelsohn, 1999 ; Timmins, 2001), pays caractérisés par un large éventail de climats liés à leurs vastes superficies, par analogie au cas d'étude les Etats-Unis. D'une autre part, Seo et Mendelsohn (2007) ont appliqué la méthode aux pays latino-américains. Récemment, plusieurs travaux se sont intéressés à des pays à superficie moins large telle que le Cameroun (Molua, 2002), le Sri Lanka (Seo S. N., Mendelsohn R., et Munasinghe M., 2005), le Sud Afrique (Gbetibouo G.A. et Hassan R.M., 2005), le Kenya (Kabubo-Mariara Jane et Karanja Fredrick K. 2007), l'Egypt (Eid et al., 2007).

Le nombre important d'applications au cas des pays en voie de développement peut être expliqué surtout par les deux caractéristiques pratique et flexible de l'approche. Ainsi, l'utilisation de données facilement disponibles sur la production observée, les conditions de production et les conditions commerciales élimine le besoin de coûteuses expériences de terrain ou la collecte de données de panel coûteuses sur de longues périodes de temps comme c'est le cas dans l'approche expérimentale.

Par ailleurs, l'absence d'un marché de la terre qui fonctionne convenablement, dans la plupart les études sur les pays en voie de développement, a rendu l'application de la technique ricardienne très difficile dans son application. Autrement dit, il est difficile d'utiliser la valeur de la terre comme variable dépendante. On a alors emprunté le revenu net par hectare agricole comme variable dépendante. La difficulté d'évaluation de cette variable (la différence entre valeur de production agricole et dépenses) dépend de l'unité statistique choisie ; le district (ex ; le cas de l'inde) ou l'agriculteur (ex ; le Kenya). Dans le premier cas, celui de l'Inde, il suffit de se baser sur les enquêtes nationales et internationale menées pour estimer cette variable ; alors que dans le second cas, des enquêtes étaient menées et les agriculteurs étaient interrogé sur leurs revenus nets.

La spécification générale du modèle est proposée par Kumar et Parikh (1998) repose sur la maximisation des profits des agriculteurs produisant les outputs Y en utilisant les inputs X et les facteurs quasi fixes F (tel que la terre, les installations d'irrigation etc.). Supposons que ces agriculteurs font face aux facteurs climatiques C, aux caractéristiques du sol S, aux technologies T, et à l'infrastructure I. Etant donnés les prix de l'output (P_y) et de l'input (P_x), le profit optimal peut être exprimé comme suit :

$$\pi^* = \pi (P_y, P_x, F, I, T, C, S) \quad (17)$$

En utilisant le lemme de Hotelling, nous pouvons obtenir les équations d'offre de producteur et de demande de facteurs:

$$Y^* = \partial\pi^* / \partial P_y \; ; \; X^* = \partial\pi^* / \partial P_x \quad (18)$$

Ainsi, la fonction de profit peut être écrite comme suit ;

$$d\pi_v = Y^* dP_y - X^* dP_x = \pi (P_y, P_x, F, I, T, C, S) \quad (19)$$

Dans l'équation précédente, on suppose que les agriculteurs se sont complètement adaptés aux variables climatiques C auxquels ils font face, en ajustant les inputs de court et de long terme tel que F, I, et T, et sont arrivés à maximiser le profit associant outputs et inputs.

À l'équilibre, les profits de court terme π_v peuvent être mesuré et exprimés comme le revenu net par unité de surface, (π_v / L). Les revenus nets peuvent alors être considérés afin d'inclure les choix optimaux d'outputs et d'inputs par les agriculteurs. Ceci implique que les impacts climatiques, (à L constant : $1/L \; \partial\pi_v^* / \partial C$) calculés à partir de l'équation précédente, représentent les réponses des agriculteurs au climat, sol et aux autres facteurs.

2.3.5. Les modifications dans le modèle standard

D'autres difficultés dans l'application de la méthode en coupe instantanée à l'agriculture des pays en voie de développement se sont ajoutées et ont nécessité d'introduire certaines modifications dans le mode d'estimation du modèle ricardien standard. Ces difficultés proviennent surtout des grandes différences de caractéristiques par rapport à l'agriculture dans les pays développés. Sanghi, Mendelsohn et Dinar (1998) ont traité ces difficultés ainsi que les différents ajustements du modèle proposé dans les travaux sur les cas de l'Inde et du Brésil lors d'une étude de l'impact du changement climatique sur l'agriculture indienne réalisée dans le cadre d'un projet de recherche mené par la Banque Mondiale en collaboration avec L'Electric Power Research Institute (EPRI). Dans un travail un peu plus récent, Dinar et Mendelsohn (1999) ont aussi relevé ces modifications. Les auteurs mentionnent surtout la difficulté de mesurer les variables de travail et de capital et, plus précisément, les prix des intrants. La plupart de ces prix sont difficiles à contrôler. Ceci est dû à la forme traditionnelle de l'agriculture dans les pays en voie de développement qui utilise des moyens techniques limités, et au mode de propriété des exploitations.

• .Ainsi, les membres d'un ménage forment une grande partie du groupe de travail dans les pays en voie de développement. Aucun salaire n'est payé à ses membres, et aucune donnée n'existe sur le nombre d'heures de travail (Bennholdt – Thomsen 1982, Grepperud 1997). Pour étudier le Brésil et l'Inde, les chercheurs ont introduit une variable dummy afin de distinguer les fermes fondées sur le travail des ménages des autres. Cependant, il était difficile pour eux d'interpréter cette variable puisqu'elle signifiait d'un côté, le travail impayé, qui implique un signe positif pour le revenu net, et d'un autre côté une ferme petite et marginale qui implique un signe négatif pour le revenu net.

• Toujours dans le cas de l'Inde, une autre difficulté réside dans la prise en compte des prix de certains intrants qui peuvent ne pas varier d'une région à l'autre parce qu'ils sont contrôlés par l'Etat : en Inde les prix des tracteurs et les prix des bœufs varient peu. Par conséquent, même si les prix « officiels » des bœufs et des tracteurs existent, en raison de l'absence de variation transversale de ces prix, elles ne sont utilisées que pour calculer le coût ou le revenu. Le nombre de bœufs et de tracteurs (sur une base par hectare) sont donc inclus comme variable explicative de la régression climatique.

Par ailleurs, Timmins C. (2006) identifie et traite une autre lacune importante de la méthodologie ricardienne qui peut être particulièrement préoccupante dans les applications aux pays en développement. En fait, si Mendelsohn, Nordhaus et Shaw (1993) soutiennent que l'avantage de la méthode ricardienne est d'utiliser directement la production observée du fait que les données reflètent la manière de travailler des agriculteurs dans des conditions commerciales et la réponse des cultures dans des conditions climatiques qui varient géographiquement, Timmins (2006) indique que l'utilisation des données observées conduirait à ignorer l'endogénéité dans la manière dont les parcelles hétérogènes des terres sont affectées à d'autres usages. Dans ce cas, le terme d'erreur dans une régression ricardienne dépend des déterminants non observables de la valeur d'une parcelle affectée à différentes utilisations. Par ailleurs, cette limite conduit à une mauvaise spécification de l'effet marginal du climat sur la valeur des terres. Ces deux effets combinés produiraient des estimations erronées de l'impact du changement climatique sur l'agriculture. L'auteur fournit un algorithme de contrôle pour ce genre de biais, qui est basé sur un modèle d'optimisation des décisions d'affectation des terres des propriétaires de parcelles de terres hétérogènes non observables.

De plus, la méthodologie ricardienne standard a ignoré la question du changement technique comme moyen d'adaptation. En fait, la méthodologie est fondée sur les connaissances de l'état actuel des conditions de travail de l'agriculteur et ne tient pas compte du changement technique induit. Cependant, Dinar et Mendelsohn (1999) expliquent que la baisse de la sensibilité de l'agriculture au changement climatique proviendrait de la substitution entre techniques préexistantes en se basant sur les cas du Brésil et de l'Inde. En fait, ces deux pays, ont fait état de succès en matière de recommandation pour améliorer les technologies de production. Ces recommandations se sont plutôt concentrées dans les districts agricoles tempérés dans les deux pays. Des centres de technologie agricole ont été concentrés autour de Sao Paulo au Brésil et autour du fleuve de delta du Gange en Inde. En se référant aux travaux de Dinar et Zilberman, 1991, de Dinar, Campbell, et Zilberman, 1992, Dinar et Mendelsohn 1999, mentionnent que l'adoption des techniques modernes peut libérer les fermiers des contraintes environnementales précédentes avec les nouvelles variétés de culture, les technologies d'irrigation, et les contrôles chimiques. En conséquence, il est possible que les technologies aient facilité les progrès dans les régions à climat tempéré, mais pas dans les régions à climats tropicaux, qui sont relativement moins productifs. La question de la technologie a fait son entrée dans la littérature de l'approche ricardienne avec le travail de Mc Kinsey et Evenson (1998). Ceux-ci ont examiné cette hypothèse pour l'Inde et ont constaté que la technologie avait amélioré le rendement des fermes durant les deux dernières décennies. Mais du fait que le développement technologique n'ait pas spécifiquement traité, les problèmes d'indépendance de la température, l'interaction entre l'adoption de technologies et le climat a semblé peu importante. Une autre recommandation concernant la nécessité de tenir compte de l'irrigation dans les estimations a été soulevée par Mendelsohn et Dinar (2003). Dans ce travail, l'objectif des auteurs était d'étudier l'interaction entre le climat, l'agriculture et l'eau. Ils montrent que la variation de la valeur de l'exploitation agricole est sensible à l'irrigation et que l'ajout de cette variable dans le modèle ricardien standard modifie les valeurs de la sensibilité au changement climatique. Finalement, ils concluent que l'irrigation aiderait à s'adapter au changement climatique.

2.3.6. Controverses sur la méthode

L'approche ricardienne est fondée, comme nous l'avons explicité, sur l'analyse en coupe instantanée des observations actuelles de la réponse de la culture et de l'agriculteur dans des conditions actuelles de fonctionnement plutôt qu'une approche idéalisée de cette

réponse tel qu'elle proposée par la méthode expérimentale. Ce principe de travail permet d'incorporer les changements de type d'exploitation que les fermiers feraient au profit d'autres cultures plus adaptées en fonction des conditions climatiques. Cette adaptation est un choix optimal qui suppose que l'agriculteur est en capacité de contrôler tous les facteurs. Cette hypothèse est à l'origine de critiques à plusieurs titres. D'une part, il est difficile d'obtenir des mesures parfaites de toutes les variables pouvant agir sur l'exploitation; et on ne peut garantir que tous les processus et interactions ont été pris en considération sans mener des expériences soigneusement contrôlées. Nous l'avons déjà mentionné, certaines variables, ne peuvent pas être incluses parce qu'elles ne varient pas dans l'espace géographique. Par ailleurs, Reilly et al. (1997) suggèrent que même si ces facteurs sont contrôlés, cette approche coclut la réponse d'équilibre de long terme au changement climatique et peut ne pas englober les coûts d'ajustement associés aux changements de cultures et de pratiques de production nouvelles. Lesquels sont très importants surtout dans les secteurs où le coût d'ajustement du capital est élevé. De plus, le changement climatique, qui peut être observé à un endroit et une date données, peut ne pas être stable et il reste difficile de savoir si ce type d'approche reflèterait l'impact sur la productivité avec précision.

La méthode ricardienne n'est valide que si les prix ne varient pas, ou du moins pas trop, en réponse à la modification de l'offre qui suit le changement climatique. Cette hypothèse est fondamentalement critiquée dans la littérature. Cline, (1996) explique qu'ne telle hypothèse mènerait à un biais dans l'estimation des pertes de bien être. En fait, le modèle ricardian étudie les pertes subies par les producteurs. En ignorant le changement de prix en cas de variation de la consommation, l'approche ne reflèterait pas vraiment la perte du surplus du consommateur. Elle sous estime par conséquent les pertes tout en surestimant les avantages.

Pour justifier l'hypothèse de prix constants, Dinar et al., (1999) affirment qu'inclure les effets prix dans n'importe quelle méthode est difficile. Ils expliquent que d'une part, dans la plupart des cas, les prix sont déterminés par un marché global. Ce qui nécessiterait un modèle global pour estimer l'impact du changement climatique sur les rendements de culture. Selon les auteurs, il n'y a pas de modèle de culture global précis, et estimer l'évolution de la production globale de n'importe quelle culture en raison d'un changement climatique est difficile. D'autre part, en se référant aux travaux de Reilly, Hohmann, et Kane 1994, Reilly et al. 1996, ils montrent que même les analyses globales prévoient que la gamme de réchauffement au 21ème siècle devrait n'avoir qu'un effet léger sur l'offre globale. Ainsi, le biais de prix constants serait négligeable. Par exemple, dans l'étude menée par Mendelsohn et

Nordhaus (1996) même si l'offre globale changeait de 25% le biais imputable à l'hypothèse de prix constants serait de 7%.

Conclusion

Chaque culture et chaque variété de culture ont des tolérances et des optima climatiques spécifiques. Comme nous l'avons rappelé, la baisse et la variabilité des précipitations combinées à la hausse de température déstabiliseraient la croissance normale des cultures en affectant la durée des cycles végétatifs ou l'évapotranspiration des plantes. De plus, les déficits hydriques subis par l'agriculture et particulièrement les cultures pluviales qui couvrent la majeure partie des surfaces arables seront accentués par le changement climatique. Comme nous l'avons explicité dans la première section, cette forte dépendance de l'agriculture et du climat est déjà au centre des études d'impact du changement climatique sur l'agriculture. Le sujet est particulièrement intéressant en lui-même, mais aussi parce qu'il est à la croisée de deux thématiques capitales, l'économie et l'environnement. L'intérêt est renforcé par le caractère dynamique des différents systèmes que le problème implique.

Nous avons étudié la littérature qui traite ces différents points afin d'examiner l'état des connaissances en ce qui concerne l'étude de l'impact du changement climatique sur l'agriculture à l'échelle régionale. L'analyse centrée sur les méthodologies employées pour mener ces études a révélé les difficultés rencontrées au niveau de la conception et de l'estimation des modèles mis en œuvre.

Ces difficultés apparaissent, tout d'abord, au niveau de la disponibilité des données avec le détail nécessaire permettant d'intégrer l'ensemble des facteurs déterminants. En fait, d'un côté, le changement climatique est un phénomène global qui affecterait plusieurs systèmes à variables multiples et qui ne sont pas stables dans le temps. Ainsi, ne considérer que les deux systèmes agricoles et climatiques uniquement dans l'étude serait trop fragmentaire. Les deux systèmes sont en effet soumis à plusieurs autres forçages d'ordre socio-économique. De plus, il ne faut pas oublier, que non seulement le climat peut changer mais aussi que les sociétés humaines et l'agriculture ne sont pas stables dans le temps et suivent ou subissent des tendances et des contraintes qui leur sont propres. Ainsi, par exemple utiliser le système de prix existant pour évaluer les impacts conduirait à ignorer le fait que ces prix peuvent changer au moment où le changement se réalise. Finalement, au niveau sectoriel, il existe une multitude d'activités qui devraient être pris en compte. L'agriculture comprend les cultures, l'élevage, la foresterie et la pêche lesquelles peuvent interagir ensemble et

exercer une influence sur le secteur. Chaque catégorie est affectée par le changement climatique essentiellement à travers ses intrants.

Ce sont autant d'éléments qui renvoient vers d'autres difficultés au niveau de la modélisation. D'un côté, beaucoup de biens économiques sont déjà difficiles à évaluer, en particulier les biens non marchands. Nous avons vu qu'il y a même des difficultés à estimer les changements de valeur de certains biens marchands. D'un autre côté, il y a la difficulté d'intégrer les décisions et les réactions de tous les acteurs de la société face au changement climatique. L'adaptation aux changements des conditions climatiques se fait, en fait, progressivement depuis l'individu jusqu'au niveau de la société. Mais ces adaptations ne suivent pas de règles prédéfinies.

Ces difficultés sont résolues de manière différente par les méthodologies existantes selon une échelle de priorité. Généralement on convient que l'adaptation est une question importante dans l'étude de l'impact du changement climatique sur l'agriculture. L'adaptation implique un changement des pratiques agricoles en réponse à un changement des conditions climatiques. Elle inclut des changements dans les procédures de gestion, telles que la synchronisation de l'ensemencement et de la moisson, l'intensification des intrants, et le changement des variétés de culture. Naturellement, l'adaptation suppose que les agriculteurs ont accès aux pratiques et aux technologies alternatives qui sont déjà pratiquées ailleurs. Dans ce contexte, la technique Ricardienne, en s'appuyant sur les variations en coupe instantanée de la valeur capitalisée de la terre en fonction du changement climatique ; on dispose d'un outil pratique pour étudier les conséquences du changement climatique sur l'agriculture tout en intégrant les mesures d'adaptation. Surtout, l'utilisation de ces données élimine le recours à de très coûteuses méthodes nécessitant les études de sites agricoles ou la collection de données de panel sur une longue période. Cet aspect pratique de la méthode a permis le développement de la recherche empirique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture dans les pays en voie de développement.

.

Chapitre 3. Changement climatique et Tunisie : étude bibliographique de la vulnérabilité du secteur agricole

Introduction

Située au nord du continent Africain, la Tunisie est limitée au nord et à l'est par la méditerranée, à l'ouest par l'Algérie, et au sud par la Libye. Elle couvre une superficie de 162155km^2 et s'étend entre les latitudes de 31° et 37° nord et entre les longitudes 8° et 11°.
Le territoire tunisien est subdivisé en deux catégories de collectivités territoriales dotées de personnes morales et d'autonomie financière : gouvernorats, municipalités. Ce système a été mis en place par le décret de Juin 1965. Un autre découpage en six régions de planification a été mis en vigueur à partir du sixième plan de développement (1982-1986) en vue d'optimiser l'exécution des politiques de l'État tunisien : Nord-est, Nord-ouest, Centre-est, Centre-ouest, Sud-est, Sud-ouest (voir annexe I).

La population tunisienne a dépassé le cap des dix millions d'habitants en 2005 ce qui correspond à une densité moyenne de 62,2 habitants/km^2. Néanmoins, le taux d'accroissement annuel de la population (inférieur à 1.2 %) est en diminution depuis le milieu des années 1980 (Institut National de Statistique, 2010). La distribution de la population géographique est disparate. Près des trois quarts des tunisiens vivent dans les régions côtières. Les régions arides du Centre et du Sud ne sont habitées que par 30 % de la population. La population rurale ne représente que 36 % environ de la population totale en 2005 et le pays est en train de s'urbaniser rapidement (d'après le GIEC plus de 75 % d'ici 2025).

Nous avons noté au premier chapitre qu'en Tunisie, comme dans le reste du monde, le climat est susceptible de changer fortement. Nous avons vu que les prévisions font état d'un changement brutal de l'agriculture tunisienne dû au changement climatique via le rapport biologique direct entre l'agriculture et les conditions climatiques.

Nous nous proposons dans le présent chapitre de mettre l'accent sur la vulnérabilité du secteur agricole au changement climatique en Tunisie. Le but final de l'analyse est d'identifier les différentes formes de vulnérabilité du secteur.

3.1. Méthodologie

Nous avons constaté au second chapitre que plusieurs études se sont intéressées à l'impact du changement climatique sur l'agriculture. La plupart de ces études se sont focalisées sur les Etats-Unis et les pays développés (Adams et al., 1988 ; Kaiser et al., 1993a ; Easterling et al., 1993 ; Mendelson et al., 1994 ; Fisher et al., 1994 ; Mendelsohn, Nordhaus et Shaw ; 1994 ,1996 ; Adams et al., 1999). Dans une étude sur les Etats-Unis qui inclut les hypothèses de l'effet fertilisant du dioxyde de carbone et de l'adaptation des agriculteurs aux changements climatiques, Adams et al. (1999) suggèrent que le réchauffement climatique augmenterait le rendement des cultures. Ces bénéfices ne peuvent pas être généralisés au reste du monde puisque, d'une part, le climat aux Etats-Unis est tempéré et demeurera ainsi même suite à une augmentation de la température, et d'autre part, les américains comptent sur une agriculture intensive en capital qui peut s'adapter à une large gamme de climats. Il en va autrement en termes de flexibilité pour une agriculture tunisienne caractérisée par la persistance de sa forme traditionnelle, favorisée par deux traits essentiels de la structure actuelle[24] la dominance de la petite exploitation (54% des exploitations ont moins de 5 Ha et 21% ont entre 5 et 10 Ha), et l'agriculture vivrière (43% des exploitations de moins de 5 Ha et 21% des exploitations entre 5 et 10 Ha vivent entièrement de l'exploitation agricole)

Les études de l'impact du changement climatique sur l'agriculture en Tunisie tout comme dans les pays en voie de développement sont rares. Généralement, en se référant à des études prospectives, on suppose que les pays en voie de développement sont les plus vulnérables au changement climatique à cause de la prédominance de l'agriculture à faible capital avec activités économiques sensiblement affectées par le climat, et du fait d'un climat de base relativement chaud. Ainsi, les résultats des études sur les Etats Unis et l'Inde, par exemple, suggèrent qu'au fur et mesure que les pays en voie de développement deviennent riches, les secteurs agricoles deviennent moins dépendants des conditions climatiques (Dinar et Mendelsohn, 1999). En fait, il s'avère que les systèmes agricoles à capital intensif sont moins sensibles au climat. Dinar et Mendelsohn (1999) expliquent ceci par les alternatives qui

[24] Nous nous référons à l'enquête structurelle de l'année 2004-2005 ; qui est la dernière enquête de structure jusqu'ici. Ce type d'enquêtes est réalisé chaque décennie par le ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques-direction générale des études et du développement agricole, selon les experts de cette direction, généralement l'état de structure ne varie pas substantiellement au cours de cette période.

s'offrent aux agriculteurs dans les pays développés et qui leur permettent de contrôler mieux les variables d'entrées. Essentiellement, les technologies peuvent tout simplement pallier les impacts du changement climatique.

Cependant, d'après le GIEC, la vulnérabilité est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa capacité d'adaptation[25]. Ainsi, il est nécessaire d'étudier le fonctionnement du système agricole dans le cadre des contraintes imposées par son milieu afin de déterminer le degré auquel le système est sensible au changement climatique et de comprendre sa capacité d'adaptation. Certes le potentiel d'adaptation de l'agriculture dépend des circonstances économiques, des infrastructures institutionnelles, facteurs moins favorables dans les pays en voie de développement (Reilly et Hohmann, 1993). Mais, les expériences du GIEC ont montré que chaque système se forme au fur et à mesure que ses composantes se transforment, par conséquent, l'étude de la réponse des composantes du système aux contraintes de leurs milieux permettrait de comprendre la capacité du système agricole à s'adapter au changement climatique.

Suivant ce raisonnement, nous nous proposons de conduire un diagnostic du contexte général de la relation entre l'agriculture et le climat en Tunisie. Pour ce faire, nous nous référons aux différents rapports et analyses réalisés au niveau national et international. Nous nous focalisons sur les informations contenus dans ces divers travaux et que nous jugeons pertinentes pour notre objectif.

3.2. Contexte général

3.2.1. Aperçu général sur l'état du secteur agricole tunisien

Le secteur agricole tunisien conserve une grande importance socio-économique. L'agriculture tunisienne conserve sa dimension vivrière. Ainsi, d'après l'enquête de structure (2004-2005) sur un nombre d'exploitations agricoles estimé de 516 000 unités, le nombre de familles vivant entièrement de l'exploitation agricole s'élève à 363300. En dépit de la

[25] Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques et la coopération technique allemande GTZ (2005) « changements climatiques : effets sur l'économie tunisienne et stratégie d'adaptation pour le secteur agricole et les ressources naturelles » rapport de la première étape, version du 11 octobre relatif au projet Mise en œuvre de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en Tunisie (projet CCC/GTZ).

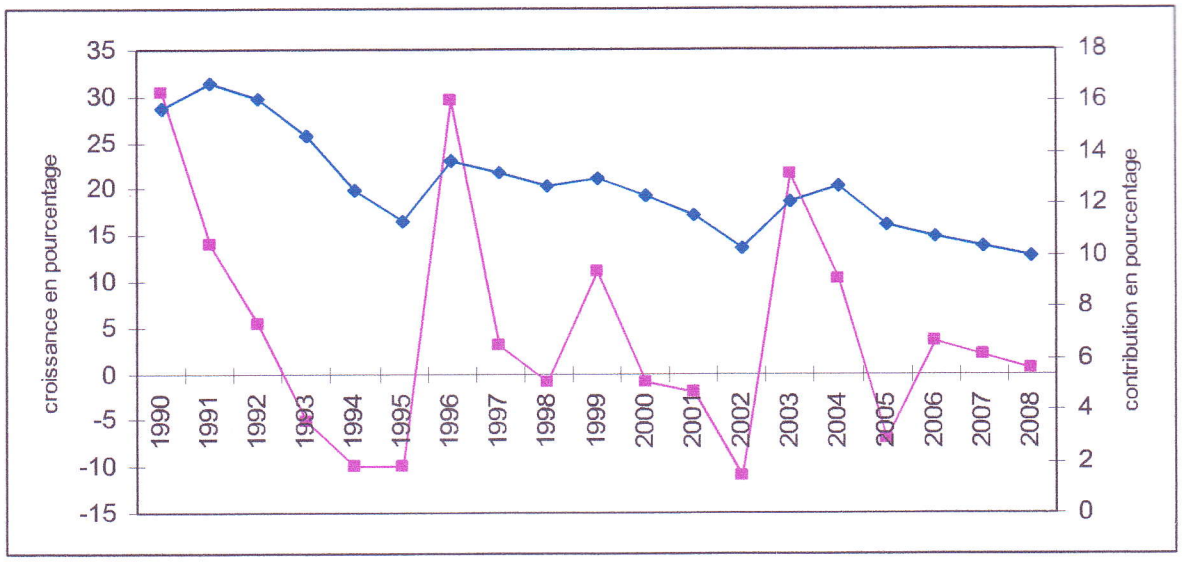
persistance de la forme traditionnelle dans le secteur, ce dernier a connu de profondes transformations donnant naissance à des unités de production modernes qui contribuent de façon notable à l'approvisionnement du marché national et même international (MARH et GTZ, 2006).

De plus, le secteur participe à la croissance économique de la Tunisie de par sa contribution au Produit Intérieur Brut (PIB), à concurrence d'une moyenne de 12,6% durant la période 1990-2005 ; une moyenne qui dépasse celle des pays arabes du Sud et de l'Est de la région méditerranée (CIHEAM, 2008). Cependant, la contribution de l'agriculture dans le PIB national tend à diminuer lentement en faveur d'une augmentation de sa contribution à l'exportation (Bachta, 2008).

Le secteur agricole est une composante de la sécurité alimentaire. Les derniers résultats de l'évolution de l'activité économique enregistrée par l'Institut National de la Statistique (INS), du Ministère du Développement et de la Coopération Internationale et de la Banque Centrale de la Tunisie enregistrent une évolution remarquable des niveaux de sécurité alimentaire. En effet, le taux de couverture des produits agroalimentaires, inférieur à 50% dans les années 1980, est quasiment de 100% ces dernières années (il est de 121,0% en 2006 ; de 79,2% en 2007 ; de 71,1% en 2008 ; et de 102,4% en 2009). Le secteur contribue aussi à l'exportation de biens, essentiellement : l'huile d'olive, les dattes et les produits de la pêche, les exportations alimentaires représentant 11 % dans les exportations.

Cependant, le secteur a connu une fluctuation de la croissance de la valeur ajoutée ainsi qu'une baisse de la contribution au PIB au fil du temps (figure 3.2.). L'abaissement de la performance du secteur est inquiétant surtout dans le contexte du changement climatique. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cet abaissement tels que les fluctuations du marché, les changements dans les politiques agricoles nationales et internationales, la dégradation de la qualité et de la disponibilité des ressources naturelles (eau, sol et atmosphère), les ravageurs (tel que les criquets) et les maladies, les catastrophes naturelles. L'incertitude induite par le changement climatique, y compris les événements extrêmes tels que les inondations et la sécheresse viennent alourdir ce phénomène.

Figure 3.1. Croissance de la valeur ajoutée de l'agriculture et contribution au PIB



Légende : Le pourcentage de croissance annuelle de la valeur ajoutée est représenté par la courbe de couleur rosâtre ; la contribution de la valeur ajoutée au PIB en pourcentage est représentée par la courbe de couleur bleu {Le graphique est construit à partir des données sur les indicateurs du développement mondial et du développement global de la Finance fournies par la Banque mondiale ; World Development Indicators & Global Development Finance, 28 Septembre 2010; http://data.worldbank.org/data-catalog}

3.3.2. Relief et paysages naturels de la Tunisie

La morphologie du territoire tunisien est contrastée (voir figure 3.3) et ses paysages diffèrent considérablement (Depois, 1961). Les recherches bibliographiques montrent que l'étude de la morphologie du territoire tunisien est généralement réalisée en lien avec d'autres questions relatives aux facteurs climat ou sol (la Communication Nationale Initiale de la Tunisie sur les Changements Climatiques 2001) ou encore avec les travaux des pédologues du service des sols de l'Institut National d'Agronomie de la Tunisie (INAT). Ceci se comprend en se référant au fait que « la morphologie d'une région est le résultante de l'action des différents facteurs climatiques, géologiques, biologiques (végétation, homme), action qui s'est déroulée tout au long de l'histoire et plus précisément du quaternaire, provoquant ainsi l'érosion des massifs montagneux, le transport des matériaux solides arrachés en amont à leurs dépôt vers l'aval » comme l'expliquent Belkhoja et al. (1973)[26]. Dans ce travail, les auteurs analysent le paysage de la Tunisie Septentrionale du point de vue de sa relation directe avec le sol. Ils distinguent deux types de formation : (i) les formations continentales avec les montagnes et les collines et leurs versants, les glacis, les terrasses des rivières, les dépressions

[26] L'un des travaux les plus approfondis sur la question et celui que les experts du service du sol (INAT) nous ont vivement conseillé est celui de Belkhoja et al. (1973).

salées et les dépressions d'eau douce, et (ii) les formations côtières qui se composent de plages et de dunes. Cette partie de la Tunisie qualifiée de complexe, par Depois (1929), couvre le Tell, la Dorsale, les Steppes et le Sahel. Nous nous fondons sur ce travail ainsi, sur la carte des régions naturelles dressée par Mtimet (1999) dans son ouvrage Atlas des sols tunisiens, pour décrire l'aspect général du relief et du paysage de la Tunisie.

Le relief montagneux se trouve aussi bien au nord ouest qu'au sud. Les montagnes du nord sont une extension de deux chaines montagneuses qui s'étendent depuis Maroc à travers l'Algérie, l'Atlas tellien qui suit le littoral méditerranéen et l'Atlas Saharien qui s'abaisse au niveau du Cap Bon et du Golfe d'Hammamet. Les montagnes du sud sont inclinées vers l'est jusqu'aux plaines côtières et vers le ouest jusqu'aux plaines désertiques recouvertes de dunes de sable. Au-delà, de vastes plaines occupent les zones côtières et désertiques de la Tunisie.

L'Atlas tellien appelé aussi le Tell septentrional ou Monts de la Medjerda est un ensemble rocheux, peu accessible, qui borde la Méditerranée. Ce massif est composé principalement de trois alignements de chaînes de montagnes : Kroumirie (Aïn Drahem) culminant à environ 1 000m, Nefza à 600 m et Mogods (Entre le Cap Serrat et Bizerte) à 500m. Au sud du Tell, on repère la riche plaine alluviale de la Medjerda à laquelle succède une zone de collines irrégulières (les Monts de Téboursouk avec leurs dépressions), puis de plateaux (le haut Tell).

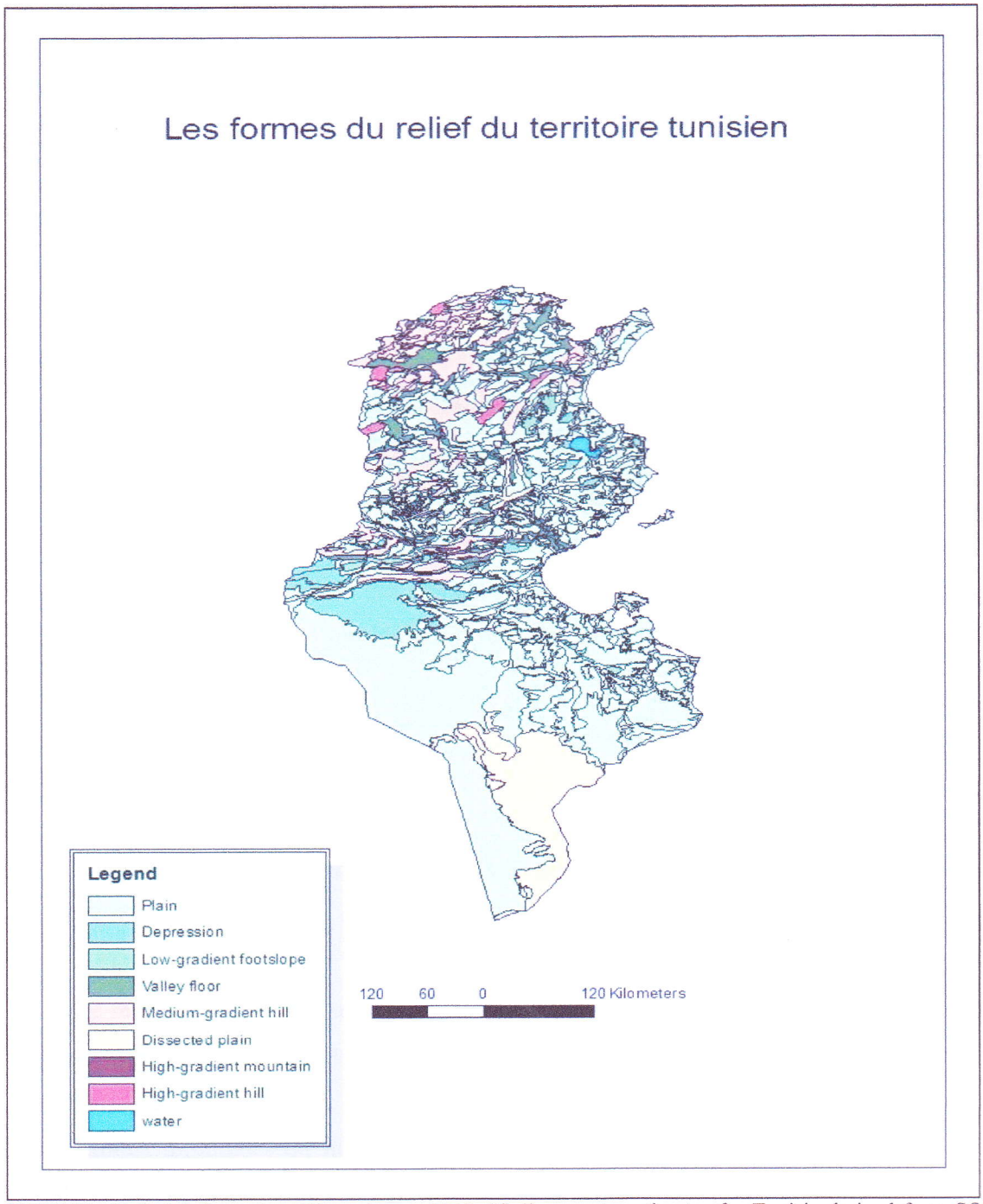
Le prolongement oriental de l'Atlas Saharien en Tunisie est désigné par la dorsale. Elle se compose de groupes montagneux alternant avec des plateaux escarpés et des dépressions. Son point culminant, à 1 544 m, est le Jebel Chaâmbi. Les percées et dépressions facilitent l'accès à la dorsale et son exploitation. Cette chaîne montagneuse, traverse la Tunisie en diagonale délimitant au nord la partie tellienne et au sud la zone de steppe qui consiste pour l'essentiel en un plateau situé à environ 500 m d'altitude

La zone côtière, désignée par le Sahel et la Jeffara, qui s'étend de Hammamet à Ben Guerdane est une région qui se compose de dunes et de plages formant par endroit des lagunes et des cuvettes (sebkhet Kelbia, sebkhet de Sidi El Hani, Sebkhet En Noual, Sebkhet El Melah) et de tombolos. Quelques îles en émergent dont les Kerkennah et Djerba sont les principales.

La zone désertique est d'abord une succession de vastes dépressions blanchies par les efflorescences salines (Chott El Gharsa, Chott El Jerid, Chott El Fejaj). Ces dépressions sont bordées à l'est par des plateaux rocheux (hamadfas) s'élevant en pente douce vers des cuvettes

pierreuses et sableuses (serirs) bordées de petites chaînes de montagnes: Djebel Tebaga (469m), monts de Matmata (713m), Dahar (689m). Au sud de ces dépressions, le Grand Erg Oriental est formé de dunes.

Figure 3.2. Géographie physique de la Tunisie



ISRIC-World Soil Information, Wageningen. 2010. "Soil property estimates for Tunisia derived from SOTER and WISE (SOTWISE-Tunisia, ver.1.0)". SOTWIS_Tunisia_v1.zip, GISfiles.

3.3.3. Le climat

Généralement, le climat d'une région est influencé par sa latitude, son relief et sa continentalité. De plus, il est le résultat des différents facteurs écologiques liés aux circonstances atmosphériques et météorologiques. Ainsi, la situation géographique de transition entre le continent africain et la Méditerranée de la Tunisie associée à l'étendue en longitude et latitude de la région, à l'existence de chaînes montagneuses et à l'influence maritime au voisinage des côtes, confère à la Tunisie un climat allant de tempéré dans la région du Nord à semi-aride et aride respectivement dans celles du centre et du sud, caractérisé par les irrégularités spatiales et temporelles. Le climat tunisien est aussi influencé par divers types de vents. La côte nord est exposée aux vents marins soufflant depuis le sud de la France, qui provoquent une baisse significative des températures et une hausse des précipitations en particulier en hiver. Au sud du pays, les vents sahariens soufflent sur les grandes étendues désertiques ainsi que sur les plaines. Ces vents chauds et secs aux printemps et en été font apparaître le sirocco, à l'origine de températures dépassant 40 °C.

Nous étudions dans ce qui suit le climat de la Tunisie en se référant aux principaux éléments du climat : le régime thermique, le régime pluvial, les étages bioclimatiques. La connaissance de ces éléments nécessiterait l'analyse de plusieurs critères (températures, précipitations, évaporation, humidité,...). Nous menons alors une étude bibliographique de ces critères.

3.3.3.a. Le régime thermique

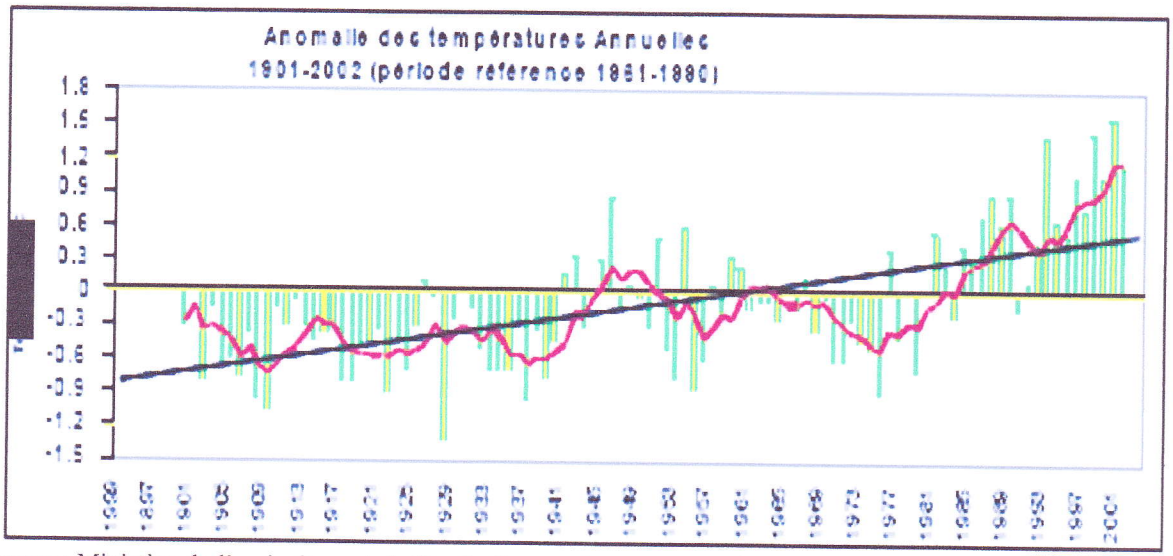
Pour étudier le régime thermique de la Tunisie nous nous intéressons à la connaissance des températures extrêmes et aux amplitudes thermiques, selon la démarche de Belkhodja et al. (1973).

Ce régime est marqué par deux saisons, l'hiver et l'été. Les températures les plus basses sont enregistrées aux mois de janvier et février en altitude et sur les côtes (les reliefs de Kroumerie et les plateaux du Centre ouest Kef, Makthar, Thala et Kasserine). Les températures minimales du mois le plus froid (Janvier) se concentrent sur trois zones : une bande côtière étroite (région de Bizerte, Ghar El-Melah, et surtout le Cap bon qui s'élargit sur les caps avec un minimum moyen de Janvier supérieur à 7°C ; une zone intérieure représentée par le quadrilatère Sakiet Sidi-Youssef, les Sers, Maktar, Hajeb El Aïoun avec un minimum

moyen varient entre 0 et 2°C ; et une zone intermédiaire représentée par les sommets et les dépressions avec des températures entre 2 et 7°C. Les plus hautes températures, variant entre 28 et 37°C, sont enregistrées aux mois de juillet et d'août. Elles se situent sur un axe Kairouan-Elborma pour l'ensemble du pays, et dans les dépressions fermées (haute vallée de la Medjerdah – plaines du pont du fahs de Rohia) pour la région du nord seulement. Les températures minimales augmentent en allant vers le littoral et vers le Sud, tandis que les maximales subissent l'effet modérateur de la mer et sont moins élevées sur le littoral. L'amplitude diurne[27] ne dépasse guère 10 °C sur l'ensemble du littoral et sur les hauts reliefs et atteint 12 à 14 °C en moyenne dans le centre et le sud du pays. (Belkhoja et al., 1973 ; MARH et GTZ, 2006).

En plus de cette irrégularité spatiale, le régime thermique de la Tunisie est caractérisé par une grande irrégularité interannuelle ainsi que par une fréquence élevée d'anomalies. La figure suivante montre ces irrégularités et ces anomalies en utilisant les écarts des températures moyennes annuelles de la période de 1901-2002 par rapport à la moyenne de la période de référence 1961-1990.

Figure 3.3. Irrégularité et anomalie des températures moyennes annuelles sur la période de 1901-2002 (période de référence 1961-1990)



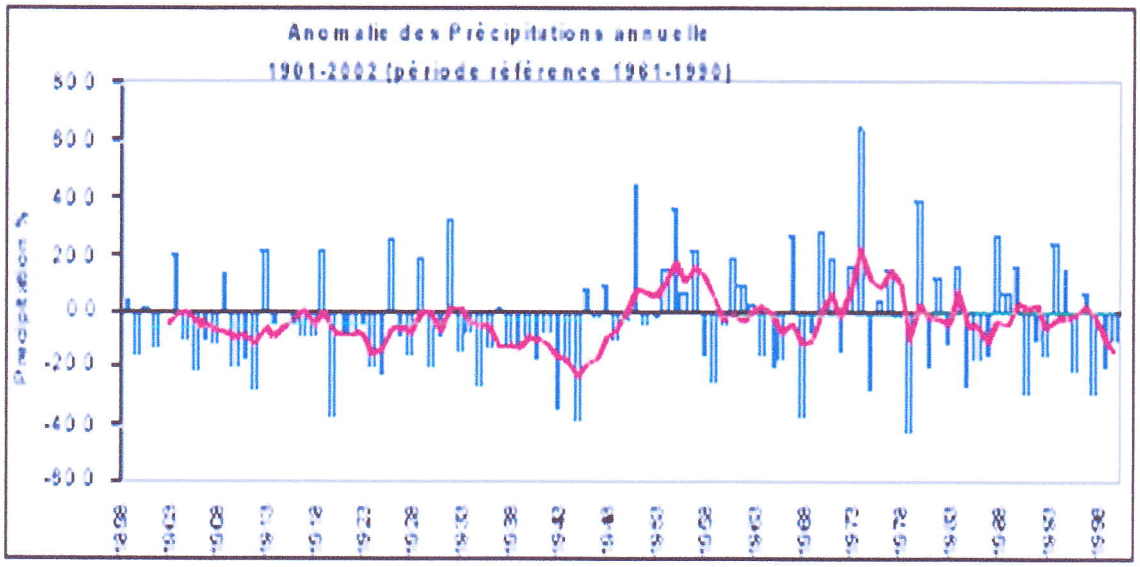
Source : Ministère de l'agriculture et de l'agriculture et des ressources hydrauliques (MARH) et la coopération technique allemande, Janvier 2007, « stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques ; cahier 7 : rapport des experts »

[27] C'est l'écart entre la température maximale et minimale

3.3.3.b. Le régime pluviométrique

La pluviométrie en Tunisie est caractérisée par la diminution des quantités moyennes mensuelles avec la latitude (du Nord vers le Sud) quelle que soit la saison. Elle est supérieure à 1200 mm/an à l'extrême Nord et à moins de 50 mm/an à celui du sud saharien (Mizouri, 2007). La pluviométrie annuelle moyenne sur la période 1970-2004 se situe entre 400 et 1000 mm au nord, entre 200 et 400 mm au centre, de 156 mm au sud et de moins de 100 mm dans l'extrême sud-ouest[28]. La pluviométrie connaît des irrégularités à l'intérieur même de chaque région. On enregistre par exemple une faible pluviométrie au niveau des plaines par rapport aux montagnes qui les entourent (Mizouri, 2007). Outre cette variabilité inter et intra régions, on enregistre aussi des différences importantes dans la répartition des précipitations dans le temps avec une forte variabilité inter saisonnière et inter annuelle tout le long du territoire. La figure 3.5 montre les anomalies enregistrées dans le temps en utilisant les écarts des précipitations moyennes annuelles de la période de 1901-2002 par rapport à la moyenne de la période de référence 1961-1990.

Figure 3.4. Irrégularité et anomalie des précipitations moyennes annuelles sur la période de 1901-2002 (période de référence 1961-1990)



Source : Ministère de l'agriculture et de l'agriculture et des ressources hydrauliques (MARH) et la coopération technique allemande (GTZ), Janvier 2007, « stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques ; cahier 7 : rapport des experts »

[28] Données avancées dans « changements climatiques : effets sur l'économie tunisienne et stratégie d'adaptation pour le secteur agricole et les ressources naturelles » rapport de la première étape, version du 11 octobre 2005, relatif au projet Mise en œuvre de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en Tunisie, Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques avec la coopération technique allemande GTZ

3.3.3.c. Les étages bioclimatiques

En se référant au quotient pluviométrique d'Emberger[29], le climat tunisien varie fortement. En fait, on distingue cinq zones bioclimatiques, allant de la plus humide à la plus aride. On constate toutefois que le climat est plutôt dominé par l'aridité. En effet, les étages bioclimatiques de l'humide et du subhumide au nord ouest, où la pluviométrie est favorable (de 600 à 800 mm), couvrent à peine 6,6% du territoire tunisien. De plus, le domaine du semi-aride (les précipitations varient de 400 à 600) couvre 16,4% du pays. Quant aux domaines arides (les précipitations varient de 100 à 600), et désertiques (les précipitations varient de 20 à 100), ils couvrent les 77% restant du pays.

3.3.4. Les zones agro-écologiques

La Tunisie peut être divisée en trois zones agro- écologiques : le grand Nord, le Centre et le Sud.

i) le Grand Nord

Le nord est la région de la Tunisie la mieux dotée par la nature et la plus riche. Avec ses trois étages bioclimatiques (humide, subhumide, semi-aride), cette région possède les principaux sols fertiles. La diversité de l'étage bioclimatique, de la topographie ainsi que des sols sont à l'origine de la diversité agronomique de la région bien que vouée à la céréaliculture, la sylviculture et l'élevage. Ainsi, on voit distingue dans le Nord Ouest, les parcours forestiers aménagés aux espèces fourragères, le croissant céréalier (Béja, Jendouba, Le Kef, Siliana, Bizerte) où blé et orge sont souvent associés à l'élevage de bovins, et l'arboriculture fruitière, surtout agrumes, vignoble et oliviers.

ii) Le Centre

Le centre de la Tunisie s'étend du sud de la Dorsale aux monts de Gafsa. Il comprend essentiellement quatre régions naturelles : la haute et la basse steppe, le kairouanais et le

[29] Emberger (1930) a établi une formule simple, développée pour la région méditerranéenne. Cette formule prend en considération le fait que l'évaporation annuelle est d'autant plus élevé que l'amplitude thermique est grande: Q=Ip= 1000 P / {[(M+m)/2](M-m)} où ; *m*, moyenne des minima du mois le plus froid et d'autre part le quotient pluviométrique ; Q, quotient de la précipitation P par le produit (T) (M - *m)* ; M est la moyenne des maxima du mois le plus chaud. Le quotient pluviothermique d'Emberger permet de définir les étages bioclimatiques.

sahel. Faisant partie de l'étage bioclimatique aride et semi aride mais soumis à l'influence maritime littorale, le Centre-Est est le domaine de l'olivier et des arbres fruitiers. Les Kairouanais, à bioclimat semi aride, sont alloués à la polyculture (culture céréalière) sur les terres épisodiquement irriguées, un peu d'arboriculture (olivier, amandiers et figuiers) et l'élevage. Ces paysages font la transition du Sahel avec les steppes. Celles-ci sont situées sur des sols profonds avec une texture à dominante sableuse et doté d'un bioclimat aride, et sont vouées au pâturage et à l'élevage extensif.

iii) Le Sud

Les sols du sud tunisien font partie de l'étage bioclimatique aride et saharien. Ils sont représentés essentiellement par des sols étroitement liés aux données géomorphologiques (collines, plateaux, dépressions et plaines littorales), caractéristiques qui font que la Tunisie du désert montre plusieurs contrastes parmi les régions naturelles du sud. On distingue deux zones agro écologique : le sud-ouest et le sud-est.

Le sud-est bénéficie des influences littorales et des aménagements hydrauliques. La plaine côtière méridionale (La Jeffara) est dotée de sols sableux à sablo-limoneux voués à l'arboriculture fruitière (oliviers, figuiers, amandiers). Quelques autres cultures (céréalières et maraichères) sont dispersées dans la région. Matmata et Dahar forment des zones montagneuses dotés de sols calcaires et marno-calciques qui n'ont aucun potentiel agricol dans les hauteurs, et de fluviosols au pied des escarpements qui sont généralement fertiles. Dans cette région on trouve quelques maigres cultures de blé ou d'orge, des oliviers et un peu d'élevage (moutons). Finalement, l'Ouara constitue une steppe de grands parcours où le système de production identifié est le système pastoral.

Le sud-ouest comprend les vastes dépressions salées ou chotts et l'Erg. Les grandes oasis sont groupées dans le Djérid et le Nefzaoua. Ces oasis sont soigneusement entretenues et exploitent les eaux souterraines. L'Erg est formé de dunes et de sable où peut se développer une végétation très rare, et constitue des zones de parcours pour les semi-nomades autour ou du côté du chott.

3.4. Identification des risques climatiques pouvant affecter l'agriculture

Les phénomènes extrêmes hydrométéorologiques font partie des caractéristiques principales du climat tunisien (Benzarti, 1994 ; Pagney, 1999). Les sécheresses et les inondations peuvent atteindre une magnitude importante. Entre 1901 et 2000, 14 inondations et 18 sécheresses ont été répertoriées. La fréquence des phénomènes extrêmes est également variable dans l'espace. Ainsi, par exemple, dans le Nord la fréquence des années sèches varie entre 10 et 15%, alors que dans le Centre et le Sud, cette fréquence se situe au alentour de 25 à 30%. Malgré la grande variabilité et la forte irrégularité des sécheresses et des inondations durant les dernières 1500 années, une augmentation des inondations depuis 1958 et des sécheresses depuis 1988 peut être constatée. Ces caractéristiques forment une contrainte des plus sérieuses pour les ressources naturelles édaphiques et hydrauliques indispensables à l'agriculture.

3.4.1. Les ressource en sol

3.4.1.a. Etat des ressources en sol

Le sol est une ressource fondamentale pour l'agriculture. Il constitue un milieu très sensible, dont l'équilibre dynamique est conditionné par le climat, la végétation, la position topographique et l'action humaine. Toute perturbation de ces principaux vecteurs entraînerait un changement important de dynamique qui pourrait être dégradant ou stabilisant. Il est donc impératif de bien connaitre le sol afin de pouvoir contrôler ces perturbations. Pour un pédologue, l'étude du sol passe par l'étude des facteurs de la pédogenèse, c'est-à-dire des facteurs de formation et d'évolution du sol : la roche, le climat, la végétation, le relief et l'homme (d'après Belkhoja et al. ; 1973 et Mtimet ; 1999). Sans entrer dans les détails de la pédologie, nous tenterons d'explorer les caractéristiques des sols en Tunisie et d'identifier l'état de leur dégradation. Ce paragraphe sera consacré à l'exploration des traits dominants du sol tunisien ainsi que ses aptitudes agronomiques.

La couverture pédologique de la Tunisie montre une grande diversité liée à la variabilité bioclimatique assez prononcée du pays et conditionnée par la position topographique. Dans la

plupart des régions tunisiennes, les sols sont dotés de calcaires et de matières organiques très évoluées (les paléosols du nord, du centre et du sud du pays) attribués à des pédogenèses successives du quaternaire[30]. Les sols tunisiens sont aussi caractérisés par l'ancienneté de leur occupation depuis l'antiquité (Belkhoja et al., 1973). Parmi les autres traits dominants des sols tunisiens contraignant la production agricole, nous avons les sols sableux meubles, les sols squelettiques sur croûtes calcaires et gypseuses et les sols sujets à la salinisation. Ces sols sont répartis sur toute la Tunisie et couvrent, d'après le ministère de l'environnement et de développement durable, environ 5.015.000 ha, soit 30% de la surface totale. Ces ressources en sol constituent des zones vulnérables aux différents processus d'altération du sol.

Nous proposons dans ce qui suit une description plus détaillé des traits dominants du sol tunisien à travers les principales zones physiographiques : le Nord, le centre et le sud. Une répartition des principales familles de sols selon les zones physiographique, les régions naturelles et les étages bioclimatiques correspondants figure dans le tableau 3.1.

L'élaboration de ce tableau a été réalisée principalement en se référant à la cinquième édition du bulletin de la division des sols du ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques de la Tunisie. Dans ce bulletin, les auteurs publient la carte pédologique couvrant tout le territoire tunisien à l'échelle de 1/500.000. La carte fournit une représentation simplifiée de la diversité et de la variabilité spatiale des sols correspondant aux principaux paysages pédologiques tunisiens. Les sols sont regroupés suivant des caractères semblables constituant des Unités Cartographiques de sol. Celles-ci sont définies en empruntant les critères de classification française[31] :

- SOLS MINERAUX BRUTS
- SOLS PEU EVOLUES
  - sols peu évolués d'origine climatique
  - sols peu évolués d'origine non climatique
- SOLS CALCOMAGNESIMORPHES
  - sols calcaires
  - sols à accumulation gypseuse

[30] Belkhoja et al. (1973) détaillent les grands traits de la paléographie de la Tunisie.

[31] « La classification française groupe les unités du sol en un certain nombre de classes, sous classes, groupes, sous-groupes. Au niveau le plus élevé les classes permettent la séparation des grands processus d'évolution, d'après le mode d'altération, l'intensité de l'évolution, les types de matières organiques. Les sous classes se présentent, à l'intérieur des classes, comme des unités de sols évoluant différemment sous l'influence de facteurs secondaires, climatiques ou pédologiques (hydromorphie, halomorphie). Les groupes diffèrent entre eux par certains caractères évolutifs des profils eux-mêmes : lessivage du calcaire ou de colloïdes. Enfin, l'intensité de ces caractères évolutifs permet une subdivision des groupes en sous groupes. » Sols de Tunisie n°5. Bulletin de la division des sols, ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques, 1973.

- VERTISOLS
- SOLS ISOHUMIQUES
- SOLS A MULL
- SOLS FERSIALLITIQUES
- SOLS HALOMORPHES
- SOLS HYDROMORPHES

Les unités cartographiques concernent en général un groupe et parfois un sous groupe. Elles sont constituées par plusieurs types de sol, qui sont décrits par un ensemble de variables essentiellement qualitatives. Ces décrivent la nature et certaines propriétés du sol (nom du sol, matériau parental). La description morphologique de la couverture du sol est réalisée en isolant un maillon élémentaire, « le profil pédologique », montrant une coupe verticale d'un sol depuis sa surface jusqu'à atteindre un matériau relativement peu altéré. Un profil pédologique est une succession d'horizons qui se développent depuis la roche mère jusqu'à la surface du sol.

Nous n'exposons pas les détails des profils de chaque type de sol dans le tableau, notre objectif est de décrire le contexte général. Nous présentons plutôt la distribution des classes de l'occupation du sol comme indication des différents types de sol. La note explicative jointe à la carte décrit la Tunisie septentorielle uniquement, nous nous sommes référés au travail de Mtimet (1999) et aux projets de Gestion des ressources réalisés dans le cadre du programme de coopération entre la FAO et le gouvernement Tunisien pour explorer le reste du pays.

Tableau 3.1. Vocation agronomique des principales familles de sols selon les zones physiographique, les régions naturelles et les étages bioclimatique.

Régions physiographiques		Régions naturelles	Etage bioclimatiques	Types de sols (classification française)	Superficie (Ha)	Occupation du sol
Nord	Nord-Ouest	Mogods et Kroumirie	Humide	Sols bruns, bruns lessivés Hydromorphes	178000	Maquis, Forêt (de chênes-liège et de pin d'alep) ; Parcours ; Terrain agricole (Céréaliculture, élevage) ;
				Vertisols	65000	
				Sols peu évolués d'apports hydromorphes	23400	
				Sols bruns calcaires et rendzines	23000	
				Sols rouges	3500	
				Régosols	5800	
		Tell	Semi aride supérieur au subhumide	Sols peu évolués d'apport alluvial	140000	
				Vertisols	87000	
				Rendzines sur croûte	113000	
				Sols châtains Sols rouges Sols bruns calcaires	35000	

				Rendzines et brun calcaires en association avec des régosols, des lithosols et des sols rouges	420000	
		Dorsale	Subhumide (les sommets des hauteurs) au Semi aride (les montagnes, glacis, plaines)	Sols peu évolués d'apport alluvial,	158000	
				Vertisols,	62000	
				Sols bruns calcaires, sols chatains et sols rouges méditerranéens	53000	
				Sols affectés par la salure	20000	
				Régosols, sols régosoliques, lithosols et rendzines	955000	
	Nord-Est	Nord-Est le Cap Bon	Subhumide / semi aride supérieur et moyen	Sols peu évolués d'apport alluvial	134000	Forêt, Parcours, Terrain agricole (Maraichage, viniculture, oléiculture, agrumes)
				Vertisols	35000	
				Sols rouges méditerranéens et sols châtains	21000	
				Sols bruns calcaires	18000	
				Rendzines sur croûte	-	

				Association de rendzine	232000	
centre	Centre-Est	Le Sahel	Semi aride inférieur Aride supérieur	Sols bruns isohumiques et de sierozems	-	Parcours ; Terrains agricole (Arboriculture fruitière)
				Sols encroûtés	-	
				Sols salés	-	
				Sols gypseux		
	Centre-Ouest	Kairouannais	Semi aride moyen / aride supérieur	Sols peu évolués d'apport	-	Parcours, steppes ; Terrains agricole (polyculture Pâturage Elevage)
		Basse steppe	Aride supérieur et inférieur	Sols isohumiques profonds	425000	
				Sols isohumiques encroûtés peu profonds	296000	
				Sols peu évolués d'apport alluvial	306000	
				Sols encroûtés type rendzine peu profonds et lithosols	282000	
				Sols salés et très salés	200000	
		Haute steppe	Aride / semi aride	Sols isohumiques	450000	
				Sols peu évolués d'apport alluvial	225000	

				Sols peu évolués d'apport alluvial	306000	
				Rendzines et rendzines sur crûtes, dols bruts d'érosion, régosols et sols régosoloques	1065000	
Sud	Sud-Est	La Jeffara	Aride	Lithosols, régosols	201200	Parcours ; Terrains agricole {l'arboriculture fruitière (oliviers, figuiers, amandiers), élevage semi-nomade}
		L'Ouara		Sols peu évolués d'apport	247000	
	Sud-Ouest	La zone des Chotts	Aride	Sols encroûtés calcaires et gypseux	237500	Parcours ; steppes ; Terrains agricole (Dattes, élevage semi- nomade)
		Matmata et Daher		Sols isohumiques	95000	
		L'Erg Oriental		Sols salés	127000	

L'élaboration de ce tableau est réalisée sur la base des documents : K. Belkhodja (1973), Projet UTF/TUN/021/TUN n°13, n°14, n°15, n°16 et n°17 (1995), et A. Mtimet (1999).

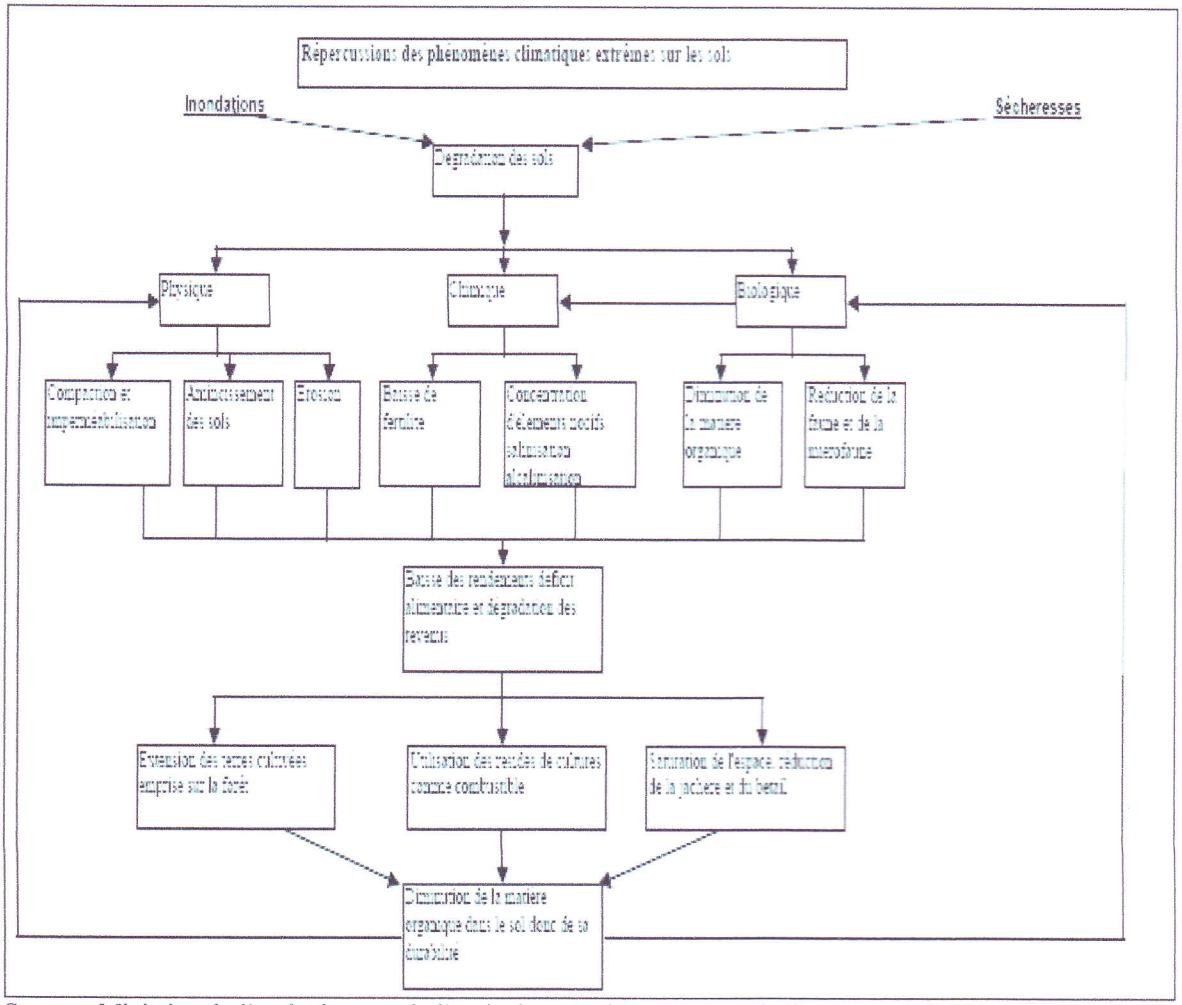
3.4.1.b. La pression sur les ressources en sol

Les ressources en sol en Tunisie sont déjà soumises à des facteurs anthropiques qui menaceraient leurs potentiels de production agricole en qualité et en quantité. Ainsi, on constate une réduction de ces ressources qui ne cesse de creuser à cause d'une urbanisation rapide du pays[32] et du développement de l'espace des cultures qui peuvent conduire de plus en plus à la diminution des surfaces forestiers et des parcours considérés comme meilleur solution contre l'érosion (Ministère de l'environnement et du Développement Durable ; 2004).

Les conditions climatiques, et particulièrement les phénomènes extrêmes viennent amplifier ces risques. Le schéma suivant décrit les répercussions possibles engendrées par les phénomènes climatiques extrêmes sur le sol. Il présente de façon détaillée les différentes transformations aux niveaux physique, chimique et biologique du sol.

[32] En 2004 la population rurale ne représente que 36 % de la population totale et atteindrait plus de 75 % d'ici 2025

Figure 3.5. Répercussions des phénomènes extrêmes sur les sols



Source : Ministère de l'agriculture et de l'agriculture et des ressources hydrauliques (MARH) et la coopération technique allemande (GTZ), Janvier 2007, « stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques : rapport final »

Dans son travail sur les ressources en sol, Mtimet (1999) évoque la question de la vulnérabilité des sols tunisiens. Il associe le phénomène de dégradation du sol à cinq processus : l'érosion hydrique, l'érosion éolienne, l'urbanisation, la salinisation et l'hydromorphie. Puis, il explique que ces processus sont provoqués par la pression des facteurs anthropiques (ancienneté d'occupation, exploitation de terres fragiles et sensibles à l'érosion, pratiques agricoles peu judicieuses, etc.) et par la sévérité des conditions climatiques (fortes pluies, sécheresse).

Au niveau quantitatif, selon une étude sur la dégradation du sol réalisée par la Direction Générale de l'Environnement et de la Qualité de Vie du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (2005), 93% des ressources pédologiques de la Tunisie sont vulnérables. Un des processus les plus menaçants est le phénomène d'érosion.

Ainsi, le rapport indique que, sur une superficie globale de terres agricoles exploitables estimée à 15, 6 millions d'hectares, un peu plus de 13 millions d'hectares sont directement exposés à un ou plusieurs phénomènes d'érosion. De plus, qu'elle soit d'origine climatique ou humaine, l'érosion a affecté près de 93% des sols cultivables du pays dont 14% sont exposés à une détérioration moyenne, 43% sont soumis à des risques de dégradation considérés plus ou moins forts, alors que 31% des terres sont sérieusement dégradées.

3.4.2. Les ressource en eau

La situation géographique de la Tunisie entre la méditerrané au nord et le désert au sud lui confère un climat diversifié mais dominé par l'aridité (16.4% du territoire est semi-aride et 77% du territoire est aride). Ainsi la pluviométrie moyenne annuelle varie de moins de 100mm à l'extrême sud à 1500mm à l'extrême nord. La saison pluvieuse s'étend du mois de Septembre au mois de Mai avec un maximum de pluviométrie en hiver.

Cette situation place la Tunisie dans la catégorie des pays les moins dotés en ressources en eau dans le bassin méditerranéen. En fait, on estime qu'un tunisien dispose de $450m^3$ par an (en 2007) alors que le seuil de sécheresse hydrique est de $1000m^3$ par an et par personne. Au-delà de cette échéance et compte tenu de la croissance des besoins en eau, on prévoit une pénurie à l'horizon 2030 avec une moyenne de dotation en eau qui atteindrait $350m^3$ par an. A côté des limites hydriques du pays, la situation géographique de la Tunisie ajoutée aux aspects géomorphologiques et géologiques des différents régions du pays sont à l'origine d'une variabilité spatio-temporelle des ressources en eau.

Avant d'examiner la vulnérabilité des ressources en eau aux phénomènes extrêmes, nous procédons à une analyse du secteur de l'eau basée sur les inventaires des Directions générales du Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques (MARH) qui s'occupent directement de l'eau, à savoir:

- La Direction générale des ressources en eau (DGRE), chargée du suivi et de l'évaluation des ressources en eau.
- La Direction générale des barrages et des grands travaux hydrauliques (DGBGTH), dont les principales activités sont la construction des barrages et des grands aménagements hydrauliques, et la gestion des barrages.
- La Direction générale du génie rural et de l'exploitation des eaux (DGGREE), qui est responsable de l'irrigation/drainage, de l'équipement rural et de l'approvisionnement en eau des populations rurales.

3.4.2.a. Le potentiel des ressources en eau

Selon les statistiques de l'an 2000 de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) du Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques, les ressources en eau de la Tunisie sont évaluées à 4825 Million m^3 (Mm^3) dont 2700 Mm^3 correspondent aux eaux de surface et 2125 Mm^3 pour les eaux souterraines.

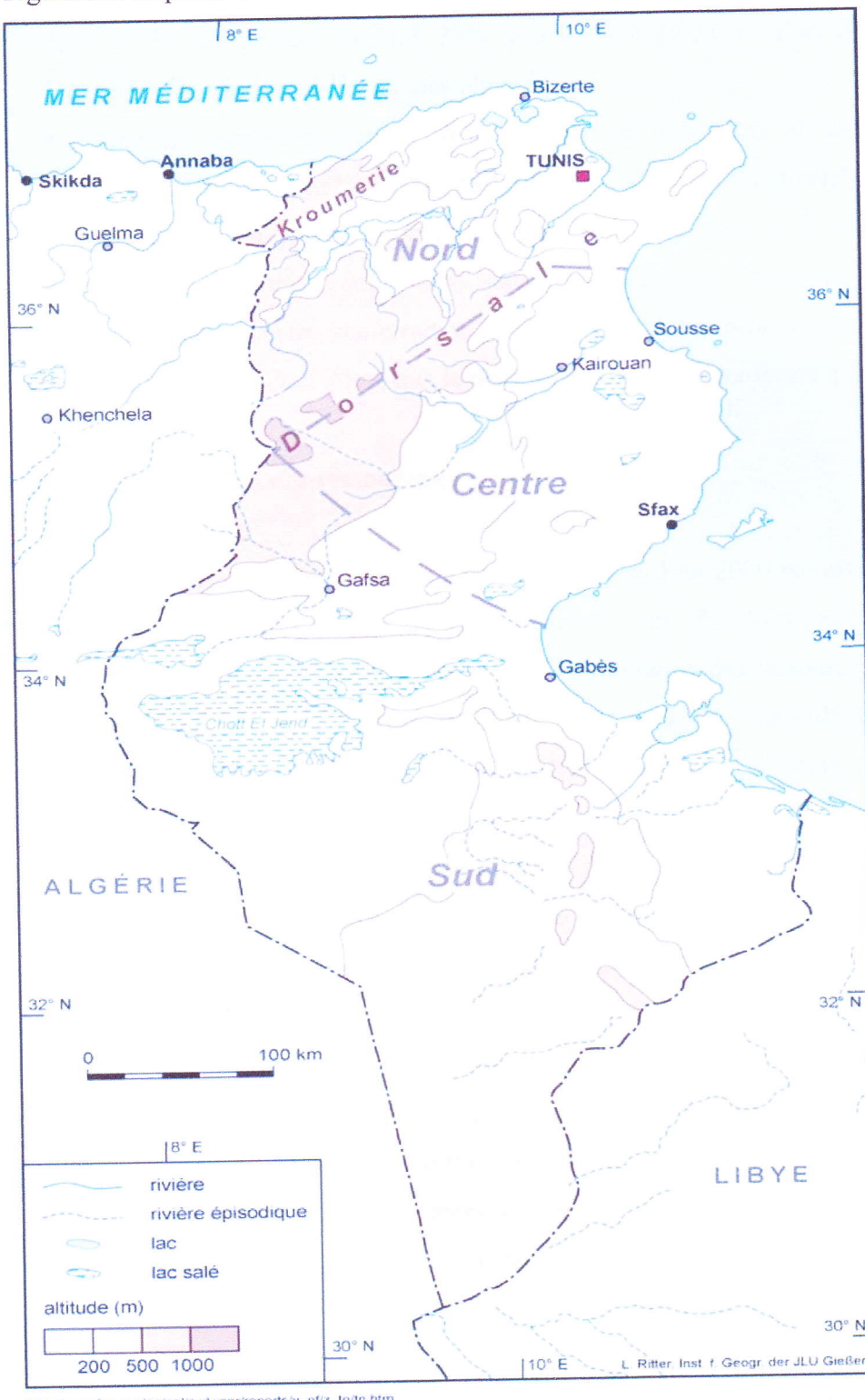
i) Les ressources de surface

La moyenne annuelle de pluviométrie sur tout le territoire est évaluée par la DGRE à 230mm par an, soit une dotation moyenne annuelle en eau de surface d'environ 36 milliards de m3/an.

- La pluviométrie est importante dans les zones humides et subhumides localisées dans le nord-ouest du territoire avec une moyenne annuelle comprise entre 600mm et 1200mm. Ceci fait que, bien que sa superficie ne représente que 6.6% de la superficie totale du pays, les apports en eau de surface provenant de l'extrême nord (évalués en moyenne à 960 Mm^3/an) représente une partie importante du potentiel total des apports en eau de surface du pays, soit 36 %.
- Dans les zones semi-aride qui s'étendent sur les régions montagneuse du Tell et de la Dorsale et du nord-est, la pluviométrie est modéré avec une moyenne annuelle comprise entre 400 et 600 mm. Cette région constitue un réservoir pour les eaux de surface de la Tunisie avec un réseau hydrographique dense représenté par les bassins de la Medjerda (qui constitue le fleuve le plus important), du Cap Bon et de Méliane. Elle occupe 16% de la superficie du pays mais elle fournit une moyenne de 1230 Mm^3/an, soit 46 % du potentiel total en eau de surface.
- Le reste du pays (les régions du centre et du sud) représente 77% de la superficie totale et se caractérise par un climat aride, une pluviométrie moyenne variant de moins de 100mm à 400mm par an. Les bassins du centre et du sud sont caractérisés par des apports faibles et irréguliers dûs aux caractéristiques édaphiques généralement perméables et à une topographie peu variée. Le centre fournit une moyenne annuelle de ressources en eau évaluées à 320 Mm^3/an, soit 12 % du potentiel total en eau de surface provenant des bassins versants de Nebhana, Marguellil, Zéroud et du Sahel. Les ressources en eau de surface de la région du sud sont les plus les plus faibles et les plus irrégulières, évaluées en

moyenne à 190 Mm^3 par an, les dotations en eau de surface constituant 6 % du potentiel total.

Figure 3.6. Répartition des ressources de surface sur le territoire tunisien



http://www.fao.org/ag/agl/swlwpn/reports/y_nf/z_tn/tn.htm

Source: FAO (1995); «Geologic map »; http://www.fao.org/agl/swlwpn/reports/y_nf/z_tn/tn.htm

ii) Les ressources souterraines

Toujours selon les analyses menées par la DGRE les ressources en eaux souterraines sont estimées à 2125 Mm3 et sont réparties comme suit

- Les eaux souterraines provenant des nappes phréatiques sont évaluées à 745 Mm3 dont 55 % proviennent du nord, 30% proviennent du centre alors que le sud ne fournit que 15 % des ressources des nappes phréatique.
- Pour les nappes profondes, les dotations en ressources en eau souterraines sont évaluées à 1380 Mm3 en l'an 2000 dont 650 Mm3 sont non renouvelables. Le potentiel des nappes peu profondes et profondes est important au sud du pays qui contient 58% des ressources souterraines dont 44% sont profondes. Le centre est relativement bien approvisionné en eaux souterraines profondes et peu profondes renfermant 24 % des ressources souterraines. Alors que le nord de la Tunisie ne renferme que 18 %.

3.4.2.b. Mobilisation des ressources

Selon un inventaire accomplie par la DGRE en l'an 2000 environ 2.100 Mm^3 par an des ressources en eau de surface sont mobilisables (dont 1800 Mm^3 sont déjà mobilisés, soit un taux de 83 %). Pour les eaux souterraines, l'exploitation des ressources en eaux provenant des nappes phréatiques a atteint 780 Mm^3 en l'an 2000, soit 105%, et ce, alors que l'exploitation des eaux souterraines profondes est estimé à 1100 Mm3, ce qui correspond à 80% du total.

La mobilisation de ces ressources est réalisé grâce à une infrastructure hydraulique qui comporte 29 grands barrages, 200 barrages collinaires, 766 lacs collinaires et plus de 3.000 forages et 151.000 puits de surface mobilisant 86% de l'ensemble des ressources en eau exploitables en 2006. Cette infrastructure hydraulique a permi de répondre aux besoins en eau des différents secteurs économiques du pays. Ainsi, 82% des ressources en eau sont consommées par le secteur agricole, essentiellement l'élevage et l'irrigation (la superficie irriguée est de 365000 ha en 2001). La consommation domestique constitue 13% des ressources mobilisées, celles destinées au secteur de l'industrie est de 4% alors que le tourisme consomme moins de 1% des prélèvements totaux.

Dans le cadre des efforts de satisfaire les besoins croissants d'eau, une stratégie qui consiste à promouvoir le développement des ressources dites non conventionnelles a été lancée en 2010. Elle consiste à traiter les eaux usées, dessaliniser l'eau de mer (dont le coût

est en baisse régulière depuis quelques années), et une amélioration des réseaux de distribution pour réduire les pertes dues aux fuites.

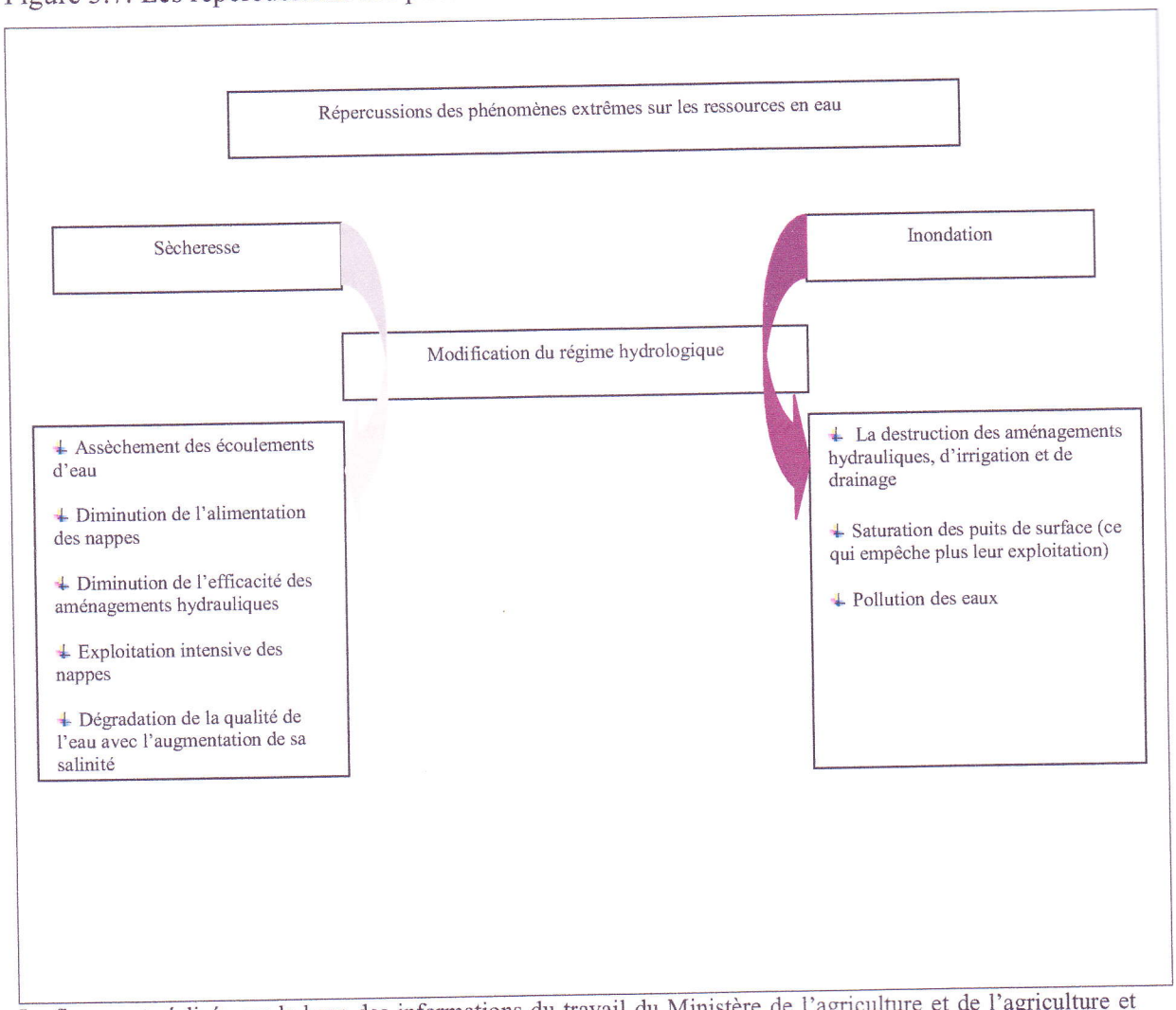
3.4.2.c. Vulnérabilité des ressources en eau

Les ressources en eau du pays sont vulnérables. En fait, en plus du stress hydrique auquel est confrontée la Tunisie, la qualité de ces ressources en eau est parfois à la limite des normes avec une salinité élevée surtout dans le cas des ressources souterraines. Ainsi, selon l'annuaire de l'exploitation des nappes (2003), seules 72% des eaux de surface sont de bonne qualité avec une salinité inférieure à 1,5 g/l. Pour les ressources des nappes phréatiques la situation est plus critique avec une salinité plus élevée, en effet, seules 3% de ces ressources ont une salinité inférieure à 1,5 g/l, alors que 13% ont une salinité inférieure à 3 g/l, et 41% ont une salinité inférieure à 5 g/l. Le cas des ressources souterraines profondes est un peu moins critique que celui des nappes phréatiques avec un taux de 25% des ressources mobilisées à salinité inférieure à 1,5 g/l, un taux de 58% à salinité comprise entre 1,5 et 3 g/l, et un taux de 12% à salinité comprise entre 3 et 5 g/l. Le degré de salinité varie d'une année à l'autre selon plusieurs facteurs, essentiellement les précipitations.

De plus, un niveau de forte baisse des ressources en eau dans les nappes est enregistré ces dernières années avec une salinisation de certaines nappes côtières. Les eaux souterraines constituent les ressources les plus mobilisés ; avec un taux de 70 %. Elles font l'objet de surexploitation surtout au niveau de certaines nappes phréatiques du nord-est et du centre. On enregistre un taux de surexploitation égale à 6% en l'an 2000. Une telle situation serait non seulement risquée pour la disponibilité des ressources en eau mais aussi pour la qualité de ces ressources. Selon une étude sur la Tunisie réalisée par le Centre d'activités régionales du Plan Bleu (BP/RAC, 2001), le degré d'exploitation des ressources phréatiques a atteint un stade où la durabilité est menacée par la dégradation chimique due à l'intrusion de l'eau de mer. Ces conclusions sont particulièrement critiques pour le secteur agricole, principal consommateur de ressources souterraines avec un taux d'exploitation de 76.9% enregistré en l'an 2000. On a même enregistré le renoncement à certains périmètres irrigués (BP/RAC, 2001).

Les risques d'aggravation sous la pression des phénomènes climatiques extrêmes sont multiples. La figure suivante met en relief les principaux risques.

Figure 3.7. Les répercussions des phénomènes extrêmes sur les ressources en eau



La figure est réalisée sur la base des informations du travail du Ministère de l'agriculture et de l'agriculture et des ressources hydrauliques (MARH) et la coopération technique allemande (GTZ), Janvier 2007, « stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques : rapport final » ; où on trouve une synthèse des dégâts ultérieurs engendrés par les phénomènes extrêmes sur le secteur de l'eau.

3.5. Le changement climatique en Tunisie

La Tunisie a signé la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), à Rio en 1992, puis l'a ratifiée en juillet 1993 et en février 2005. La Tunisie faisant partie des pays en voie de développement, la CCNUCC ne lui donne aucune obligation de limitation des émissions. Cependant, elle est tenue de transmettre régulièrement une communication, conformément à l'article 12 de la communication Initiale tunisienne à la CCNUCC, décrivant les efforts déployés, en vue de contribuer à la lutte contre le changement climatique. Par ailleurs, convaincu d'une part du principe de responsabilités communes mais

différentiables, et d'autre part de la menace que peut représenter le changement climatique sur le pays, le gouvernement tunisien s'est engagé dans l'élaboration d'une stratégie de développement durable. Dans ce contexte, la Tunisie a lancé un projet d'appui à la mise en œuvre de la « CCNUCC » sur les changements climatiques (désigné par CCC/GTZ[33]) en collaboration avec la Coopération Technique Allemande (GTZ)[34]. L'objectif du projet est d'intégrer les mesures concernant la mise en œuvre de la « CCNUCC » et du Protocole de Kyoto dans les stratégies et plans de développement des secteurs économiques prioritaires tunisiens. Pour aboutir à cet objectif général, le projet s'est fixé comme objectifs spécifiques d'étudier la vulnérabilité et d'identifier les principales mesures d'adaptation aux changements climatiques dans le cadre d'une stratégie nationale pour l'adaptation dans le secteur agricole et les ressources naturelles. Dans ce qui suit nous nous appuyons sur les informations contenues dans les rapports de ce projet ainsi que dans d'autres documents nationaux, régionaux et internationaux disponibles, afin d'identifier les différentes formes de la vulnérabilité du secteur agricole.

3.5.1. Evolution du climat tunisien

En se basant sur les observations du GIEC (chapitre 1) pour la Méditerranée, nous pouvons déduire la tendance de l'évolution du climat pour la Tunisie. Nous notons une diminution du niveau des précipitations ainsi qu'une tendance à la hausse des fréquences des évènements extrêmes.

Les études réalisées dans ce contexte au niveau régional sont rares. L'un des premiers travaux à notre connaissance est celui de Labbane Y. et al. (1994). L'étude a porté sur l'évolution de la température en Tunisie relative à la période 1961-1990. Les auteurs ont réalisé une analyse statistique des séries de données de 12 stations du réseau de l'Institut National de la Météorologie. Les résultats ont montré qu'il n'y a pas de tendance dominante et qu'on enregistre plutôt une tendance à la baisse à la station de Bizerte contrairement aux

[33] Le projet de mise en œuvre de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en Tunisie désigné par CCC/GTZ, comme le décrit la Coopération Technique Allemande (GTZ) est réalisé dans le cadre de la coopération bilatérale Tuniso-Allemande et est planifiée pour une durée de 6 ans (2006-2011) et est structuré en deux phases (de 2006 à 2008 et de 2009 à 2011).

[34] La GTZ est une entreprise de coopération internationale pour le développement durable. Elle propose des solutions de développement dans les domaines politique, économique, écologique et social. Elle opère dans 128 pays situés en Afrique, en Asie et en Amérique latine, dans les régions du Bassin méditerranéen et du Moyen-Orient ainsi qu'en Europe, dans le Caucase et en Asie centrale. L'entreprise est détenue par la République fédérale allemande et a son siège à Francfort-sur-le-Main.

conclusions mondiales. Cependant, ces résultats sont contestables en comparant les méthodes de travail de l'étude à celles des travaux plus pointus adoptés au niveau international (voir chapitre 1). Les auteurs même de l'étude ont exprimé leurs réserves quant à ces résultats étant donnée la période d'étude choisie ainsi que la période étroite qui couvre la série de données. Cette vigilance est d'autant plus accentuée que l'une des caractéristiques les plus remarquables du climat tunisien est sa variabilité prononcée, due à l'irrégularité et la violence des pluies d'une part et par la longueur des saisons et même des années sèches d'autre part (Mizouri M., 2007). Il convient donc de travailler sur des séries longues.

Dans un rapport de prospection du climat au 20ième siècle, réalisé par le Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM)[35] (Les notes d'alertes du CIHEAM, 2008) sur la région du Maghreb (la Tunisie, l'Algérie et le Maroc) mentionne : une hausse de température au 20ième siècle comprise entre 1.5 et 2°C (à comparer à 0.74°C au niveau mondial, soit plus du double de la hausse de la moyenne planétaire), une modification de la quantité et de la répartition des pluies, avec une baisse de la moyenne annuelle entre 10 et 20%, une occurrence plus grande des sécheresses avec une fréquence d'une fois tous les trois ans, une intensification des inondations, des vagues de chaleur en toutes saisons, et une élévation du niveau de la mer (à Sfax on a noté une élévation 3 à 4 fois plus rapide que la moyenne mondiale, de 1.5 à 2mm/an).

De plus, une analyse statistique détaillée des tendances des précipitations et des températures annuelles et saisonnières sur la période 1950-2004 réalisée sur cinq stations météorologiques (Tunis-Carthage, Jendouba, Kairouan, Gafsa, Gabes) supposées représentatives des différents régions naturelles de la Tunisie par la GTZ en collaboration avec le MARH dans le cadre du projet CC/GTZ, confirme les constats des études précédentes quant à l'évolution de la température et des précipitations ainsi que l'intensification des évènements climatiques extrêmes (vagues de chaleurs et inondations), essentiellement lors des deux dernières décennies.

Les observations de l'augmentation des températures moyennes, de l'élévation du niveau de la mer et de l'augmentation des fréquences des extrêmes climatique, enregistrés

[35] Le CIHEAM est une organisation intergouvernementale qui a été créé en 1962. Elle réunit aujourd'hui treize Etats membres du Bassin méditerranéen (Albanie, Algérie, Egypte, Espagne, France, Grèce, Italie, Liban, Malte, Maroc, Portugal, Tunisie et Turquie). Le CIHEAM se structure autour de quatre Instituts Agronomiques Méditerranéens (IAM), localisés à Bari (Italie), Chania (Grèce), Montpellier (France) et Saragosse (Espagne), et d'un Secrétariat Général situé à Paris. Avec au cœur de son action trois missions fondamentales : la formation, la recherche et la coopération dans les domaines d'activité de: l'agriculture, l'alimentation et le développement rural durable en Méditerranée.

durant le vingtième siècle prouvent que le changement climatique est incontestable et que la Tunisie serait l'une des régions les plus menacées.

3.5.2. Le climat tunisien futur

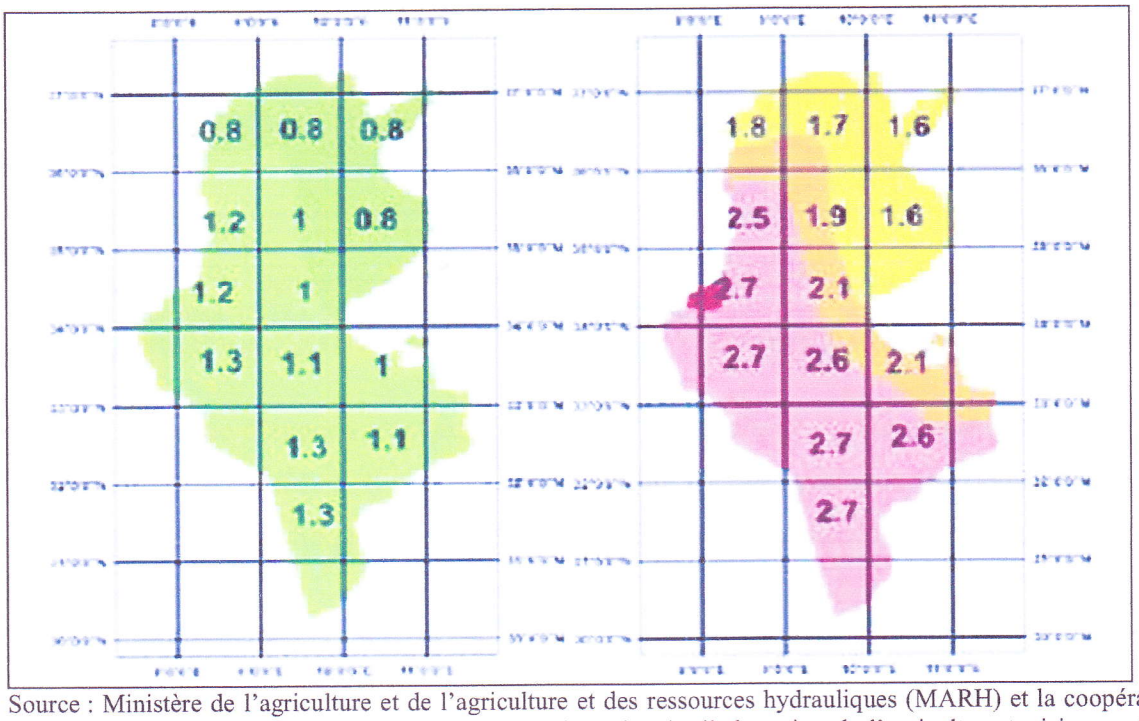
Les prévisions du GIEC (que nous avons déjà mentionné au premier chapitre) montrent qu'il est très probable que la Tunisie connaîtra un réchauffement plus important qu'au niveau mondial, affectant fortement les ressources hydrauliques, les écosystèmes et les agro systèmes. Ces prévisions sont basées sur des conclusions liées à l'étude de l'évolution du climat global et à ceux des régions méditerranéenne et africaine. Ces prévisions sont les résultats de simulation du climat futur issus de modèles numériques couplés à échelles de résolution variables mais faibles. Bien évidemment, de tels modèles sont conçus pour de larges étendues géographiques. Une augmentation de l'échelle de résolution de ces modèles est nécessaire afin de mener des études du changement climatique au niveau régional. Le laboratoire du « Tyndall Center» offre une étude concernant la Tunisie. Dans cette étude, les résultats de quatre modèles ont été projetés : les modèles canadien (CGCM2), australien (CSIROmk2), américain (DOEPCM) et britannique (HadCM3). Les scénarios extrêmes A1, A1F1 ainsi que les scénarios moyens A2 et B2 du SRES ont été combinés aux modèles cités (Hulme et al. 2001).

Une analyse de ces projections est réalisée dans le cadre du projet CCC/GTZ, afin de développer des projections climatiques pour la Tunisie. Cette analyse indique qu'à l'échelle annuelle, les modèles DOEPCM et CSIRO donnent des résultats extrêmes bas et hauts respectivement. Les modèles CGCM2 et HadCM3 donnent des augmentations des températures médianes de l'ordre de +3 °C à l'horizon 2080. Finalement, Le modèle HadCM3 a été retenu comme modèle le plus fiable pour projeter les températures et les précipitations des horizons futurs pour la Tunisie. Le choix des scénarios appropriés a été réalisé à partir d'une comparaison de l'évolution des températures, selon les quatre scénarios SRES (haut : A1F1, bas : B1, moyens : A2 et B2) proposés dans l'étude à partir des observations faites au sujet des tendances des températures vérifiées au cours de la période 1950-2004. L'étude comparative a révélé que les scénarios A2 et B2 correspondent le mieux à la projection du climat futur de la Tunisie même si, à l'horizon 2050, les résultats des quatre scénarios s'avèrent assez proches. Les scénarios moyens A2 et B2 ont été alors sélectionnés pour étudier les projections futures du climat tunisien. Ces projections réalisées au pas de temps de

cinq ans par le groupe d'experts en climat du projet CCC/GTZ sont les premières disponibles pour la Tunisie (MARH et GTZ, 2007).

Les résultats publiés de cette étude concernent les principales variations climatiques (température et précipitations) annuelles et saisonnières attendues à l'horizon 2020 (2011-2040) et 2050 (2041-2070) par rapport à la période de référence (1961-1990). Pour les températures (figure3.10), on prévoit une augmentation quasi-certaine entre 0.6 et 1.3°C de la température moyenne annuelle. Cette augmentation serait accentuée à l'horizon 2050; c'est la région du Sud-ouest qui subirait la plus forte élévation (2.7°C) accompagnée d'une fréquence plus accrue de vagues de chaleur.

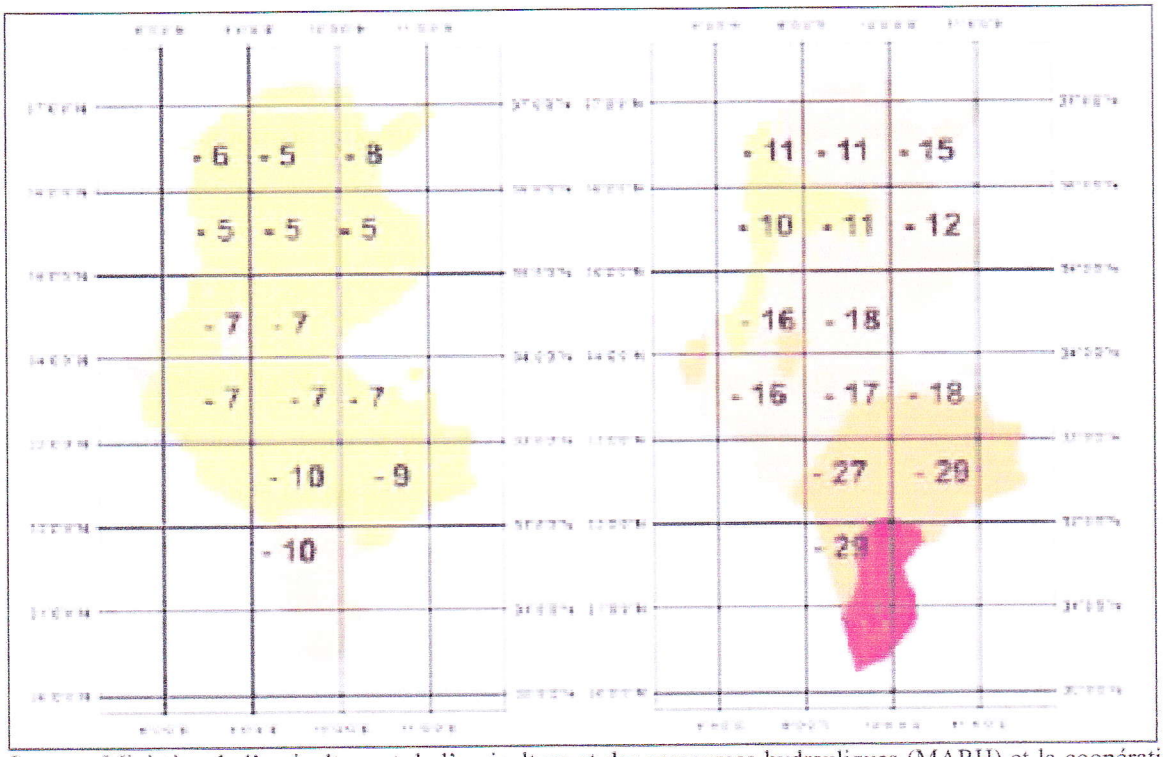
Figure 3.8. Projections de la température moyennes annuelles (selon le modèle HadCM3 et le scénario A2) à l'horizon 2020 (gauche) et 2050 (droite) par rapport à la période de référence (1961-1990)



Source : Ministère de l'agriculture et de l'agriculture et des ressources hydrauliques (MARH) et la coopération technique allemande (GTZ), Janvier 2007, « stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques ; cahiers 7 : rapport des groupes d'experts »

Pour les précipitations (figure 3.11.), on prévoit une baisse moyenne variant de 5% (10%) au Nord ouest, à 10% (30%) à l'extrême Sud à l'horizon 2020 (2050).

Figure 3.11. Projections des précipitations moyennes annuelles (selon le modèle HadCM3 et le scénario A2) à l'horizon 2020 (gauche) et 2050 (droite) par rapport à la période de référence (1961-1990)



Source : Ministère de l'agriculture et de l'agriculture et des ressources hydrauliques (MARH) et la coopération technique allemande (GTZ), Janvier 2007, « stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques ; cahiers 7 : rapport des groupes d'experts »

Le groupe d'experts s'est aussi intéressé à la variabilité du climat ainsi à la fréquence des phénomènes extrêmes. Il prévoit une variabilité accrue du climat, une variabilité et une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes (sécheresses, inondations, vent).

Dans le rapport on trouve également une étude des impacts attendus de ces projections sur les principaux secteurs (les ressources en eau, les écosystèmes, les agro-systèmes) de la Tunisie. Ces prévisions viennent confirmer celles du GIEC. Nous notons particulièrement les conclusions sur les conséquences quant aux projections à l'horizon 2020 :

- une augmentation de la vulnérabilité des écosystèmes ; avec l'accentuation de la fréquence des incendies de la forêt et la modification du couvert végétal
- une réduction considérable des eaux de surfaces et une baisse de 28% des ressources en eau souterraine; une augmentation des taux d'évaporation et de l'intrusion de l'eau de mer dans les nappes côtières ;

- Un accroissement des besoins en eau pour l'irrigation et une diminution de la production agricole par manque d'eau ; on prévoit une réduction de 20% des surfaces céréalières et d'environ 800.000 ha des superficies arboricoles en particulier dans les régions du centre et du sud ;
- une augmentation du risque des maladies respiratoires, hydriques et vectorielles ; et une augmentation du niveau de la mer de 15 à 18cm avec risque de dégradation des infrastructures touristiques.

Conclusion

En Afrique du Nord, la Tunisie se trouve dans une région aride à semi-aride avec un climat méditerranéen dans la partie nord et un climat saharien dans la partie sud. Cette situation de transition lui confère une variabilité spécifique.

Le climat tunisien se caractérise aussi par une fréquence élevée des phénomènes extrêmes oscillant entre des sècheresses prolongées (1967, 1968, 1994, et 1995) et des inondations catastrophiques (1969, 1973, 2002) causant des dégâts énormes sur les ressources potentielles (eau, sol, forêt) du pays. En plus de ces enjeux, les ressources naturelles du pays sont confrontées à la surexploitation qui devrait s'accentuer avec la forte croissance démographique et l'augmentation des besoins des différents secteurs économiques (agriculture, tourisme, industrie).

En Tunisie, l'agriculture garde une importance socio-économique considérable. Par ailleurs, ce secteur est très lié au climat et à ses fluctuations du fait de son aspect traditionnel.

Tout ceci rend le secteur agricole particulièrement vulnérable au changement climatique, ce qui représente un enjeu fort pour le développement durable du pays.

À notre connaissance, les études réalisées jusqu'ici sont plutôt qualitatives et mettent en avance le besoin de développer des travaux qui permettraient de mesurer les impacts du changement climatique avec plus de précision afin d'élaborer des stratégies d'adaptation convenables. En réponse au manque d'études de ce genre en Tunisie, l'objectif de ce travail est de contribuer à évaluer quantitativement l'impact économique du changement climatique sur le secteur agricole en Tunisie.

Chapitre 4. La spécification des entrées du modèle Ricardien

Introduction

L'application du modèle Ricardien au cas de la Tunisie exige certaines modifications que nous examinons à travers la spécification du modèle et de ses entrées. En fait, la construction de la fonction de réponse de la productivité agricole tunisienne au climat nécessite la prise en compte des caractéristiques socio-économique, techniques et physiques de l'agriculture tunisienne. Partant de cette considération, nous exploitons les bases de données existantes et les recommandations des experts afin de fixer les entrées du modèle ricardien. Nous commençons par fixer la forme utilisée du modèle puis nous détaillons ses entrées. Nous présentons une justification de nos choix et nous décrivons les données utilisées. Nous nous focalisons surtout sur l'analyse des données des entrées climatiques.

4.1. Spécification du modèle : focalisation sur les modifications du modèle standard

4.1.1. Le cadre formel

L'absence d'une source fiable sur les valeurs de la terre en Tunisie rend l'application de la méthode ricardienne très difficile dans sa stricte représentation. Nous adoptons alors la méthode adjacente de revenu net. Nous rappelons dans ce qui suit la formalisation de cette méthode.

Considérons une exploitation agricole. La fonction de production de celle-ci peut être exprimée comme une fonction de variables exogènes et endogènes des intrants et des moyens de production. Les variables exogènes incluent les caractéristiques du sol et du climat, associées à l'exploitation agricole, ainsi que les rémunérations nettes (prix, subventions) associées aux activités agricoles. Les variables endogènes incluent le travail (salariés, ménages), le capital (matériel et équipement), les graines, les fertilisants et d'autres intrants

déterminant les ressources et les capacités de production. Les caractéristiques de l'exploitant agricole peuvent aussi avoir une importante contribution au processus de production.

Ainsi, la fonction de profit s'écrit comme suit :

$$\pi = \sum_{j=1}^{n} \left[p_j \, Q_j \left(z, m, x_j \right) - w \, x_j \right] \qquad \text{où } j = 1, 2, \ldots, n \text{ cultures} \quad (1)$$

p_j sont les prix des activités agricoles, Q_j les fonctions de production, z le vecteur des variables climatiques, m vecteur des caractéristiques exogènes à l'exploitation agricole, x_j est le vecteur des inputs associés à l'activité de production j et w est le vecteur des prix des inputs.

Maximisant le profit, on détermine le vecteur x_j satisfaisant les conditions d'optimalité suivantes étant donnée les intrants endogènes :

$$p_j \frac{\partial Q_j}{\partial x_j} = w \qquad j = 1, 2, \ldots, n \quad (2)$$

Le vecteur optimal x_j est noté comme suit : $x_j = x_j (z, m)$.

La fonction de profit optimal est :

$$\pi^* (z, m, p, w)$$

À l'équilibre, les bénéfices de court terme, peuvent être mesuré et exprimé en revenu net par unité de surface agricole. Les impacts climatiques calculés $(\frac{\partial \pi^*}{\partial z})$ à partir de cette fonction de profit représentent la réponse des agriculteurs au climat, au sol et aux autres facteurs de production et aux prix.

Conformément au travail de MNS[36] (1993), nous faisons l'hypothèse que les variables climatiques prennent la forme quadratique dans la fonction du revenu net, et que les prix sont uniformes à travers les régions. La fonction du revenu net peut ainsi être exprimée en fonction des conditions climatiques et des caractéristiques exogènes à l'exploitant ainsi ;

$$\pi = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{c} \alpha_i z_i + \sum_{i=1}^{c} \beta_i z^2 + \sum_{i=1}^{L} \gamma_l m_l + u \qquad (3)$$

Où α, β, et γ sont respectivement les coefficients des variables climatique et les autres variables exogènes et u un terme d'erreur $u \rightarrow N(0,1)$.

[36] MNS par référence à Mendelsohn, Nordhaus et Show

Une fois, la fonction estimée, nous sommes en mesure d'estimer l'effet du changement climatique sur l'agriculture. Ainsi, le changement de bien être résultant d'un changement climatique de C_0 à C_1 peut être mesuré par :

$$\Delta\pi = \pi(C_1) - \pi(C_0) \quad (4)$$

4.1.2. Spécification de l'unité d'observation

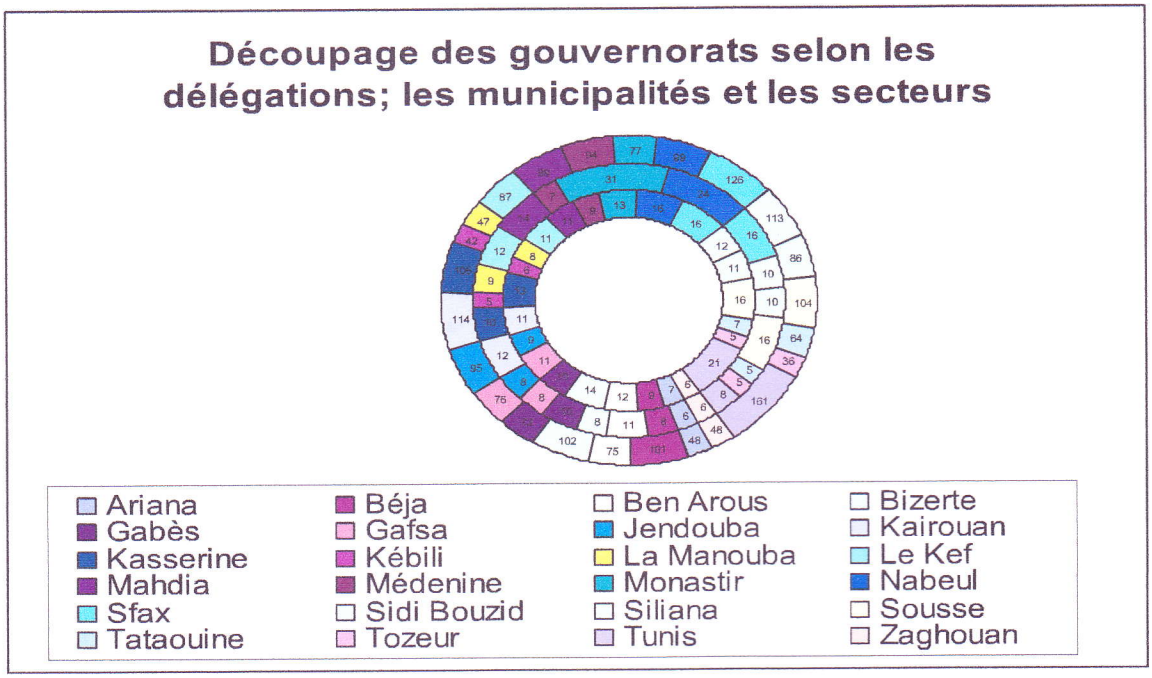
La conception du modèle ricardien offre une certaine flexibilité quant au choix de l'unité d'observation. En fait, dans la littérature, le modèle ricardien a été utilisé pour observer le comportement des individus et des collectivités. On note par exemple que Fleisher et al., (2007) ont étudié l'impact du changement climatique sur les revenus des exploitants agricoles en se référant aux résultats d'enquêtes sur les revenus des fermiers réalisées spécifiquement pour ce travail. Alors que Mendelsohn et al. (1994) et Sanghi et al. (1998) se sont fixés comme unité d'observation le district et ont exploité des bases de données existantes sur le revenu net agricole du district. D'une autre part, Kabubo-Mariara et al. (2007) se sont intéressés aux revenus nets agricoles des zones agro-écologiques de Kenya en effectuant une enquête sur les données comptables par zone agro-écologique. Le choix de l'unité d'observation dépend alors de la disponibilité de données sur la variable à expliquer le revenu net agricole.

Les données utilisées dans le cadre de notre travail sont issues de bases de données existantes et complétées par les suggestions d'experts, faute de faisabilité d'une enquête touchant les revenus des fermiers tunisiens. Cette marge de flexibilité est réduite par la contrainte de non disponibilité de données au niveau de l'exploitation agricole. En fait les bases de données disponibles, que se soit au niveau international (FAO et WB), ou au niveau national (MARH), ne procurent pas de mesures sur le revenu par exploitant. Ces bases fournissent des séries temporelles de données comptable (valeurs ajoutées, rendements, moyens de production, etc.) sur l'ensemble du territoire (FAO, WB et MARH) ou selon les régions de planification et les gouvernorats (MARH). Pour cela, les données de base du modèle proviennent des travaux de la Direction Générale des études et de Développement (DGED) du MARH, qui procurent des données plus détaillées. De tels travaux sont également élaborés de manière plus détaillés (par délégation) au niveau des Services de l'Arrondissement des Etudes et Statistiques Agricoles relevant des Commissariats Régionaux

de Développement Agricole (CRDA). Mais nous n'avons pas pu accéder à ces travaux. Nous considérons alors le gouvernorat comme unité d'analyse.

Le gouvernorat est une collectivité territoriale de la Tunisie qui dispose d'une autonomie morale et financière, et à la tête de laquelle on trouve un gouverneur nommé par le président de la République sur proposition du ministre de l'intérieur. Actuellement la Tunisie compte 24 gouvernorats divisés en 264 délégations (dirigées par des délégués). La plus petite division administrative est le secteur (dirigé par un chef de secteurs) dont le nombre est de 2 073.

Figure 4.1. Découpage des gouvernorats selon les délégations ; les municipalités et les secteurs



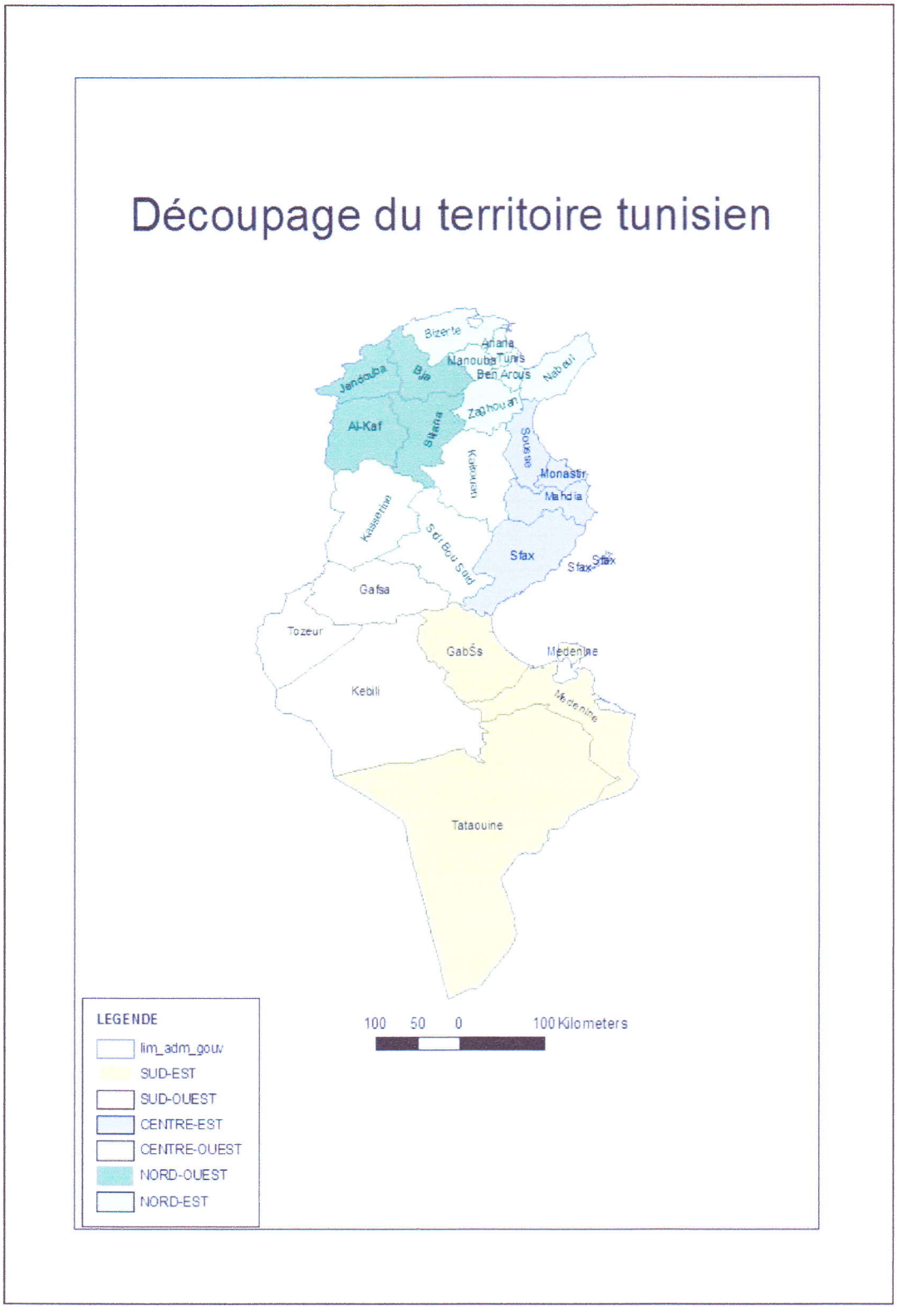
Dans la figure ci-dessus, l'anneau le plus haut représente le nombre de secteurs par gouvernorat; l'anneau du milieu représente le nombre de municipalités par gouvernorat et l'anneau interne représente le nombre de délégations par gouvernorat.

Les 24 gouvernorats sont rassemblés par régions de planification comme suit :

- Nord-est : gouvernorats de Bizerte, Tunis, Ariana, Manouba, Ben Arous, Zaghouan et Nabeul ;
- Nord-ouest : gouvernorats de Jendouba, Béja, Kef et Siliana
- Centre-est : gouvernorats de Sousse, Monastir, Mahdia et Sfax
- Centre-ouest : gouvernorats de Kairouan, Kasserine et Sidi Bouzid
- Sud-est : gouvernorats de Gabès, Médenine et Tataouine

- Sud-ouest : gouvernorats de Gafsa, Tozeur et Kébili

Figure 4.2. Découpage du territoire tunisien selon les régions de planification et selon les gouvernorats



Les gouvernorats présentent des caractéristiques disparates particulièrement au niveau de leurs contributions au développement du secteur agricole. Nous exposons quelques exemples dans le tableau suivant.

Tableau 4.1. Date de création et superficie des gouvernorats de la Tunisie

Gouvernorat	Date de Création	Superficie (km²)	Part du secteur agricole dans l'emploi (2004)	Pourcentage des terres cultivées (2004)
Ariana	3 décembre 1983	482	4%	0.47%
Tunis	21 juin 1956	288	1%	0.16%
La Manouba	31 juillet 2000	1 137	12%	1.81%
Ben Arous	3 décembre 1983	761	5%	0.73%
Bizerte	21 juin 1956	3 750	18%	4.2%
Béja	21 juin 1956	3 740	37%	5.1%
Jendouba	21 juin 1956	3 100	36%	3.44%
Le Kef	21 juin 1956	5 081	24%	29.7%
Siliana	5 juin 1974	4 642	27%	11.6%
Zaghouan	1976	2 820	21%	3.76%
Nabeul	21 juin 1956	2 840	22%	3.71%
Sousse	21 juin 1956	2 669	5%	3.5%
Monastir	5 juin 1974	1 024	6%	1.65%
Mahdia	5 juin 1974	2 878	25%	5.2%
Sfax	21 juin 1956	7 545	13%	11%
Gafsa	21 juin 1956	7 807	13%	4.7%
Kairouan	21 juin 1956	6 712	30%	9%
Sidi Bouzid	1973	7 400	37%	9.31%
Kasserine	21 juin 1956	8 260	29%	7.5%
Gabès	21 juin 1956	7 166	16%	3.6%
Médenine	21 juin 1956	9 167	10%	4.6%
Tataouine	2 mars 1981	38 889	26%	4%
Tozeur	21 juin 1956	5 593	21%	0.3%
Kébili	1981	22 454	34%	1.2%

Les données de ce tableau proviennent du travail de MARH, 2007 ; « Indicateurs du développement agricole des gouvernorats de la république »

Nous notons, d'abord, que les dates de création des gouvernorats sont différentes. Le district du grand Tunis a connu plusieurs rééchelonnements qui ont accompagné la croissance rapide de la concentration de la population dans cette zone (850 milliers d'habitants en 1950, 1700 milliers d'habitants en 1995 et plus de 2000 habitants en 2004).

Les critères de contribution à l'emploi et à l'exploitation de terre arables montrent l'importance de la participation socio-économique du nord-ouest et un peu moins du centre-ouest au secteur agricole. Les apports socio-économiques des gouvernorats de la zone côtière, notamment, les gouvernorats du Grand Tunis (c'est-à-dire celle d'Ariana, de Tunis, de la

Manouba et de Ben Arous) à l'activité agricole est beaucoup moins importante. Ceci peut être expliqué par un taux élevé d'urbanisation (supérieur à 75% en 2010) et la concentration des activités industrielles (supérieure à 80% en 2010) enregistrés dans ces gouvernorats.

Dans notre travail nous disposons seulement de 24 observations pour l'analyse de la relation entre le climat et l'agriculture. Il n'est plus alors possible de suivre la procédure d'analyse classique adopté par MNS (1994) qui consiste à utiliser la méthode en coupe instantanée. Ceci nous pousse à utiliser la méthode de panel afin d'estimer les coefficients de l'équation (3). Cette méthode a été utilisée lors de l'étude du cas de l'Inde (Kumar et Parikh ; 1998) dans sa version ordinaire. Elle a permis aux auteurs de tenir compte non seulement de l'effet individu mais aussi de l'effet temps.

4.1.3. Spécification de la variable dépendante

Nous pouvons définir le revenu net agricole comme la différence entre la valeur de la production et le coût de facteur de production :

$$Revenu\ net\ agricole = valeur\ de\ la\ production - coût\ des\ facteurs\ de\ production$$

Le coût des facteurs de production étant les dépenses dans la main d'oeuvre et les fertilisants

Les travaux de la DGED contiennent à la fois des données comptables et des données de structure. Pour calculer le revenu net agricole nous nous focalisons sur les données comptables qui sont présentées chaque année dans l'« Annuaire des Statistiques Agricoles » et le « Budget économique ». Ces données concernent : la dimension économique (valeur ajoutée et prix), les investissements et les crédits, les rendements, la part technico-économique (la part relative de certaines activités de production dans la valeur ajoutée) et la balance commerciale alimentaire. Ils sont classées de manière globale pour l'ensemble du pays, ou par région de planification.

La DGED construit ces données à partir des enquêtes annuelles sur différents thèmes (enquête agricole, enquête céréale, enquête des périmètres irrigués, enquête oasis, enquête commercialisation) et à partir des comptes rendus sur le budget économique de l'ensemble du gouvernorat élaboré par les différents CRDA du pays. Nous pouvons pu exploiter ces travaux pour construire la base de données du modèle ricardien. La disponibilité des données diffère d'un gouvernorat à un autre. Les données les plus complètes sont disponibles à partir de l'année 1992 pour tous les gouvernorats, sauf pour la Manouba créée en l'an 2000. Nous

exploitons les données qui couvrent la période 1992- 2007. Les gouvernorats de Ariana ; Tunis ; Ben Arous et Manouba sont considérés ensemble comme étant une métropole désigné par le grand Tunis (Grand_Tunis).

Figure 4.3. Découpage du territoire tunisien selon les unités d'analyse



Les prix des facteurs de productions exploités sont des prix donnés en prix constants de 1990 afin de neutraliser l'effet de l'augmentation générale des prix. Au niveau des valeurs de la dimension économique, les experts de la DGED soulignent que les mesures qui concernent les prix des produits agricoles fournis devraient être considérées avec prudence.

En fait, les données en question sont approximatifs des prix des récoltes des fermes conclus dans les conditions d'offre et de demande des marchés de gros.

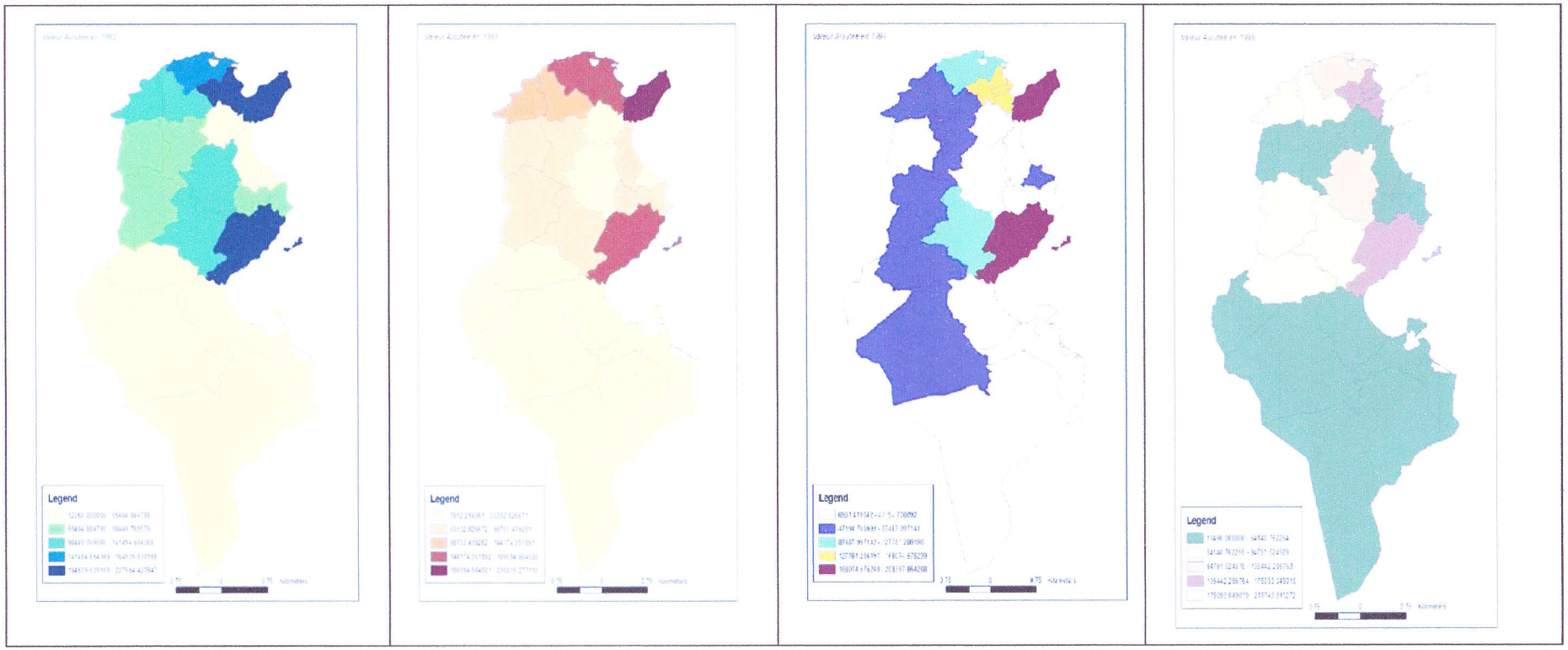
Malheureusement, la base de données existante ne contient pas d'informations sur les salaires et sur le nombre d'heures de travail. Ceci peut être expliqué par la difficulté d'estimer le salaire et le nombre d'heures de travail de la main d'œuvre familiale qui constitue une grande partie du de travail (voir chapitre 3). Les informations existantes concernant les valeurs de travail sont disponibles de manière ventilée pour l'ensemble du territoire dans les publications de l'institut national de la statistique (INS). De même, des informations sur le nombre d'heures de travail existent dans l'enquête agricole. Cependant, elles sont présentées de manière globale selon les régions de planification.

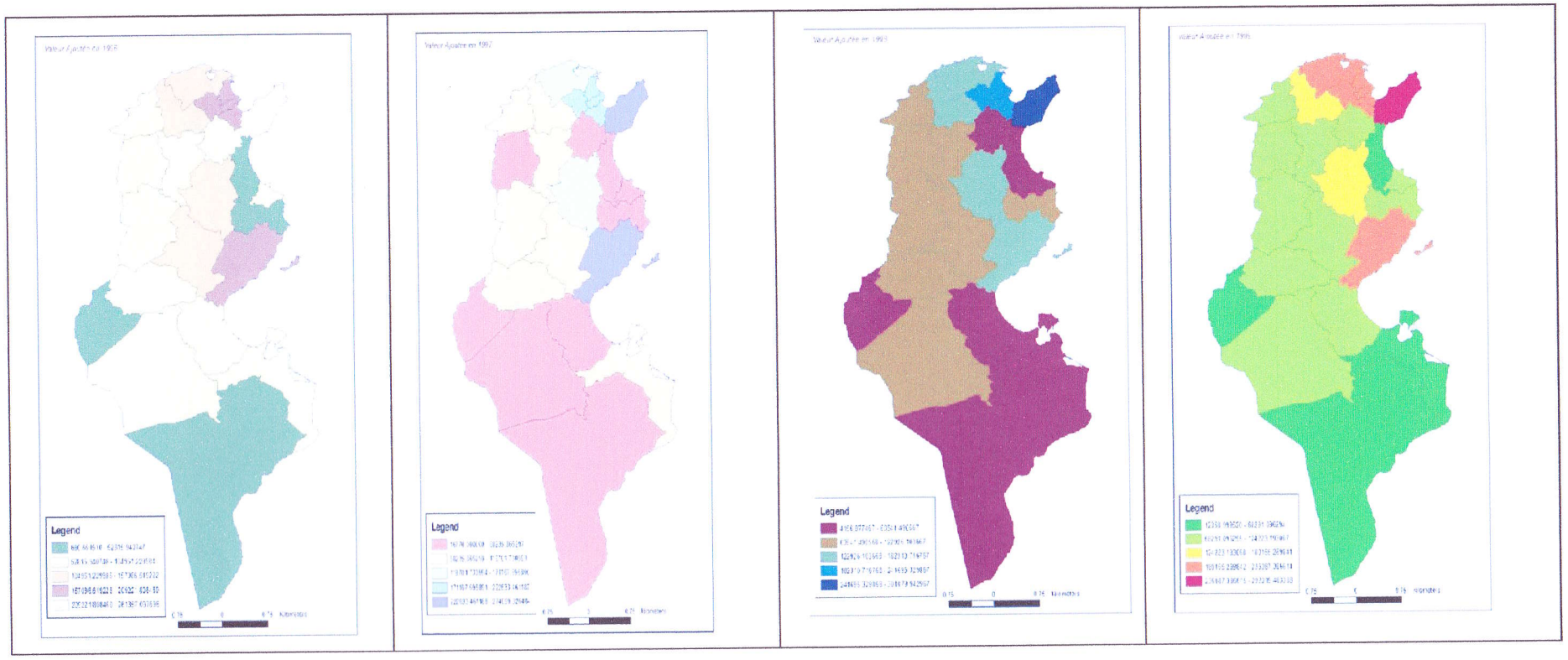
Pour surmonter le problème de non disponibilité des données précises nous utilisons la valeur ajoutée comme variable dépendante du modèle au lieu du revenu net agricole. La valeur ajoutée peut être définie comme la valeur créée par le secteur agricole en transformant les matières premières ou produits semi–finis en produits finis. Elle se calcule en faisant la différence entre la valeur de la production réalisée et la valeur des consommations intermédiaires (matières premières, produits semi-finis, services de sous-traitance, des achats non stockables de matières premières (eau, énergie, petit équipement,..), des travaux d'entretien et de réparation, des primes d'assurances, des études et recherches, des rémunération d'intermédiaires et honoraires, des frais de transports et des déplacement, des commissions sur services bancaires (autres que les intérêts sur crédits bancaires) et des dépenses diverses).

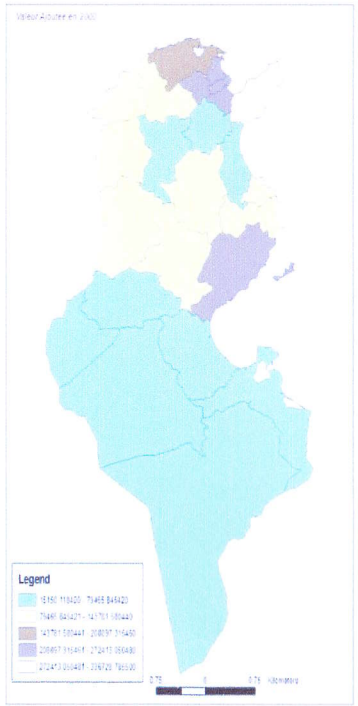
Cette mesure permet d'évaluer la richesse créée par le secteur agricole. La détermination de la valeur ajoutée permet ainsi de disposer d'informations utiles sur l'efficacité de la mise en œuvre des moyens d'exploitation agricole. La prise en compte de cette variable dans notre modélisation est très intéressante. Elle nous permet de répondre à notre objectif et de vérifier ainsi si les changements climatiques peuvent affecter la productivité et le potentiel de production de ce secteur.

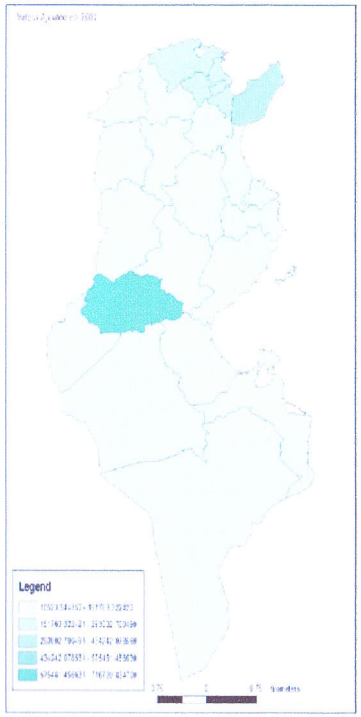
Dans les bases de données exploitées, les deux valeurs de la production et des consommations intermédiaires sont disponibles par gouvernorat et sont estimées par les experts du MARH en prix constants de 1990. On trouve « la valeur ajoutée » calculée uniquement pour l'ensemble du pays. Les résultats de calculs des valeurs ajoutées par gouvernorat sont représentés dans la figure suivante.

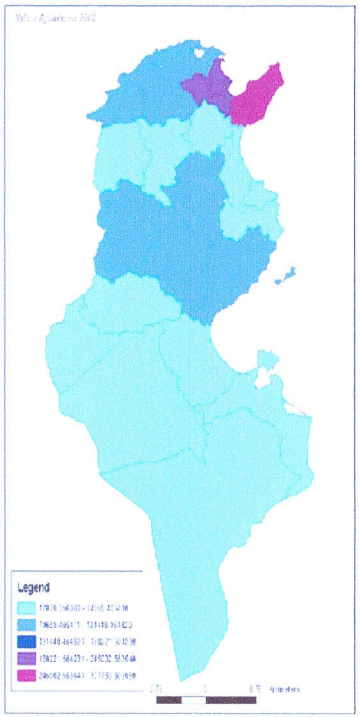
Figure 4.4. Valeur ajoutée en 1000DT estimée au prix constant de 1990 durant la période 1992-2007

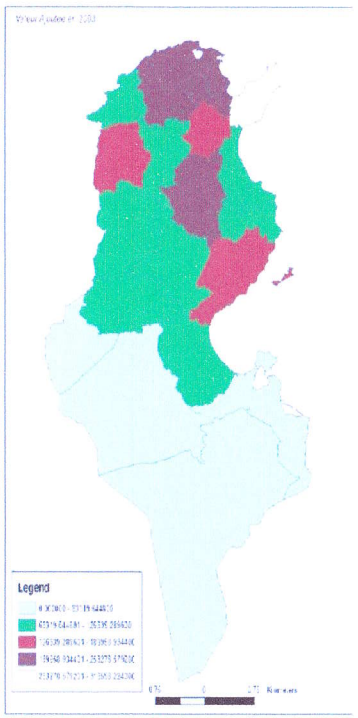


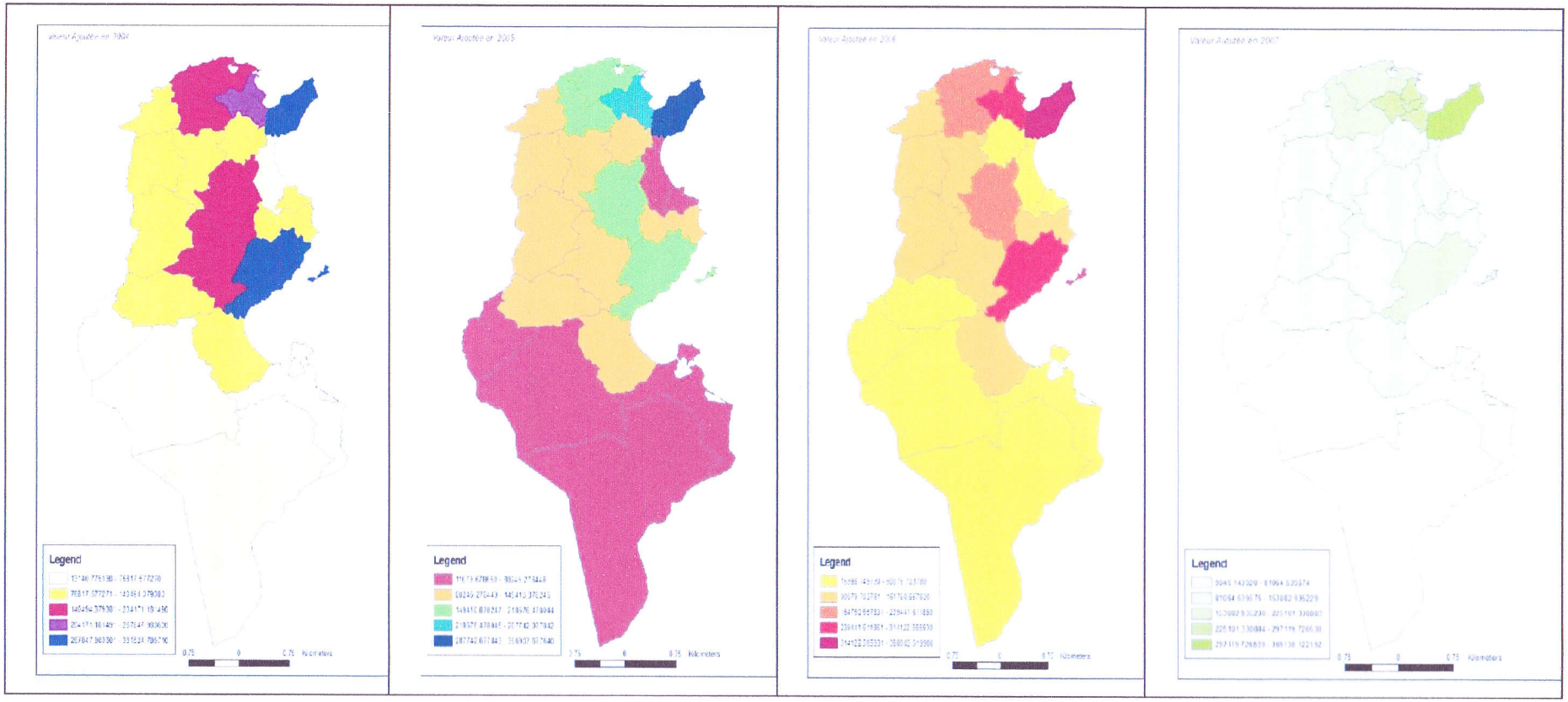

Legend
Legend
Legend
Legend


Legend


Legend


Legend


Legend


Valeur Ajoutée en 2004
Legend
Valeur Ajoutée en 2005
Legend
Valeur Ajoutée en 2006
Legend
Valeur Ajoutée en 2007
Legend

La figure ci-dessus est formée par 16 cartes représentant les différentes valeurs de la valeur ajoutée sur l'ensemble du territoire tunisien pendant la période 1992-2007. Dans la figure, les différentes valeurs de la valeur ajoutée sont représentées par différentes couleurs indiquant les disparités spatiales au niveau de la productivité agricole. Chaque année, les valeurs de la variable « valeur ajoutée » sont classées selon des intervalles égaux. Cette classification est représentée de manière ascendante dans la légende.

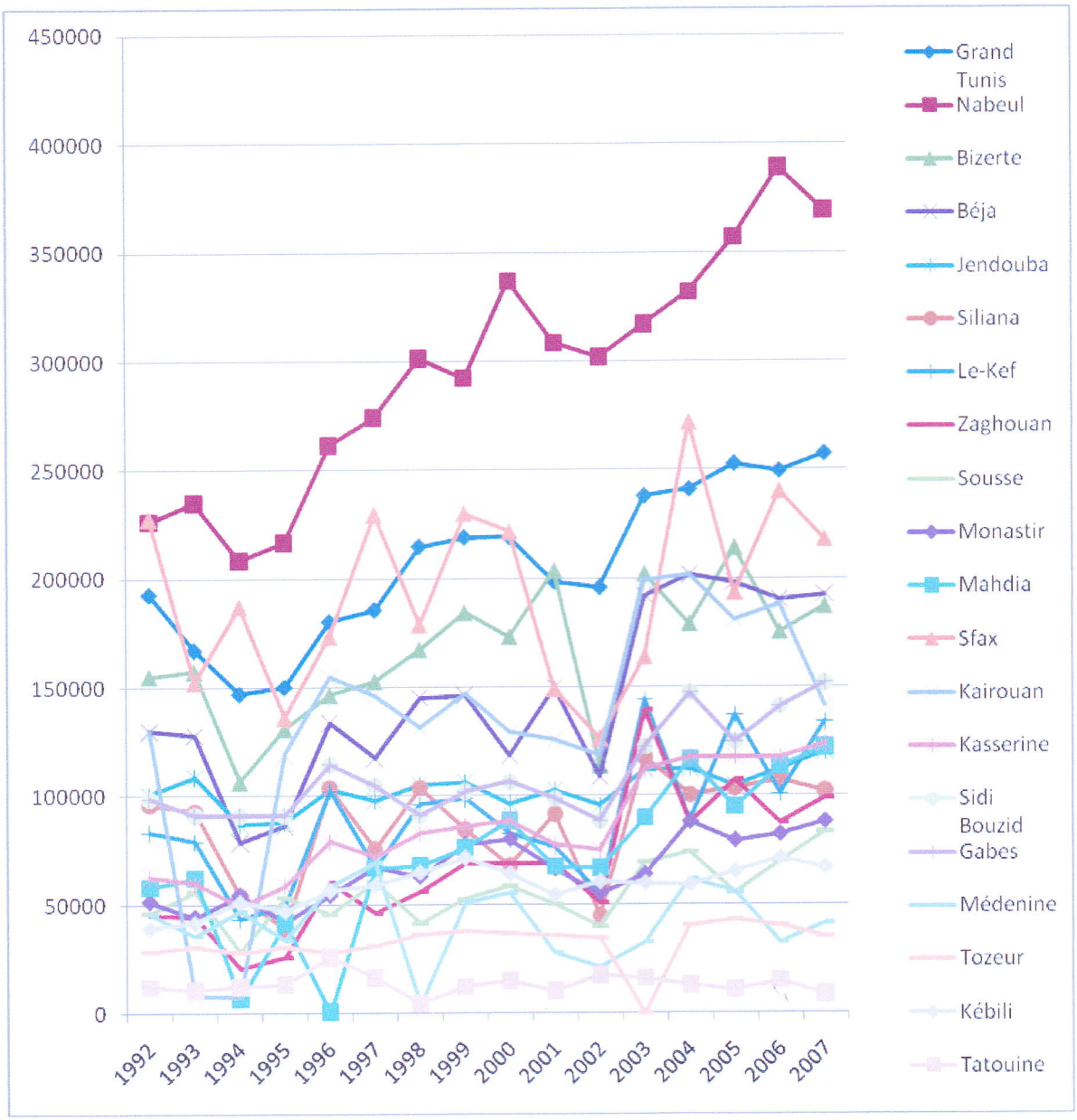
Dans la littérature, un des facteurs déterminants d'une activité agricole dans un point de l'espace est le facteur naturel. En fait, c'est l'existence de dotations naturelles qui, pour Ricardo dans sa théorie sur les avantages comparatifs, est le moteur de l'échange entre les régions qui peut conduire à une spécialisation régionale, c'est-à-dire une localisation différenciée des activités. Dans la figure 4.4 présentée ci-dessus, le sud le moins doté en nature détient toujours les valeurs ajoutées les plus faibles. Cependant, le nord ouest doté par la nature la plus riche ne détient pas les valeurs ajoutée les plus élevées. Nous constatons que, quelque soit l'année, les valeurs ajoutées les plus élevées sont détenus par Nabeul, Grand-Tunis, Sfax et Bizerte. Ainsi, le secteur agricole dans ces gouvernorats conserve une capacité productive malgré la concentration de la masse de la population et des activités économiques orientées vers le tourisme et le secteur industriel (BP/RAC, 2001).

Dans la figure 4.5 présentée ci-dessous, les courbes représentent l'évolution tendancielle de valeur ajoutée (1992-2007) selon les gouvernorats. Le graphique montre encore plus nettement que le précédent que le secteur agricole des gouvernorats de la zone côtière maintient une capacité productive dans le temps tout le long de la période 1992-2007. Les gouvernorats de Nabeul, Grand-Tunis, Sfax et Bizerte détiennent même une capacité productive plus élevée que les gouvernorats de Jendouba et Béja qui sont dotés d'une nature plus favorable à l'agriculture. Ces disparités au niveau des résultats de la productivité reflèteraient les disparités aux niveaux structurel et technique.

Le cas du gouvernorat du Grand-Tunis montre une capacité productive progressive et soutenue dans le secteur agricole est particulièrement remarquable malgrés que ce gouvernorat est celui qui contribue le moins à l'activité agricole aux deux niveaux de terre cultivée et de main d'œuvre. En fait, la courbe des valeurs ajoutées de l'agriculture dans le Grand Tunis durant la période 1992-2007 montre une tendance à la hausse que seul celle du gouvernorat de Nabeul affiche. Dans le même temps, les courbes de tendance des valeurs ajoutées des autres gouvernorats connaissent des baisses qui pourraient être expliquées par les variabilités des conditions climatiques.

Le niveau élevé de la capacité productive que montrent plusieurs gouvernorats de la zone côtière peut être expliqué par une avancée technologique telle que le souligne le rapport de l'UNEP (BP/RAC, 2001). Ainsi, les facteurs techniques seraient des facteurs clés pour soutenir la croissance agricole même durant les périodes difficiles. Pour vérifier cette hypothèse, nous devrions tenir compte de ces facteurs dans l'analyse afin de contrôler leurs effets. Il est donc nécessaire d'intégrer les caractéristiques de production agricole au niveau de chaque gouvernorat dans l'analyse.

Figure 4.5. Evolution tendancielle de la valeur ajoutée en Mille Dinars tunisien (MDT) dans chacun des gouvernorats de la Tunisie sur la période 1992-2007.



4.2. Spécifications des variables de contrôle du modèle

4.2.1. Les entrées socio-économiques et techniques

Dans cette section nous définissons les entrées socio-économiques et techniques du modèle. Il ne s'agit pas de déterminer les indicateurs de productivité agricole, mais de contrôler les effets des facteurs susceptibles d'accroître ou limiter la croissance de la productivité agricole. La sélection de ces facteurs est fondée sur une démarche hypothético-déductive. Nous exploitons le travail de diagnostic que nous avons mené dans le chapitre 3 en se concentrant sur le cas de la Tunisie.

i) Facteurs socio-économiques

Les facteurs socio-économiques sont souvent identifier à partir des variables de structure. L'intégration de ces facteurs dans le modèle ricardien ne dépend que de la disponibilité des données au niveau des gouvernorats. Nous exploitons alors les enquêtes de structure et l'enquête agricole élaborées par la DGED et les enquêtes de l'Institut National de la Statistique (INS).

Les enquêtes de structures fournissent une description des principales caractéristiques du secteur agricole en Tunisie. Elles intégrent des variables concernant les agro systèmes, le zonage et la typologie des exploitations. Une enquête sur les structures des exploitations agricoles est effectuée chaque décennie. Sa première parution date d'avril 1996 et le travail a porté sur l'année agricole 1994-1995. Une enquête de structure plus récente a été réalisée au cours de l'année 2004-2005. L'ensemble des données de l'enquête comprend de nombreuses variables : la structure et les caractéristiques des exploitants agricoles, les bénéficiaires des services agricoles, la répartition des terres des exploitations agricoles, la description des activités agricoles sur les grandes cultures, le maraîchage, l'arboriculture fruitière et les cultures irriguées, la structure et les caractéristiques de l'élevage, la structure du matériel agricole, le financement et les crédits agricoles, la description de la main d'œuvre. Nous avons retenu les variables renseignées au niveau des gouvernorats, c'est-à-dire les actifs exploités et les caractéristiques des exploitants (une description détaillée de ces variables figure dans l'annexe).

Les enquêtes agricoles sont réalisées chaque année et fournissent une base de données sur l'occupation du sol au niveau de chaque gouvernorat sur la période 1998-2007 et sur la

main d'œuvre agricole au niveau des gouvernorats sur toute la période 1992-2007. La main d'œuvre agricole présente la particularité de l'importance de la main d'œuvre familiale. Nous incorporons cette particularité dans le modèle à travers la part de la main d'œuvre familiale dans le travail. Quant à l'occupation du sol, nous la considérons inchangée.

Finalement, il nous est indispensable de contrôler l'effet de la population sur la productivité agricole. En fait, comme nous l'avons mentionné au chapitre 3, l'urbanisation rapide est une des caractéristiques socio-économiques du pays. Cette caractéristique contraint la productivité du secteur agricole par les dotations en ressources naturelles. Nous utilisons les informations de l'INS sur la démographie disponibles au niveau des gouvernorats pour construire la variable densité de population et l'intégrer dans le modèle.

ii) facteurs techniques

Pour spécifier les variables techniques nous nous sommes référés aux informations bibliographiques et aux commentaires des experts de la DGED quant aux performances du secteur. Malgré la persistance de la forme traditionnelle du secteur agricole tunisien, ce secteur a connu une évolution progressive grâce à l'accélération de la production des sous secteurs du lait, des viandes rouges et de la pomme de terre. Ces améliorations sont le résultat d'efforts considérables du secteur public dans le développement et la régulation du secteur (MARH et GTZ, 2007). En raison de la forte dépendance de l'agriculture tunisienne vis-à-vis de l'eau, ces efforts se sont concentrés sur l'extension et la réhabilitation de l'irrigation (Al Atiri R., 2004). L'eau est considérée comme un facteur limitant la croissance agricole en Tunisie à cause du stress hydrique et des problèmes de qualité dont souffre le pays. L'irrigation est un élément technique fondamental auquel plusieurs études ont été consacrées entièrement (Mendelsohn et Dinar, 2003 ; Fleisher et al., 2007 ; Mckinsey et Evenson, 1998) afin d'explorer le rôle de ce facteur dans l'adaptation aux conditions climatiques. Nous nous plaçons dans le même contexte, et nous proposons d'examiner l'effet de ce facteur sur la performance de l'agriculture et sa sensibilité au climat. Pour ce faire, nous considérons les périmètres irrigués en intensif puisque ce sont des périmètres dont l'équipement est permanent et dont la ressource en eau est individualisée, sûre et connue en débit et en volume pendant toute l'année. Ces périmètres sont généralement irrigués à partir soit des grands barrages, soit des barrages collinaires récents, soit des forages profonds, soit des puits de surface, soit par pompage sur certains oueds à écoulement constant dans le Nord, soit des eaux usées traitées. Ces périmètres ne sont pas totalement exploités. Le taux d'intensification

sert à estimer l'utilisation optimale de ces superficies. Selon l'enquête sur les périmètres irrigués, ce taux est défini par :

$$taux\ d'\text{int}ensification = \frac{\text{sup}erficie\ des\ cultures\ en\ \text{int}ensif}{\text{sup}erficie\ irrigable\ en\ \text{int}ensif} \times 100$$

Où la superficie des cultures en intensif mesure la superficie irriguée en intensif majorée de la superficie des parcelles ayant porté au cours de la même campagne deux ou plusieurs cultures en intensif et de la superficie équipée d'un réseau d'irrigation permanent et disposant d'une main d'oeuvre suffisante pour son irrigation. L'enquête fournit les valeurs de cette variable au niveau des gouvernorats sur la période d'analyse choisie (1992-2007).

4.2.2. Spécification des entrées physiques du modèle : les ressources naturelles édaphiques

La prise en considération des dotations édaphiques dans le modèle est indispensable non seulement à cause du rôle déterminant incontestable de ces facteurs dans la production agricole, mais aussi à cause des particularités contraignantes que présente ceux-ci au niveau du pays. Les données spécifiques à ces facteurs sont issues de bases de données existantes. Nous nous sommes essentiellement référés aux informations disponibles dans les deux bases de données pour la Tunisie {SOTWIS-Tunisia (ver.1)} afin de déterminer les valeurs des paramètres de sol nécessaires en entrée du modèle. Cette base a été construite à partir des bases de données SOTER et WISE fournis en ligne par l'institut internationale ISRIC (World Soil Information). Ces deux bases ont été réalisées dans le cadre d'une coopération entre l'ISRIC, la FAO et l'UNEP, principalement.

i) Présentation de la base de données

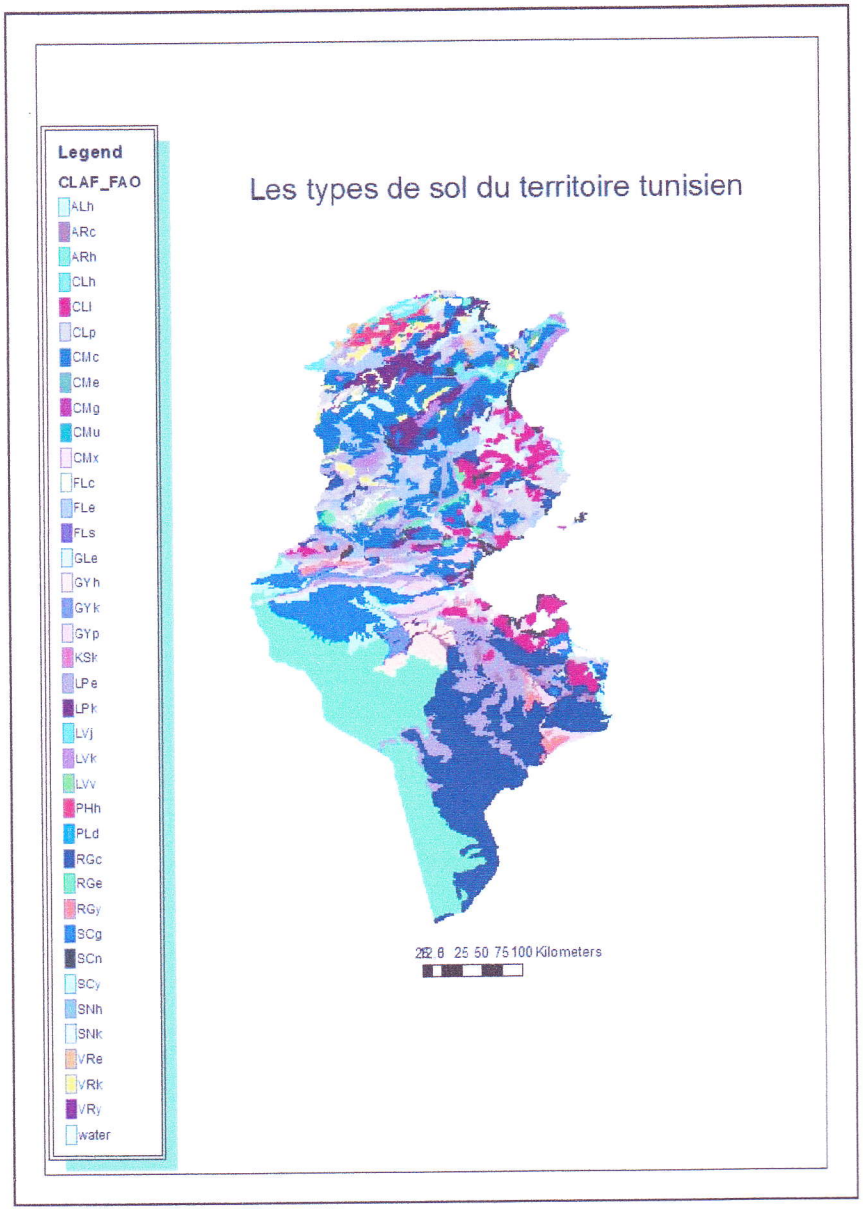
La base de données SOTER (soil and terrain) est une base de données géographique des sols de la Tunisie. Elle fournit une représentation simplifiée de la diversité et de la variabilité spatiale des sols à l'échelle du millionième sur la base de la classification élaborée par la FAO (voir annexe) dans le cadre d'un programme d'estimation de la dégradation du sol dans les régions arides. Elle constitue une amélioration significative pour le pays des informations de la carte du sol à l'échelle de 1 :5000000 (mentionnée au chapitre 3) qui fournit une description unique du profil. Elle est décrite en utilisant 250 unités cartographiques du sol désigné par SOTER-units. Celles-ci sont constituées par 256 types de

terrain et 534 types de sol décrits par des variables essentiellement qualitatives telles que le nom du sol, sa texture, le matériau parental, et d'autres variables analytiques décrites sous forme d'intervalles telles que l'altitude, la longueur de la pente. La base de données WISE consiste en une estimation de ces variables sur la base de règles de pédotransfert développées par l'ISRIC (cf. Batjes NH, 2010). La procédure de pédotransfert permet d'estimer les propriétés de sol sur cinq séries d'horizons standards de 20cm chacun jusqu'à 1m, et deux séries d'horizons de 50cm (100-150cm et 150-200cm). Les propriétés estimées des horizons profonds sont considérées moins pertinentes que celles des horizons supérieurs puisqu'elles sont basées sur un ensemble moins large de données. Ainsi, l'ensemble des données présent contient uniquement les propriétés estimées uniquement pour les horizons de 1m.

ii) Spécifications des paramètres édaphiques du modèle

Nous présentons dans ce qui suit les paramètres sol que nous allons retenir pour le modèle. D'abord, la base de données SOTWIS-Tunisia (ver.1) nous donne des renseignements sur les types de sol existants sur le territoire tunisien. Le nom du type de sol affecté à la base de données SOTWIS-Tunisia (ver1.) est fondé sur la classification du «FAO-UNESCO (1998) Revised Legend Code» (CLAF_FAO). Cette classification contient 153 types de sol, dont 38 seulement sont observés en Tunisie.

Figure 4.6. Les types de sol du territoire tunisien



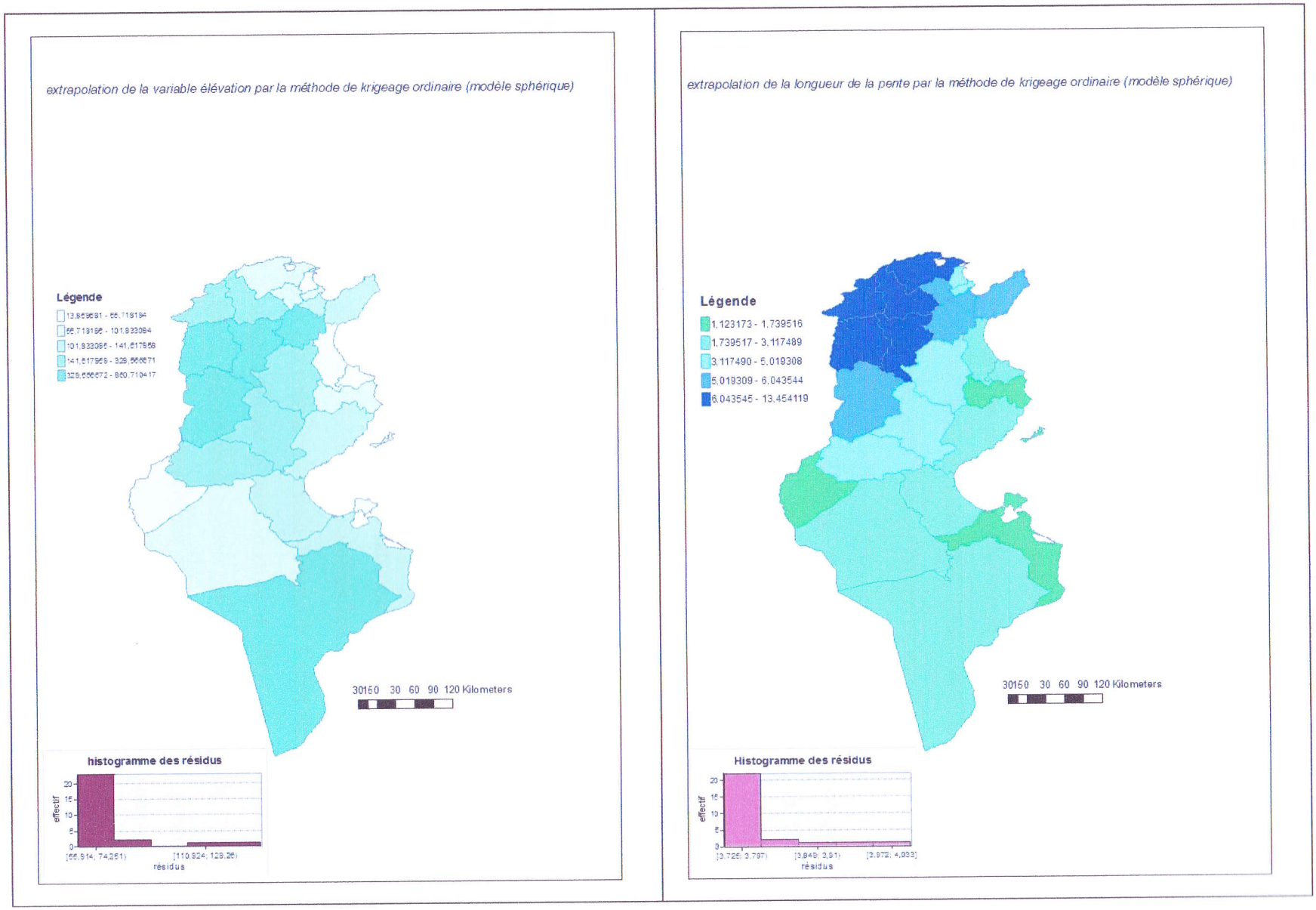
La description morphologique de ces types de sol est réalisée en utilisant 100 types de profils. Ces profiles sont décrits par un ensemble de propriétés (telle que la masse de sable, la profondeur du sol, la teneur volumique en cailloux, le drainage, etc.) qui dépendent de la profondeur du sol. L'attribution de ces paramètres à chaque gouvernorat a été réalisée grâce au logiciel ARCgis 9.2. Pour considérer cette variété dans les données sur le paramètre «type de sol» dans le modèle nous estimons la surface agricole de chaque type de sol dans chaque gouvernorat. Le logiciel ARCgis 9.2. nous a aussi permi aussi de calculer des superficies de chaque type de sol des différentes listes obtenues.

De plus, nous retenons les deux variables de longueur de la pente et d'altitude comme indication de la forme de la terre. Nous utilisons comme méthode d'interpolation spatiale le

krigeage ordinaire[37] (modèle sphérique) pour déduire les valeurs de ces deux variables au niveau des gouvernorats. La figure 4.7 présentée ci-dessous illustre une représentation graphique des résultats d'interpolation sous forme de cartes accompagnées des histogrammes des résidus (les valeurs des deux variables sont classées par la méthode du quantile).

[37] Une description plus détaillée de la méthode existe dans le chapitre 5.

Figure 4.7. Résultats d'interpolation spatiale des variables élévation et longueur de la pente



4.3. Spécification de la variable d'intérêt : le climat

4.3.1. Spécification des paramètres climatiques

La variable climatique appropriée pour cette étude est le « climat normal ». Les climatologues définissent le climat normal par la moyenne arithmétique d'un paramètre climatique calculée sur 30 ans. Cette durée a été sélectionnée suite à un accord international fondé sur les recommandations de la Conférence Météorologique Internationale en Varsovie en 1933. Dans la littérature, l'utilisation du modèle ricardien pour estimer l'impact du changement climatique sur l'agriculture est souvent fondée sur la prise en compte du climat normal dans l'analyse (Mendelsohn, Nordhaus et Shaw 1994, 1996, 1999 ; Dinar et al. 1998). En effet, selon les adeptes de la méthode ricardienne, c'est par rapport à cette durée que les exploitants agricoles s'adaptent.

Nous utilisons dans une première analyse quatre paramètres climatiques : la température normale et la précipitation normale au cours des différentes saisons. La décision de considérer l'effet saisonnier part de l'aspect de forte saisonnalité qui caractérise le climat et qui affecte l'activité agricole. Les valeurs de ces paramètres sont obtenues en effectuant la moyenne arithmétique des paramètres considérés sur trente ans. Dans une seconde analyse, nous explorons l'effet du climat annuel sur la valeur ajoutée. Nous utilisons alors la normale du climat annuel (les moyennes de la température annuelle et de la précipitation annuelle) comme paramètre du modèle ricardien pour estimer la relation avec la valeur ajoutée.

Toutefois, il est important de signaler que les experts en climatologie soulignent qu'il n'est pas toujours vrai que le climat normal soit une estimation de la valeur espérée du climat surtout dans le cas des régions arides. Ils estiment que l'intervalle de 30 ans est non seulement un peu trop court pour renvoyer la tendance du climat dans une région donnée, mais aussi un peu trop long pour décrypter les anomalies et les variabilités interannuelles. Nous intégrons alors la variable écart par rapport à la normal pour tenir compte de l'effet des anomalies. Ceci nous conduit à mener deux analyses estimant la relation entre la valeur ajoutée agricole et le climat normal en présence des écarts saisonniers et annuels par rapport à la normale.

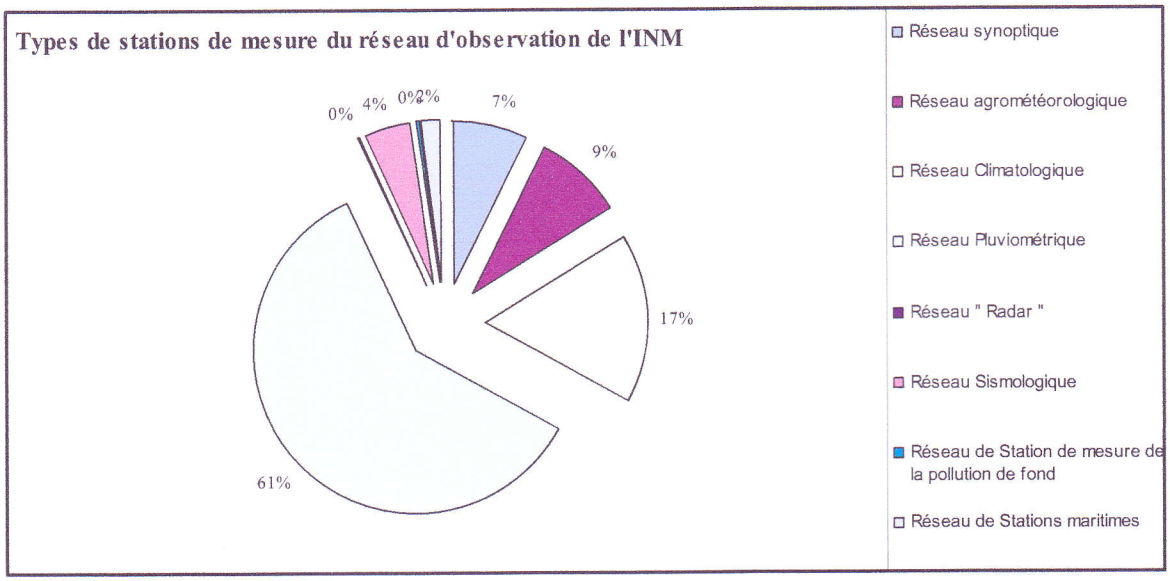
Dans la construction du climat normal dans une station, certaines précautions prescrites par les experts doivent être prise en compte. Les données enregistrées pour la durée de trente ans doivent être homogènes, c'est à dire qu'aucun changement dans les localités, les instruments, ou les procédures d'observation ne devrait survenir pendant la durée qui

influence le résultat climatique moyen. De plus, la base de données doit être complète et ne montre aucun manque de valeurs. Nous essayons de vérifier la faisabilité de l'adoption du climat normal à partir des données dont nous disposons.

4.3.2. La base de données

Les mesures des paramètres climatiques sont généralement recueillies par un réseau d'observation principal selon les normes internationales de la météorologie dans des sites bien sélectionnées. Les données nécessaires à cette étude sont uniquement fournies par la banque de données de l'Institut National de la Météorologie (INM). Le réseau de mesures géré par l'INM couvre tout le territoire tunisien d'une surface de 163610 km^2et compte 347 stations de type divers.

Figure 4.8. Les divers types de station de mesure du réseau d'observation de l'INM



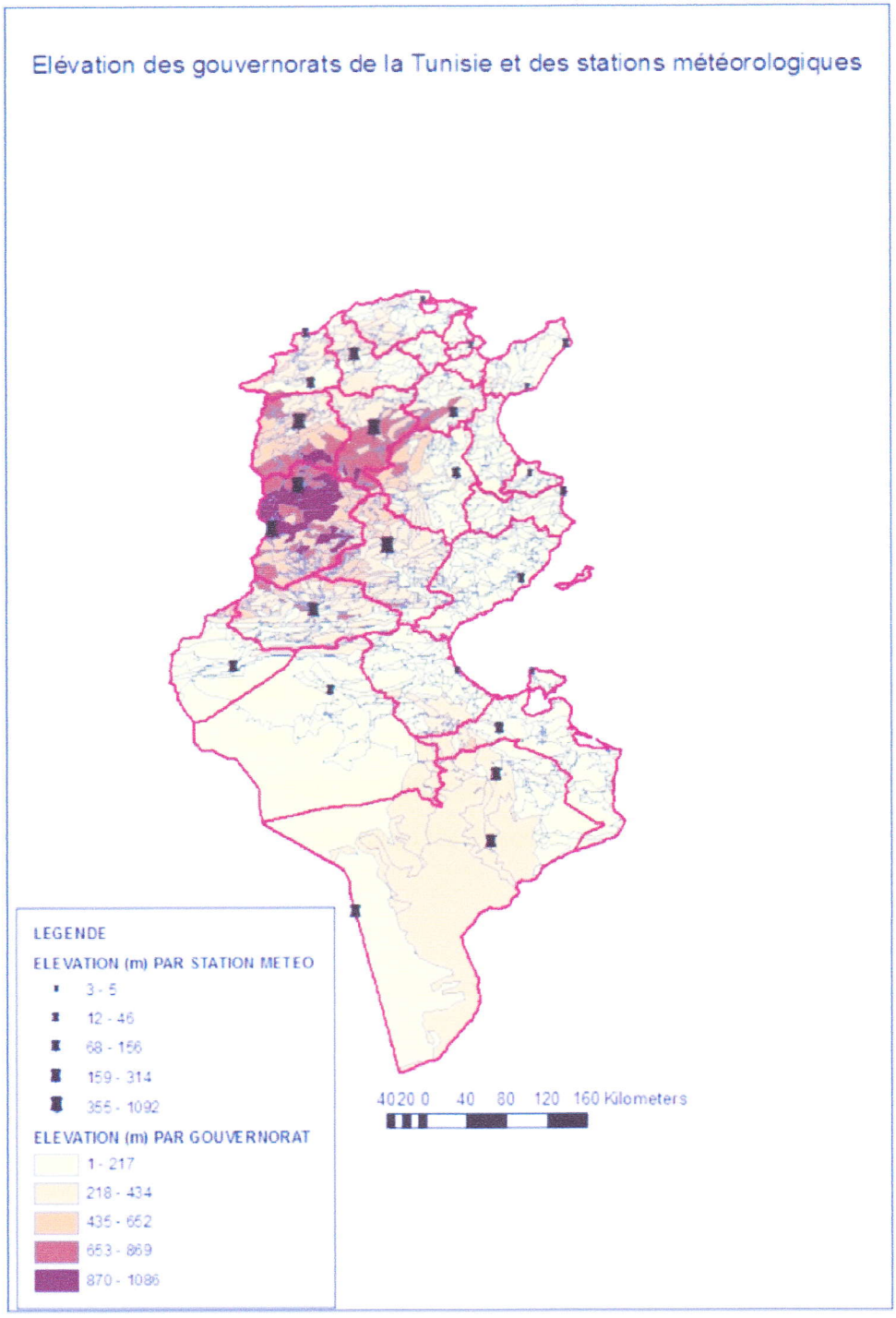
Les mesures dont nous disposons couvrent uniquement les mesures des températures et précipitations mensuelles moyennes sur la période allant de 1970 à 2008 provenant de 27 stations.

Le contrôle de fiabilité des mesures des paramètres climatiques est une étape classique dans la littérature. La nature de chaque phénomène atmosphérique est conditionné par plusieurs facteurs, essentiellement, la morphologie du territoire, la distance par rapport à la mer et la zone climatique qui rendent ce contrôle indispensable pour entammer une analyse

des données. De plus, les mesures de ces phénomènes sont liées à l'emplacement géographique ainsi qu'à l'efficacité du matériel.

Le premier contrôle de la fiabilité des mesures consiste à analyser la représentativité du réseau d'observation. Ce contrôle est indispensable pour vérifier l'existence d'un biais de représentativité et de le maîtriser même si les climatologues signalent qu'il est illusoire d'éliminer ce type de biais. Une distribution homogène des stations sur le territoire demeure une condition primordiale pour effectuer des études du climat. Une méthode de vérification simple de la représentativité du réseau consiste en la représentation des stations de mesure sur une carte telle que nous le produisons. Au vue de la carte (figure 4.9), nous constatons qu'il n'y a pas de disparité notable au niveau de la distribution des stations météo à notre disposition sur le territoire.

Figure 4. 9. Répartition des stations météorologiques sur le territoire tunisien



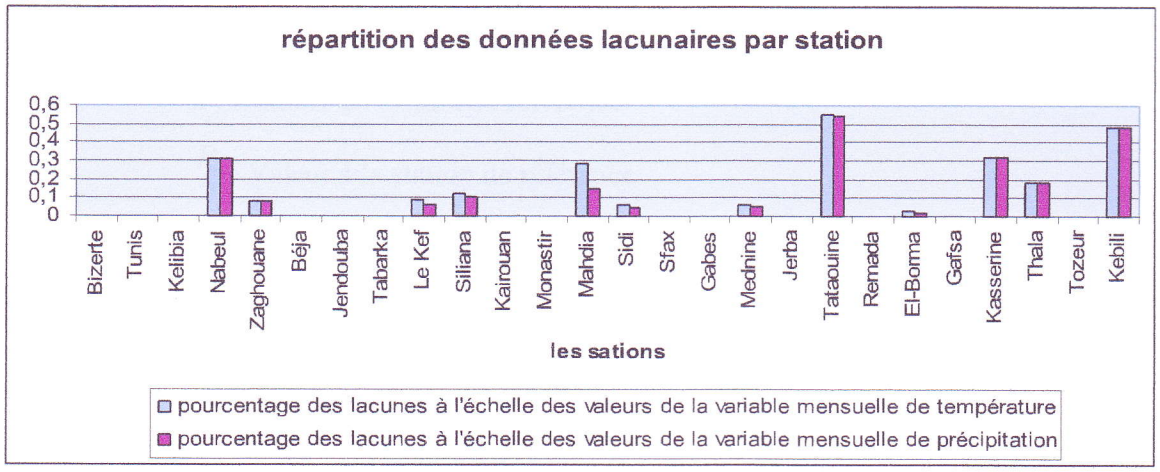
Il est à noter que même si le biais de la représentativité du réseau reste difficile à éliminer, les climatologues insistent sur la nécessité de le diminuer par l'exemption des données manquantes et de l'hétérogénéité des données (Cantat, 2004).

4.3.3. Le problème de données manquantes

4.3.3.a. Détection des discontinuités dans les mesures

Les séries de mesures des paramètres climatiques dont nous disposons comportent un pourcentage de données lacunaires. Le pourcentage de données mensuelles manquantes sur la température et sur la précipitation est respectivement de 10 et 9%. Le manque de données n'est pas le même pour toutes les stations. La figure 4.10 présente la répartition des lacunes dans les données sur la période 1970-2007 dans chaque station. Les stations de Nabeul, Mahdia, Kasserine, Thala et Kebili comportent le plus grand nombre de données manquantes à l'échelle des mesures mensuelles des deux variables de température et de précipitation. Le manque de données dans ces séries peut être expliqué soit par une fermeture temporaire de la station à cause d'un changement d'emplacement, soit par une panne du matériel de mesure qui peut prendre plusieurs semaines pour être réparé ou remplacé ou aussi à cause de la négligence du personnel. Dans un travail de réflexion sur le contrôle de fiabilité, Cantat (2004) cerne les diverses causes de discontinuité de données. La discontinuité des données peut biaiser les résultats des calculs des différents tests statistiques à effectuer et peut même engendrer le problème d'hétérogénéité dans les données. Il est donc nécessaire de reconstruire ces séries.

Figure 4.10. La répartition des données lacunaires par station



4.3.3.b. Les méthodes de reconstitution des séries temporelles

La présence des données manquantes dans les séries de données d'une station météorologique donnée peut largement atténuer la pertinence des résultats des tests à effectuer. En fait, les données manquantes peuvent contenir des informations utiles pour répondre à la problématique de notre travail et leur exclusion risque de générer des résultats biaisés puisque l'information disponible est inférieure à celle initialement prévue. Ainsi, il est nécessaire de reconstruire les séries afin de minimiser la perte d'information. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été développées pour reconstruire une série complète de données à partir d'une série lacunaire.

On distingue essentiellement deux groupes de méthodes. Le premier groupe offre un éventail de spécifications statistiques utilisant essentiellement le concept de moyenne, nous retenons les exemples suivants :

- la valeur manquante est remplacée par la moyenne arithmétique, la moyenne mobile ou la médiane de la série de donnée de la station concernée. Dans ces cas les résultats trouvés peuvent sous-estimer ou surestimer les mesures
- la valeur manquante est remplacée par celle de la station la plus proche ou par la moyenne des stations voisines. Dans ces deux cas, la reconstitution des données est basée essentiellement sur les observations les plus proches
- la valeur manquante est remplacée par une moyenne pondérée par la tendance annuelle des différentes stations :

$$P_x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\overline{P_x}}{\overline{P_i}}P_i\right)$$

Où P_x : Donnée manquante estimée (précipitation, température)

n : Nombre de station de référence

P_i : Valeur à la station de référence

$\overline{P_x}$: Valeur moyenne à long terme de la station

$\overline{P_i}$: Valeur moyenne à long terme de la station de référence

- la valeur manquante est remplacée par la moyenne arithmétique des anomalies standardisées des stations où la valeur existe.

Ces techniques laissent croire que les différentes stations présentent le même profil de données, ce qui n'est pas le cas généralement surtout lorsqu'il s'agit des stations implantées dans des régions à relief différent.

Le second groupe de méthodes utilise des techniques économétriques plus avancées, et nous distinguons notamment celles qui font appel aux techniques de Krigeage, d'Analyse en Composantes Principales (ACP) et de régression linéaire.

- L'approche qui utilise la technique de krigeage permet de reconstituer les données manquantes à partir des données existantes des différentes stations (nous expliquons davantage les étapes de cette technique dans le chapitre suivant).
- L'ACP est une méthode qui consiste à réduire le nombre de variables pour que seules les composantes présentant les valeurs de variance les plus élevées soient retenues. Il s'agit alors de regrouper les variables les plus corrélées au sein des composantes non corrélées et de variance maximale des variables initiales. L'utilisation de l'ACP pour l'imputation des données manquantes consiste à estimer la matrice de covariance à partir des stations présentant des données complètent, puis estimer les paramètres de l'analyse en composantes principales pour régénérer enfin les données manquantes. Cette procédure rend la pertinence de la technique dépendant du nombre de stations ayant des données complètes. Si le pourcentage de données manquantes est élevé, cette technique peut conduire à de mauvais résultats.
- Une troisième méthode d'imputation des données manquantes consiste à prédire les données manquantes d'une station à partir des données complètent des autres stations à l'aide de la technique de régression multiple.

Toutefois, il faut noter que quelque soit la méthode utilisée pour remplacer les valeurs manquantes, il reste illusoire d'éliminer le biais sur ces valeurs. Les valeurs trouvées demeurent des valeurs estimées qui doivent être soumises à des tests de validation.

4.3.3.c. Reconstitution des séries temporelles

Nous adoptons la technique de régression multiple de type linéaire afin de reconstruire les séries temporelles qui présentent des données manquantes. Il s'agit d'expliquer les séries lacunaires par les séries des stations complètes, c'est à dire de construire un modèle de régression sous la forme suivante :

$$y_i = a + bx_i + \varepsilon \qquad (1)$$

Où ; y_i : valeur de la variable climatique de la station présentant des données manquantes

x_i : valeur de la variable climatique de la station présentant des données complètent.

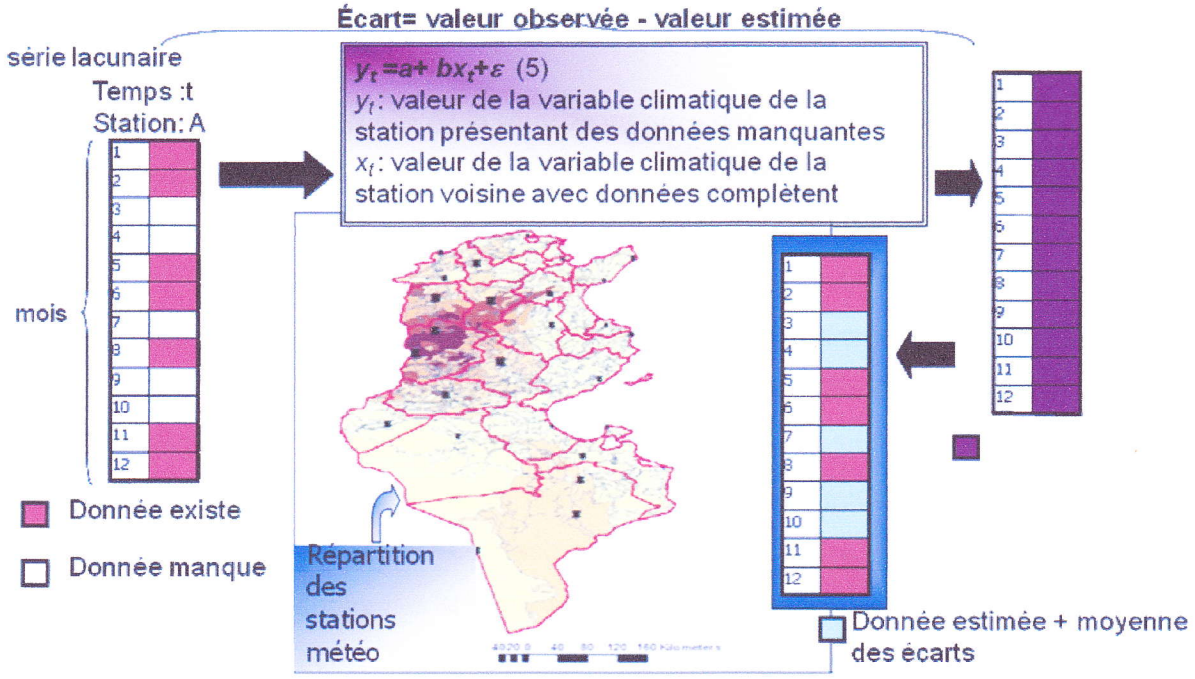
Il suffit d'estimer les coefficients afin de parvenir à l'estimation des valeurs manquantes :

$$\hat{y}_i = \hat{a} + \hat{b}x_i \qquad (2)$$

Le problème est que ce type de modélisation néglige toute dispersion naturelle de la variable dépendante autour de la droite de régression, ce qui risquerait d'aboutir à des valeurs aberrantes. Pour corriger ce biais, nous ajoutons à la valeur estimée $\hat{y}_i$ de la relation (2) la moyenne de tous les écarts entre la valeur estimée et la valeur observée pour chaque mois.

Le choix de la variable (x_i) est basé sur les critères de voisinage et de similarités bioclimatiques entre les stations lacunaires et les stations à données complètes. L'application de ces règles de décision dépend de la disponibilité de séries climatiques complètes, nous insistons sur le respect a minima du critère de voisinage. Le tableau 3 en annexe présente la répartition des différentes stations selon les critères de voisinage et de similarités bioclimatiques pour toutes les stations météo à notre disposition.

Figure 4.11 Reconstitution des données manquantes



La validation de cette technique a été réalisée grâce au test d'homogénéité. Ces tests sont réalisés à l'aide du test d'évolution de la moyenne et de la variance à l'aide d'échantillon d'un nombre d'observation égal (les résultats du test sont présentés dans le tableau 4 de l'annexe). Les résultats des différents tests sont satisfaisants et prouvent que la procédure de reconstitution de données que nous avons menée est appropriée. Partant de ces conclusions, nous avons retenu les données existantes et nous avons ajouté les données manquantes aux séries correspondantes à partir des données estimées corrigées par la moyenne des écarts.

4.3.4. Contrôle de l'homogénéité des données

L'analyse de l'homogénéité des données est réalisée à l'aide de plusieurs procédures statistiques (cf. Der Megreditchian G, 1988). Nous retenons là aussi le test destiné à la comparaison de deux populations à l'aide d'un nombre équivalent d'échantillons couramment utilisé dans la littérature. Il s'agit du test qui s'intéresse à l'évolution de la moyenne et de la variance. Notre objectif est de vérifier l'existence d'une variabilité marquante dans les données. Cette variabilité peut être expliquée soit par des problèmes de mesure tels que le changement de l'heure de mesure, le changement au niveau de l'environnement de la station, le remplacement des appareils de mesure, le changement de lieu de mesure, soit par les changements climatiques. L'existence d'une certaine hétérogénéité dans les séries

pluviométrique rendrait non robuste l'étude de l'évolution des précipitations pour les différentes stations.

Pour tester l'homogénéité de la série de mesures des paramètres climatiques dont nous disposons, nous divisons les observations en deux échantillons d'un nombre d'observations égales. Ainsi, nous obtenons un premier échantillon couvrant la période 1970-1988 soit 19 années d'observation et le deuxième échantillon couvre la période 1989-2007 soit 19 années.

Les résultats des différents tests sont présentés dans l'annexe[38]. La première et la deuxième ligne sont destinées à une simple comparaison des moyennes et des écarts type des deux échantillons construits dans chaque station météo. Les valeurs révèlent des similarités entre les moyennes et les écarts types des deux échantillons quelques soit la station. La troisième ligne du tableau présente les résultats du test d'égalité des moyennes. L'exploration des résultats pour les différentes stations montre une égalité des moyennes entre les deux échantillons dans la majorité des stations. Ainsi, nous notons que dans la plupart des cas la valeur de significativité du T-Test est supérieur à 0.05 ce qui valide l'hypothèse d'égalité de moyennes des deux sous échantillons. Finalement, la quatrième ligne présente les résultats du « Test de Levene» qui consiste à vérifier l'égalité des variances. Ces résultats prouvent que les deux plages de données proviennent de distributions de variance égale c'est-à-dire qu'il faudra rejeter l'hypothèse d'inégalité des variances dans la majorité des stations. Pour conclure, nous pouvons avancer que les données sont remarquablement homogènes dans la majorité des cas. Nous pouvons même dire que seules quelques stations présentent des données hétérogènes, ce qui ne peut pas remettre en cause la qualité de l'ensemble des données.

4.4. Etudes de la variabilité et de la tendance temporelle des mesures des paramètres climatiques

Dans ce paragraphe nous exploitons les données dont nous disposons pour examiner la variabilité et la tendance des mesures des paramètres climatiques. Ce travail nous permet de vérifier les conclusions du GIEC.

4.4.1. Choix de la méthode

[38] L'ensemble des tests sur l'homogénéité est réalisé à l'aide du logiciel SPSS

Etant donnés les résultats positif du contrôle de fiabilité des mesures des paramètres climatiques que nous avons mené dans le paragraphe précédent, l'analyse des mesures des paramètres climatiques est désormais possible. Nous nous proposons ici de mener une étude de la variabilité et de la tendance climatique durant la période 1970-2007. Notre objectif est de vérifier s'il existe une tendance significative des séries climatiques dont nous disposons. Nous vérifions la signification statistique de la tendance à l'échelle annuelle, saisonnière et mensuelle.

La littérature offre une variété d'outils et de méthodes pour étudier les séries chronologiques climatiques. D'un côté, nous disposons d'une multitude d'outils classiques sous forme :

- de paramètres statistiques, tels que le cumul (total utilisé pour étudier les quantités de pluies et leurs rythmes), la tendance centrale (moyenne arithmétique utilisée pour apprécier la tendance climatique) ou encore la dispersion (écart type qui détermine la dispersion autour de la moyenne, ou le coefficient de variation qui permet d'apprécier la variabilité interannuelle pondérée sur des séries chronologiques).
- de tests statistiques non paramétriques développés pour apprécier la signification de la tendance et détecter les éventuelles ruptures de stationnarités dans les séries chronologiques, tels que les tests de Spearman et de Mann-kendall basés sur le coefficient de corrélation.
- Le test de régression linéaire qui permet de quantifier la tendance moyenne. Il s'agit d'ajuster des modèles linéaires aux données (méthode des moindres carrés).

D'un autre côté, plusieurs indices ont été développés à cet effet, comme l'indice de sécheresse ou indice d'écart par rapport à la moyenne qui permet d'estimer le déficit pluviométrique annuel.

Si l'utilisation des paramètres statistiques simples ou encore des indices ne suscite pas de problèmes, l'application des tests aux séries chronologiques pose une difficulté majeure quant à la détermination du degré de liberté et par conséquent à la qualité des résultats. Un des problèmes majeurs des études de séries chronologiques est l'autocorrélation temporelle des données qui risquent de surestimer la signification de la tendance. De plus l'utilisation des régressions linéaires nécessiterait de vérifier les conditions d'application de cette méthode (les conditions d'indépendance, d'hétéroscédasticité et de normalité des résidus).

Pour étudier la tendance des séries chronologique climatiques dont nous disposons nous retenons les méthodes basées sur le coefficient de variation en pourcentage et sur le test non paramétrique (test de Spearman), couramment utilisé. La nature des données conditionne largement la nature du coefficient à calculer. Notre choix est non seulement lié à la notoriété des deux méthodes, mais aussi conditionné par la nature des données. En fait, puisque dans notre cas la variable est ordinale (variable temps) il est préférable de faire appel aux méthodes non paramétriques qui n'exigent pas que les variables soient issues d'une distribution paramétrée. Aussi, la méthode non paramétrique nous permet de vérifier l'existence d'une tendance même si celle-ci n'est pas linéaire.

4.4.2. Etudes de la variabilité et de la tendance des séries climatiques

Nous commençons par calculer le coefficient de variation pour chaque station des sommes annuelles, mensuelles et saisonnières. Le coefficient est mesuré par le rapport de l'écart-type à la moyenne, et s'exprime en pourcentage :

$$CV = 100 \times \sigma / \mu$$

Les résultats sont présentés dans le tableau 6 de l'annexe. Nous constatons que ce coefficient est élevé pour l'ensemble des stations, quelque soit la nature des données (annuelles, mensuelles et saisonnières). Ces résultats confirment la variabilité prononcée qui caractérise le pays (chapitre 3).

Ensuite, nous procédons à l'étude de la tendance à l'aide du test de Spearman. Le test de Spearman est basé sur le coefficient (noté r_s ou ρ) appelé aussi coefficient de corrélation des rangs. Le calcul de ce coefficient peut être soumis à un test de signification du coefficient qui consiste à accepter ou rejette l'hypothèse d'absence de corrélation ($r_s = 0$). Les résultats d'estimation sont présentés dans l'annexe. Nous retenons les conclusions présentées ci-après quant à la tendance des précipitations et celle des températures.

1. Etude de la tendance des précipitations

- Tendance annuelle : les valeurs prises par le coefficient de Spearman en valeur absolue ne dépassent pas 0.2 et sont toutes non significativement différentes de 0. Nous pouvons conclure l'absence de tendance annuelle dans les données sur les précipitations. En outre, la quantité de pluie enregistrée dans toutes les stations ne dépend pas du temps, ce qui implique que la série en question est stationnaire.
- Tendance saisonnière :
  - Saison d'été : seule la station de Tataouine présente une tendance non linéaire significativement négative au seuil de 5% (le coefficient de Spearman est égal à -0.397). Ce résultat nous permet d'avancer que pour cette station la série enregistrée est stationnaire.
  - Pour la saison d'automne, aucune station ne présente de tendance significative. Les signes des coefficients de Spearman oscillent entre des signes négatifs et d'autres positifs. Il n'y a pas de dépendance entre la quantité de pluie enregistrée et le temps, les séries de données enregistrées sont alors stationnaires.
  - Pour la saison d'hiver, aucune station ne présente de tendance significative, ce qui implique qu'il n'y a pas de dépendance entre les données enregistrées et le temps. Nous pouvons alors déduire que la série utilisée est stationnaire.
  - Pour la saison du Printemps, seules les stations de Bizerte et de Mahdia présentent des séries à tendance significative (avec un coefficient de Spearman négatif (-0,33) et significatif au seuil de 5% pour la station de Bizerte et un coefficient significativement positif (0,93) au seuil de 10% pour la station de la Mahdia).
- Tendance mensuelle : l'étude de la tendance mensuelle des séries chronologiques dont nous disposons révèle que le nombre le plus élevé de stations présentant des séries de données à tendance significativement différente à 0 est enregistré aux mois de Mars, Décembre et Juillet. Ce nombre (5 stations) étant faible par rapport à l'ensemble des 27 stations, nous considérons que dans l'ensemble les séries de données ne présentent pas de tendance significative et que les séries chronologiques utilisées dans l'étude sont stationnaires.

L'étude de la tendance de la quantité de pluie aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle aboutit à des résultats très intéressants. Nous avons trouvé une tendance significative des précipitations dans quelques stations, pour les saisons d'été et de printemps

(échelle saisonnière), et pour les mois de Janvier, Mars, Juin, Juillet, Août, septembre et Décembre (échelle mensuelle). Nous pouvons suggérer qu'au cours de ces dernières années, il y avait un changement dans la distribution temporelle des précipitations plutôt qu'une tendance à la baisse ou à la hausse de la quantité de pluie. Ce résultat confirme les résultats du GIEC quant à la précipitation, qui suggèrent que l'augmentation du CO_2 atmosphérique dans le cadre du changement climatique ne pourrait pas affecter annuellement la quantité de pluie en méditerranée mais que les effets pourraient être sentis au niveau de la distribution temporelle de la pluie.

2. Etude de la tendance de la température

- Tendance annuelle : Les résultats illustrés dans les tableaux de l'annexe 4 prouvent l'existence d'une évolution tendancielle de la température moyenne annuelle. Presque toutes les stations présentent des coefficients de corrélation significativement positifs. Ceci soutient l'existence d'une certaine tendance de la température à la hausse.
- Tendance saisonnière :
  - Pour la saison d'Été, une tendance significative et positive est remarquable pour presque toutes les stations (exception faite pour les stations Siliana et la Thala).
  - Pour la saison d'Automne, nous enregistrons les mêmes remarques. En fait, une tendance significative et positive est claire pour presque toutes les stations (exception pour la station de Kasserine et celle de Thala).
  - Pour la saison d'hiver, les résultats sont différents. Uniquement quatre stations (Tunis-Carthage, Monastir, Mahdia et Djerba) présentent des coefficients de corrélation significativement positifs. D'un autre côté, pour la Thala, le coefficient de corrélation est significatif et négatif et montre l'existence d'une tendance à la baisse de la température.
  - Pour la saison de Printemps, nous notons les mêmes tendances que pour les saisons d'été et d'automne. Une tendance significative et positive est enregistrée presque pour toutes les stations exception faite pour la station de Kasserine et celle de Thala.
- Tendance mensuelle : Seules les mois de Février, Janvier et Décembre ne présentent pas de tendance significative, les autres mois présentent une tendance significativement positive.

L'étude de la tendance de la température aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle aboutit aussi à des résultats qui confirment les conclusions du GIEC : la détection d'une tendance significativement positive dans presque toutes les stations aux saisons été, automne et printemps et dans quelques stations pour la saison d'hiver à l'échelle saisonnière et dans presque toutes les stations aux mois de Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre et Novembre et dans quelques stations dans les autres mois. Ceci nous pousse à conclure qu'au cours de ces dernières années, une tendance à la hausse de la température est enregistrée.

Conclusion

Pour appliquer le modèle ricardien au cas tunisien, certaines modifications dues essentiellement à l'absence de données sont retenues. D'abord, il nous est difficile d'appliquer le modèle ricardien dans sa version classique à cause de l'absence de données fiables sur les valeurs de la terre, nous nous proposons alors de tester le modèle fondée sur le revenu net. L'unité d'analyse que nous choisissons est le gouvernorat puisque la plupart des données sont disponibles, ou peuvent être extrapolées à ce niveau. Nous retenons la valeur ajoutée comme variable dépendante pour apprécier le revenu net pour lequel nous ne disposons pas directement de données. Nous choisissons de travailler sur la période 1992-2007 puisque les données sur la valeur ajoutée ne sont complètes que pour cette période.

L'analyse des données sur la valeur ajoutée montre une variabilité spatio-temporelle entre les gouvernorats qui peut être expliquée par les disparités des dotations naturelles et des facteurs socio économiques et techniques. Nous explorons les bases de données disponibles afin de disposer du maximum de données et d'information quant à ces variables pour en contrôler les effets.

Finalement, nous explorons la base de données climatique afin de faire les corrections nécessaires. L'analyse de la variabilité et de la tendance de séries chronologiques complétées en cas de valeurs manquantes et l'analyse d'hétérogénéité confirme les résultats du GIEC quant à un changement climatique constaté ces dernières années.

Désormais, nous sommes en mesure d'étudier l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture tunisienne en utilisant la méthode ricardienne.

Chapitre 5. Etude de l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la productivité agricole tunisienne. Pour commencer, nous utilisons la méthode ricardienne (chapitre 2) afin d'examiner la relation entre le climat et la productivité agricole. Puis, nous calibrons les coûts agricoles de divers scénarios du changement climatique.

La première étape présente une difficulté majeure liée à la disponibilité des mesures des paramètres climatiques par station et non pas par gouvernorat. En effet, les mesures des paramètres climatiques doivent être en accord avec les données agro économiques dont nous disposons pour pouvoir les utiliser dans les estimations et simulation du modèle ricardien. De plus, certains gouvernorats ne sont pas couverts par les stations météorologiques disponibles alors que d'autres en possèdent plusieurs. Ainsi, il est nécessaire d'estimer les variables climatiques par gouvernorat à partir des enregistrements des stations météorologiques réparties sur tout le territoire avant de procéder à l'exploration de la relation entre le climat et l'agriculture. L'interpolation des données qui crée un champ continu de variables à partir de mesures ponctuelles, permettant d'estimer les variables climatiques même dans les zones non couvertes par les stations météorologiques, est alors une étape primordiale.

5.1. Spatialisation des mesures des paramètres climatiques : théorie et application

5.1.1. Aperçue bibliographique

Nous sommes confrontés à une variété de techniques d'interpolation classées en méthodes déterministes, méthodes stochastiques et méthodes mixtes. Les méthodes déterministes offrent plusieurs alternatives qui dépendent de la corrélation entre les données

géographiques. Les deux méthodes les plus connues sont la méthode d'interpolation linéaire IDW (exprimée en fonction de l'inverse de la distance) et la méthode de régression multiple. Les méthodes stochastiques se distinguent des méthodes déterministes par l'association de la théorie de probabilité au principe de corrélation entre les données géographiques. Ces méthodes fournissent une variété de résultats comprenant celles des estimations des variables météorologiques, de l'erreur, des probabilités associées aux variables estimées, permettant une évaluation de la qualité d'estimation. La technique la plus diffuse est le krigeage. Finalement, les méthodes mixtes combinent les deux approches déterministes et stochastiques.

Le choix de la méthode d'interpolation est très important pour la précision des estimations. Dans la littérature les méthodes d'interpolation, appliquées aux mesures des paramètres climatiques, les plus réputées pour la valeur de leurs résultats, sont le krigeage, les régressions multiples et la méthode de krigeage résiduel qui combine les deux approches (Joly et al., 2007 ; Szymanowski et al., 2007 ; Lhottelier, 2006). Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes dépend en premier lieu de la disponibilité des données et de leurs caractéristiques.

Les méthodes de régression multiple et du « residual kriging » font appel aux régressions. Il s'agit, principalement, d'estimer des variables météorologiques dans des endroits non couverts par les stations météorologiques à l'aide des valeurs des variables dans les points connus ainsi que les facteurs susceptibles de reproduire le climat à une échelle fine. La méthode de régression multiple est souvent utilisée dans des études similaires (Mendelsohn et al., 1994 ; Sanghi et al., 1998, Kumar et Parikh, 1998, etc.). Dans ce travail, nous disposons d'un nombre restreint de stations météorologiques qui ne nous permettraient pas d'utiliser ces deux méthodes. Nous examinons alors de près la méthode du krigeage.

La méthode du krigeage trouve son fondement dans la géostatistique. Il s'agit d'un problème classique de modélisation statistique de données spatiales à l'aide d'une fonction aléatoire. L'objectif étant d'estimer des valeurs dans des points sans observation, c'est-à-dire d'estimer la fonction aléatoire en question en un point du plan qui est définie par des poids autour des valeurs mesurées. L'information sur les points du plan permet de calculer des distances et de modéliser la corrélation entre les points mesurés comme fonction de la distance entre ces points.

$$\hat{Z}(x_p) = \sum_{i=1}^{N} \varphi_i \cdot Z(x_i) \quad (1)$$

$Z(x_i)$ est la valeur connue de Z en un point x_i

φ_i pondération à estimer de la valeur connue de Z au point i

x_p est le point de l estimation

N est le nombre de valeurs connues

Une condition fondamentale à l'utilisation de la technique du krigeage est la stationnarité de la moyenne et de la variance de la fonction aléatoire. En fait, le krigeage est basé sur la théorie des variables régionalisées qui stipule que la variation spatiale d'un phénomène quelconque représenté par des valeurs quantitatives, est statistiquement homogène sur toute la surface considérée : le même modèle de distribution doit régir tous les points de la zone en question. Puisque nous avons montré, dans le chapitre 4, que les mesures des paramètres climatiques dont nous disposons sont homogènes nous pouvons retenir la méthode du krigeage pour ce travail. Ceci étant nous explorons dans la suite du paragraphe les différentes étapes d'interpolation de la méthode.

L'idée de départ de la méthode du krigeage, est que pour une même variable, l'effet relatif d'un point d'observation diminue avec la distance qui le sépare du point de l'espace dont on veut estimer la valeur. Le choix des poids de la fonction selon la technique du krigeage dépend alors du degré de similarité entre les valeurs des points mesurés. En fait, l'objectif est d'identifier la distance optimale à l'intérieur de laquelle les points mesurés sont corrélés. La méthode du krigeage utilise la relation entre la corrélation spatiale et la distance entre les points mesurés définie par le variogramme pour estimer les poids. Etant donnée la stationnarité de la moyenne et de la variance de la fonction aléatoire, le krigeage utilisera plutôt le semi-variogramme qui est la moitié du variogramme pour déterminer les poids de l'équation (1). Le semi-variogramme est estimé à partir de l'échantillon de points connus à l'aide de l'équation suivante:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2$$

où; n est le nombre de couples de points de l échantillon séparés par une distance h

L'étape suivante consiste à représenter le semi-variogramme empirique par un graphique où la distance figure sur l'axe des abscisses et les différentes valeurs trouvées du semi-variogramme figurent sur l'axe des ordonnées. Puis vient l'étape la plus délicate (Gratton, 2002) de la procédure qui nécessite d'associer une fonction continue appropriée à tous les points du semi-variogramme empirique. Cette étape est réalisée en ajustant une fonction analytique au semi-variogramme à l'aide de la méthode des moindres carrés ordinaire. Les fonctions les plus utilisées dans cet ajustement sont : le modèle sphérique, le

modèle exponentiel, le modèle gaussien, la fonction puissance, le modèle cubique et le sinus cardinal.

Il existe trois types de krigeage: le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel qui diffèrent par la variation de la formule de tendance. Le krigeage simple suppose que la variable est stationnaire et la moyenne est connue. Le Krigeage ordinaire est largement utilisé. Il suppose que la variable est stationnaire et la moyenne constante et inconnue. Le Krigeage universel suppose qu'il y ait une tendance principale dans les données c'est à dire que la variable n'est pas stationnaire.

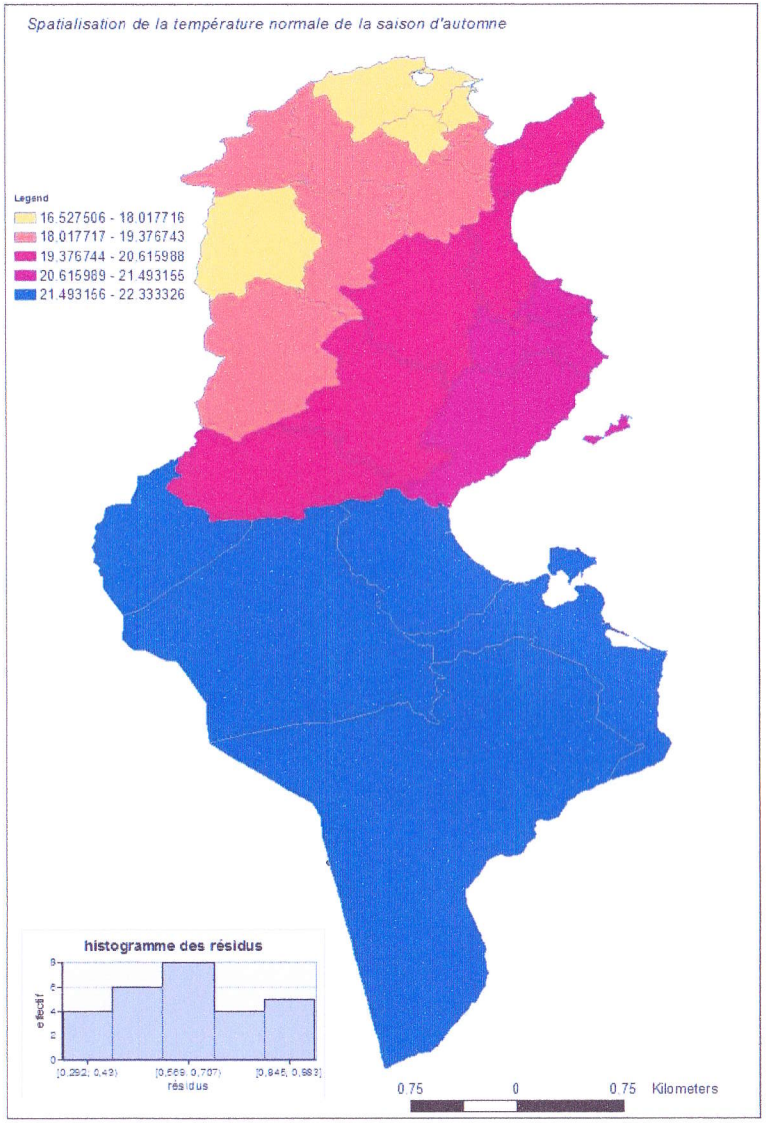
5.1.2. Interpolation spatiale des mesures des paramètres climatiques

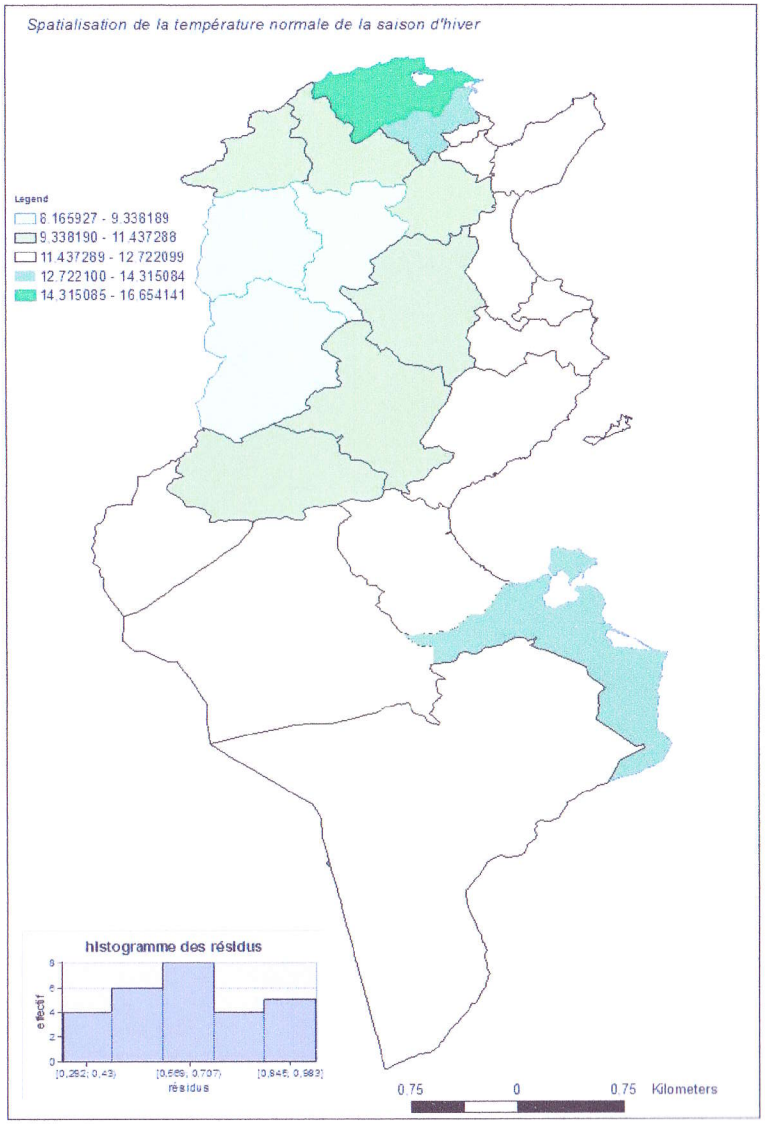
Dans ce travail nous avons choisi la technique du krigeage ordinaire fréquemment utilisée en interpolation spatiale pour déterminer les valeurs de la variable précipitation par gouvernorat. C'est une méthode qui a été beaucoup testée et qui est réputée pour la valeur de ses résultats (Gratton, 2001). Ce choix est dicté non seulement par la qualité reconnue des résultats de la méthode mais surtout parce qu'il n'y a pas de raison scientifique qui ne le permet pas (puisque nous avons vérifié auparavant la stationnarité des données de précipitation). Pour déterminer les valeurs de la température par gouvernorat nous utilisons la méthode du krigeage universel, qui est une méthode plus générale que la précédente, puisque les données de cette variable ne sont pas stationnaires.

Sur la base de ces décisions nous avons conduit une série d'interpolation des paramètres climatiques que nous avons déjà définis pour l'étude (climat normal, climat saisonnier, climat annuel) à l'aide du logiciel Arcgis 9.2. Arcgis permet d'examiner les différentes étapes de la procédure d'interpolation, le kriging ordinaire en particulier. Ceci nous a permis de comparer les courbures théoriques disponibles et de choisir la plus convenable en regard des points du semi-variogramme. La sélection d'une courbure théorique convenable est une décision hypothétique qui ne suit pas de règles précises. Gratton (2002) qualifie cet étape de presqu'un art. Nous nous sommes référés aux consignes du guide d'application du logiciel (Arcgis Desktop) pour faire la sélection. Nous avons surtout insisté sur le fait que la courbe à l'origine du modèle choisi correspond le mieux à la direction des points du semi-variogramme puisque c'est la partie qui influencerait le plus le résultat d'interpolation selon le guide. Finalement, nous nous en sommes tenus au modèle sphérique pour mener l'interpolation des 20 paramètres climatiques sur tout le territoire de la Tunisie.

Pour la première analyse, les variables interpolées sont le climat normal saisonnier et le climat saisonnier. Nous calculons, en premier lieu, les moyennes arithmétiques des variables climatiques (température et précipitations) saisonnières sur la période 1971-2001 dans chacune des 27 stations météorologiques afin d'estimer la valeur de la normale du climat saisonnier. Puis nous interpolons les valeurs trouvées afin de prédire les valeurs du climat normal saisonnier dans les 21 unités d'observation. Les résultats des 8 interpolations spatiales de la normale de la température saisonnière et la normale de la précipitation saisonnière sont présentés ci-dessus.

Tableau 5.1. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage universel de la normale de la température saisonnière





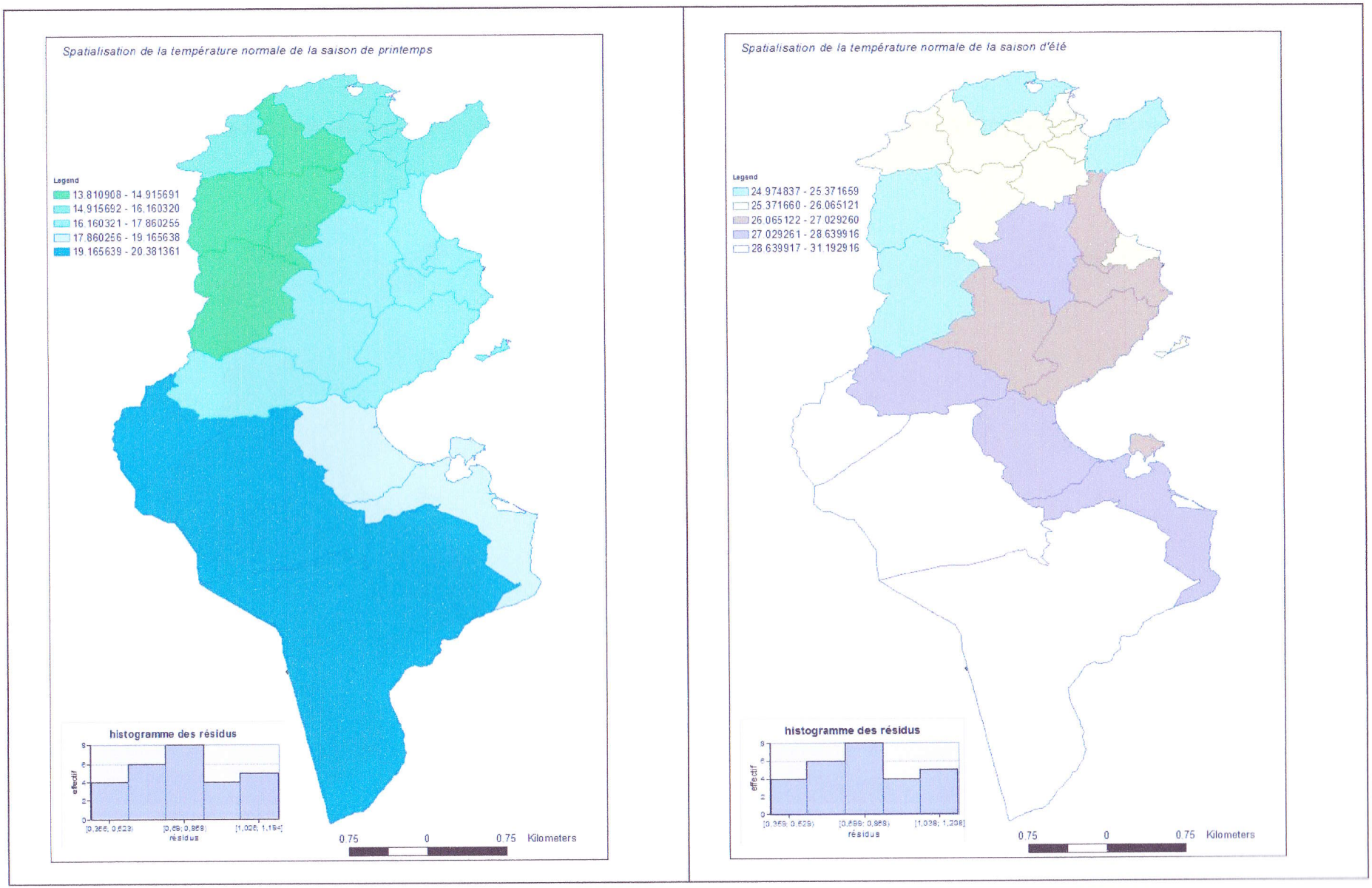
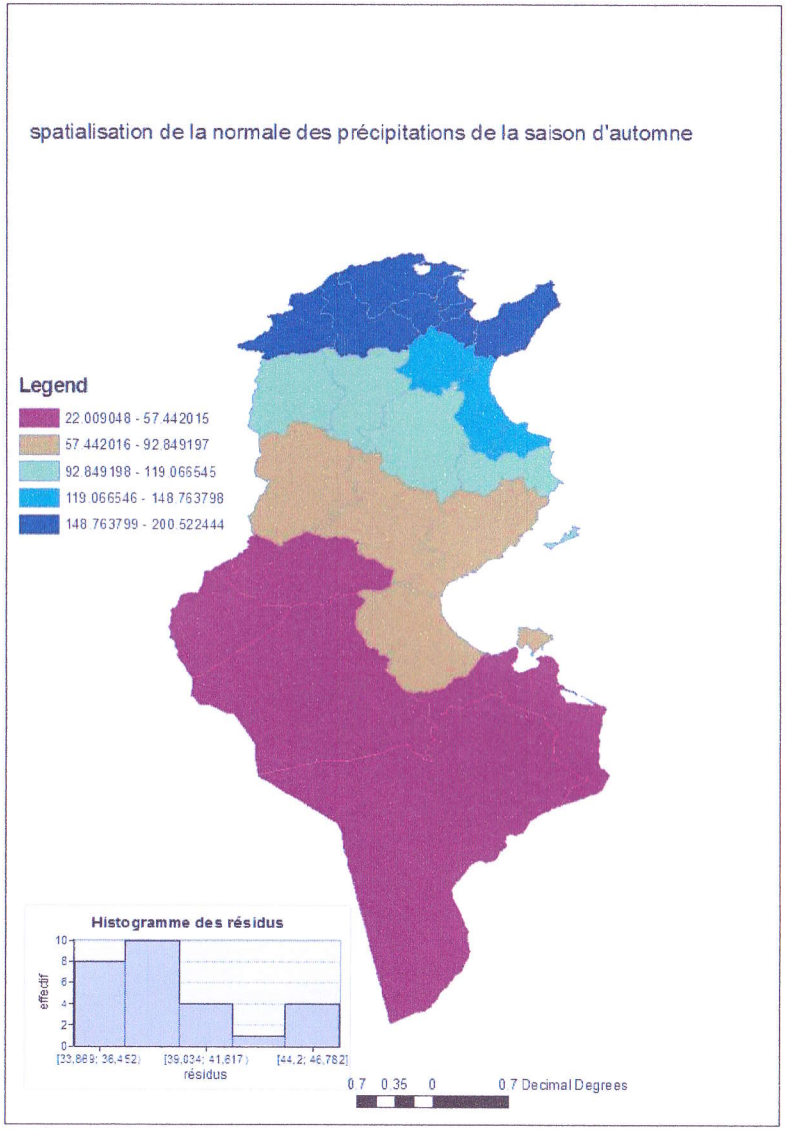
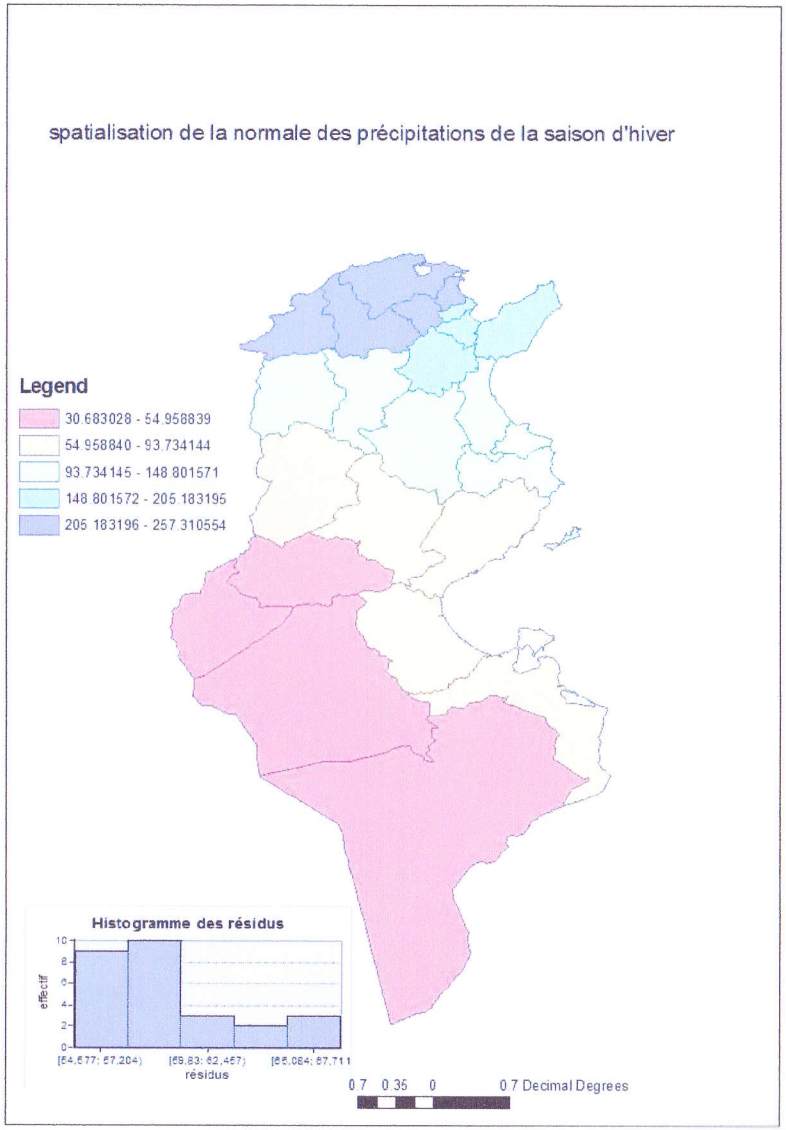
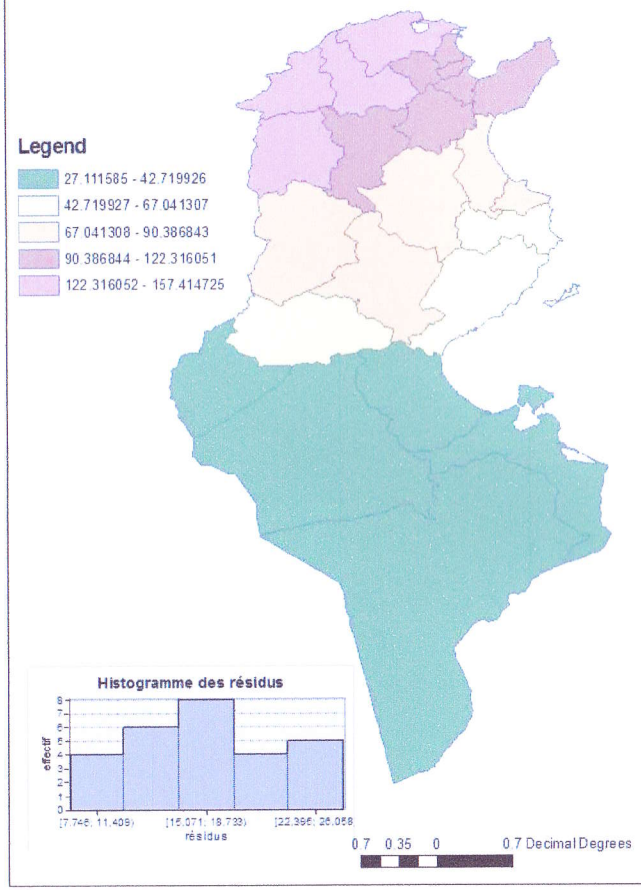

Spatialisation de la température normale de la saison de printemps
Legend
13.810908 - 14.915691
14.915692 - 16.160320
16.160321 - 17.860255
17.860256 - 19.165638
19.165639 - 20.381361
histogramme des résidus
effectif
résidus
0.75 0 0.75 Kilometers
Spatialisation de la température normale de la saison d'été
Legend
24.974837 - 25.371659
25.371660 - 26.065121
26.065122 - 27.029260
27.029261 - 28.639916
28.639917 - 31.192916
histogramme des résidus
effectif
résidus
0.75 0 0.75 Kilometers

Tableau 5.2. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage ordinaire de la normale de la précipitation saisonnière

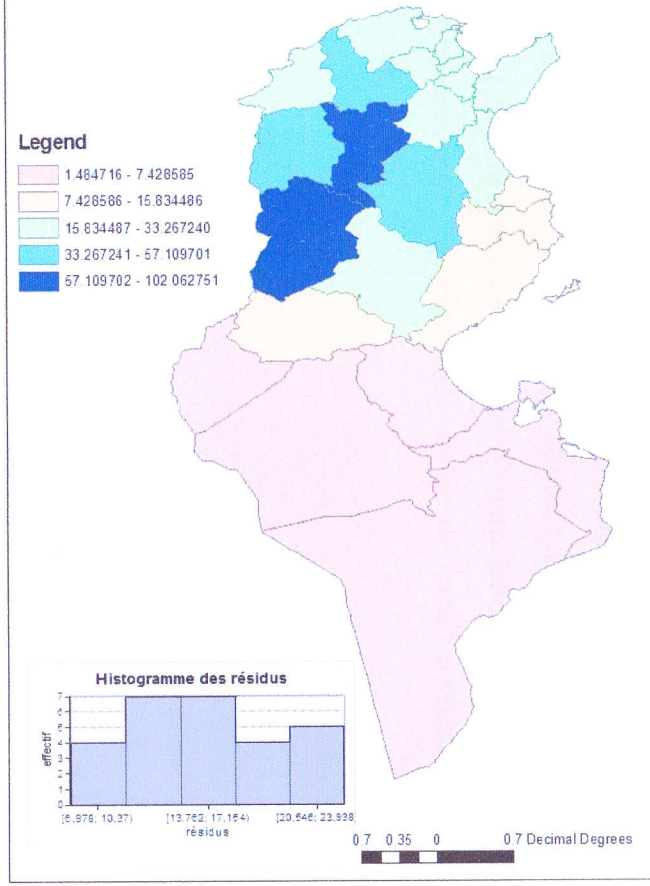




spatialisation de la normale des précipitations de la saison de printemps



spatialisation de la normale des précipitations de la saison d'été

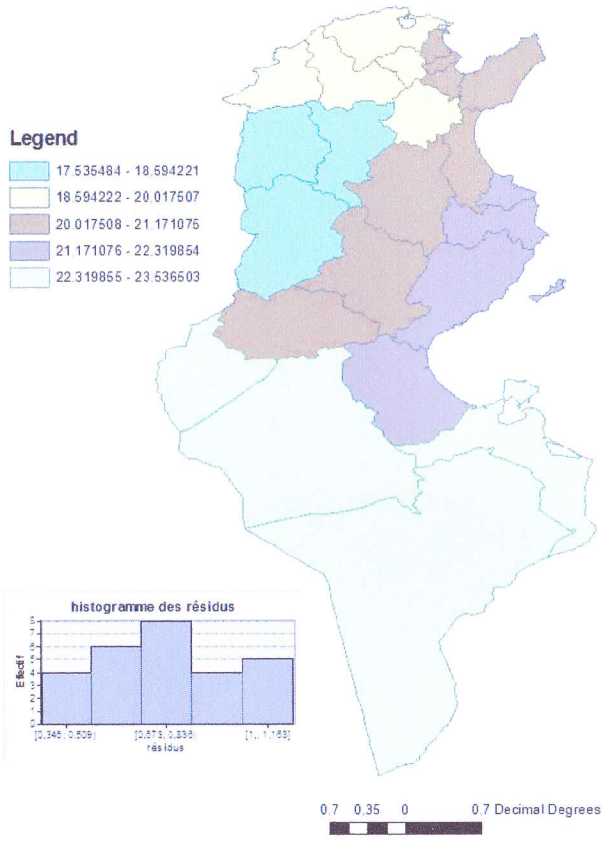


Le tableau ci-dessus présente l'estimation des variables climatiques saisonnières normales sous forme de cartes accompagnées des histogrammes des valeurs des résidus.

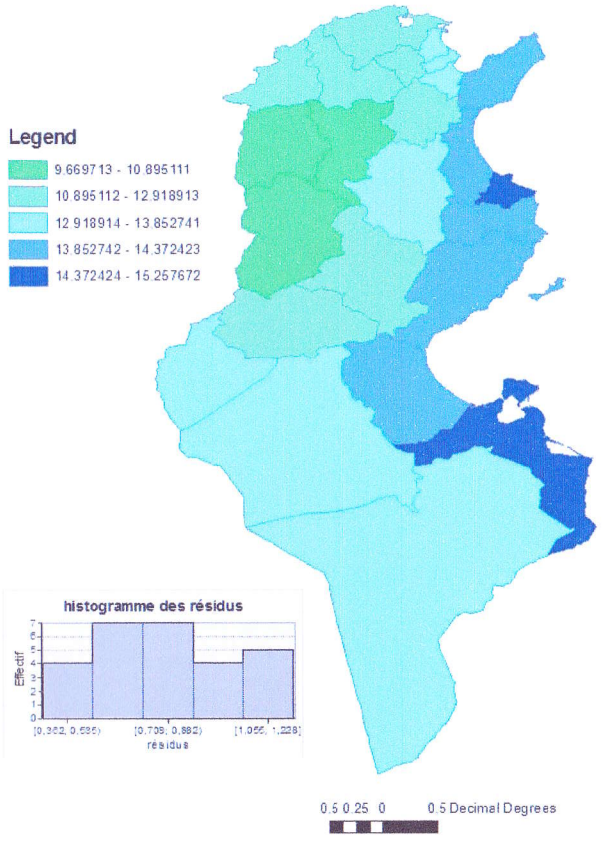
Nous effectuons, également, une interpolation des variables climatiques saisonnières des différentes années de la période d'analyse 1992-2007. En tout, nous procédons à 120 interpolations pour les besoins de la première analyse. Nous présentons dans ce qui suit un échantillon des résultats d'interpolation des variables climatiques saisonnières de l'année 2007 (un échantillon plus large comprenant des résultats d'interpolation à pas de 5 ans sur la période d'analyse est présenté dans l'annexe) sous forme de cartes accompagnées des histogrammes des valeurs des résidus.

Tableau 5.3. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage universel de la température saisonnière de l'année 2007

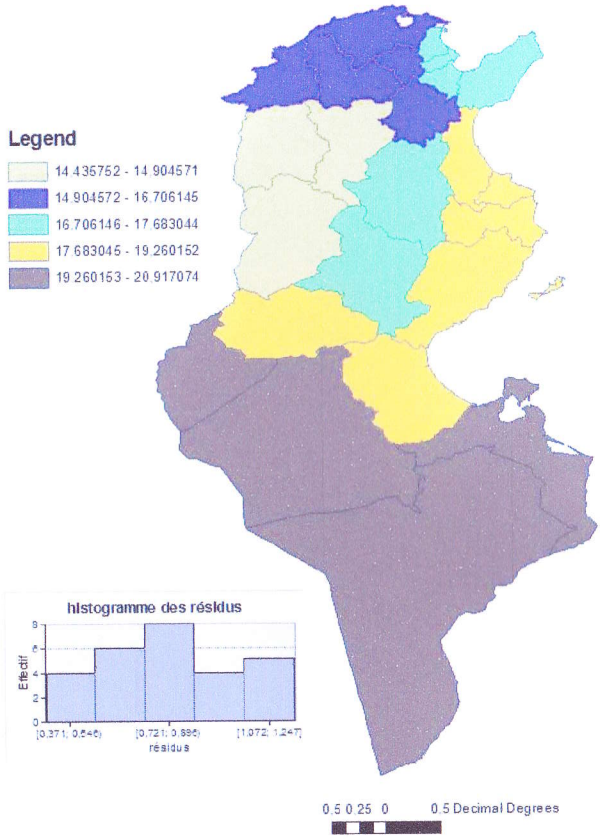
spatialisation de la température de la saison d'automne de l'année 2007



spatialisation de la température de la saison de l'hiver de l'année 2007



spatialisation de la température de la saison du printemps de l'année 2007



spatialisation de la température de la saison d'été de l'année 2007

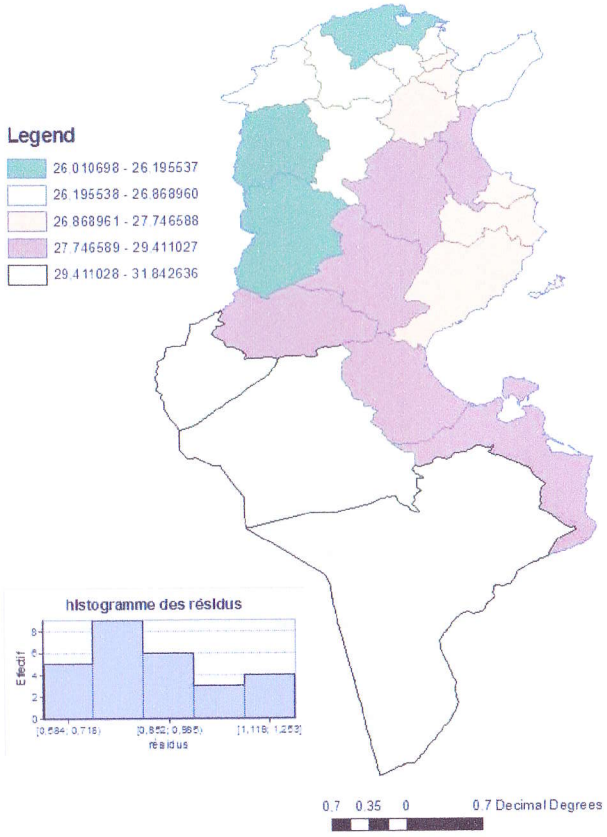
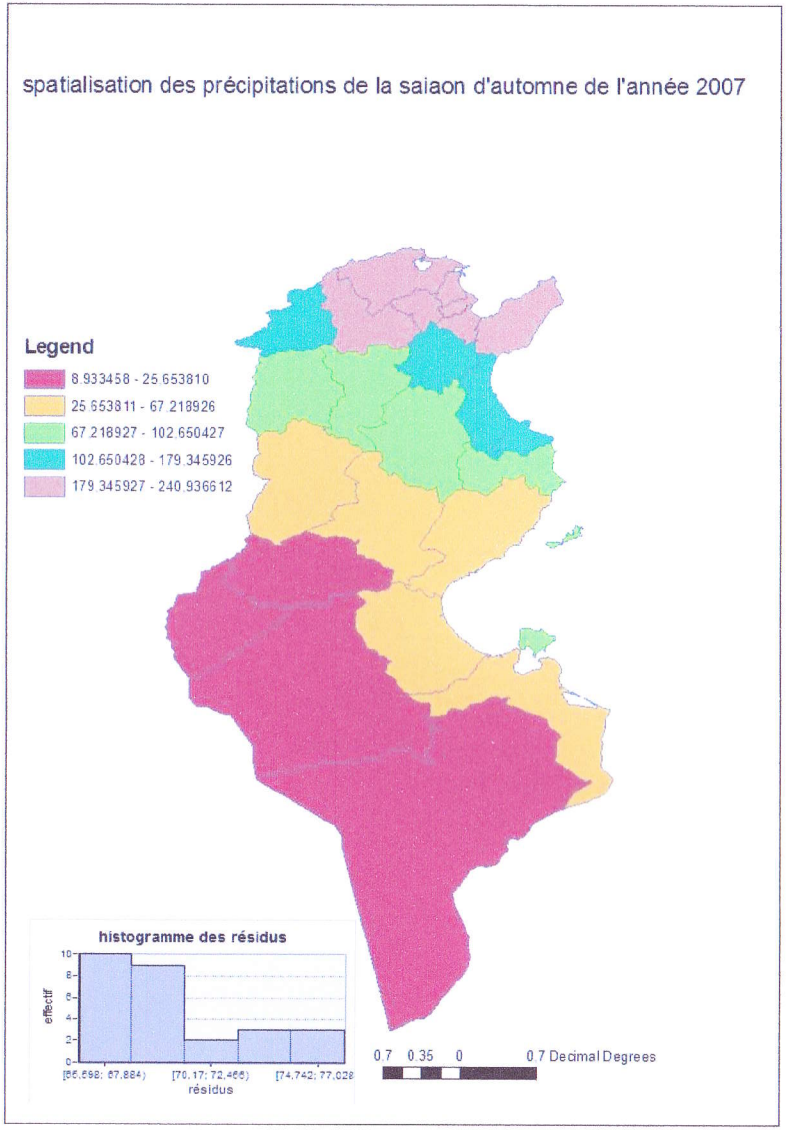
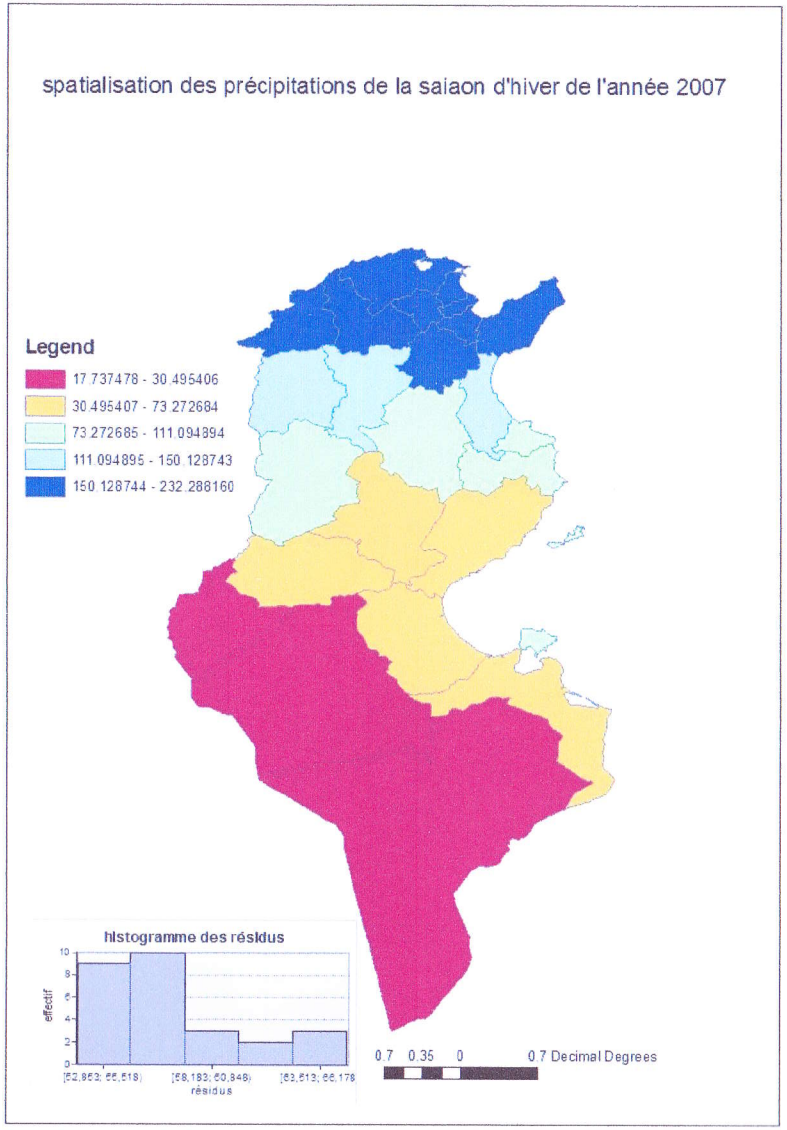
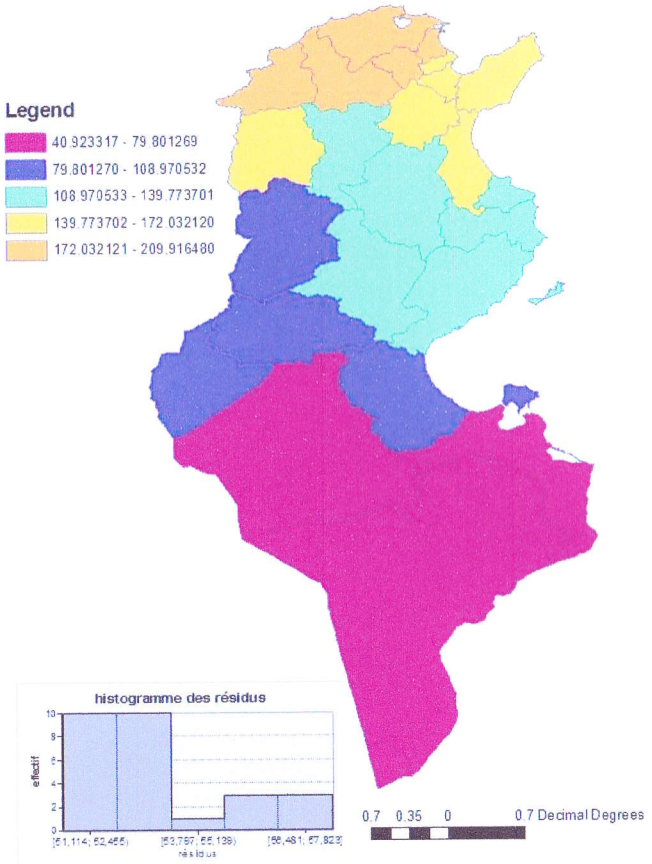


Tableau 5.4. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage ordinaire des précipitations saisonnières de l'année 2007

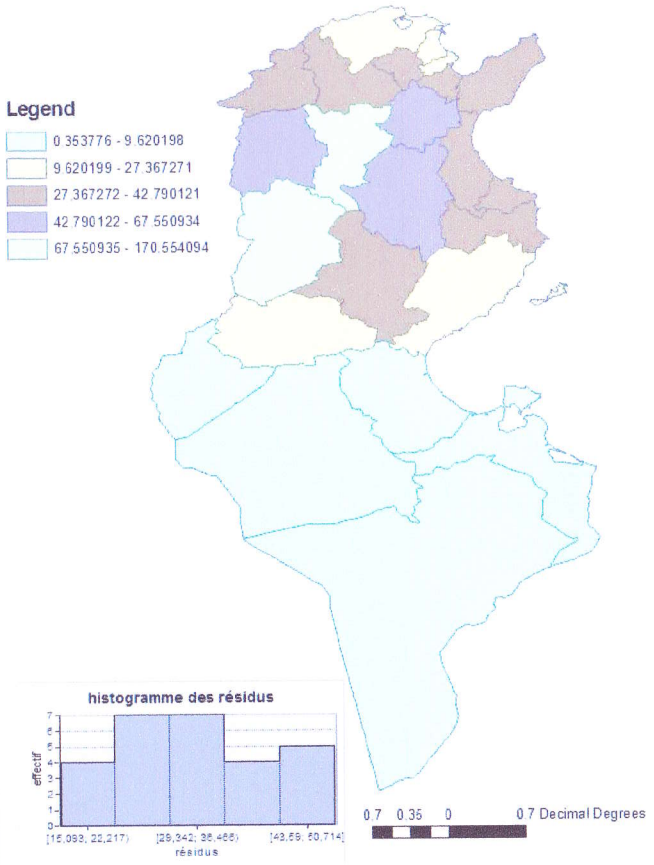




spatialisation des précipitations de la saiaon de printemps de l'année 2007

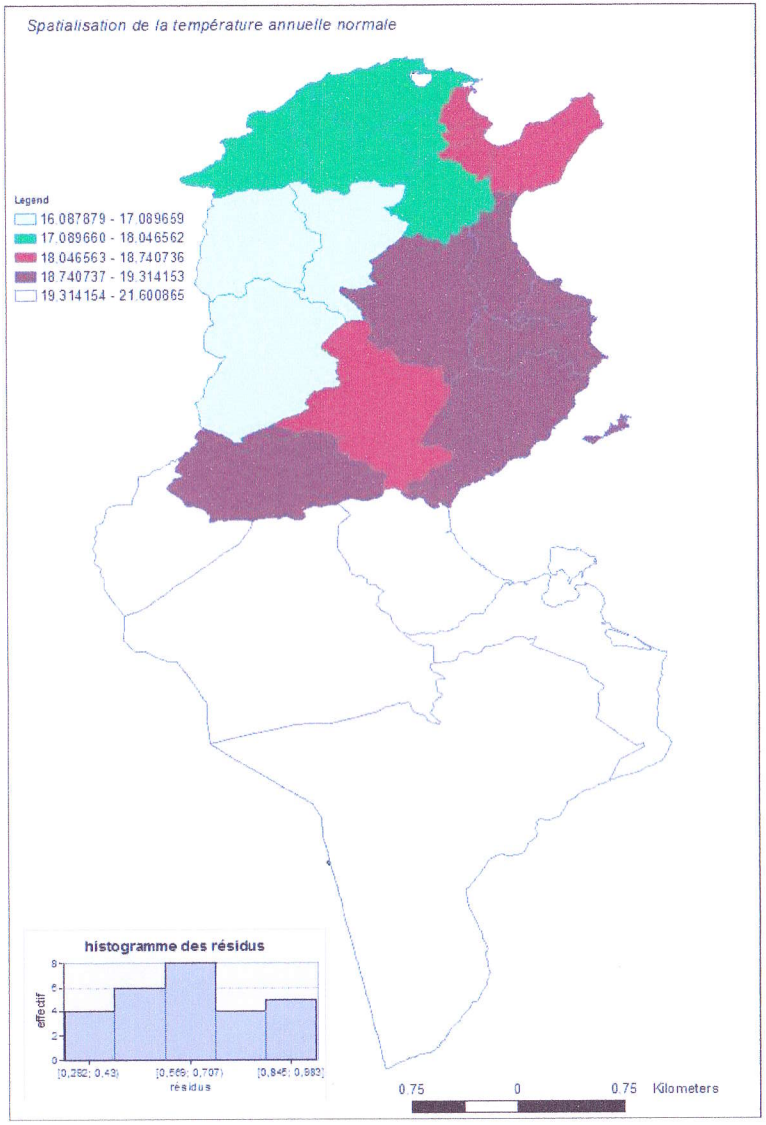


spatialisation des précipitations de la saiaon d'été de l'année 2007



Les variables climatiques nécessaires à la seconde analyse sont le climat annuel de la période 1992-2007 et la normale du climat annuel. Nous calculons alors, la moyenne arithmétique des variables climatiques annuelles sur la période 1971-2001 dans chacun des 27 stations météorologiques afin d'estimer la normal du climat annuelle. Nous effectuons ensuite un total de 32 interpolations pour déterminer les valeurs des variables climatiques (climat normale et climat annuel) par gouvernorat. Un échantillon des résultats des différentes interpolations est présenté ci-après sous forme d'un tableau de cartes accompagnées des histogrammes des valeurs des résidus.

Tableau 5.5. Résultats d'interpolation spatiale de la normale de la température et des précipitations annuelles



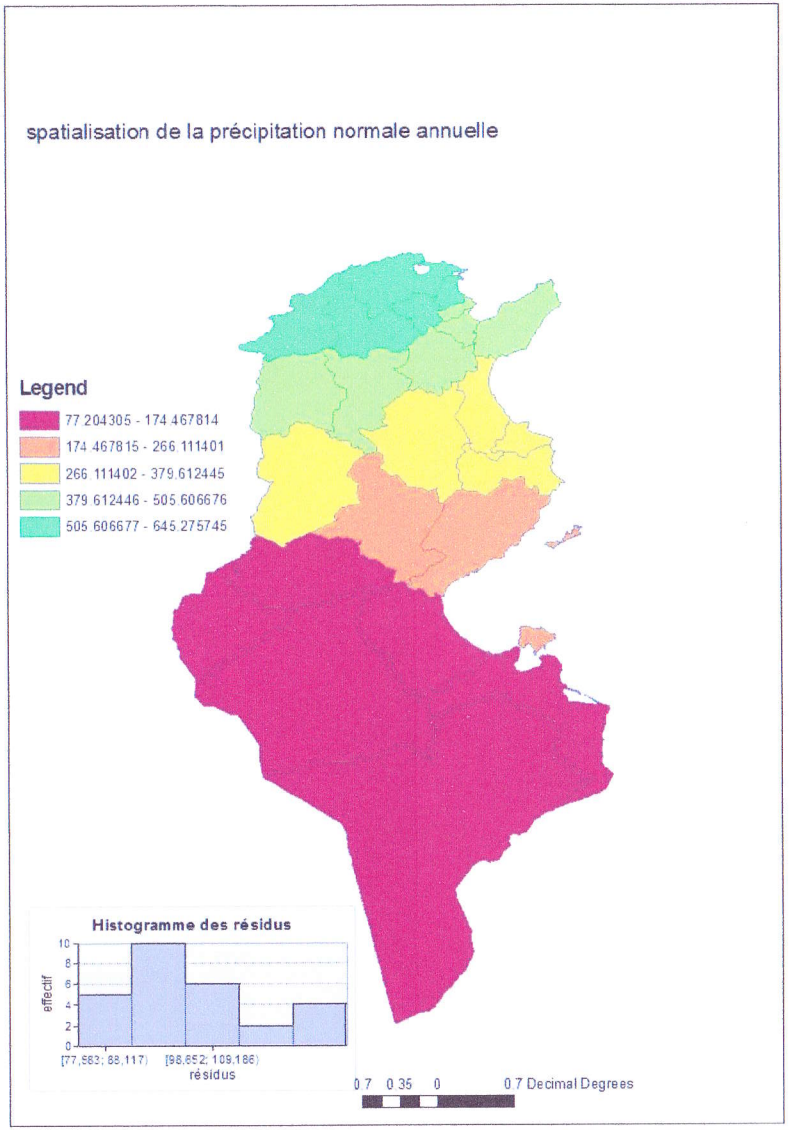
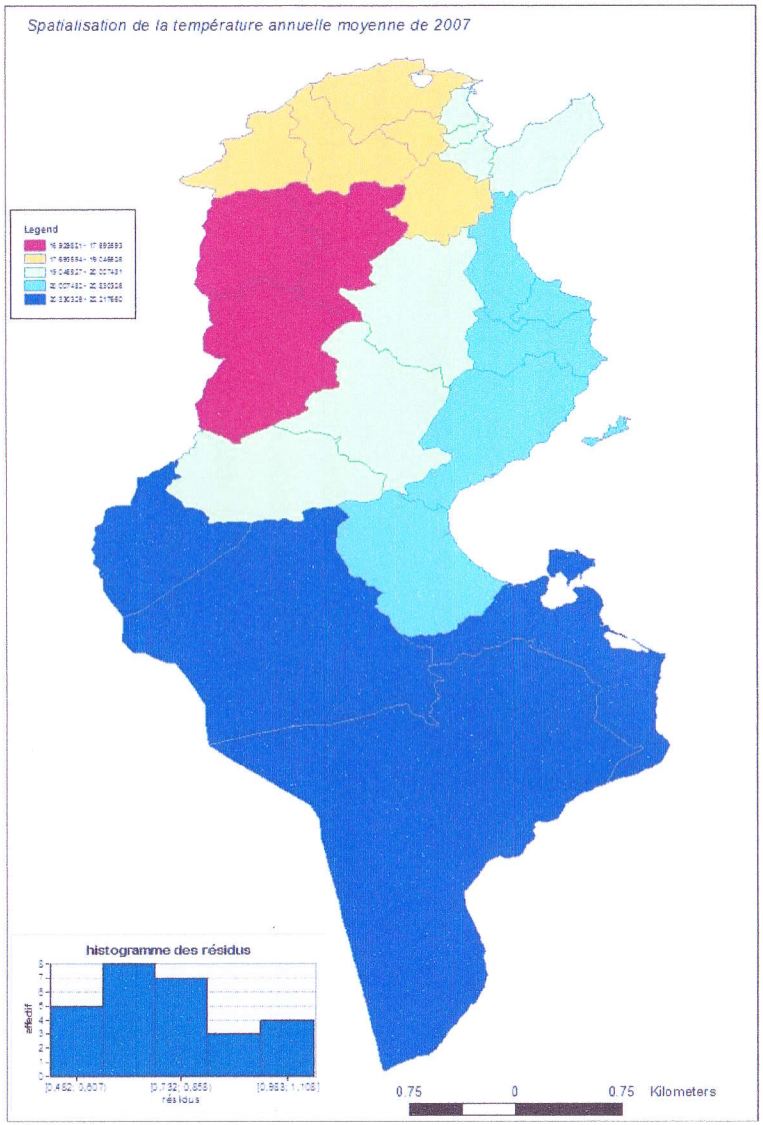
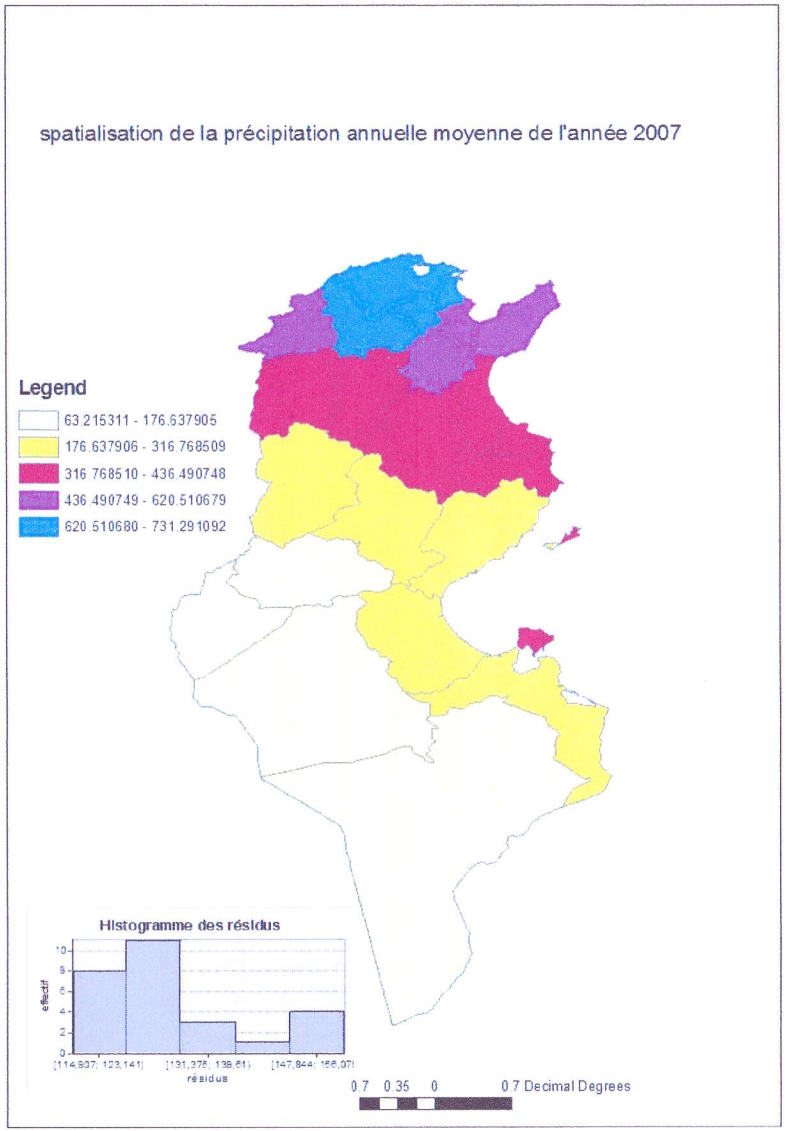


Tableau 5.6. Résultats d'interpolation spatiale par de la température et des précipitations de l'année 2007





5.2. Spécification de la procédure d'estimation du modèle ricardien modifié

Certaines études relatives à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture ont pris en compte la dimension temporelle (Kumar K.S.K. et Parikh J., 1998) sans pour autant considérer la dimension spatiale et plus précisément les effets spatiaux : autocorrélation spatiale[39] et hétérogénéité spatiale[40] qui peuvent résulter de deux points proches dans l'espace. Ainsi, ces études ne tiennent pas compte, par exemple, de l'effet positif de la production agricole qui peut résulter du rapprochement spatial des lieus des pôles économiques ou industriels. Alors que, cet aspect est important surtout dans les pays en voie de développement où l'exploitation agricole est plutôt traditionnelle, basée sur des méthodes rudimentaires fatigantes et une main d'œuvre généralement non qualifiée. Le cas des deux gouvernorats de Tunis et Sfax est illustratif, puisque nous constatons (chapitre 4) que sur la période d'étude, la valeur ajoutée garde un niveau élevé par rapport aux autres gouvernorats quelques soient les conditions climatiques.

Dans notre travail, nous introduisons la dimension spatiale dans l'analyse afin de contrôler son effet sur le résultat de l'activité agricole. Ce choix convient à cette étude surtout dès lors que nous utilisons des données géographiques et que notre échantillon est composé d'unités de production (gouvernorat) appartenant à un seul pays, c'est-à-dire, très proches dans l'espace et se caractérisent par des climats interdépendants. En fait, Jayet H. (2001) avance que si des observations réparties dans l'espace sont fréquemment interdépendantes alors ce qui se passe dans une localisation particulière dépend de ce qui se passe dans d'autres localisations. Ainsi dans notre modélisation, nous ajoutons des variables qui tiennent comptes de la disparité géographique et nous nous référons à des procédures d'estimation très spécifiques adaptées aux modèles qui intègrent les deux effets d'autocorrélation et d'hétérogénéité spatiales.

Dans la littérature, plusieurs modèles d'économétrie spatiale et tests d'autocorrélation spatiale ont été développés pour contrôler et vérifier l'existence d'une interaction spatiale. Nous nous proposons d'utiliser ces outils afin de contrôler l'effet de la dimension spatiale. Ce travail constitue, du moins à notre connaissance, un des rares travaux empiriques qui utilisent ce type de modèles, surtout dans le cas de données de panel, pour étudier l'impact du

[39] Absence d'indépendance entre des observations géographiques.
[40] Différenciation dans l'espace des variables et des comportements.

changement climatique sur l'agriculture. Dans ce qui suit, nous présentons une synthèse de ces travaux. Nous exposons, en premier lieu, le modèle des données de panel dans sa forme classique, c'est-à-dire sans considérer l'interaction spatiale puis nous présentons les modèles avec interaction spatiale. Les tests d'autocorrélation spatiale que nous allons utilisés seront présentés simultanément dans ces deux paragraphes. Les tests d'autocorrélation spatiale développés et appliqués principalement sur des données de série temporelle, sont détaillés dans l'annexe puisque nous n'allons pas les utiliser dans notre travail.

5.2.1. Présentation des modèles linéaires sans interaction spatiale sur données de panel

Nous commençons par estimer un modèle linéaire simple sans prendre en considération l'existence possible d'une autocorrélation spatiale. Puisque nous exploitons les dimensions temporelles et individuelles des données (données relatives à 21 régions sur une période allant de 1992 jusqu'à 2007, soit 16 ans) il est nécessaire de considérer l'existence d'effets spécifiques individuels lors de l'estimation. En fait, il est inapproprié d'envisager l'existence de caractéristiques communes qui peuvent influencer de la même manière la productivité des différents gouvernorats durant la même période. Dans ce cadre, la littérature offre deux modèles différents : le modèle à effets fixes où l'effet spécifique est supposé certain et le modèle à effets aléatoires appelé aussi modèle à erreurs composées où les effets spécifiques sont supposés inobservables. Le choix de l'un ou l'autre de ces deux modèles est basé sur l'hypothèse d'exogénéité du terme constant par rapport aux variables explicatives. Le choix entre ces deux modèles est effectué sur la base du résultat du Test d'Hausman[41].

i) Modèles à effets fixes

Pour ce type de modèles, les effets spécifiques individuels (α_g) sont captés par des termes constants et certains. Il n'existe pas un seul terme constant commun pour tous les gouvernorats, chaque gouvernorat (g) se caractérise par un terme constant qui lui est propre et qui représente ses spécificités. Le modèle se présente comme suit :

$$Y_{gt} = \alpha_g + \beta X_{gt} + \varepsilon_{gt}$$

Les termes aléatoires ε_{gt} sont supposés indépendants et identiquement distribués et satisfont les conditions suivantes, $\forall g \in [1, N], \quad \forall t \in [1, T]$

[41] Pour plus d'information sur ce test Voir annexe 8.

- $E(\varepsilon_{gt}) = 0$
- $E(\varepsilon_{gt}\varepsilon_{gs}) = \begin{cases} \sigma_\varepsilon^2 & t=s \\ 0 & \forall t \neq s \end{cases}$,

  ce qui implique que $E(\varepsilon_g \varepsilon_g') = \sigma_\varepsilon^2 I_T$ *où* I_T *désigne la matrice identité* de forme (T,T)
- $E(\varepsilon_{gt}\varepsilon_{js}) = 0, \forall g \neq j, \forall (t,s)$

L'estimation de ce modèle aboutit à des estimateurs dits « Estimateur Within » qui sont identiques aux estimateurs des MCO obtenus où les variables expliquées et explicatives sont centrés sur leurs moyennes individuelles. L'estimation d'un « estimateur Within » est une solution appropriée pour corriger le problème de corrélation entre les effets spécifiques (α_g) et les variables explicatives (X_{gt}). Elle élimine les effets spécifiques pour obtenir un estimateur sans biais et convergent.

ii) Modèles à effets aléatoires

Dans ce cas, les effets spécifiques individuels sont inobservables, ils se manifestent au niveau du résidu. Le modèle se présente comme suit :

$$Y_{gt} = \mu + \beta X_{gt} + \varepsilon_{gt}$$

$$\text{avec } \varepsilon_{gt} = \alpha_g + \lambda_t + \nu_{gt}$$

Où, α_g : représente les effets individuels supposés aléatoires ;

λ_t : représente les effets temporels qui sont identiques pour tous les individus (gouvernorats dans notre cas);

ν_{gt} : représente l'effet des autres variables non prises dans le vecteur (X_{gt}). Il est supposé orthogonal aux effets individuels et temporels.

Les composantes du résidu sont supposés indépendantes et identiquement distribués (iid) et satisfont les conditions ci-dessous :

- Les α_g, λ_t et ν_{gt} sont centrés (espérance nulle)
- Les α_g, λ_t et ν_{gt} sont homoscédastiques et d'écarts type respectifs σ_α , σ_λ *et* σ_ν
- Les α_g, λ_t et ν_{gt} sont non corrélés et indépendants les uns des autres.

Ce modèle, suppose que les trois effets (α_g, λ_t et ν_{gt}) ne s'exercent pas sur la constante du modèle (μ), mais plutôt sur la perturbation aléatoire ε_{gt}. La variance du résidu est:

$$Var(\varepsilon) = \sigma_\alpha^2 + \sigma_\lambda^2 + \sigma_\nu^2$$

Généralement, la procédure d'estimation consiste à éliminer l'effet temps parce qu'il est souvent inexistant ou très faible (λ_t=0). Le résidu prend ainsi la forme suivante :

$$\varepsilon_{gt} = \alpha_g + \nu_{gt}$$

Pour ce type de modèle c'est l'estimateur de MCG qui est efficace. L'estimateur Within est un estimateur sans biais et convergent mais qui n'est pas efficace (faible variance).

5.2.2. Les modèles avec interaction spatiale

L'exploitation des données géographiques rend possible l'existence d'une interdépendance entre les différents unités. Puisque, notre échantillon est composé de gouvernorats faisant partie d'un même pays et ayant des caractéristiques communes (au niveau du climat, de l'infrastructure, du système de production, etc.), la prise en compte de l'interaction causée par la proximité géographique dite aussi interaction spatiale dans la modélisation est nécessaire. Elle requiert une spécification du modèle et une procédure d'estimation particulière pour corriger le problème d'autocorrélation spatiale. Anseliln et al. (2008) proposent deux modèles appliqués dans la littérature qui exploitent les données de panel pour répondre à des objectifs particuliers. On distingue le modèle avec autocorrélation spatiale (appelé aussi modèle à variable expliquée spatialement décalée (SAR)) où l'interaction spatiale se manifeste au niveau de la variable expliquée et du modèle avec autorégression spatiale (appelé aussi modèle à erreurs spatialement autocorrélées (SEM)) où l'interdépendance spatiale entre les différentes unités se manifeste au niveau du terme aléatoire du modèle ε. Le choix entre ces deux modèles est effectué grâce au test fiable : Multiplicateur de Lagrange classique (LM). Un troisième type de modèle appelé modèle de Durbin spatial (SDM) développé par Le Sage et Pace (2009) exploite aussi les donnés de panel avec dépendance spatiale. Pour ce modèle, la variable expliquée et les variables explicatives sont spatialement décalées. Il est à noter qu'un quatrième type de modèle appelé modèle de régression géographique pondérée (GWH) a été développé pour tenir compte de la dépendance spatiale et n'a pas été appliquée sur des données de panel. Pour ce modèle, les coefficients estimés ne sont pas stables, ils dépendent principalement de l'espace[42].

---

[42] Le modèle peut être défini comme suit : $Y_g = \sum_k \beta_{gk} X_{gk} + \varepsilon_g$ .Ce modèle suppose que les données proches de l'unité g ont plus d'influence dans l'estimation de β_{gk} que les données qui sont loin de cette unité. Dans ce cas une pondération variable qui dépend principalement de l'emplacement géographique de différentes unités à utiliser.

Dans notre travail, nous exploitons les trois premiers modèles qui peuvent être exploités sur des données de panel : modèle avec autocorrélation spatiale (SAR), modèle avec autorégression spatiale (SEM) et modèle spatial de Durbin (SDM).

i) Modèle avec autorégression spatiale

Pour ce modèle, appelé aussi modèle autorégressif spatial (SAR), l'interaction spatiale se manifeste au niveau de la variable expliquée. Il a été développé par Anseliln et al. (2008) et amélioré par Elhost (2010) pour considérer directement la dépendance spatiale de la variable expliquée des variables explicatives et du terme d'erreur pour le cas de données de panel. Il se présente comme un ajustement du modèle simple de panel à effet fixe et à effet aléatoire, il est comme suit :

$$Y_{gt} = \sum_{j=1}^{N} \delta A_{gj} Y_{jt} + X_{gt}\beta + \chi_g + \lambda_t + \varepsilon_{gt}$$

où Y_{gt} : le vecteur des observations de la variable expliquée du gouvernorat g à la date t ;

δA : matrice des effets d'autorégression spatiale où :

δ : coefficient autorégressif qui mesure l'intensité de l'interaction entre les différents gouvernorats. Son intégration dans la modélisation est très importante, il permet de tenir compte de l'effet de la proximité géographique entre les différents gouvernorats.

A_{gj} : la matrice spatiale de contiguïté d'ordre 1. C'est le type de matrice le plus utilisé[43].

X_{gt} : le vecteur ligne des observations des variables explicatives.

β : le vecteur des coefficients inconnus à estimer.

χ_g : effet individuel

λ_t : effet temporel

ε_{gt} : le vecteur des résidus du modèle soumis aux hypothèses standard de moindre carré.

Ce modèle qui intègre une variable spatiale retardée (ρA) est appelé processus spatial autorégressif d'ordre 1.

ii) Modèle avec autocorrélation spatiale (SEM)

Dans ce cas, le terme aléatoire ε suit comme pour le cas de la variable expliquée dans le modèle avec autorégression spatiale un processus autorégressif spatial. Ce modèle se présente comme suit:

[43] Voir annexe 7 pour plus de détails sur la matrice de pondération.

$$Y_{gt} = X_{gt}\beta + \chi_g + \lambda_t + \varepsilon_{gt}$$
$$avec\ \varepsilon_{gt} = \sum_{j=1}^{N} \rho A_{gj}\varepsilon_{gt} + \eta_{gt}$$

avec ρA : matrice des effets d'autocorrélation spatiale

η : vecteur des termes aléatoires indépendants avec espérance nulle, E(η) = 0 et variance σ^2

iii) Modèle de Durbin spatial (SDM)

Dans ce cas, on suppose que la dépendance spatiale subsiste au niveau de la variable expliquée et des variables explicatives. Elle se présente comme suit :

$$Y_{gt} = \sum_{j=1}^{N} \rho A_{gj} Y_{jt} + X_{gt}\beta + \sum_{j=1}^{N} \nu A_{gj} X_{jt} + \chi_g + \lambda_t + \varepsilon_{gt}$$

La valeur expliquée du gouvernorat (g) à la date t dépend de cette même variable et de la moyenne des caractéristiques (variables climatiques et autres variables) des gouvernorats voisins. Ce modèle suppose que les variables explicatives d'un gouvernorat (g) exercent un effet direct sur la variable expliquée de ce gouvernorat et un effet indirecte sur la variable expliquée d'un autre gouvernorat (j, j≠g).

5.3. Estimation de la réponse de la valeur ajoutée au climat et implications pour le changement climatique

La définition des paramètres climatiques du modèle ricardien modifié (chapitre 4) nous a permis de dégager deux analyses principales. La première analyse ayant pour objet d'étudier l'effet du climat annuel sur la valeur ajoutée, alors que, la seconde tente d'examiner l'effet du climat saisonnier sur la valeur ajoutée. Nous nous proposons dans ce chapitre d'accomplir ces deux analyses. Dans les deux cas d'analyse nous tacherons d'étudier la variabilité spatio-temporelle du modèle et d'intégrer des variables de contrôle. Avant de procéder à l'étude nous présentons les techniques d'estimation nécessaires. Dans ce qui suit nous présentons les résultats relatifs aux deux analyses de l'effet du climat saisonnier et celui du climat annuel sur la productivité agricole et nous étudions les implications pour le changement climatique.

5.3.1. Estimation du modèle sans autocorrélation spatiale

Nous commençons par estimer le modèle spécifié dans le chapitre 4 sans considérer la possibilité d'existence d'une autocorrélation spatiale (nous retenons ainsi l'hypothèse ; $\rho = 0$ {le modèle SAR n'est pas retenu}, $\delta = 0$ {le modèle SEM n'est pas retenu} et $\gamma = 0$ {modèle SDM non retenu}). Les niveaux annuels des valeurs ajoutées par gouvernorats sont alors régressés sur les variables climatiques, édaphiques, géographiques, techniques et d'autres variables de contrôle (occupation du sol et densité de la population).

Les variables climatiques incluent des termes linéaire, quadratique et d'interaction des paramètres température et de précipitation. Les termes quadratiques et d'interaction sont intégrés dans le modèle afin de capturer l'effet de second ordre du climat sur la valeur ajoutée.

Dans chaque cas d'analyse (analyse annuelle et analyse saisonnière), nous procédons à des estimations répétées en utilisant la technique du maximum de vraisemblance sur des données de panel. Il faut préciser que le besoin d'utiliser le test d'Haussman afin de déterminer la nature du modèle (modèle à effet fixe ou à effet aléatoire) ne s'est pas posé. En fait, le modèle à effet aléatoire est le plus approprié pour interpréter les coefficients estimés du modèle, puisque nous avons considéré comme variable d'intérêt le climat normal qui ne dépend pas du temps.

Ceci étant, nous commençons par estimer le modèle contenant des variables climatiques uniquement, puis nous insérons à chaque estimation en plus des variables climatiques des variables de contrôle pour tenir compte des spécificités socioéconomiques et environnementales indexés sur le gouvernorat. Notons que nous n'avons pas pu insérer toutes les variables de contrôle ensemble à cause du problème de colinéarité. Notons aussi qu'au niveau de l'insertion des paramètres de sol nous nous sommes heurtés au problème de corrélation entre les paramètres. Nous avons alors mené une analyse factorielle, qui nous a permis d'obtenir un ensemble de groupes de types de sols indépendants que nous avons désigné par Fi avec i = {1,..., 12}. Une description détaillée de ces groupes et de leurs propriétés communes existe dans l'annexe 6.

Les deux tableaux présentés ci-dessous fournissent les coefficients des estimations répétées du modèle dans les deux cas d'analyse ainsi que les résultats des tests LM. Le tableau 5.7 affiche les résultats de la première analyse où nous nous intéressons à la réponse de la valeur ajoutée aux variables climatiques saisonnières normales. Le tableau 5.8 présente les résultats de l'analyse de l'effet du climat annuel normal sur la valeur ajoutée. La

première série de coefficients illustrée dans la première colonne des deux tableaux résulte de la régression du modèle contenant uniquement les variables climatiques. Le reste des colonnes montre les résultats des régressions qui intègrent des variables de contrôle en plus des variables climatiques.

i) Analyse de l'effet saisonnier

Tableau 5.7. Analyse saisonnière : régression du modèle ricardien sans autocorrélation spatiale {(1) sans variables de contrôles, (2) avec la variable taux d'intensification, (3) avec les variables de structures, (4) avec les variables occupation du sol, (5) et (6) avec les variables groupes de sol}

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Constante	757.46**	549.0969**	1294.19**	490.6219**	69.98746	196.1658**
T été N	-37.07682**	-35.30662**	-48.6549	-20.78164**	-7.350812*	-9.167697**
(T été N)^2	.602387**	.5887644**	.8166519	.3284545**	-.0077546	.005079
T Dv été-N	.0561762	.0426722	-.0236716	-.011921	.0510353	.0535586
T Aut N	-57.49386**	-41.68831**	-104.101**	-18.9022**	-.4340074	-10.98364
(T Aut N)^2	1.343131**	.9984525**	2.427294**	.4663366**	-.1119323	.1474124
T Dv Aut-N	-.0039393	-.0336482	-.4904096	-.0208201	.0071417	.0073911
T Hiv N	-3.50031**	-4.617666**	-.4994863	3.887804**	3.850678*	-.2512138
(T Hiv N)^2	.0261329	.1046404	-.0703675	-.318376**	-.3490076*	-.1832064**
T Dv Hiv-N	-.0070645	.0005308	.5640016	.0106312		
T Pr N	43.11996**	44.15878**	55.04664		11.76785*	14.42263**
(T Pr N)^2	-.9929955**	-1.068068**	-1.35062	.0799623**		
T Dv Pr-N	.071759**	.0831001**	-.7260477	-.0049987	.069967*	.0714108**
P été N	-1.993834**	-1.335094**	-2.687709	-1.972946**	.0787488*	.0765756**
(P été N)^2	.0011598**	.0009817**	.0018765	.001437**		
P Dv été-N	.0011071	.0031873**	.0127787	-.0000161	.0011409	.0011198
P Aut N	-.4583642**	-.0170489	-1.155174	.4328219**		
(P Aut N)^2	.0000615	-.0000457	.000501	-.0006977**		
P Dv Aut-N	.0005578	.0000337	-.0053801		.0006055	.0006321
P Hiv N	.091254*	.1013367*	.1310543	-.1654554**	.035178*	.0222532**
P Dv Hiv-N	.000902**	.0016936**	-.01488**	.001421**	.0009328*	.0008938**
P Pr N	1.028411**	.8516165**	1.228074	.0032683		
(P Pr N)^2	-.0021285**	-.0018107**	-.0024584	.0000861		
P Dv Pr-N	.0025913**	.0034632**	.0092285	.0012962**	.0025954*	.0026265**
T été N*P été N	.070961**	.0468497**	.0931593	.0677487**		
T Aut N*P Aut N	.0187024**	.0005223	.0466675	-.0114333		
T Hiv N* P Hiv N	-.0016046	-.0055341	-.0047221	.0118273**		
T Pr N*P Pr N	-.0346249**	-.02925**	-.0394215	.0001698		
F1					-.6472784*	-.3015666**
F2					3.533964*	2.896887**
F3					.1113234	-1.524106**
F4					.3353636*	.5246922**
F5					.4447454*	.7610995**
F6					.8895958*	-.4189876**
F7					-.2909461*	.6287395**
F8					.2936416*	-.3664126**
F9					-1.281025*	-1.261461**
F10					.4216555*	.1941587**
F11					-1.021371*	
F12						.5018777**
T Intensification Global		.002543				
S1				2.18e-06*		
S4				.0000507**		
S5				-4.92e-06**		
S6				-4.05e-06		
S7				1.19e-06*		
T3			.0057495			
T6			.0475428			
Log L	-209.99985	-136.57107	-20.5442	16.616672	-204.28907	-204.26143
LM_ρ	33.35**	34.71**	0.12	1.61**	29.52**	
LM_δ	17.32**	16.24**	5.76**	12.5**	6.71**	
LM_ρ robust	21.84	26.28**	6.56**	0.031**	25.92**	
LM_δ robust	5.81	7.8**	12.2**	10.92**	3.11*	

*significatif au seuil de 10%. **significatif au seuil de 5%

T été N (température normale de la saison d'été) T Hiv N (température normale de la saison d'hiver), T AutN (température normale de la saison d'automne), T Pr N (température normale de la saison de printemps), P été N (précipitation normale de la saison d'été), P Hiv N (précipitation normale de la saison d'hiver), P Aut N (précipitation normale de la saison d'automne), P Pr N (précipitation normale de la saison de printemps), T Dv été-N (écart de la température de la saison d'été par rapport à la normale), T Dv Aut-N (écart de la température de la saison d'automne par rapport à la normale), T Dv Hiv-N (écart de la température de la saison d'hiver par rapport à la normale), T Dv Pr-N (écart de la température de la saison de printemps par rapport à la normale), P Dv été-N (écart des précipitations de la saison d'été par rapport à la normale), P Dv Aut-N (écart des précipitations de la saison d'automne par rapport à la normale), P Dv Hiv-N (écart des précipitations de la saison d'hiver par rapport à la normale), P Dv Pr-N (écart des précipitations de la saison de printemps par rapport à la normale), T Dv An-N (écart de la température annuelle moyenne par rapport à la normale), P Dv An-N (écart des précipitations annuelles moyennes par rapport à la normale)

Les Fi (i = {1,..., 12}) désignent les groupes {des différents types de sols classés selon la FAO-UNESCO (1998)} créés (voir annexe 6) tels que : F1 (Alh, CMg, CMu, CMx), F2 (ARc, ARh, LPe, PLd, RGe), F3 (VRk, VRy), F4 (FLs, SCy, SNh), F5 (GYh, SCn), F6 (CMe, KSk, LPk), F7 (CLl, GYp, SCg), F8 (CLp, RGc, VRe), F9 (FLe, GYh), F10 (CLh, LVj, SNk), F11 (LVv, RGy), F12 (CMc, FLc, GLe, LVk)

Le taux d'intensification est définie par : $\text{le taux d'intensification} = \frac{\text{superficie des cultures en intensif - ...}}{\text{superficie irriguée en intensif}}$ Où ; la superficie des cultures en intensif mesure la superficie irriguée en intensif majorée de la superficie des parcelles ayant porté au cours de la même campagne deux ou plusieurs cultures en intensif ; et la superficie équipée d'un réseau d'irrigation permanent et disposant d'une main d'eau suffisante pour son irrigation.

S1 (répartition des superficies de céréacultures (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S4 (répartition des superficies de légumineuses (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S5 (répartition des superficies d'arboricultures (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S6 (répartition des superficies de cultures industrielles et autres (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S7(répartition des superficies de jachères (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007))

T3 (Pourcentage des tracteurs agés moins de 10 ans), T6 (Nombre de cadre/ Total employés)

Log L : Log de la vraisemblance/ LM test classique de Multiplicateur de Lagrange vérifiant la possibilité d'existence d'une autocorrélation spatiale tel que l'hypothèse ρ =0 implique que le modèle SAR n'est pas retenu, l'hypothèse δ =0 implique le modèle SEM n'est pas retenu et l'hypothèse γ=0 implique que le modèle SDM non retenu.

En examinant les coefficients des variables climatiques dans la première colonne du tableau 1 nous constatons que :

- Les coefficients des variables température normale des saisons d'hiver, de printemps, d'été et d'automne sont significatifs au seuil de 5%. Ces coefficients présentent un signe positif dans le cas de la saison de printemps et un signe négatif dans le cas des saisons d'hiver, d'été et d'automne. Le signe positif indique que la température a un effet positif sur la productivité agricole en Tunisie durant la saison de printemps. Ce résultat peut être expliqué par le fait que des températures plus élevées pourraient avoir un effet positif sur la croissance de certaines plantes. Elles renforceraient aussi l'effet fertilisant du CO_2 ainsi que son effet anti-transpirant sur les plantes C_3 et C_4 à moins que les plantes ne soient surchauffées (voir chapitre 2). Cependant, il est difficile de trancher pour la variable température. On ne peut pas séparer les effets physiologiques des températures (au niveau des plantes et de leurs organes) des effets écologiques (au niveau du champ ou de la région). Il y a, à la fois, des impacts positifs et négatifs aux deux niveaux, seule une simulation spécifique à la culture et au site permet d'évaluer l'effet global "net" des augmentations de température. Ainsi le signe positif du coefficient de la variable dépend des autres paramètres spécifiques à la culture et à son environnement intégrés dans le modèle. Le signe négatif des coefficients des variables température moyenne saison hiver et automne n'est pas une surprise, il signifie que des températures élevées durant ces périodes de l'année qui correspondent aux périodes de semis suivie de celles de genèse ont des effets négatifs sur l'agriculture.
- Les coefficients des variables « précipitation normale » des saisons d'automne, de printemps et d'été sont significatifs au seuil de 5%, et celui de la variable précipitation moyenne de la saison d'hiver est significatif au seuil de 10%. Les variables précipitation normale des saisons de printemps et d'hiver présentent un signe positif. Alors que, le signe de la variable de précipitation normale de la saison d'été est négatif. Les variables « précipitation normale » des saisons printemps et hiver présentent un signe positif indiquant l'effet positif de l'augmentation des précipitations sur l'agriculture durant ces saisons. Le signe de la variable précipitation moyenne de la saison été est négatif. Ces signes ne présentent pas une surprise ; il reflète le rôle important des précipitations dans l'agriculture.
- Pratiquement, tous les coefficients des termes climatiques de second ordre sont significatifs au seuil de 5%. Seuls les coefficients des termes de second ordre des

variables température normale de la saison d'hiver et précipitation normale de la saison d'automne ne sont pas significatifs. Les coefficients significatifs des termes de second ordre présentent un signe positif dans le cas des saisons d'automne et d'été, et un signe négatif dans le cas de la saison de printemps. Le signe positif implique que la valeur ajoutée est une fonction convexe du climat normale, alors que le signe négatif implique que la valeur ajoutée est une fonction concave du climat normale. Autrement dit, un excès de température ou de précipitation dans le cas de la saison d'été ou d'automne serait bénéfique pour la productivité agricole. D'un autre côté ces mêmes évènements seraient fatals pour la productivité agricole dans le cas de la saison de printemps.

- Les coefficients de la variable écart climatique de la saison de printemps par rapport à la normale et celui de la variable écart des précipitations de la saison d'hiver par rapport à la normale sont significatifs et positifs. Ceci implique que l'impact des anomalies de température de la saison d'hiver et des précipitations des deux saisons d'hiver et de printemps, enregistrées durant la période d'étude, a un effet positif significatif sur la valeur ajoutée.
- Les coefficients des termes d'interaction entre température et précipitation des saisons d'été, d'automne et de printemps sont significatifs au seuil de 5%. Le signe de ces coefficients est positif dans le cas des saisons d'été et d'automne, et négatif dans le cas de la saison de printemps. Le signe négatif de ce type de coefficient indique qu'une augmentation de la température associée à une augmentation des précipitations affecterait négativement le secteur agricole. Ceci peut être expliqué par le fait que la qualité et la quantité des ressources en terres et en eaux déclineraient, notamment du fait de l'augmentation du ruissellement, de l'érosion, des processus de dégradation des sols, de la fréquence des inondations et, probablement, des sécheresses.

Globalement, les résultats montrent que le climat présente une relation non linéaire avec la valeur ajoutée, ce qui est cohérent avec la littérature existante (Mendelsohn et al. 1994).

En comparant ces résultats aux résultats affichés dans le reste des colonnes du tableau 5.7, nous remarquons certains changements au niveau de la valeur de la fonction Log de la vraisemblance (Log L), de la significativité des variables ainsi que du signe des coefficients significatif, en voici les détails:

- En introduisant la variable taux d'intensification dans le modèle, le Log L augmente de -209.99985 à -136.57107. De plus, le coefficient de la variable écart des

précipitations de la saison d'été par rapport à la normale devient significatif au seuil de 5% et présente un signe positif qui indique que des anomalies de précipitation enregistrées durant cette saison sont bénéfiques pour la valeur ajoutée agricole. Le coefficient du taux d'intensification est non significatif, ceci peut être expliqué par le caractère traditionnel de l'agriculture tunisienne qui fait que l'investissement en irrigation n'est pas important et que le taux d'intensification n'a pas connu une évolution remarquable dans le temps durant la période d'étude.

- L'introduction des variables pourcentage des tracteurs âgés de moins de 10 ans et taux de la main d'œuvre familiale augmente le Log L de -209.99985 à -20.5442. Les coefficients des variables de contrôle s'avèrent non significatifs. Là aussi, la persistance de la structure traditionnelle du secteur agricole peut expliquer la non significativité de ces variables. De plus, l'introduction de ces variables annule la significativité de plusieurs variables climatique et change le signe du coefficient de la variable écart des précipitations de la saison d'hiver qui prend un signe négatif contrairement à la première et seconde régression.
- L'introduction des variables occupation du sol dans le modèle augmente la valeur du Log L de -209.99985 à 16.616672. Les coefficients des variables répartition des superficies de céréaculture et répartition des superficies de jachères sont significatifs au seuil de 10% alors que les coefficients des variables répartition des superficies de légumineuses, répartition des superficies d'arboricultures sont significatifs au seuil de 5%. Seul le coefficient de la variable répartition de la superficie de l'arboriculture présente un signe négatif, qui indique un effet négatif sur la valeur ajoutée agricole. Les coefficients des autres variables possèdent un signe positif qui témoigne de leurs effets positifs sur la valeur ajoutée. D'un autre côté, l'introduction de ces variables dans le modèle changent le signe des coefficients de quatre variables climatiques (les variables température normale de la saison d'hiver, précipitation normale de la saison d'automne, précipitation normale de la saison d'hiver et la variable de second ordre température normale de la saison de printemps).
- Finalement, nous introduisons les groupes de types de sol dans le modèle. Cette étape est réalisée en deux régressions à cause du problème de corrélation entre les groupes de sol F11 (LVv, RGy) et F12 (CMc, FLc, GLe, LVk). Le Log L est réduit de -209.99985 à environ -204 dans les deux cas. Cependant, les résultats des deux analyses diffèrent au niveau du signe des variables de contrôle communes aux deux colonnes {F6 (CMe, KSk, LPk), F7 (CLl, GYp, SCg), F8 (CLp, RGc, VRe)}. De plus,

des changements dans les signes des coefficients des deux variables précipitation normale des deux saisons d'été et d'hiver sont aperçus au niveau des deux analyses mais un changement de signe du coefficient de la variable température normale de l'hiver est enregistré dans la première régression (6ième colonne) uniquement. Ces incohérences ne nous permettent pas de conclure.

La comparaison de différentes colonnes du tableau 5.8 révèle que l'intégration de variables de contrôle affecte les coefficients des variables climatiques. Par conséquent, le modèle ricardien qui prend en considération la dimension temps et néglige la dimension spatiale peut être biaisé. Nous effectuons alors le test de Multiplicateur de Lagrange classique (LM) approprié à la vérification de l'existence d'une autocorrélation spatiale. Nous utilisons, la matrice de contigüité d'ordre 1 (voir annexe 7) pour prendre en considération l'existence de ou moins une frontière commune entre les unités spatiales qui sont les gouvernorats dans notre travail.

Les résultats marquants suite aux différentes régressions sont les résultats de deux tests LM non robustes et les tests LM robustes. Ces résultats rejettent l'hypothèse H0 d'absence d'une autocorrélation spatiale au niveau de la variable dépendante (H0 : $\delta=0$) ainsi que l'hypothèse H0 d'absence d'une autocorrélation spatiale au niveau du terme d'erreur (H0 : $\rho=0$). De plus étant donnée que la valeur de la statistique LM_ρ robuste est supérieure à celle de la de la statistique LM_δ, le modèle SAR semble être le modèle le plus approprié à notre travail.

ii) Analyse de l'effet annuel

Tableau 5.8. Analyse annuelle : Régression modèle sans autocorrélation spatiale {(1) sans variables de contrôles, (2) avec les variables densité et taux d'intensification, (3) avec les variables occupation du sol, (4) avec les variables de structures}

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Constante	7.479451	-137.3821**	-.1844479	4.790476	-13.08586
T An N	.8503171	10.63105**	1.639473	.9460204	2.816454
(T An N)^2	-.0340404	-.1731706**	-.0529071	-.0318838	-.0787163
T Dv An-N	.0712399	.0632472	-.0538552	-.1431389	-1.08033**
P An N	-.0211109	.1835875**	-.0138241	-.0109509	-.0035842
(P An N)^2	3.75e-06	-.0000277**	2.63e-06	1.23e-06	6.94e-06
P Dv An-N	.0009838**	.0009826**	.0010513**	.0005861**	.0005011
T An N*P An N	.0010527	-.0076769**	.0006819	.000586	-.0000366
Long pente (m)		-.1390323**			
F1		-.5400511**			
F2		-.191867*			
F3		-.4072621**			
F4		.0654904			
F5		-.2532878**			
F6		-.3582978**			
F7		-.1018758			
F8		1.549744**			
F9		.7223176**			
F10		.7796897**			
F11		.473115**			
F12		.4009335**			
Densité			.1131805		
Taux Intensification Global			-.0041549*		
T7				-.0033524	
S1				1.18e-06	
S4				.0000473**	
S5				1.92e-07	
S6				.0000119	
S7				4.38e-07	
T3					.009663**
T6					.0142794
Log L	-252.32396	-214.46827	-175.18771	-32.809714	-37.931
LM_ρ	41.94**	39.66**	29.33**		
LM_δ	35.92**	28.79**	1.291**		
LM_ρ robust	6.25**	16.78**	49.45**		
LM_δ robust	0.23**	5.92**	21.4**		

**significatif au seuil de 5%. *significatif au seuil de 10%.

TAnN moyenne arithmétique de la température de la période (1971-2001), PAnN moyenne arithmétique de la précipitation de la période (1971-2001), T Dv An-N écart de la température annuelle moyenne par rapport à la normale, P Dv An-N écart des précipitations annuelles moyennes par rapport à la normale

Les Fi (i = {1,…, 12}) désignent les groupes {des différents types de sols classés selon la FAO-UNESCO (1998)} créés (voir annexe 6) tels que : F1 (Alh, CMg, CMu, CMx), F2 (ARc, ARh, LPe, PLd, RGe), F3 (VRk, VRy), F4 (FLs, SCy, SNh), F5 (GYh, SCn), F6 (CMe, KSk, LPk), F7 (CLl, GYp, SCg), F8 (CLp, RGc, VRe), F9 (FLe, GYh), F10 (CLh, LVj, SNk), F11 (LVv, RGy), F12 (CMc, FLc, GLe, LVk)

Le taux d'intensification est définie par : le taux d'intensification = $\frac{\text{superficie des cultures en intensif} + \alpha\beta}{\text{superficie irriguée en intensif}}$ Où ; la superficie des cultures en intensif mesure la superficie irriguée en intensif majorée de la superficie des parcelles ayant porté au cours de la même campagne deux ou plusieurs cultures en intensif ; et la superficie équipée d'un réseau d'irrigation permanent et disposant d'une main d'eau suffisante pour son irrigation.

S1 (répartition des superficies de céréacultures (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S4 (répartition des superficies de légumineuses (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S5 (répartition des superficies d'arboricultures (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S6 (répartition des superficies de cultures industrielles et autres (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S7(répartition des superficies de jachères (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007))

T3 (Pourcentage des tracteurs agés moins de 10 ans), T6 (Nombre de cadre/ Total employés)

Log L : Log de la vraisemblance/ LM test classique de Multiplicateur de Lagrange vérifiant la possibilité d'existence d'une autocorrélation spatiale tel que l'hypothèse ρ =0 implique que le modèle SAR n'est pas retenu, l'hypothèse δ =0 implique le modèle SEM n'est pas retenu et l'hypothèse γ=0 implique que le modèle SDM non retenu.

Là aussi, les résultats des tests LM affichés à la fin du tableau montrent l'existence d'une autocorrélation spatiale ; maintenant ainsi la conclusion de non vigueur du modèle ricardien qui tient compte de la dimension temporelle et néglige la dimension spatiale même lorsque nous étudions l'effet annuel. Cependant, cela ne constitue pas le seul reproche que nous pouvons constater en examinant les résultats à travers les différentes estimations du tableau.

Les résultats affichés dans la première colonne du tableau 5.8 montrent que seul le coefficient de la variable écart de la précipitation annuelle moyenne par rapport à la normale

est significatif, et présente un signe positif indiquant un effet positif sur la valeur ajoutée. Les résultats des régressions qui intègrent des variables de contrôle affichés dans les colonnes 3, 4 et 5 ne sont pas aussi cohérents avec le principe du modèle ricardien. D'ailleurs, le climat dans ces trois cas ne présente pas aussi de relation significative avec la valeur ajoutée.

Seule, l'intégration des variables groupes de types de sol ainsi que la variable longueur de la pente augmente la significativité des variables climatiques de sorte que les résultats obtenus soient cohérents avec le principe du modèle ricardien. Cependant, les signes des différents coefficients de la variable température sont inattendus. Nous nous focalisons, particulièrement, sur le coefficient de la variable température annuelle normale. Un coefficient positif largement significatif qui indique un effet positif de la température sur la valeur ajoutée. En agronomie, certaines recherches avancent que dans les régions subhumides à semi aride et aride, des températures plus élevées pourraient avoir des effets positifs sur les plantes de types CAM, C_3, et C_4 (voir chapitre 2). Ces conclusions pourraient expliquer ce signe inattendu de la température annuelle normale et la valeur ajoutée. Tout de même, ces interprétations devraient être traitées avec prudence. Surtout que, l'évaluation de la valeur ajoutée agricole est basée sur les valeurs de production de plusieurs autres types (ex. l'arboriculture) qui ne réagissent pas de la même manière.

Dans la suite de notre travail nous nous focalisons sur l'analyse saisonnière et nous omettons l'analyse annuelle, Puisque cette dernière a montré que la relation entre la valeur ajoutée et le climat annuel n'est pas significative contrairement à la logique qui stipule que la valeur ajoutée est plutôt un phénomène annuel (Kumar K.S.K. et Parikh J., 1998). Ce résultat est surtout expliqué par le caractère de saisonnalité du climat tunisien impliquant une tendance à la fluctuation au cours de l'année agricole.

5.3.2. Estimation du modèle avec autocorrélation spatiale

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, les résultats des tests LM nous amènent à considérer l'autocorrélation spatiale au niveau du modèle. L'hypothèse d'absence d'autocorrélation spatiale est rejetée et le modèle SAR (interaction spatial au niveau de la variable dépendante) s'avère le plus approprié. Nous effectuons, également, des estimations du modèle en se basant sur la technique SEM que nous présentons dans l'annexe. Cependant, il est inadapté d'utiliser SDM à cause de la nature de la base de données exploitée. En fait, le

nombre d'observations peut être considéré comme faible (336 observations) par rapport au nombre élevé de variables explicatives à estimer. Dans ce sens, Elhorst (2010) stipule que les expériences montrent que l'exploitation du modèle SDM pour des recherches empiriques nécessite un nombre élevé d'observations pour estimer des coefficients significatif de l'interaction spatial au niveau des variables explicatives.

Dans ce qui suit nous présentons les résultats d'estimation du modèle spécifié en utilisant la technique SAR. Identiquement à la démarche de présentation du paragraphe précédent, les tableaux 5.9 et 5.10 affichent les résultats de l'analyse où nous nous intéressons à la réponse de la valeur ajoutée aux variables climatiques saisonnières normales. La première série de coefficients illustrée dans la première colonne du tableau 3 résulte de la régression du modèle contenant uniquement les variables climatiques. Le reste des colonnes de ce même tableau montre les résultats des régressions qui intègrent des variables de contrôle en plus des variables climatiques. Le tableau 5.11 affiche les résultats des estimations du modèle en intégrant les variables du sol.

Tableau 5.9. Analyse de l'effet saisonnier : Résultats d'estimations du modèle ricardien {(1) sans variables de contrôles, (2) avec les variables densité et taux d'intensification, (3) variables occupation du sol, (4) avec les variables de structures} en utilisant la méthode SAR

	(1)	(2)	(3)	(4)
Constante	752.424111**	414.187635**	634.471094*	1294.45**
T été N	-34.537908**	-43.291487**	-14.094583	-48.43735**
(T été N)^2	0.552938**	0.731087**	0.184564	0.810570**
T Dv été-N	0.036592	0.023317	0.019316	-0.044241
T Aut N	-60.39238**	-40.05884**	-20.852364**	-103.4099**
(T Aut N)^2	1.393307**	0.971954**	0.488007**	2.409580**
T Dv Aut-N	-0.002841	-0.007986	-0.023143	-0.433530
T Hiv N	-2.005314	-9.305437**	8.330967	-0.875553
(T Hiv N)^2	-0.051756	0.328365**	-0.581395	-0.052486
T Dv Hiv-N	-0.005794	0.003254	0.007315	0.557819
T Pr N	42.426523**	68.91126**	-23.605563	54.371474
(T Pr N)^2	-0.948870**	-1.699637**	0.763565	-1.330260
T Dv Pr-N	0.045667*	0.048733*	-0.010079	-0.737439**
P été N	-2.105190**	-0.586529	-3.279192	-2.734906**
(P été N)^2	0.001080**	0.000668**	0.002021	0.001894**
P Dv été-N	0.001060	0.002385**	0.000001	0.012627**
P Aut N	-0.613295**	0.245529	0.351302**	-1.149433**
(P Aut N)^2	0.000074	-0.000058	-0.000865**	0.000518
P Dv Aut-N	0.000273	0.000007	-0.000927*	-0.004965
P Hiv N	0.048869	0.221639**	-0.323433	0.142321
P Dv Hiv-N	0.000592	0.001050**	0.001250**	-0.014739**
P Pr N	1.167945**	1.198340**	-0.170868	1.205353**
(P Pr N)^2	-0.002025**	-0.002547**	0.000666	-0.002490**
P Dv Pr-N	0.001678**	0.002095**	0.001320**	0.008503*
T été N*P été N	0.075627**	0.020781	0.114087	0.094888**
T Aut N*P Aut N	0.026452**	-0.011723	-0.004402	0.046113**
T Hiv N* P Hiv N	0.001800	-0.015342**	0.023808	-0.005491
T Pr N*P Pr N	-0.044314**	-0.043248**	0.004634	-0.037888
Densité		-0.242196**		
Taux Intensification Global		0.001103		
S1			0.000002**	
S4			0.000044**	
S5			-0.000006**	
S6			-0.000019	
S7			0.000001	
T3				0.005243
T6				0.046317**
A*Y (δ)	0.327994**	0.368960**	0.101979	-0.071970
Log L	-195.78758	-111.94483	19.249431	-9.1575478

**significatif au seuil de 5%. *significatif au seuil de 10%.

T été N (température normale de la saison d'été) T Hiv N (température normale de la saison d'hiver), T AutN (température normale de la saison d'automne), T Pr N (température normale de la saison de printemps), P été N (précipitation normale de la saison d'été), P Hiv N (précipitation normale de la saison d'hiver), P Aut N (précipitation normale de la saison d'automne), P Pr N (précipitation normale de la saison de printemps), T Dv été-N (écart de la température de la saison d'été par rapport à la normale), T Dv Aut-N (écart de la température de la saison d'automne par rapport à la normale), T Dv Hiv-N (écart de la température de la saison d'hiver par rapport à la normale), T Dv Pr-N (écart de la température de la saison de printemps par rapport à la normale), P Dv été-N (écart des précipitations de la saison d'été par rapport à la normale), P Dv Aut-N (écart des précipitations de la saison d'automne par rapport à la normale), P Dv Hiv-N (écart des précipitations de la saison d'hiver par rapport à la normale), P Dv Pr-N (écart des précipitations de la saison de printemps par rapport à la normale), T Dv An-N (écart de la température annuelle moyenne par rapport à la normale), P Dv An-N (écart des précipitations annuelles moyennes par rapport à la normale)

Densité représente le total de la population recensée divisée par la surface totale dans chaque gouvernorat

Le taux d'intensification est définie par : le taux d'intensification = $\frac{\text{superficie des cultures en intensif}}{\text{superficie irriguée en intensif}}$ Où ; la superficie des cultures en intensif mesure la superficie irriguée en intensif majorée de la superficie des parcelles ayant porté au cours de la même campagne deux ou plusieurs cultures en intensif ; et la superficie équipée d'un réseau d'irrigation permanent et disposant d'une main d'eau suffisante pour son irrigation.

S1 (répartition des superficies de céréacultures (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S4 (répartition des superficies de légumineuses (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S5 (répartition des superficies d'arboricultures (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S6 (répartition des superficies de cultures industrielles et autres (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)), S7(répartition des superficies de jachères (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007))

T3 (Pourcentage des tracteurs agés moins de 10 ans), T6 (Nombre de cadre/ Total employés)

Log L : Log de la vraisemblance le terme d'interaction spatial (A*Y (ρ))

En examinant les résultats du tableau 5.9 nous constatons qu'ils sont robustes à travers les différentes estimations. D'abord, la valeur du Log de la vraisemblance diminue par rapport

à ses analogues de la régression du modèle sans autocorrélation spatiale indiquant des résultats plus efficaces. De plus, en examinant les coefficients des variables climatiques, dans les différentes colonnes du tableau 5.9, nous constatons que le climat présente une relation non linéaire avec la valeur ajoutée, ce qui est cohérent avec la littérature existante (Mendelsohn et al. 1994). Ensuite, les coefficients des variables climatiques gardent les mêmes signes quelques soit la variable de contrôle intégrée. Ces signes correspondent à ceux trouvés lors de la première étape de régression du modèle ricardien sans variables de contrôle et sans autocorrélation spatiale. Ainsi, par exemple, une élévation de la température pendant les périodes de plantation, de genèse et de récolte a un effet négatif sur la production agricole. Alors que, des températures élevées pendant les périodes de croissance sont bénéfiques pour la production agricole.

Il faudra noter, aussi, que les coefficients des variables de contrôle s'accordent avec leurs homologues trouvés dans les régressions sans autocorrélation spatiale. Ces coefficients indiquent des interactions évidentes avec la valeur ajoutée telles que l'effet négatif de l'augmentation du taux de densité de la population, et d'autres contestables telle que l'effet négatif des superficies occupées par l'arboriculture.

Finalement, le terme d'interaction spatial (A*Y (ρ)), est positif et significatif quelque soit la régression. Ceci indique que le développement de l'activité agricole d'un gouvernorat donnée permet d'améliorer la production d'un autre gouvernorat qui lui est voisin. Nous pouvons conclure que l'expérience réussie d'un gouvernorat peut être transférer à un autre gouvernorat par effet de synergie.

Tableau 5.10. Analyse de l'effet saisonnier : Résultat d'estimation du modèle ricardien avec groupes de variables de sol en utilisant la méthode SAR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constante	468.16**	690.73**	2828.11**	325.81*	690.28**	351.03**	764.16**	207.8	702.23**	699.05**	313.01*	766.55**
T été N	-45.8**	-21.31**	6.08	-17.98**	-16.98**	-43.97**	-33.86**	-36.68**	-41.95**	-38.65**	-43.85**	-42.3**
$(T \text{ été } N)^2$	0.76**	0.31**	-0.14	0.14	0.23**	0.71**	0.53**	0.61**	0.71**	0.62**	0.73**	0.68**
T Dv été-N	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.036	0.03
T Aut N	-41.61**	-50.49**	-123.57**	-33.71**	-43.11*	-26.6*	-60.46**	-27.8*	-60.5**	-57.31**	-43.43**	-61.47**
$(T \text{ Aut } N)^2$	1**	1.15**	2.97**	0.93**	0.94*	0.62*	1.39**	0.67**	1.44**	1.33**	1.11**	1.43**
T Dv Aut-N	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	-0.002	0.004	0.004	0.003	0.004	0.003
T Hiv N	-11.44**	0.03	-4.37**	-3.26*	1.66	-9.67**	-1.87	-6.45**	-7.47**	-5.06**	-5.51**	-7.16**
$(T \text{ Hiv } N)^2$	0.41**	-0.13	0.2*	-0.38**	-0.21**	0.25*	-0.06	0.16	0.21*	0.09	0.008	0.2
T Dv Hiv-N	-0.004	-0.003	-0.004	-0.003	-0.003	-0.003	-0.005	-0.003	-0.003	-0.005	-0.003	-0.005
T Pr N	70.24**	18.08	-159.95**	26.64**	4.37	63.46**	40.34	65.9**	60.63**	51.54**	80.04**	55.58**
$(T \text{ Pr } N)^2$	-1.7**	-0.32	3.98**	-0.14	0.05	-1.47**	-0.88	-1.6**	-1.51**	-1.19**	-1.94**	-1.29**
T Dv Pr-N	0.04*	0.04*	0.04**	0.04*	0.04*	0.04*	0.04*	0.04*	0.04*	0.04*	0.04*	0.04*
P été N	-0.7	-2.51**	-9.47**	-9.04**	-2.72**	-0.65	-2.21	-0.41	-1.8**	-1.76**	-0.59	-1.98**
$(P \text{ été } N)^2$	0.0007**	0.001**	0.008**	0.001**	0.001**	0.0002	0.001	-0.00002	0.001**	0.001**	0.0003	0.001**
P Dv été-N	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001**	0.001	0.001	0.001
P Aut N	0.16	-0.54**	-0.55**	2.66**	-0.78**	-0.11	-0.61**	-0.11	-0.24	-0.26	0.5	-0.51**
$(P \text{ Aut } N)^2$	-0.00001	0.0001	0.0008**	-0.001**	0.00006	-0.0001	0.00005	-0.00007	0.0001**	0.00001	-0.0003**	0.0001
P Dv Aut-N	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
P Hiv N	0.3**	-0.008	0.360**	-0.65**	-0.05	0.06	0.04	0.09*	0.17**	0.11**	-0.04	0.18**
P Dv Hiv-N	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
P Pr N	1.13**	0.73*	-4.66**	1.96	0.55*	1.42**	1.13	1.6**	1.09**	1.04**	1.82**	1.28**
$(P \text{ Pr } N)^2$	-0.002**	-0.001**	0.0004	-0.0004	-0.0009**	-0.002**	-0.001**	-0.002**	-0.002**	-0.001**	-0.002**	-0.002**
P Dv Pr-N	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**
T été N*P été N	0.02	0.08**	0.31**	0.34**	0.09**	0.02	0.07	0.01	0.06**	0.06**	0.02	0.06**
T Aut N*P Aut N	-0.009	0.02**	0.02**	-0.08**	0.03**	0.003	0.02**	0.003	0.008	0.01	-0.01	0.01**
T Hiv N*P Hiv N	-0.02**	0.004	-0.03**	0.02**	0.01**	0.001	0.002	-0.0007	-0.01*	-0.006	0.005	-0.008
T Pr N*P Pr N	-0.03**	-0.02*	0.28**	-0.11**	-0.01	-0.05**	-0.04**	-0.06**	-0.03**	-0.03**	-0.07**	-0.04**
F1	0.95**											
F2		-0.2*										
F3			-1.06**									
F4				-2.67**								
F5					0.17**							
F6						0.38**						
F7							-0.02					
F8								0.32**				
F9									-0.3**			
F10										0.24**		
F11											-0.5**	
F12												-0.2**
A*Y (δ)	0.3*	0.29*	0.3**	0.29**	0.29**	0.29**	0.32**	0.29**	0.29**	0.3**	0.29**	0.3**
Log L	-192.52	-192.45	-192.44	-192.5	-192.58	-192.8	-195.78	-192.47	-192.41	-193.15	-192.43	-193.1

**significatif au seuil de 5%. *significatif au seuil de 10%.
T été N (température normale de la saison d'été) T Hiv N (température normale de la saison d'hiver), T AutN (température normale de la saison d'automne), T Pr N (température normale de la saison de printemps), P été N (précipitation normale de la saison d'été), P Hiv N (précipitation normale de la saison d'hiver), P Aut N (précipitation normale de la saison d'automne), P Pr N (précipitation normale de la saison de printemps), T Dv été-N (écart de la température de la saison d'été par rapport à la normale), T Dv Aut-N (écart de la température de la saison d'automne par rapport à la normale), T Dv Hiv-N (écart de la température de la saison d'hiver par rapport à la normale), T Dv Pr-N (écart de la température de la saison de printemps par rapport à la normale), P Dv été-N (écart des précipitations de la saison d'été par rapport à la normale), P Dv Aut-N (écart des précipitations de la saison d'automne par rapport à la normale), P Dv Hiv-N (écart des précipitations de la saison d'hiver par rapport à la normale), P Dv Pr-N (écart des précipitations de la saison de printemps par rapport à la normale), T Dv An-N (écart de la température annuelle moyenne par rapport à la normale), P Dv An-N (écart des précipitations annuelles moyennes par rapport à la normale)
Les Fi (i = {1,..., 12}) désignent les groupes {des différents types de sols classés selon la FAO-UNESCO (1998)} créés (voir annexe 6) tels que : F1 (Alh, CMg, CMu, CMx), F2 (ARc, ARh, LPe, PLd, RGe), F3 (VRk, VRy), F4 (FLs, SCy, SNh), F5(GYh, SCn), F6 (CMe, KSk, LPk), F7 (CLl, GYp, SCg), F8 (CLp, RGc, VRe), F9 (FLe, GYh), F10 (CLh, LVj, SNk), F11 (LVv, RGy), F12 (CMc, FLc, GLe, LVk)
Log L : Log de la vraisemblance le terme d'interaction spatial (A*Y (ρ))

Le tableau 5.10 affiche les résultats des estimations du modèle ricardien à l'aide de la méthode SAR en intégrant les différents groupes de sol (Fi ; i={1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12}) comme variables de contrôle. Les différents groupes de sol sont intégrés séparément à cause du problème de corrélation entre ces groupes. L'intégration de ces variables ne diminue pas significativement la valeur du Log de la vraisemblance mais augmente la significativité des coefficients des différentes variables climatiques. Les résultats sont robustes à travers les

différentes régressions et sont cohérents avec les résultats des régressions du tableau 3 (les signes des coefficients significatifs ne changent pas et le terme d'interaction spatial (A*Y (ρ)), est positif et significatif quelque soit la régression).

La plupart des coefficients des variables groupes de sol sont significatifs au seuil de 5%. Pour vérifier la notoriété des signes de ces coefficients, nous effectuons une analyse du modèle ricardien avec autocorrélation spatiale en intégrant séparément les différentes propriétés de sol qui caractérisent ces groupes sol. Les résultats de cette analyse existent dans l'annexe 8 (tableau 23).

5.3.3. Implications pour le changement climatique

Les résultats de l'analyse réalisée avec le modèle ricardien montrent que le climat a des effets importants sur l'agriculture en Tunisie. Dans ce paragraphe, nous utilisons les résultats de régressions des modèles intégrants les variables climatiques uniquement et ceux intégrants les groupes de sol afin de projeter l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne. Pour simuler l'impact, nous utilisons les projections du modèle HadCM3 reconnu, par le groupe d'experts en climat du projet CCC/GTZ, comme des prévisions cohérentes au climat de la Tunisie (voir chapitre 3). Le modèle HadCM3 prévoit une augmentation moyenne annuelle sur l'ensemble du pays de 1.0 à 1.1° C à l'horizon 2020[44]. Pour les précipitations moyennes le modèle montre une tendance générale modérée à la baisse à l'horizon 2020. Nous avons vu dans le chapitre 3 qu'en Tunisie il y a de très grandes disparités géographiques et saisonnières dans les tendances. Cependant, les prévisions au niveau des gouvernorats ne sont pas disponibles. Des prévisions plus détaillées existent aux niveaux des zones agro-écologiques et montrent :

- une diminution des précipitations de -5 % au Nord, de -8 % au Cap Bon et Nord-Est et de -10 % à l'extrême Sud.
- Une augmentation relativement faible de la température de +0.8°C dans les zones Nord, du Cap Bon et du Centre-Ouest, une élévation plus importante des températures (+1.3°C) dans les zones du Sud-Ouest et de l'Extrême Sud, une élévation moyenne de la température de la zone allant de la limite du Nord-Ouest au Sud-Est (+1.0°C).

Quant aux prévisions saisonnières disponibles au niveau de ce même découpage sont détaillés dans le tableau 5.12.

[44] Le rapport du groupe d'experts en climat du projet CCC/GTZ propose aussi quelques prévisions du climat futur de la Tunisie à l'horizon 2050, mais ces prévisions ne sont pas autant détaillées que celles à l'horizon 2020.

Tableau 5.12. Prévisions saisonnières du climat à l'horizon 2020

HadCM3	Températures		Précipitations	
	Nord	Sud	Nord	Extrême Sud
Eté	+ 0.9°C	+1.6°C	-8%	-40%
Hiver	+0.7°C	+1°C	0	-7%
Automne	+0.9°C	+1.4°C	-6%	-12%
Printemps	+0.6°C	+1.2°C	-6%	-12%

En utilisant les résultats des régressions, nous simulons l'impact attendu du changement climatique sur la valeur ajoutée comme suit :

$$\Delta VA = VA_1 - VA_0$$

Où VA_1 est une estimation de la valeur ajoutée sous le nouveau scénario climatique à partir des résultats de régression du modèle, VA_0 est la valeur estimée de la valeur ajoutée à partir du modèle d'estimation sous le scénario du climat courant.

Ainsi, nous ajoutons les changements climatiques prévus par le modèle HadCM3 à la température de référence et nous multiplions la base de précipitations par les pourcentages de diminutions prévu par le modèle climatique. Cela nous donne un nouveau climat pour le pays. Nous calculons la valeur ajoutée du climat actuel (correspondant à l'année 2007 ; dernière année disponible dans la base de données) et de chaque nouveau climat. En soustrayant la valeur ajoutée estimée de la valeur ajoutée actuelle nous pouvons obtenir la modification de la valeur du revenu net pour chaque pays. Les résultats de simulation sont affichés le tableau 5.13.

Tableau 5.13. Prévisions de la valeur ajoutée moyenne par hectare selon le modèle HadCM3

zones agro-écologiques	**Δ(température; précipitations)**	**Gouvernorat**	**ΔVA (VA1-VA0)**	**ΔVA en pourcentage**
Nord-est et Cap-Bon	(+1.7°C; -0%)	Bizerte	24990,8753	12,6436451
		Grand Tunis	40104,6221	13,1774277
		Zaghouan	9290,20508	13,139045
		Nabeul	45126,6869	13,5445397
Nord-Ouest	(+1.7°C; -0%)	Béja	20542,0217	13,5427331
		Jendouba	15302,6664	13,4939888
		Siliana	12455,7981	13,5674084
		Le-Kef	13282,8142	14,2959031
Sud-ouest	(+2.8°C; -7%)	Gabes	20641,9725	32,7842296
		Médenine	14489,7868	33,2848547
		Tatouine	5624,91831	36,5836266

VA0: valeur ajoutée estimé (année 2007) / VA1: valeur ajoutée estimé (année 2020)

Nous constatons que la valeur ajoutée agricole tendrait à augmenter avec les changements du climat prévus à l'horizon 2020. L'amélioration de la valeur ajoutée est d'autant plus ressentie au Sud-ouest du pays avec plus de 32% d'accroissement. Ainsi, contrairement aux appréciations des experts (voir chapitre 2) le changement climatique aurait un effet positif sur l'agriculture tunisienne.

Les résultats du tableau 5.13 sont basés sur les résultats des estimations du modèle ricardien modifié en utilisant la technique de panel. La considération du temps dans notre analyse a permis d'intégrer implicitement l'évolution technologique dans le temps. Puisque, la valeur ajoutée est la richesse créée suite à l'exploitation des moyens mises en œuvre dans la production. De plus, nous avons noté une marge de progression de la valeur ajoutée pendant la période d'étude (1992-2007) qui a accompagné les efforts d'amélioration des techniques d'exploitation agricoles (chapitre 4).

L'évolution technologique affecterait alors l'effet du changement climatique sur l'agriculture. Résultat des faits le changement climatique permettrait d'accroitre la valeur ajoutée agricole en Tunisie. Cette marge de progression de la valeur ajoutée est d'autant plus importante chez les régions ou le développement technologique initial est éphémère.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évalué l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne en utilisant la méthode ricardienne. Nous avons conduit, une analyse de la réponse du climat à la valeur ajoutée en utilisant le modèle ricardien modifié. L'exploitation de données géographiques très proches dans l'espace qui se caractérisent par des climats interdépendants a nécessité d'examiner l'influence du rapprochement spatial des lieus des pôles économiques ou industriels. Nous avons alors utilisé les modèles d'interaction spatiale afin de tenir compte de la dimension spatio-temporelle. L'analyse a montré que l'intégration de l'espace permet de tenir compte de l'effet de synergie entre les gouvernorats. Ainsi, le développement de l'activité agricole d'un gouvernorat permet d'améliorer la production d'un gouvernorat qui lui est voisin. En d'autres termes les modèles ricardiens qui ne considèrent pas la dimension spatiale conduiraient à une surestimation des bénéfices et des pertes du changement climatique.

Les résultats de simulation à l'horizon 2020 montrent que le changement climatique aurait des effets positifs sur l'agriculture malgré le fait que la Tunisie ait un climat

relativement chaud. Le niveau de technologie joue alors un rôle important dans l'agriculture tunisienne et modifie l'impact du climat sur l'agriculture.

CONCLUSION

Dans ce travail nous avons proposé une évaluation économique du changement climatique sur l'agriculture tunisienne. Nous avons adopté une démarche du global au local. Nous avons commencé par considérer la société de tous les hommes dans son ensemble sans distinction de régions, puis nous nous sommes intéressés au cas tunisien. Dans ce qui suit nous présentons l'ensemble des principales étapes de ce travail ainsi que les résultats originaux par chapitre.

Le premier chapitre présente d'une manière détaillée les différents concepts et approches traitant du changement climatique. Il s'agit d'un balayage de la littérature sur les enjeux et les controverses du dérèglement global du climat. Il commence par rappeler le caractère urgent du problème et les controverses qui s'y rapportent. L'objectif étant d'expliquer la théorie permettant de comprendre le changement climatique. La compréhension des hypothèses avancées par la littérature ainsi que la méthodologie de développement des modèles numériques de prévision et de simulation climatique, donne une vision objective de l'influence humaine sur le climat ainsi que l'ampleur de ce phénomène et explique les controverses qui existent. Ce chapitre se focalise, ensuite, sur la progression de la prise en charge du phénomène par la communauté internationale aux niveaux institutionnels et scientifiques. Après avoir développé les fondements de la gestion intergouvernementale du problème, il présente une synthèse des concepts de base de la littérature des modèles d'évaluation intégrée, à l'origine de plusieurs travaux interdisciplinaires, adoptés dans la prise de décision internationale sur la question. Ultérieurement, il fait le point sur les difficultés d'identification et de quantification des impacts du problème ainsi que les controverses qui leurs sont liées à travers une revue de la littérature des différentes étapes d'évaluation d'impact. La principale conclusion du chapitre étant, la nécessité de recourir à l'évaluation locale des impacts du problème, visant les secteurs les plus affectés afin de comprendre l'image entière des effets du changement climatique dans une région, puisque les estimations totales omettent plusieurs mesures qui rendent les études approximatives, inégales et inachevées. Un autre résultat de la littérature évoque la nécessité d'intégrer l'adaptation dans toute étude d'évaluation de l'impact. Ce résultat est particulièrement important, dans le sens où il est considéré comme une des hypothèses fondamentales sur lesquelles nous avons fondé nos choix, notamment, au niveau de la méthodologie.

Le deuxième chapitre consiste en une revue de la littérature traitant de l'impact du changement climatique sur l'agriculture à l'échelle régionale. L'approche choisit s'inscrit dans le même état d'esprit adopté dans le premier chapitre, c'est-à-dire de comprendre l'évolution des hypothèses et des techniques avancées dans la littérature. Il met l'accent sur les limites conceptuelles des différentes méthodologies proposées. Le chapitre expose d'abord des généralités sur les mécanismes physiologiques et culturaux des impacts. L'exposé est utile pour la compréhension de la suite du chapitre. En effet, il met en évidence les principales conclusions sur l'écophysiologie des plantes et leurs liens avec les régions de production, qui constituent les hypothèses de bases des méthodologies d'études des cultures et des exploitations agricoles existantes. Dans la suite du chapitre, une distinction entre les modèles de culture et le modèle ricardien est présenté afin de justifier le choix du modèle ricardien dans l'étude empirique ultérieurement. Le chapitre expose en dernier lieu les fondements théoriques du modèle ricardien et explicite les critiques adressées à cette approche. Cette étude bibliographique débouche sur les avantages de l'approche ricardienne qui permet notamment de capturer l'ensemble des variétés infinies des mesures d'adaptation aux changements des conditions climatiques.

Le troisième chapitre présente un diagnostic sur la vulnérabilité du secteur agricole tunisien au changement climatique. Il s'agit d'une synthèse et organisation des informations jugées pertinentes pour l'objectif du travail, contenues dans les divers rapports d'études réalisés en Tunisie et ailleurs, suivies de leurs analyses. Ainsi nous avons établit un diagnostic sur l'état du secteur agricole tunisien d'un point de vue structurel, technique et économique d'un côté et sur l'état des ressources naturelles de l'autre côté. Ce diagnostic est nécessaire pour identifier les risques pouvant affecter l'agriculture. Le chapitre expose également, l'état de connaissances de l'impact du changement climatique sur la Tunisie. A travers ce diagnostic, le chapitre met en évidence l'urgence de se focaliser sur l'étude empirique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne.

La suite de la thèse, c'est-à-dire le quatrième chapitre et le cinquième chapitre, est consacrée à l'étude empirique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne. Le quatrième chapitre est une étape de préparation des données pour pouvoir adapter le modèle ricardien au contexte tunisien. Il présente, d'abord, les détails sur le mode de renseignement sur les entrées économiques agronomiques, physiques et techniques du modèle. Dans ce cadre un exposé des difficultés rencontrées pour constituer les données est présenté. Il introduit, alors, l'approche par données de panel comme étant une solution au

manque de largeur dans l'échantillon. De plus, il explique le recours à la valeur ajoutée comme variable dépendante pour détourner le problème de manque de données sur les salaires et le volume horaire. Ce choix constitue une des premières originalités du travail puisqu'il constitue l'unique travail où l'impact du changement climatique sur la richesse agricole est évalué au lieu du revenu net agricole. Dans la suite du chapitre, une exploration de la base de données utilisée pour le cas des mesures des paramètres climatiques est présentée. La méthodologie de traitement des données manquantes est précisée et les résultats de l'étude empirique de la tendance des variables climatiques sont exposés. Ces résultats sont inédits et s'avèrent conformes aux conclusions prospectives de la littérature sur l'ampleur du changement climatique en Tunisie.

Finalement, le cinquième chapitre procède à l'étude empirique des impacts du changement climatique sur la valeur ajoutée dans le secteur agricole tunisien par gouvernorat en utilisant l'approche ricardienne.

Il reprend d'abord la question de spécification du modèle ricardien modifié et de ses entrées. D'une part, les mesures des paramètres climatiques sont disponibles par station et non pas par gouvernorat. Il développe alors une étude bibliographique des méthodologies de spatialisation de mesures des paramètres climatiques les plus pertinents dans la littérature. La technique de Krigeage s'avère la plus approprié pour l'extrapolation des mesures des paramètres climatiques disponibles par station au niveau de l'unité d'analyse « gouvernorat ». Les résultats de cette extrapolation sont aussi originaux puisque à notre connaissance aucune étude similaire n'a était faite sur le cas de la Tunisie. D'autre part, l'analyse des données sur la valeur ajoutée faite dans le quatrième chapitre a montré une variabilité spatio-temporelle expliquée par les effets spatio-temporels engendrés par l'utilisation de données sur panel et de données géographique composées d'un échantillon d'unités proches dans l'espace. Ainsi, le chapitre cinq met en évidence la nécessité d'introduire la dimension spatiale en plus de la dimension temporelle afin de contrôler les effets spatio-temporels sur le résultat de l'activité agricole. Une étude bibliographique des méthodes économétriques sur données de panel spatialisées est alors développée. Ces méthodes sont des développements récents de la recherche dans ce domaine.

Dans la suite du chapitre une estimation du modèle en tenant compte de l'effet temporel uniquement puis en ajoutant l'effet spatial est réalisée. L'analyse ricardienne incorporant la méthode de panel spatial est aussi une analyse inédite. L'étude compare successivement des

modèles tenant compte de toujours plus de variables. Suite à cette analyse, un exposé de la simulation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne est présenté.

Le résultat principal du travail est que le changement climatique aurait des effets positifs sur l'agriculture. Ces résultats vont à l'inverse de la thèse proposée dans l'introduction. Ils sont aussi surprenants par rapport à l'exposé des risques de pénurie en ressources naturelles courues par la Tunisie présenté au troisième chapitre. Toutefois, ils sont dans la ligne des résultats des premiers modèles ricardiens ayant inspiré les travaux.

Il faut souligner que nous ne rejetons pas l'hypothèse que l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne serait négatif. Toutefois nous pouvons expliquer ce résultat par la faculté de la méthode ricardienne à intégrer l'ensemble des variétés infinies des mesures d'adaptation aux changements des conditions climatiques. En effet, comme nous l'avons souligné dans le chapitre 4, le secteur agricole tunisien et le monde rural ont connu de profondes mutations qui ont touché à la fois la conduite des cultures et celle de l'élevage, l'occupation du sol et l'aménagement hydro-agricole. L'ensemble de ces mutations ont permis le développement de l'agriculture tunisienne. Ce développement a permis de dégager un surplus pour l'exploitation. Ainsi, le niveau technologique incorporé implicitement dans l'analyse permet de muter l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne comme l'explique plusieurs travaux qui utilise les modèles ricardiens pour étudier l'impact du changement climatique sur l'agriculture (Kumar et Parikh, 1998 ; Sanghi, 1998 ; Sanghi, Mendelsohn and Dinar, 1998 ; McKinsey et Evenson, 1998 ; Sanghi et Mendelsohn, 1999 ; Timmins, 2001).

Néanmoins, il est nécessaire d'approfondir cette analyse afin de pouvoir établir une stratégie d'adaptation de l'agriculture tunisienne au changement climatique. Il serait judicieux d'examiner des scénarios climatiques alternatifs à un horizon plus loin que 2020 afin de vérifier le rôle du niveau technologique dans la mutation de l'impact du changement climatique. De tels perspectives nécessiterait de disposer de données sur les variables technologiques en Tunisie et de pousser les recherches sur les modèles numériques appropriés au cas de la Tunisie. Il est nécessaire aussi de tenir compte de l'ensemble des défis auxquels le secteur agricole tunisien est aujourd'hui confrontée, nous citons particulièrement la gestion durable des ressources naturelles. Il faudra aussi noter que durant la période de référence de notre étude empirique le développement agricole s'est effectué dans un cadre de marché

protégé et qu'il est nécessaire de tenir compte de la nouvelle contrainte de libéralisation des barrière à l'entrée.

L'étude empirique pourrait être poursuivit en séparant l'effet des différentes variables d'adaptation. D'abord, d'innombrables possibilités d'adaptations sont disponibles pour l'agriculteur—changement des périodes de plantation ; des variétés de culture, des dates de récoltes, et des méthodes de laboure et d'irrigation. Ce potentiel d'adaptation dépend d'un autre élément critique le rôle de différents genres d'infrastructures tel que la base de connaissances scientifiques et techniques, et le fonctionnement des établissements pour la gestion des ressources. De plus, le potentiel d'adaptation dépend de la capacité des écosystèmes et des agro systèmes à s'adapter aux nouvelles conditions climatiques. Par exemple, le changement climatique affecterait la capacité des différents types de sols à produire certains types de cultures ce qui détournerait les possibilités de production. Ainsi le potentiel d'adaptation est fonction des deux systèmes socio économiques et écologiques. La comparaison entre les différentes estimations intégrant les différentes activités en question révèlera les mesures d'adaptation optimales dans le cas de l'agriculture. Les estimations assumeraient que les exploitants agricoles choisiraient les activités d'innovation disponibles pendant la période d'étude c'est-à-dire 1992-2007. Ce travail pourrait ainsi être une référence pour établir une stratégie d'adaptation de l'agriculture tunisienne au changement climatique.

BIBLIOGRAPHIE

Sites internet:

Agriculture Research Service:
http://ars.usda.gov/is/AR/archive/jul97/global0797.htm

Banque Centrale Tunisie :
Tunisie données Economiques et Financières
http://www.bct.gov.tn/bct/siteprod/francais/pnrd.jsp

Food and Agriculture websites:
http://www.fao.org
http://sedac.ciesin.columbia.edu/giss_crop_study/CCMresources.html
http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/GAEZ/index.htm?sb%20=%206
http://www.fao.org/ag/Agl/swlwpnr/reports/y_nf/z_tn/tn.htm#soils

Institut nationale de la statistique-Tunisie :
Données économiques, http://www.ins.nat.tn/indexfr.php

IPCC:
http://www.ipcc.ch/

ISRIC-World Soil Information:
http://www.isric.org

Ministère de l'Agriculture et des ressources hydrauliques
http://www.onagri.tn/

Organisations des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation :
AQUASTAT : Système d'information de la FAO sur l'eau et l'agriculture,
http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=fr

Pew Center: climate change
http://www.pewclimate.org
http://www.pewclimate.org/global-warming-in-depth/all_reports/agriculture/index.cfm

The World Bank:
World Development Indicators & Global Development Finance, 28 Septembre, 2010;
http://data.worldbank.org/data-catalog

Unfccc web site:
http://unfccc.int/essential_background/background_publications_htmlpdf/climate_change_information_kit/items/288.php

Le scepticisme est un devoir:
http://www.pensee-unique.fr/

Revues, Rapport et Ouvrage :

Abrol Y.P., Allen L. H., Jr., Baker J.T., Bazzaz F.A., Boote K.J., Bouwman L., Brinkman R., Evans T.E., Fischer G., Frohberg K., Gommes R., Goudriaan J., Hogsett W.E., Ingram K.T., Jäger Hans-Jurg, Krupa S.V., Leemans R., Parry M.L., Reilly J., Rosenzweig C., Sombroek W.G., Tinker B., Unsworth M.H., van de Geijn S.C., Gert Jan van den Born, 1997. «Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes», BAZZAZ F., et SOMBROEK W. (Eds), Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). FAO [on line]. http://www.fao.org/docrep/W5183E/W5183E00.htm

Adams R.M., Mc Carl B., Duek D., et Glyer D., 1988. "Implications of Global Climate Change for Western Agriculture", *Western Journal of Agriculture Economics*, 13 (2), pp 348-356.
ageconsearch.umn.edu/bitstream/32124/1/13020348.pdf

Adams, R.M. 1989. "Global Climate Change and Agriculture: An Economic Perspective". *American Journal of Agricultural Economics*, 71, pp 1272-1279.
www.jstor.org/stable/1243120

Adams R.M., Rosenweig C., Pearl R., Ritchie J., Mc Carl B., Glyer D., Curry B., James J., Boote K., et Allen H., 1990. "Global Climate Change and U.S Agriculture", *Nature*, 345, pp 219-223.
http://www.nature.com/nature/journal/v345/n6272/pdf/345219a0.pdf

Adams R.M., Fleming R., Chang C., McCarl B., et Rosenzweig C., 1995. "A Reassessment of the Economic Effects of Global Climate Change in U.S. Agriculture", Climatic Change, 30 (2), pp. 147-167.
www.springerlink.com/index/N201G122L0PW77M2.pdf

Adams R. M., Hurd B. H., et Reilly J. (1999), «Agriculture and Global Climate Change: A Review of Impacts to U.S. Agricultural Resources», préparé pour le Pew Center on Global Climate Change, February 1999. 18 Décembre 2009. PewClimate [PDF].
http://www.pewclimate.org/docUploads/env_argiculture.pdf

Adams R.M., McCarl B., Segerson K., Rosenzweig C., Bryant K., Dixon B., Conner R., Evenson R., et Ojima D., 1999. "The Economic Effects of Climate Change on U.S. Agriculture", *The Impact of Climate Change on the Economy of the United States,* pp 18–54, ed. Mendelsohn R., et Neumann J.E., Cambridge University Press, 330 pages.

Agence Internationale de l'Energie, Janvier 2008, « Emissions de CO_2 issues de la combustion des énergies fossiles », 2007 ; tiré de Communauté économique de l'Afrique de l'ouest (CEDEAO) et Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE), « Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'ouest : le climat et les changements climatique ». FAO [PDF]. 22 octobre 2009. *www.fao.org/nr/clim/docs/clim_080502_fr.pdf*

Agoumi, Senoussi, Yacoubi, Fakhredine, Sayouty, Mokssit, Chikri. 1999. « Changements climatiques et ressources en eau » *Hydrogéologie appliquée,* Tome 12 vol 11, pp 163–182.

Akong'a, J., T.E. Downing, N.T. Konijn, D.N. Mungai, H.R. Muturi, et H.L. Potter. 1988. "The Effects of Climatic Variations on Agriculture in Central and Eastern Kenya". In: M.L. Parry, T.R. Carter; and N.T. Konijn (Eds.): The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Vol. 2, Assessment in Semi-Arid Regions.

Amor Mtimet 1999. "Atlas des Sols tunisiens ". Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques de la Tunisie

Armington, P. 1969. "A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production" *IMF Staff Papers*, 16, pp 159-178.

Baer, B.D., W.S. Meyer, et D. Erskine. 1994. "Possible Effects of Global Climate Change on Wheat and Rice Production in Australia". In: C. Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.

Barro, R.J., et X. Sala-i-Martin. 1995. " Economic Growth. New York. Barry, T.A., and S. Geng (1992): The Impact of Wheather and Climate Change on Wheat Yield in the United States". World Resource Review 4 (4): 419-450.

Batjes NH. 2010. "Soil property estimates for Tunisia derived from SOTER and WISE (SOTWISE-Tunisia, ver.1.0)". Report 2010/ 01, ISRIC-World Soil Information, Wageningen (41p. withdataset).
http://www.isric.org/isric/webdocs/docs/ISRIC Report 2010 01.pdf

Bergthorsson, P., H. Björnsson, O. Dyrmundsson, B. Gudmundsson, A. Helgadottir, et J.V.Jonmunndsson. 1988. "The Effects of Climatic Variations on Agriculture in Iceland". In: M.L. Parry, T.R. Carter, and N.T. Konijn (Eds.): The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Volume 1 – Assessment in Cool Temperate and Cold Regions.

Belkhodja K., Bortoli L. Cointepas, J.P., Dimanche P., Fournet A., Jaquinet J.C. et Mori A., 1973 "Sols de Tunisie: Bulletin de la Division des Sols". No.5.Ministère de l'Agriculture, Division des Ressources en Eau et en Sol. Division des Sols.

Boé J. et Terray L., 2007, "Régimes de temps et désagrégation d'échelles". Octobre 2009. shf.asso [PPT]. www.shf.asso.fr/29JH/Terray-SHF2007.ppt

Bos, E., M.T. Vu, E. Massiah, et R.A. Bulatao. 1994. "World Population Projections: Estimates and Projections with Related Demographic Statistics". *World Bank*, Baltimore. The Johns Hopkins University Press.

Brisson N. 2009, "Principes et utilités des modèles de cultures", Académie d'agriculture de France, Modélisation végétale, Séminaire 28 Janvier 2009. 18 Décembre 2009. Academie-culture [PDF].
http://www.academie-agriculture.fr/mediatheque/seances/2009/20090128resume4.pdf

Bruckner, T, G. Hooss, H.-M. Füssel, et K. Hasselmann. 2001. "The ICLIPS Climate Model". *Climate Change*, submitted to special ICLIPS issue.

Bruckner,T, G. Petschel-Held, F. L. Toth, H.-M. Füssel, C. Helm, M. Leimbach, et H.-J. Schellnhuber. 1999. "Climate Change Decision-Support and the Tolerable Windows Approach". *Environmental Modelling and Assessment* 4, pp 217-234.

Callaway, John M. 2004. "Adaptation benefits and costs: are they important in the global policy picture and how can we estimate them?". *Global Environmental Change*, 14, pp 273-282.

Caswell, Margriet F., et David Zilberman. 1986. ''The Effect of Well Depth and Land Quality on the Choice of Irrigation Technology". *American Journal of Agricultural Economics* 68 (Nov.): pp798-811.

CerdaÁ, A. 2000. "Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia". *Soil & Tillage Research* 57, pp 159-166.

Central Laboratory for Agricultural Climate (CLAC), Agriculture Research Centre (ARC), Ministry of Agriculture and Land Reclamation, Egypt 2006, "Assessment of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change in North Africa: Food Production and Water Resources", A Final Report Submitted to Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC), Project No. AF 90, Submitted by Ayman F. Abou-Hadid, , Published by The International START Secretariat 2000 Florida Avenue, NW Washington, DC 20009 USA www.start.org

CIHEAM, (2008) ; Mediterra 2008 : « les futurs agricoles et alimentaires en Méditerranée », rapport pour la réflexion et l'aide à la décision, http://portail2.reseau-concept.net/Upload/ciheam/fichiers/Mediterra_2008_-_PPT.pdf

Cline, W.R. 1992. "The Economics of Global Warming". Institute for International Economics, Washington, DC.

Cline, W.R., 1994, "International Economic Policy in the 1990s", Cambridge, Mass.: The MIT Press. Copeland, B. R., & Taylor

Cline, W. 1996. "The Impact of Global Warming on Agriculture: Comment". *American Economic Review*, 86, pp 1309-1312.

Cline, William. 1996. "The Impact of Global Warming on Agriculture: Comment.". *American Economic Review* 86 (5), pp 1309-12.

Committee on the Science of Climate Change Division on Earth and Life Studies; National Research Council; National Academy Press; Washington, D.C. 2001 "Climate Change Science: an Analysis of Some Key Questions". http://www.nap.edu

Communauté économique de l'Afrique de l'ouest (CEDEAO) et Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE), Janvier 2008, « Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'ouest : le climat et les changements climatique ». atlas-ouestafrique [PDF]. 22 octobre 2009. *www.fao.org/nr/clim/docs/clim_080502_fr.pdf*

Cure, J.D., et Acock, B. 1986. "Crop Responses to Carbon Dioxide Doubling: A literature survey", *Agriculture and Forest Meteorology*, 38, pp127-145.

Darwin R., Tsigas M., Lewandrowski J., Raneses A., 1995. "World Agriculture and Climate Change: Economic Adaptations." United States Department of Agriculture - Agricultural Economic Report, 703.
http://purl.umn.edu/33933

Darwin, Roy. 1999. "The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis: Comment." *American Economic Review* 89 (4), pp 1049-52.

Deke Oliver, Hooss Kurt Georg, Kasten Christiane, Klepper Gernot, et Springer Katrin. 2001. "Economic Impact of Climate Change: Simulations with a Regionalized Climate-Economy Model", Kiel Institute of World Economics, Düsternbrooker Weg 120, 24105 Kiel (Germany). Kiel Working Paper No. 1065.

De Siqueria, O.J.F., J.R. Boucas Farias, et L.M. Aguiar Sans. 1994. " Potential Effects of Global Climate Change for Brazilian Agriculture: Applied Simulation Studies for Wheat, Maize, and Soybeans". In: C. Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.

Delecolle, R., D. Ripoche, F. Ruget, et G. Gosse. 1994 " Possible Effects of Increasing CO2-Concentration on Wheat and Maize Crops in North and Southeast France". In: C.Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.

Denz Elzen, M.G.J., et J. Rotmans. 1992 "The Socio-Economic Impact of Sealevel Rise on The Netherlands: A Study of Possible Scenarios". *Climatic Change* 20: pp 169-195.

DGFE, FAO, Projet UTF/TUN/021/TUN ; 1995 « Gestion des ressources naturelles » : Bilan diagnostic du système agraire d'El Ouara. Tunis, document n° 15

DGFE, FAO, Projet UTF/TUN/021/TUN ; 1995 « Gestion des ressources naturelles » : Bilan diagnostic du système agraire de l'Erg Oriental. Tunis, document n° 17

DGFE, FAO, Projet UTF/TUN/021/TUN ; 1995 « Gestion des ressources naturelles » : Bilan diagnostic du système agraire de la chaîne des Matmata et du Dahar. Tunis, document n° 14

DGFE, FAO, Projet UTF/TUN/021/TUN ; 1995 « Gestion des ressources naturelles » : Bilan diagnostic du système agraire de la Jeffra. Tunis, document n° 16

DGFE, FAO, Projet UTF/TUN/021/TUN ; 1995 « Gestion des ressources naturelles » : Bilan diagnostic du système agraire des Chotts. Tunis, document n° 13

Direction des Sols, PNUD : Rapport final du projet TUN/88/04, Etude de l'impact des actions de développement et de la lutte contre la désertification. Tunis, juin 1991

Dinar, Ariel, et Dan Yaron. 1990. "Influence of Quality and Scarcity of Inputs on the Adoption of Modern Irrigation Technologies". *Western Journal of Agricultural Economics* 15 (2): pp 224-233.

Dinar, Ariel, et David Zilberman. 1991. ''The Economics of Resource-Conservation, Pollution- Reduction Technology Selection: The Case of Irrigation Water.'' *Resources and Energy* 13 (4): pp 323-348.

Dinar, Ariel, Mark B. Campbell, et D. Zilberman, 1992. ''Adoption of Improved Irrigation and Drainage Reduction Technologies Under Limiting Environmental Conditions.'' *Environmental & Resource Economics* 2 (4), pp 373- 398.

Dinar A., Mendelsohn R., Evenson R., Sanghi A., Kumar K., Prikh J., McKinsey J., et Lonergan S., 1998. "Measuring the Impact of Climate Change on Indian Agriculture". World Bank Technical Paper No. 402. Washington: World Bank.

Easterling III W.E., Crosson P.R., Rosenberg N.J., McKenney M.S., Katz L.A., et Lemon K.M., 1993. "Paper 2. Agricultural impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas (MINK) region", Climatic Change, 24 (1-2), 23-61.

Easterling III W.E., Hurd B.H., et Smith J.B., 2004, "Coping with climate change. The role of adaptation in the United States", Pew Center on Global Climate Change, juin 2004. Pewtrusts [PDF].
www.pewtrusts.org/uploadedfiles/wwwpewtrustsorg/reports/Global_Warming/pew_climate_0704.pdf

Easter K. W., Rosegrant M. W., et Dinar A., 1999, ''Formal and Informal Markets for Water: Institutions, Performance and Constraints.'' *World Bank Research Observer* 14 (1): pp 99-116.

Eid H.M., 1994. "Impact of Climate Change on Simulated Wheat and Maize Yields in Egypt". In: C. Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.

Eid H. M., El-Marsafawy S M. et Ouda S. A., 2007, "Assessing the Economic Impacts of Climate Change on Agriculture in Egypt A Ricardian Approach". World Bank -Policy Research Working Paper, 4293, WPS4293.

Escano, C.R., et L.V. Buendia. 1994. "Climate Impact Assessment for Agriculture in the Philippines: Simulation of Rice Yield under Climate Change Scenarios". In: C. Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.

Fischer, G., H.T. Van Velthuizen, 1996. "Climate change and global agricultural potential project: A case study of Kenya". International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 96 pp

Fleischer Aliza, Lichtman Ivgenia, Mendelsohn Robert. 2007. "Climate change, irrigation, and Israeli agriculture: Will warming be harmful?", Ecological Economics, ECOLEC-02900; n° de pages 8.

Fankhauser, S. 1994. "Protection vs. Retreat: Estimating the Costs of Sea-level Rise". CSERGE Working Paper GEC 94-02, Norwich.

Fankhauser, S. et Tol, R.S.J. 2002. "On Climate Change and Economic Growth". European Bank for Reconstruction and Development, and Hamburg, Vrije and Carnegie Mellon Universities.
http://www.uni-hamburg.de/wiss/FB/15/sustainability/growth.pdf

Feenstra, J.F., I. Burton, J.B. Smith, et R.S.J. Tol. 1998. "Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies". Amsterdam.

Füssel, H.-M., et J. G. van Minnen. 2000. "Deriving Climate Protection Targets From Guard-rails for the Preservation of Terrestrial Ecosystems". Integrated Assessment, accepted.

Gadgil, S., A.K.S. Huda, N.S. Jodha, R.P. Singh, et S.M. Virmani. 1988. " The Effects of Climatic Variations on Agriculture in Dry Tropical Regions of India". In M.L. Parry, T.R.Carter, and N.T. Konijn (Eds.): The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Volume 2 - Assessment in Semi-Arid Regions.

Gana, A. 1992. "L'exploitation familiale en Tunisie", dans: l'agriculture familiale, tome1, op.cit., p : 263-304

Gbetibouo G.A. et Hassan R.M, 2005, "Measuring the economic impact of climate change on major South African field crops: a Ricardian approach" Global and Planetary Change 47 143–152

Gratton Y., Juin 2002, « le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale », les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, www.iag.asso.fr

Groupe de travail interministériel, 2008, "Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France", Document d'étape, Paris, juin 2008. Rapport complet disponible sur le site web de l'ONERC :
http://www.onerc.gouv.fr

Groupe de travaille I, Troisième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), "changement climatique 2001 : les bases scientifiques physiques". IPCC [PDF]
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_third_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm

Groupe de travail I, Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 2007, "changement climatique 2007 : les bases scientifiques physiques". IPCC [PDF]. 29 Janvier 2007.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm

Groupe de travail I, Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 2007, "changement climatique 2007 : Rapport de synthèse". IPCC [PDF]. 29 Janvier 2008.
www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf

Groupe de travail II, Troisième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 2001, "climate change 2001 : Impacts, Adaption and Vulnerability". IPCC [PDF].
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_third_assessment_report_wg3_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm

Groupe de travail II, Quatrième Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 2007, "climate change 2007 : Impacts, Adaption and Vulnerability". IPCC [PDF]. 29 Janvier 2007.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_third_assessment_report_wg4_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm

Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, GIEC (2007), "procédures". IPCC [PDF]. 29 Janvier 2009.
*www1.ipcc.ch/pdf/ipcc-faq/ipcc-**procedures**-fr.pdf*

Hall, R.E., et C.I. Jones. 1999. "Why Do Some Countries Produce So Much More Output per Worker than Others?" *The Quarterly Journal of Economics*, 114(1), pp 83-116.

Hasselmann, K., S. Hasselmann, R. Giering, V. Ocana, et H. V.Storch. 1997. "Sensitivity Study of Optimal CO2-Émission Paths Using a Simplified Structural Integrated Assessment Model (SIAM)". *Climatic Change* 37, pp 345-386.

Haurie A. 2002. "Integrated Assessment Modeling for Global Climate Change: An Infinite Horizon Optimization Viewpoint". NCCR-WP4
http://ecolu-info.unige.ch/~nccrwp4/

Heal, G. et Bengt, K. 2002. "Uncertainties and Climate Change", *Environmental and Resource Economics*, 22, pp 3-39.

Hitz S. et Smith J. 2004 "Estimating global impacts from climate change", *Global Environmental Change*, 14, 201-218.
Hooss, G., R. Voss, K. Hasselmann, E. Maier-Reimer, et F. Joos. 2000. " A Nonlinear Impulse Response Model of the Coupled Carbon Cycle-Ocean" Atmosphere Climate System (NICCS). *Climatic Dynamics*.

Howitt, Richard E., Jay Lund, et al. 1999. "Integrated Economic-Engineering Analysis of California's Future Water Supply". Report to State of California Resources Agency, Sacramento. Department of Agricultural Economics and Department of Civil and Environmental Engineering, University of California,

Hulme M., Doherty R., Ngara T, New M. et Lister D., 2000, "African Climate Change: 1900-2100", Revised Manuscript for Climate Research.

Iglesias, A. 1995. "Effects on Wheat and Maize in Spain". In: P.A. Harrison, R.E. Butterfield, and T.E. Downing (Eds.): Climate Change and Agriculture in Europe – Assessment of Impacts and Adaptations.

IPCC Working Group II. Geneva. Jin, Z., Ge D., H. Chen, and J. Fang (1994): Effects of Climate Change on Rice Production and Strategies for Adaptation in Southern China. **Draft.** In: C. Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.

Institut Nationale de la Statistique(INS)-Tunisie, 2008, "Annuaire statistique de la Tunisie", n°51, ISSN : 0066-3689, http://www.ins.nat.tn/indexfr.php

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1996. "Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific- Technical Analyses". Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne. http://www.ipcc.ch

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. "Summary for Policymakers". A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. http://www.ipcc.ch

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. "Summary for Policymakers. *Climate Change* 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. http://www.ipcc.ch

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). "Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability". A Report of Working Group II. http://www.ipcc.ch

Jonesa P.G., et Thornton P.K., "The potential impacts of climate change on maize production in Africa andLatin America in 2055", Global Environmental Change 13 (2003) 51–59

Jayet H., 2001, « Econométrie et données spatiales Une introduction à la pratique », Cahiers d'économie et sociologie rurales, n° 58-59.

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M., Wavreski P., 2007, « densite des points de mesure, types et limites des modèles d'interpolation » *Journées de Climatologie – Grenoble, 22-23* mars 2007 Climat et société: Mesures et modèles

Joos, F., C. Prentice, S. Sitch, R. Meyer, G. Hooss, G.-K. Plattner, et K. Hasselmann .2001. "Global Warming Feedbacks on Terrestrial Carbon Uptake under the IPCC Emission Scenarios". Global Biogeochemical Cycles, submitted.

Joos, F., M. Bruno, R. Fink, U. Siegenthaler, T. Stocker, C. LeQuere, et J. Sarmiento .1996 "An Efficient and Accurate Representation of Complex Oceanic and Biospheric Models of Anthropogenic Carbon Uptake". *Tellus*, 48B, pp 397-417.

Joos,F., G.-K. Plattner, T. Stocker, O. Marchal, et A. Schmittner. 1999. "Global Warming and Marine Carbon Cycle Feedbacks on Future Atmospheric CO2". *Science* 284, pp 464-467.

Journal officiel tunisien, 22 juin 1956 « Décret du 21 juin 1956 portant organisation administrative du royaume »

Journal officiel de la République tunisienne, 24 mars 1989 « Décret du 24 mars 1989 portant délégation de certains pouvoirs des membres du gouvernement aux gouverneurs »

Journal officiel de la République tunisienne, 22 mai 1992 « Décret du 22 mai 1992 portant création d'une division des comités de quartiers au sein de l'administration de chaque gouvernorat »

Kabubo-Mariara Jane et Karanja Fredrick K. 2007. "The economic impact of climate change on Kenyan crop agriculture: A Ricardian approach" Global and Planetary Change 57 319–330

Kaiser H.M., 1991. "Climate Change and Agriculture". *Northeastern Journal of Agricultural and Resource Economics*, 20, pp 151-163.

Kaiser H.M., Riha S.J., Wilks D.S., Rossiter D.G., et Sampath R., 1993. "A farm-level analysis of economic and agronomic impacts of gradual warming", *American Journal of Agricultural Economics*, 75, pp 387-398.

Kallhauge Angela Churie, Girardin Osvaldo, Moore Rawlstone; "Financing for Adaptation Activities in Developing Countries".
http://unfccc.int/files/meetings/workshops/other_meetings/application/pdf/barbadrm.pdf

Kemfert Claudia. 2001. "Economic Effects of Alternative Climate Policy Strategies: Impact Assessment on World Regions".http://weber.ucsd.edu/~carsonvs/papers/468.pdf

Klepper, G., and K. Springer. 2000. " Benchmarking the Future: A Dynamic, Multi-Regional, Multi-Sectoral Trade Model for the Analysis of Climate Policies". *Kiel Working Paper*, No.976, The Institute of World Economics, Kiel.

Kokoski M.F., 1984. "A General Equilibrium Analysis of the Measurement of Economic Impacts of Climatic Changes". University of North Carolina at Chapel Hill.

Kumar K.S.Kavi, et Parikh J, 2001. "Indian agriculture and climate sensitivity". *Global Environmental Change*, 11, pp 147-154.

Kurtze, C., and K. Springer. 1999. "Modelling the Economic Impact of Global Warming in a General Equilibrium Framework". *Kiel Working Paper*, No. 922, The Institute of World Economics, Kiel.

Kurukulasuriya P., et Rosenthal S., 2003, "Climate Change and Agriculture. A Review of Impacts and Adaptations", Paper 91, World Bank-Climate Change Series.

Lepetit, P. 2002. "Les Etats Unies et Le Changement Climatique de Rio à Johannesburg", *Revue d'Economie Financière*, 66, pp 57-100.

Liverman, D.M. 1992. "Global Warming and Mexican Agriculture: Some Preliminary Results". In: J.M. Reilly, and M. Anderson (Eds.): Economic Issues in Global Climate Change: Agriculture, Forestry and Natural Resources.

Maddison, D and Bigano, A., 2000, "The Amenity Value of the Italian Climate", http://www.cserge.ucl.ac.uk/Italian_Climate.pdf

Maier-Reimer, E., et K. Hasselmann. 1987. "Transport and Storage of CO2 in the Ocean – An Inorganic Ocean-Circulation Carbon Cycle Model". *Clim.Dyn.* 2, pp 63-90.

Manne, A.S., et Richels. R.G. 1992. "Buying Greenhouse Insurance: The Economic Cost of CO2-Emission Limits". Cambridge, MIT Press.

Martin J. P., Burniaux J-M., Nicoletti G., et Oliveira-Martins J. 1992, « Les coûts des accords internationaux sur la réduction avec le modèle GREEN des émissions de CO_2 : résultats des simulations ». OCDE [PDF]. 24 Octobre 2009. *http://www.oecd.org/dataoecd/21/46/33955142.pdf*

Martin P., Cynthia R., Iglesias A., Fischer G., Livermore M., 1999. "Climate change and world food security: a new assessment". *Global Environmental Change*, 9, pp 51-67.

Matthews R. et Wassmann R., 2003. "Modelling the impacts of climate change and methane emission reductions on rice production: a review", *Europ. J. Agronomy*, 19, pp 573-598.

Matthews, R.B., M.J. Kropff, et D. Bachelet. 1994. "Climate Change and Rice Production in Asia". Entwicklung und ländlicher Raum 1, pp 16-19.

Mendelsohn R., Nordhaus W.D., et Shaw D., 1993. "Measuring the impact of global warming on agriculture", Cowles Foundation discussion paper 1045, http://cowles.econ.yale.edu/P/cd/d10a/d1045.pdf

Mendelsohn R.; Nordhaus W.D. et Shaw D., 1994. "The impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis", *The American Economic Review*, 4 (84), pp 755-771.

Mendelsohn R., Nordhaus W.D., et Shaw D., 1996. "Climate impacts on aggregate farm value: accounting for adaptation", Agricultural and Forest Meteorology, 80 (1), pp 55-66.

Mendelsohn R. et Nordhaus W.D. 1996. "The Impact of Global Warming on Agriculture: Reply", *American Economic Review*, 86, pp 1312-1315.

Mendelsohn R. et Dinar A., 1999. "Climate Change, Agriculture, and Developing Countries: Does Adaptation Matter?", The World Bank Research Observer, 14 (2), pp. 277–93.

Menzhulin, G.V., L.A. Koval, et A.L. Badenko. 1994. "Potential Effects of Global Warming and Carbon Dioxide on Wheat Production in the Former Soviet Union". *In: C. Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.*

Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire. République Tunisienne. Octobre 2001. "Communication Initiale de la Tunisie à la Convention Cadre des Nations Unis sur les Changements Climatiques", http://unfccc.int/resource/docs/natc/tunnc1e.pdf.

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques de la Tunisie, et Coopération Technique Allemande 2007. "Changements Climatiques : Effets Sur l'Economie Tunisienne et Stratégie d'Adaptation pour Le Secteur Agricole et les Ressources Naturelles"

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques de la Tunisie, Division Du Sol, 1973, "Bulletin de La Division Des Sols ; Sols De Tunisie"

Ministère de l'Agriculture-Direction des Ressources en Eau et en Sol-Division des Sols, République tunisienne, 1973, "Carte pédologique de la Tunisie", échelle 1 : 5,000,000, République Tunisienne. Institut National de Recherches Forestières

Ministère de l'Agriculture-Direction des Ressources en Eau et en Sol-Division des Sols, République tunisienne, 1976, "Carte Bioclimatique de la Tunisie Selon la Classification d'Emberger". Etages et Variantes, échelle 1 : 1,000,000, République Tunisienne. Institut National de Recherches Forestières.

Ministère de l'Agriculture-Direction des Ressources en Eau et en Sol-Division des Sols, République tunisienne, 1976, "Carte des Roches Mères des Sols", échelle 1 : 1,000,000, République Tunisienne. Institut National de Recherches Forestières ; http://library.wur.nl/WebQuery/isric/19956

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques de la Tunisie, Direction générale des études et du développement Agricole 1996. "Budget Economique de l'année 1997 de L'Agriculture et de la Pêche "

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques de la Tunisie, Direction générale des études et du développement Agricole 1997. "Enquête Sur Les Structures des exploitations agricoles 1994-1995 "

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques de la Tunisie, Direction générale des études et du développement Agricole 1997. "Annuaire des statistiques agricoles"

Ministère du développement et de la coopération internationale, République tunisienne, 2005, "Budget Economique 2006", novembre 2005, http://www.mdci.gov.tn/fileadmin/publications/BE2006_FR.pdf

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques de la Tunisie, Direction générale des études et du développement Agricole 2006. "Enquête Sur Les Structures des exploitations agricoles 2004-2005 "

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques de la Tunisie, Direction générale des études et du développement Agricole, 2006, "Indicateurs du secteur agricole "

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques de la Tunisie, Direction générale des études et du développement Agricole 2008. "Annuaire des statistiques agricoles"

Ministère de l'Agriculture et des ressources hydrauliques-Direction générale de la planification du développement et des investissements agricoles, République tunisienne, (2009); Budget Economique 2010 : Agriculture et Pêche, http://www.onagri.nat.tn/budget_eco/BUDECO2010.pdf

Mitchell, W., Chittleborough, J., Ronai, B. et Lennon, G. 2001, 'Sea Level Rise in Australia and the Pacific' , in Proceedings of the Pacific Islands Conference on Climate Change, Climate Variability and Sea Level Rise, Linking Science and Policy, eds. M. Grzechnik and J. Chittleborough, Flinders Press, South Australia.

Molua, Ernest L. 2002. "Climate Variability, Vulnerability and Effectiveness of Farm-Level Adaptation Options: the Challenges and Implications for Food Security in Southwestern Cameroon." Environment and Development Economics 7 (3, 2002): 529–545.

Mooney, S., et L.M. Arthur, 1990, "The Impacts of Climate Change on Agriculture in Manitoba". *Canadian Journal of Agricultural Economics,* 38, pp 685-694.

Moore, Michael, et Don Negri, 1992, "A Multiple Production Model of Irrigated Agriculture Applied to Water Allocation Policy of the Bureau of Reclamation". *Journal of Agriculture and Resource Economics* 17 (1): pp 29–43.

Mtimet, A. (1999) ; « Atlas des Sols Tunisiens. Préface Mustapha Lasram ». ISBN/ 9973-914-05-8. République Tunisienne. Ministère de l'Agriculture.

Muchena, P, 1994, "Implications of Climate Change for Maize Yields in Zimbabwe". In: C.Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.

Nations Unies 1992 "Convention-Cadre des Nations Unies dur les Changements Climatiques", FCCC/INFORMAL/84, GE.05-62221 (F) 180705 260705, http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf

Negri, Don H., et David H. Brooks. 1990. "Determinants of Irrigation Technology Choice." *Western Journal of Agricultural Economics* 15 (2), pp 213-23.

Nordhaus W.D., 1991, « to slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect », Economic Journal, 101: 920-937.

Nordhaus, W.D. 1993. "Reflections on the Economics of Climate Change", *Journal of Economic Perspective*, 4 (7), 11-25.

Nordhaus W.D., 1994. "Locational Competition and the Environment: Should Countries Harmonize Their Environmental Policies?," Cowles Foundation Discussion Papers 1079, Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University.

Observatoire national des effets du réchauffement climatique; FRANCE. Direction générale de l'énergie et du climat; FRANCE. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer; FRANCE. Ministère de l'espace rural et de l'aménagement du territoire; FRANCE. Ministère de la santé et des sports; FRANCE. Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche; FRANCE. Délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires ; FRANCE. « Evaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France : Rapport de la deuxième phase ». ladocumentationfrançaise [pdf]. http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/094000464/index.shtml

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)-Service des sols - ressources, aménagement et conservation-Division de la mise en valeur des terres et des eaux de la FAO, 25 décembre 2010, " Zonage Agro-écologique – Directives", Bulletin Pédologique de la FAO, no. 73. FAO [document en ligne]. http://www.fao.org/docrep/w2962f/w2962f00.htm

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 1997, "Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes". FAO [on line]. http://www.fao.org/docrep/W5183E/W5183E00.htm

Olesen Jørgen E., Bindi Marco. 2002. "Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy", *European Journal of Agronomy*, 16, pp 239-262.

Onyeji, S.C., and G. Fischer. 1994. "An Economic Analysis of Potential Impacts of Climate Change in Egypt. Global Environmental Change (4), pp 281-299.

Oram, R.C. 1985. "Sensitivity of Agricultural Production to Climate Change", *Climatic Change* (7), pp129-152.

Parry, M. 1990. "Climate Change and World Agriculture", London, Petschel-Held, G., H.-J.

Projet RAB 94G31. 1998 "l'eau et les Changements Climatiques au Maghreb" Livre publié en dans le cadre du **projet RAB 94G31**: Il peut être déchargé du site www.ccmaghreb.com

Projet PNUD-FEM RAB 94G31. 2002 "le climat et la santé au Maghreb" livre publié dans le cadre du Projet PNUD-FEM RAB 94G31.

Projet de FEM/PNUD RAB/94/G31, 2002 « Vulnérabilité et Adaptation des Pays du Maghreb aux Changements Climatiques Alger ». 6èmes Journées du Comité Consultatif Technique Maghrébin sur les Changements Climatiques, 6–7 Mai.

Projet PNUD-FEM RAB94G31 (Novembre 2002) « Vulnérabilité et Adaptation des pays du Maghreb face aux changements Climatiques », COP8 à New delhi www.ccmaghreb.com

Qureshi, A., et A. Iglesias. 1994. "Implications of Global Climate Change for Agriculture in Pakistan: Impacts on Simulated Wheat Production". In: C. Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.

Reilly, J., et Hohmann, N. 1993. "Climate Change and Agriculture: The Role of International Trade". *The American Economic Review*, vol.83, No.2, pp 306-312.

Reilly, J., Hohmann N., et Kane S., 1994, "Climate Change and Agricultural Trade: Who Benefits, Who Loses?"? Global Environmental Change 4, no. 1: 24–36.

Reilly, John M., et 19 coauthors, 2001, "Agriculture: The Potential Consequences of Climate Variabilityand Change for the United States", US National Assessment of the Potential Consequences of Climate Variability and Change, US Global Change Research Program. New
York: Cambridge University Press.

Reinsborough, Michelle J, 2003, "A Ricardian Model of Climate Change in Canada". Canadian Journal of Economics, 36, no. 1 (February): 21–40.

Rosenzweig C., Parry M.L., Fischer, G., et Fromberg K., 1993. "Climate Change and World Food Supply". Research Report, (3). Environmental Change Unit, University of Oxford.

Rosenzweig C., et Parry M.L., 1994. "Potential impact of climate change on world food supply", *Nature*, 367, pp 133-138.

Rosenzweig C., et Hillel D., 1995. "Potential Impacts of Climate Change on Agriculture and Food Supply", Consequences, 1 (2).
http://www.gcrio.org/CONSEQUENCES/summer95/agriculture.html

Rosenzweig C., Iglesias A., Yang X.B., Epstein P.R., et Chivian E., 2001. "Climate change and extreme weather events. Implications for food production, plant diseases, and pests". Global Change & Human Health, 2 (2).

Rosenzweig Cynthia, Tubiello Francesco N., Goldberg Richard, Mills Evan, et Bloomfield Janine. 2002. "Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change". *Global Environmental Change*, 12, pp 197-202.

Saliba, Bonnie, C. 1987. "Do Water Markets 'Work'? Market Transfer and Trade-offs in the Southwestern States." *Water Resources Research* 23, pp 1113- 1122.

Sanghi, A. 1997 "The climate sensitivity of Brazilian agriculture: estimates from the Ricardian model". Paper presented at the workshop: Measuring the impacts of Climate Change on Indian and Brazilian agriculture, World Bank.

Santer, B. 1985. " The Use of General Circulation Models in Climate Impact Analysis – A Preliminary Study of Impacts of a CO2-Induced Climatic Change on Western European Agriculture". *Climatic Change* 7, pp 71-93.

Schelling, Thomas C. 1992. "Some Economics of Global Warming", *the American Economic Review*, Vol.82, No.1, pp 1-14.

Schellnhuber T., Bruckner F., Toth L., and Hasselmann K., 1999, "The Tolerable Windows Approach: Theoretical and methodological Foundations", Climatic Change, 41:pp 303-331.

Schimmelpfennig, D., J. Lewandrowski, J. Reilly, M. Tsigas, et I. Parry. 1996. "Agricultural Adaptation to Climate Change: Issues of Long run Sustainability". Vortrag gehalten auf der Konferenz Agricultural Economic Report, No. 740, Natural Resources and Environment Division, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture.

Schmalensee, R. 1993. "Symposium on Global Climate Change", *Economic Perspectives*, 4 (7), pp 3-11.

Schmidt-Hebel, K., et L. Serén. 1997. "Saving Across the World: Puzzles and Policies". *World Bank*, Discussion Paper, No. 354, Washington, D.C.

Seo N., Mendelsohn R. 2007 "A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on Latin American Farms", World Bank Policy Research Working Paper 4163.

Seo S. N., Mendelsohn R., et Munasinghe M. 2005 "Climate change and agriculture in Sri Lanka: a Ricardian valuation", Environment and Development Economics, 10, 581–596

Smit B., Brklacich M., Stewart R.B., McBride R., Brown M., et Bond D. 1989. "Sensitivity of Crop Yields and Land Resource Potential to Climatic Change in Ontario, Canada". *Climatic Change* 14, pp 153-174.

Smith J., et Hitz S. 2002. "Estimating the Global Damages from Climate Change".www.oecde.org/dataoecd/56/63/2487147.pdf

Springer, K. 1998. "The DART General Equilibrium Model: A Technical Description". *Kiel Working Paper*, No. 883, The Institute of World Economics, Kiel.

Stour, Agoumi, Snoussi. 2002. « Changements climatiques et Elévation du Niveau de la Mer» *Revue Marocaine de Génie Civil*, N 97.

Strzepek, K.M., S.C. Onyeji, M. Saleh, et D.N. Yates. 1994. " An Assessment of Integrated Climate Change Impacts on Egypt". Working Paper 94-48. International Institute for Applied Systems Analysis, Titus, J.G., Park, R.A., Leatherman, S.P., Weggel, J.R., Greene, M.S., Mausel.

Timins, C. January 2006. "Endogenous Land Use and the Ricardian Valuation of Climate Change." *Environmental and Resource Economics*, Vol. 33, n° 1, pp119-142.

Titus J.G., Park R.A., Leatherman S.P., Weggel J. R., Greene M.S., Mausel P.W., Brown S., Gaunt G., Trehan M., et Yohe G., 1991. "Greenhouse Effect and Sea-level Rise". The Cost of Holding Back the Sea. Coastal Management 19, pp 171-204.

Tol, R.S.J. 1999. "The Marginal Costs of Greenhouse Gas Emissions". *The Energy Journal*, 20(1), pp 61-81.

Tol, R.S.J. et al. 2001. "How Much Damage will Climate Change Do? Recent Estimates", World Economics, 1(4), pp179-206.

Tol, Richard S.J., Downing Thomas E., Kuik Onno J. et Smith Joel B. 2004. "Distributional aspects of climate change impacts". *Global Environmental* Change, 14, pp 259-272.

Toman, M. 2000. "Climate Change Risks and Policies: An Overview". Climate Issues Brief No. 1. http://www.rff.org/Documents/RFF-CCIB-01-REV.pdf

Toman, M. 1998. "Research Frontiers in the Economics of Climate Change". Discussion Paper 98-32.http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-98-32.pdf

Tongyai, C. 1994. "Impact of Climate Change on Simulated Rice Production in Thailand". In: C. Rosenzweig, and A. Iglesias (Eds.): Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study.

Tubiello F.N. et Ewert F., 2002, "Simulating the effects of elevated CO2 on crops: approaches and applications for climate change", European Journal of Agronomy, volume18, issues 1-2, 57-74. 07 Décembre 2007. Elsevier [PDF].
linkinghub.elsevier.com/retrieve/PII/S1161030102000977

Tubiello F.N., Soussana J.-F. et Howden S. M., 2007, "Crop and pasture response to climate change", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 11 Décembr e 2007; 104(50): 19686–19690. Publié en ligne le 6 Décembre 2007. doi: 10.1073/pnas.0701728104. PMCID: PMC2148358. 18 Décembre 2009. PubMed Central [PDF]. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2148358/pdf/zpq19686.pdf

U N E S C O - F A 0, "Carte Bioclimatique de la zone Méditerranéenne : *Notice explicative,* Physiologie et psychologie en milieu aride XII". Compte rendu de Recherches sur la zone aride Étude écologique de la zone méditerranéenne ;
http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001372/137255fo.pdf

Voss, R., et U. Mikolajewicz. 2000. "Long-Term Climate Changes Due to Increased CO2-Concentration in the Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model ECHAM3/ LSG" .*Climate Dynamics*.

Voss, R., Sausen R., et U. Cubasch. 1998. "Periodically Synchronously Coupled Integrations with the Atmosphere-Ocean General Circulation Model ECHAM3/LSG". *Climate Dynamics*,14, pp 249-266.

Williams, G.D.V., R.A. Fautley, K.H. Jones, R.B. Stewart, et E.E. Wheaton.1988. "The Effects of Climatic Variations on Agriculture in Saskatchewan, Canada". In: M.L. Parry, T.R. Carter, and N.T. Konijn (Eds.): The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Vol. 1 - Assessment in Cool Temperate and Cold Regions.

Yohe, G., Neumann, J., Marshall, P., et H. Ameden. 1996. "The Economic Cost of Greenhouse-Induced Sea-Level Rise for Developed Property in The United States". *Climatic Change*,32, pp 387-410.

Young, Robert, A. 1986. "Why Are There So Few Transactions Between Water Users?" *American Journal of Agricultural Economics* 68 (5), pp 1143 –51.

Annexes

Liste des Annexes

Annexe 1. Le problème de données manquantes *218*

Annexe 2. Homogénéité des données *220*

Annexe 3. Variabilité des mesures des paramètres climatiques *224*

Annexe 4. Résultats de l'étude des tendances : test de Spearman *230*

Annexe 5. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage universel de la température saisonnière et la précipitation saisonnière *242*

Annexe 6. Description des paramètres du modèle ricardien *258*

Annexe 7. Description des groupes de sol résultants de l'analyse factorielle des types de sol *261*

Annexe 8. Matrice de pondération *265*

Annexe 9. Différents tests d'autocorrélation spatiale et Test d'Hausman *268*

Annexe 1. Le problème de données manquantes

Tableau 1. Répartition du Nombre et du pourcentage de données manquantes sur la période de 1970-2007 selon les stations de mesure

Station météo	Données Température		Données Précipitation	
station	Nombre données manquantes	Pourcentage des données manquantes	Nombre données manquantes	Pourcentage des données manquantes
Bizerte	0	0	0	0
Tunis Carthage	0	0	0	0
Kelibia	0	0	0	0
Nabeul	143	31%	141	31%
Zaghouan	37	8%	35	8%
Béja	1	0	1	0
Jendouba	0	0	0	0
Tabarka	0	0	0	0
Le Kef	42	9%	26	6%
Siliana	56	12%	47	10%
Kairouan	0	0	0	0
Monastir	0	0	0	0
Mahdia	128	28%	71	15%
Sidi-Bouzid	29	6%	20	4%
Sfax	0	0	0	0
Gabes	0	0	0	0
Médenine	26	6%	21	5%
Djerba	0	0	0	0
Tataouine	251	55%	246	54%
Remada	0	0	0	0
Elborma	12	3%	11	2%
Gafsa	0	0	0	0
Kasserine	146	32%	144	32%
Thala	82	18%	82	18%
Tozeur	0	0	0	0
Kebili	221	48%	221	48%
TOTAL	1174	10%	1066	9%

Tableau 2. Attribution des stations voisins et de même étage bioclimatique à chaque station

Station	Liste des Stations voisin et même étage bioclimatique
Nabeul	Tunis*, Kelibia**, Zaghouan**
Monastir	Mahdia**
Djerba	Gabes**, Médenine**
Tunis	Nabeul*, Bizerte**, Kelibia**, Médenine **, Zaghouan*, Beja*
Gabes	Djerba*, Sfax*, Médenine *
Bizerte	Tunis**, Tabarka**, Jendouba**, Beja**
Mahdia	Monastir**, Sfax**, Kairouan**
Sfax	Gabes**, Mahdia**, Sidi-bouzid**
Kelibia	Nabeul**
Kebili	Tozeur*, Médenine **, Tataouine*, Elborma**, Gafsa*
Kairouan	Mahdia*, Sidi-bouzid**, Siliana*, Kasserine*
Tabarka	Bizerte**, Jendouba**
Tozeur	Kebili**, Gafsa**
Médenine	Djerba**, Kebili*, Tataouine*
Jendouba	Kef**
Zaghouan	Nabeul**, Tunis*, Kelibia*, Kairouan*, Beja*, Siliana**
Beja	Bizerte*, Tabarka*, Jendouba*, Siliana*
Tataouine	Kebili*, Médenine *, Elborma**, Remada**
El-borma	Kebili*, Tataouine**, Remada**
Remada	Kebili*, Tataouine**, El-borma**
Gafsa	Kebili*, Tozeur*, Sidi-bouzid**, Kasserine*
Sidi- bouzid	Kairouan**, Gafsa**, Kasserine*
Siliana	Kairouan*, Beja*, Kef**, Kasserine**
Kef	Tabarka*, Siliana**, Kasserine**, Thala**
Kasserine	Gafsa**, Sidi bouzid**, Siliana*, Kef*, Thala**
Thala	Siliana**, Kef**, Kasserine**

* Station voisin
** Station voisin et même étage bioclimatique

Annexe 2. Homogénéité des données

Tableau 3. Résultats des tests d'homogénéité des données pluviométrique pour chaque station

	Bizerte	**Tunis-Carthage**	**Kelibia**	**Nabeul**
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 52.575 m2 = 52.979	m1 = 39.76 m2 = 40.56	m1 = 42.36 m2 = 48.57	m1 = 32.96 m2 = 39.77
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 51.157 σ 2= 52.913	σ1= 42.84 σ 2= 46.39	σ1= 43.35 σ 2=52.51	σ1= 33.703 σ 2= 43.607
T-Test égalité de moyenne	t = -0.083 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -0.192 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.375 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.865 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir
Test Levin égalité des variances	f = 0.019 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.010 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 4.319 l'hypothèse d'égalité des variances est à rejeter	f = 6.538 l'hypothèse d'égalité des variances est à rejeter

	Zaghouan	**Beja**	**Jendouba**	**Tabarka**
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 39.32 m2 = 40.23	m1 = 47.98 m2 = 47.31	m1 = 31.98 m2 = 38.167	m1 = 36.11 m2 = 41.30
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 47.08 σ 2= 44.41	σ1= 44.66 σ 2= 45.27	σ1= 43.35 σ 2=52.51	σ1= 31.482 σ 2= 38.167
T-Test égalité de moyenne	t = -0.0214 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 0.160 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.583 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.583 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir
Test Levene égalité des variances	f = 0.239 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.092 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = -3.98 l'hypothèse d'égalité des variances est à rejeter	f = 3.98 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Kef	**Siliana**	**Kairouan**	**Monastir**
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 34.31 m2 = 38.86	m1 = 39.11 m2 = 38.86	m1 = 24.29 m2 = 26.48	m1 = 28.37 m2 = 30.44
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 30.06 σ 2= 35.09	σ1= 34.50 σ 2= 30.65	σ1= 30.91 σ 2=30.01	σ1= 44.51 σ 2= 36.22
T-Test égalité de moyenne	t = -1.486 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 2.496 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à rejeter	t = -0.767 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -5.45 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir
Test Levene égalité des variances	f = 2.946 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.313 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = -0.853 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.401 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 24.21 m2 = 28.88	m1 = 20.35 m2 = 21.39	m1 = 18.81 m2 = 19.15	m1 = 17.72 m2 = 15.72
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 38.47 σ 2= 36.79	σ1= 27.09 σ 2= 24.98	σ1= 29.30 σ 2=25.81	σ1= 31.13 σ 2= 28.95
T-Test égalité de moyenne	t = -1.325 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -0.425 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -0.132 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 0.357 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir
Test Levene égalité des variances	f = 0.687 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.018 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.735 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.184 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Médenine	Djerba	Tataouine	Remada
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 16.43 m2 = 13.52	m1 = 19.9 m2 = 17.89	m1 = 12.06 m2 = 11.66	m1 = 7.73 m2 = 7.29
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 27.62 σ 2= 21.6	σ1= 34.52 σ 2= 29.04	σ1= 18.02 σ 2=20.13	σ1= 15.17 σ 2= 13.16
T-Test égalité de moyenne	t = 1.253 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 0.672 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 0.222 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 0.332 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir
Test Levene égalité des variances	f = 5.351 l'hypothèse d'égalité des variances est à rejeter	f = 2.746 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.466 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.628 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 3.73 m2 = 4.21	m1 = 14.08 m2 = 13.89	m1 = 21.65 m2 = 23.84	m1 = 41.12 m2 = 31.04
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 8.47 σ 2= 10.16	σ1= 20.07 σ 2= 23.41	σ1= 19.48 σ 2=24.38	σ1= 31.86 σ 2= 27.72
T-Test égalité de moyenne	t = -0.783 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 0.096 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.061 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 3.601 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à rejeter
Test Levene égalité des variances	f = 0.942 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.036 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 7.258 l'hypothèse d'égalité des variances est à rejeter	f = 1.712 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Tozeur	Kebili
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 7.14 m2 = 8.2	m1 = 8.56 m2 = 8.37
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 11.21 σ 2= 15.13	σ1= 11.26 σ 2= 14.66
T-Test égalité de moyenne	t = -0.854 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 0.153 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir
Test Levene égalité des variances	f = 3.105 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 3.468 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

Tableau 4. Résultats des tests d'homogénéité des données température pour chaque station

	Bizerte	Tunis-Carthage	Kelibia	Nabeul
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 17.54 m2 = 18.46	m1 = 18.22 m2 = 19.96	m1 = 17.84 m2 = 18.75	m1 = 18.3 m2 = 19.27
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 5.47 σ 2= 5.68	σ1= 5.65 σ 2= 8.36	σ1= 5.04 σ 2=5.26	σ1= 5.12 σ 2= 5.39
T-Test égalité de moyenne	t = -1.771 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -2.601 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à rejeter	t = -1.89 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.95 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir
Test Levene égalité des variances	f = 0.939 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 2.283 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.941 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 1.305 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 17.95 m2 = 18.49	m1 = 17.02 m2 = 18.16	m1 = 17.73 m2 = 18.63	m1 = 17.5 m2 = 18.58
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 6.2 σ 2= 6.39	σ1= 6.25 σ 2= 6.52	σ1= 6.42 σ 2= 6.68	σ1= 4.93 σ 2= 5.42
T-Test égalité de moyenne	t = -0.917 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.913 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.458 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -2.232 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à rejeter
Test Levene égalité des variances	f = 0.678 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 1.136 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.979 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 5.045 l'hypothèse d'égalité des variances est à rejeter

	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 15.97 m2 = 16.87	m1 = 17.03 m2 = 17.42	m1 = 19.51 m2 = 20.6	m1 = 18.82 m2 = 19.87
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 6.87 σ 2= 6.93	σ1= 6.88 σ 2= 6.72	σ1= 6.36 σ 2=6.58	σ1= 5.474 σ 2= 5.655
T-Test égalité de moyenne	t = -1.395 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -0.613 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.803 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -2.021 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à rejeter
Test Levene égalité des variances	f = 0.215 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.001 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.629 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.611 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 18.45 m2 = 19.54	m1 = 18.18 m2 = 19.12	m1 = 18.60 m2 = 19.74
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 5.187 σ 2= 5.341	σ1= 6.447 σ 2= 6.642	σ1= 5.6 σ 2=5.823
T-Test égalité de moyenne	t = -2.197 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.547 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -2.134 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à rejeter
Test Levene égalité des variances	f = 0.515 hypothèse d'égalité des variances est retenue	f = 0.618 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.889 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Médenine	Djerba	Tataouine	Remada
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 20.36 m2 = 21.39	m1 = 19.73 m2 = 20.91	m1 = 20.82 m2 = 21.49	m1 = 20.46 m2 = 21.35
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 6.26 σ 2= 6.41	σ1= 5.42 σ 2= 5.74	σ1= 6.35 σ 2= 6.58	σ1= 6.54 σ 2= 6.86
T-Test égalité de moyenne	t = -1.74 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -2.25 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à rejeter	t = -1.11 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.41 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir
Test Levene égalité des variances	f = 0.454 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 1.387 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.954 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 1.342 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 21.14 m2 = 22.26	m1 = 18.8 m2 = 19.93	m1 = 16.95 m2 = 17.23	m1 = 15.36 m2 = 14.8
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 7.87 σ 2= 8.12	σ1= 7.18 σ 2= 7.41	σ1= 6.7 σ 2=6.85	σ1= 6.97 σ 2= 7.01
T-Test égalité de moyenne	t = -1.5 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.65 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -0.438 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = 0.856 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à rejeter
Test Levene égalité des variances	f = 0.552 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.622 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.432 l'hypothèse d'égalité des variances est à rejeter	f = 0.249 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

	Tozeur	Kebili	Gabes
Moyenne 1970/1988 1989/2007	m1 = 21.5 m2 = 22.33	m1 = 20.60 m2 = 21.44	m1 = 19.49 m2 = 20.36
Ecart type 1970/1988 1989/2007	σ1= 7.49 σ 2= 7.61	σ1= 7.47 σ 2= 7.6	σ1= 5.512 σ 2= 5.757
T-Test égalité de moyenne	t = -1.17 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.196 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir	t = -1.657 l'hypothèse d'égalité des moyennes est à retenir
Test Levene égalité des variances	f = 0.212 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.291 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir	f = 0.922 l'hypothèse d'égalité des variances est à retenir

Annexe 3. Variabilité des mesures des paramètres climatiques

Tableau 5. Valeurs des coefficients de variation des données sur précipitations annuelles par station

Station	Coefficient de variation %
Bizerte	22,8555791
Tunis-carthage	32,5188593
Kelibia	29,1999186
Nabeul	33,5885199
Zaghouan	34,5244884
Beja	24,2840866
Jendouba	28,1621397
Tabarka	19,0535837
Kef	26,7135416
Siliana	43,7525866
Kairouan	34,443229
Monastir	43,308176
Mahdia	41,0045961
sidi-bouzid	43,0052338
Sfax	38,2747039
Gabes	51,3274115
Médenine	46,2252026
Djerba	53,9902489
Tataouine	46,806758
Remada	58,8487171
Elborma	55,5253804
Gafsa	49,6866415
Kasserine	35,8545175
Thala	36,0664904
Tozeur	57,267319
Kebili	45,001505

Tableau 6. Valeurs des coefficients de variation des données sur les précipitations saisonnières par station

	Saison été	Saison Automne	Saison Hiver	Saison Printemps
Bizerte	99,22	40,49	38,85	37,19
Tunis-carthage	95,31	55,97	42,26	39,85
kelibia	113,46	46,16	42,20	37,85
Nabeul	90,56	48,24	51,44	45,56
Zaghouan	92,10	52,90	55,42	38,34
Beja	94,66	46,12	41,71	38,98
Jendouba	79,08	46,46	43,73	38,86
Tabarka	90,28	35,46	39,23	36,05
Kef	58,84	42,77	51,07	37,43
Siliana	55,59	67,90	54,38	61,93
Kairouan	93,42	51,59	71,09	48,36
Monastir	108,62	63,30	72,71	53,35
Mahdia	139,93	63,92	65,73	52,55
sidi-bouzid	76,57	41,78	80,73	54,29
Sfax	139,61	77,67	65,37	62,50
Gabes	114,97	82,24	76,06	63,95
Médenine	148,76	79,11	71,39	90,14
Djerba	189,39	78,79	80,73	88,51
Tataouine	166,88	78,88	67,44	97,21
Remada	164,28	92,54	71,35	115,72
Elborma	221,67	124,39	114,77	96,96
Gafsa	96,01	62,46	89,03	64,31
Kasserine	50,78	42,80	73,93	46,72
Thala	48,90	62,66	50,91	55,30
Tozeur	155,90	72,14	84,64	80,37
Kebili	116,86	75,50	69,36	67,08

Tableau 7. Valeurs des coefficients de variation des données sur les précipitations mensuelles par station

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Bizerte	53,05	65,83	68,76	57,23	63,51	117,70	208,90	184,88	87,97	69,44	55,35	61,68
Tunis-carthage	61,97	81,75	74,75	60,80	79,30	144,53	200,60	121,89	146,06	71,94	78,97	76,41
kelibia	62,81	84,34	67,62	61,56	86,22	137,53	310,61	199,26	94,67	71,72	72,62	58,58
Nabeul	77,59	94,56	76,47	60,28	84,46	128,72	203,54	124,52	95,11	60,54	87,70	73,61
Zaghouan	105,43	103,97	76,57	63,59	94,34	148,40	188,75	105,88	93,40	69,43	98,46	90,71
Beja	61,86	67,18	73,32	59,62	67,72	125,88	221,72	154,33	89,34	68,38	75,95	55,06
Jendouba	70,46	70,18	65,64	54,88	79,54	98,64	254,39	117,77	85,38	59,14	79,45	70,74
Tabarka	54,11	59,18	62,63	55,31	68,24	124,07	184,29	149,06	74,07	69,67	52,46	53,51
Kef	83,29	73,75	78,58	61,20	79,75	83,81	144,32	74,90	66,84	53,85	87,11	84,28
Siliana	100,94	90,89	77,76	88,10	93,22	89,40	89,18	84,45	92,20	120,22	79,63	70,26
Kairouan	108,79	107,82	80,76	78,20	92,40	124,82	211,96	124,35	101,62	78,82	97,79	138,95
Monastir	105,50	115,19	98,70	76,53	96,20	128,78	158,61	148,42	114,90	102,75	88,65	128,37
Mahdia	100,77	90,56	88,52	71,50	97,61	146,38	266,96	203,65	119,71	109,25	108,49	106,69
sidi-bouzid	160,50	92,91	83,01	84,27	115,54	118,26	138,46	117,10	85,80	77,77	88,29	186,13
Sfax	145,95	126,84	81,19	102,57	124,58	215,31	308,74	195,86	111,78	133,41	111,24	94,26
Gabes	159,60	104,30	92,42	93,33	163,84	148,83	254,29	284,25	143,54	155,10	129,45	115,35
Médenine	140,74	106,92	118,25	130,18	126,02	223,08	282,86	233,80	135,14	146,44	157,40	98,95
Djerba	162,43	109,07	97,94	129,11	113,42	144,11	333,31	333,41	135,72	138,57	117,65	86,86
Tataouine	125,39	125,66	116,49	97,15	220,80	185,65	265,24	214,95	154,03	202,25	82,77	94,75
Remada	175,53	137,82	145,22	140,22	200,92	205,06	466,93	336,32	123,67	195,78	128,26	110,21
Elborma	208,68	207,00	133,79	191,24	243,42	265,76	367,41	387,82	206,95	206,42	141,75	128,86
Gafsa	211,64	121,60	107,28	109,49	99,14	143,26	218,80	180,15	94,32	104,65	106,81	156,30
Kasserine	170,43	94,52	75,82	75,19	84,06	68,36	90,77	78,43	64,95	59,13	90,50	156,31
Thala	81,23	76,96	63,18	88,56	80,89	79,34	93,15	73,04	105,29	91,95	92,35	77,62
Tozeur	184,87	129,20	98,90	155,06	143,52	187,64	376,16	284,30	144,03	133,93	106,15	161,74
Kebili	147,54	118,79	92,23	117,68	126,79	195,31	252,77	169,05	132,82	147,49	111,79	114,42

Tableau 8. Valeur des coefficients des données sur la Température moyenne annuelle par station

Stations	Coefficient de variation
Bizerte	3,73
Tunis-carthage	9,23
kelibia	3,45
Nabeul	3,41
Zaghouan	3,31
Beja	4,94
Jendouba	3,97
Tabarka	4,26
Kef	4,48
Siliana	5,14
Kairouan	4,08
Monastir	3,72
Mahdia	3,75
sidi-bouzid	3,83
Sfax	4,16
Gabes	3,15
Médenine	3,60
Djerba	3,98
Tataouine	3,61
Remada	3,41
Elborma	3,74
Gafsa	4,10
Kasserine	3,60
Thala	8,51
Tozeur	3,06
Kebili	3,01

Tableau 9. Valeurs des coefficients de variation des données sur les températures moyennes saisonnières par station

	Saison été	Saison Automne	Saison Hiver	Saison Printemps
Bizerte	4,16	4,83	6,45	5,84
Tunis-carthage	4,78	5,30	41,42	7,33
kelibia	3,86	4,51	6,56	5,29
Nabeul	4,00	4,42	6,34	5,36
Zaghouan	3,28	4,98	8,89	6,37
Beja	4,78	6,01	8,33	7,75
Jendouba	4,02	5,22	8,30	6,83
Tabarka	5,49	5,28	8,12	6,20
Kef	3,99	6,08	13,19	8,89
Siliana	5,92	6,76	10,82	8,53
Kairouan	3,92	5,33	8,24	6,52
Monastir	3,79	4,85	7,05	5,47
Mahdia	4,05	5,00	8,11	5,36
sidi-bouzid	3,85	5,27	10,06	6,35
Sfax	4,07	5,20	7,53	5,66
Gabes	3,21	4,59	7,72	4,40
Médenine	3,46	5,22	8,66	5,88
Djerba	4,13	4,92	6,85	5,40
Tataouine	3,88	4,89	9,42	5,84
Remada	3,60	5,60	9,33	5,62
Elborma	3,41	6,06	10,43	5,61
Gafsa	3,64	5,80	9,18	6,40
Kasserine	3,57	4,85	12,68	7,50
Thala	5,53	8,92	24,43	14,19
Tozeur	2,79	4,62	7,55	5,29
Kebili	2,81	4,74	8,47	5,28

Tableau 10. Valeurs des coefficients de variation des données sur la Température mensuelle par station

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Bizerte	8,27	9,39	8,19	7,07	7,59	5,35	4,68	4,57	4,63	7,49	6,72	7,62
Tunis-carthage	111,10	10,21	10,46	8,14	8,10	6,01	5,15	4,93	4,53	8,04	7,44	8,81
kelibia	8,42	8,73	7,96	5,93	6,03	4,56	4,68	3,92	3,89	6,76	6,43	7,81
Nabeul	8,35	8,51	7,79	5,89	5,85	4,76	4,69	3,96	3,77	6,74	6,26	7,57
Zaghouan	10,49	12,23	9,91	7,75	7,72	5,20	3,96	4,92	4,70	8,35	7,77	10,51
Beja	10,75	11,15	10,73	9,21	9,53	6,48	5,48	5,23	5,49	9,13	8,67	9,90
Jendouba	10,90	11,22	10,31	8,40	8,49	5,83	4,69	4,86	5,08	8,00	7,68	9,77
Tabarka	10,54	10,28	8,83	7,56	8,69	7,16	6,18	5,79	5,65	7,86	7,07	8,99
Kef	16,92	16,85	14,44	12,10	10,66	6,61	5,18	5,14	8,60	10,44	10,16	14,76
Siliana	14,76	14,11	13,24	11,21	10,44	7,70	6,67	6,54	8,47	9,82	8,93	12,82
Kairouan	9,77	10,47	10,02	7,75	7,13	4,98	4,27	4,55	4,48	8,04	7,70	9,50
Monastir	8,83	8,48	8,37	6,28	6,41	4,80	4,26	4,01	3,91	6,83	7,43	8,19
Mahdia	9,47	8,92	7,75	8,25	5,97	6,48	4,11	4,65	4,13	7,09	7,63	10,07
sidi-bouzid	12,49	12,24	10,59	7,87	7,73	5,72	4,29	4,27	4,57	8,36	8,67	12,32
Sfax	9,25	8,76	8,81	6,46	6,28	4,86	4,70	4,15	4,08	7,36	7,72	8,83
Gabes	9,98	8,85	7,33	5,28	5,03	3,60	3,91	3,30	3,50	6,78	7,24	9,60
Médenine	11,18	10,23	8,65	7,08	7,52	5,19	4,81	3,67	4,22	8,47	8,30	11,26
Djerba	8,64	7,97	7,85	6,24	6,43	5,08	4,81	3,98	4,01	6,94	6,88	7,75
Tataouine	12,22	12,21	8,99	7,08	7,49	5,65	5,04	4,45	4,85	8,23	7,78	12,81
Remada	12,75	11,41	9,58	7,03	7,02	5,12	5,20	4,33	4,99	9,11	8,60	12,38
Elborma	13,71	11,48	10,17	7,14	6,57	4,83	5,18	4,65	5,01	9,22	9,70	13,56
Gafsa	12,01	11,22	10,30	7,91	7,58	4,66	4,43	4,34	4,49	8,66	9,46	11,15
Kasserine	17,48	15,30	12,39	9,90	9,23	5,86	4,72	4,25	5,12	8,93	9,73	15,51
Thala	32,05	29,28	21,38	17,14	13,92	8,25	6,27	6,21	9,12	12,51	15,87	25,54
Tozeur	10,38	9,65	8,49	6,21	6,69	3,79	3,74	3,31	3,65	7,51	7,62	9,14
Kebili	12,34	9,66	8,92	6,38	6,76	3,84	3,73	3,30	3,55	7,69	8,02	10,36

Annexe 4. Résultats de l'étude des tendances : test de Spearman

Tableau 11. Etude de la tendance de la précipitation

- Tendance annuelle

Précipitation Annuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,01	0,03	0,16	0,20	0,02	0,00	0,17	0,12

Précipitation Annuelle	Stations							
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,25	-0,19	-0,02	0,06	0,15	-0,02	-0,01	-0,18	-0,13

Précipitation Annuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,09	0,03	0,04	0,16	-0,11	0,12	-0,15	0,01	-0,05

- Tendance saisonnière

- Saison Été :

Précipitation Saisonnière	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,06	0,318	0,22	0,29	0,17	0,15	0,09	0,08

Précipitation Saisonnière	Stations							
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,177	-0,163	-0,054	0,263	0,101	0,193	0,21	-,029	0,254

Précipitation Saisonnière	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,221	-,397**	-0,165	-0,225	-0,054	0,229	-0,15	0,204	0,017

- Saison Automne :

Précipitation Saisonnière	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,04	-0,07	-0,002	0,046	-0,03	-0,08	0,01	0,07

Précipitation Saisonnière	Stations							
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,28	-0,28	-0,17	0,002	0,03	-0,32	-0,27	-0,13	-0,1

Précipitation Saisonnière	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,07	0,01	0,08	0,26	-0,05	0,1	-,36**	-0,07	-0,02

- Saison Hiver :

Précipitation Saisonnière	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,05	0,06	0,26	0,14	0,01	0,08	0,24	0,26

Précipitation Saisonnière	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,27	-0,07	-0,11	-0,09	0,17	-0,02	-0,06	-0,09	-0,07

Précipitation Saisonnière	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,05	-0,08	0,10	0,06	-0,15	0,05	0,11	-0,04	-0,18

- Saison Printemps :

Précipitation Saisonnière	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,33*	-0,25	-,005	-0,09	-0,28	-0,27	-0,1	-0,27

Précipitation Saisonnière	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	-,18	-,03	-,05	-,05	,31	-,07	,14	,06	-,009

Précipitation Saisonnière	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,008	-0,105	-0,046	-0,098	-0,118	-0,146	-0,041	-0,054	-0,111

- Tendance mensuelle

- Mois Janvier

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,008	0,100	0,1	0,057	0,04	0,09	0,19	0,15

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,19	-0,22	0,06	0,09	0,34**	-0,01	0,15	0,12	-0,011

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,13	-0,21	-0,03	0,19	-0,09	-0,02	-0,11	-0,04	-0,06

- Mois Février

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,25	-0,12	-0,005	-0,07	-0,07	-0,22	-0,11	-0,19

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	-0,005	-0,12	-0,22	-0,1	-0,03	-0,14	-0,19	-0,26	-0,11

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,09	-0,19	-0,11	0,07	-0,28	-0,08	-0,01	-0,18	-0,27

- Mois Mars

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,27	-0,23	-0,13	-0,18	-0,37**	-0,19	-0,07	-0,35**

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	-0,1	-0,17	-0,19	-0,09	0,17	-0,25	-0,02	-0,25	0,009

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,14	-0,12	-0,08	-0,16	-0,32**	-0,33**	-0,08	-0,29	-0,34**

- Mois avril

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,03	-0,09	0,09	0,07	-0,10	-0,01	-0,03	-0,04

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	-0,11	-0,07	-0,01	-0,1	0,2	0,18	0,13	0,2	-0,01

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,06	-0,1	-0,12	0,22	0,12	-0,04	-0,12	0,13	-0,05

- Mois Mai

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,12	-0,03	-0,08	-0,08	0,09	-0,16	-0,03	0,000

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	-0,04	0,11	0,09	0,19	0,31	0,13	0,26	0,01	-0,17

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,01	0,17	0,02	0,19	0,08	0,03	0,11	-0,08	-0,16

- Mois Juin

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,190	0,105	0,184	0,236	0,241	0,082	0,187	0,203

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,196	-0,051	0,152	0,152	0,131	0,240	0,212	-0,020	0,040

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,069	-0,401**	-0,155	-0,225	0,098	0,179	-0,141	-0,003	-0,200

- Mois Juillet

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,21	0,24	-0,02	-0,01	0,28	0,16	0,02	-0,19

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	-0,007	-0,23	0,12	0,32**	0,14	0,004	0,18	-0,09	0,06

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,002	-0,41*	-0,03	0,05	0,15	-0,11	-0,24	0,26	-0,53*

- Mois Août

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,07	0,04	0,11	0,007	0,1	-0,002	-0,05	0,14

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,16	-0,05	-0,09	0,16	-0,05	0,18	0,2	0,18	0,34**

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,26	-0,44*	0,07	-0,14	0,08	0,07	-0,07	0,34**	0,06

- Mois Septembre

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,31	0,32**	0,22	0,23	0,3	0,1	0,14	0,34**

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,26	-0,47*	0,08	0,23	0,10	-0,14	-0,02	0,02	-0,03

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,07	-0,13	0,14	0,03	0,07	0,14	-0,28	0,08	0,02

- Mois Octobre

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	-0,32**	-0,28	-0,09	-0,09	-0,17	-0,26	-0,07	-0,27

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	-0,06	-0,11	-0,006	-0,06	0,02	-0,23	-0,25	-0,11	-0,07

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,000	0,28	0,16	0,16	-0,18	0,09	-0,17	0,006	-0,19

- Mois Novembre

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,16	0,04	0,06	-0,05	-0,07	0,08	0,14	0,2

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,24	-0,05	-0,11	0,05	0,1	0,01	0,04	-0,02	0,05

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	-0,02	-0,16	-0,09	0,2	0,06	0,005	-0,13	0,006	0,02

- Mois Décembre

Précipitation Mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,32**	0,25	0,35**	0,28	0,18	0,45*	0,31	0,39**

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,24	0,2	0,06	0,07	0,28	0,11	0,09	0,03	0,003

Précipitation Mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,05	0,1	0,12	0,05	0,12	0,15	0,19	0,18	-0,02

** Variable Significative à 5%,* Variable Significative à 10%

Tableau 12. Etudes de la tendance de la température

- Tendance annuelle

Température annuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,78*	0,86*	0,81*	0,8*	0,59*	0,82*	0,72*	0,79*

Température annuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,74*	0,52*	0,86*	0,88*	0,79*	0,81*	0,88*	0,84*	0,85*

Température annuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,87*	0,66*	0,78*	0,84*	0,85*	0,21	-0,08	0,71*	0,74*

- Tendance saisonnière

- Saison Été :

Température saisonnière	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,69*	0,79*	0,77*	0,78*	0,55*	0,73*	0,68*	0,73*

Température saisonnière	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,62*	0,31	0,76*	0,77*	0,7*	0,66*	0,78*	0,73*	0,55*

Température saisonnière	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,76*	0,45*	0,6*	0,66*	0,72*	0,36**	-0,04	0,57*	0,56*

- Saison Automne :

Température saisonnière	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,67*	0,79*	0,68*	0,65*	0,57*	0,75*	0,65*	0,61*

Température saisonnière	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,55*	0,44*	0,72*	0,74*	0,67*	0,75*	0,77*	0,77*	0,74*

Température saisonnière	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,83*	0,75*	0,77*	0,81*	0,77*	0,29	-0,05	0,71*	0,69*

- Saison Hiver :

Température saisonnière	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,26	0,45*	0,14	0,12	0,08	0,36**	0,15	0,02

Température saisonnière	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,24	0,08	0,31	0,34**	0,35**	0,22	0,43*	0,2	0,28

Température saisonnière	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,4**	0,13	0,13	0,19	0,27	-0,22	-0,44*	0,13	0,14

- Saison Printemps :

Température saisonnière	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,72*	0,77*	0,71*	0,71*	0,43*	0,73*	0,66*	0,8*

Température saisonnière	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,6**	0,35**	0,69*	0,78*	0,53*	0,59*	0,74*	0,67*	0,62*

Température saisonnière	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,71*	0,35**	0,5*	0,68*	0,7*	0,15	-0,12	0,56*	0,57*

- Tendance Mensuelle

- Mois Janvier

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,07	0,33**	0,04	0,06	-0,02	0,19	-0,01	-0,09

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,03	-0,006	0,16	0,2	0,28	0,1	0,33**	0,06	0,23

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,25	0,02	0,000	0,07	0,10	-0,27	-0,42*	0,02	-0,009

- Mois Février

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,08	0,25	0,09	0,11	0,02	0,22	0,13	0,03

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,13	0,001	0,18	0,16	0,20	0,10	0,25	0,07	0,13

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,21	-0,01	-0,008	0,14	0,14	-0,21	-0,5*	0,099	0,12

- Mois Mars

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,4**	0,57*	0,44*	0,41*	0,17	0,52*	0,42*	0,48*

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,42*	0,3	0,49*	0,51*	0,28	0,38**	0,46*	0,37**	0,45*

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,48*	0,19	0,26	0,38**	0,5*	0,13	-0,18	0,44*	0,39**

- Mois Avril

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,56*	0,7*	0,62*	0,67*	0,33**	0,66*	0,6*	0,65*

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,54*	0,32**	0,6*	0,7*	0,54*	0,46*	0,66*	0,55*	0,46*

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,61*	0,33**	0,43*	0,42*	0,57*	0,19	-0,20	0,45*	0,39**

- Mois Mai

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,660*	0,72*	0,68*	0,7*	0,44*	0,65*	0,54*	0,66*

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,46*	0,32	0,58*	0,68*	0,584**	0,46*	0,69*	0,655*	0,54*

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,64*	0,37**	0,47*	0,59*	0,55*	0,27	-005	0,441*	0,443*

- Mois Juin

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,63*	0,72*	0,67*	0,69*	0,42*	0,62*	0,54*	0,73*

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,49*	0,38**	0,62*	0,73*	0,54*	0,53*	0,71*	0,65*	0,47*

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,67*	0,16	0,18	0,13	0,52*	0,25	-0,03	0,37**	0,37**

- Mois Juillet

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,59*	0,72*	0,65*	0,7*	0,29	0,59*	0,46*	0,66*

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,38**	0,1	0,62*	0,61*	0,62*	0,49*	0,65*	0,63*	0,35**

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,64*	0,31	0,43*	0,47*	0,52*	0,22	-0,18	0,37**	0,37**

- Mois Août

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,51*	0,66*	0,67*	0,68*	0,32**	0,53*	0,45*	0,58*

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,3	0,14	0,59*	0,61*	0,66*	0,59*	0,77*	0,75*	0,61*

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,78*	0,48*	0,61*	0,65*	0,68*	0,35**	-0,14	0,56*	0,51*

- Mois septembre

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,51*	0,66*	0,36**	0,3	0,24	0,39**	0,26	0,32**

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,24	0,19	0,4**	0,45*	0,41*	0,34**	0,6*	0,59*	0,56*

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,66*	0,38**	0,47*	0,54*	0,55*	-0,05	-0,29	0,32**	0,31

- Mois Octobre

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,193	0,502*	0,613*	0,629*	0,504*	0,642*	0,584*	0,592*

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,62*	0,46*	0,68*	0,7*	0,67*	0,68*	0,7*	0,69*	0,59*

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,71*	0,6*	0,6*	0,64*	0,69*	0,38**	0,05	0,63*	0,6*

- Mois Novembre

Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,5*	0,59*	0,54*	0,49*	0,36**	0,62*	0,5*	0,43*

Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,48*	0,38**	0,64*	0,64*	0,58*	0,53*	0,7*	0,63*	0,62*

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,79*	0,59*	0,59*	0,62*	0,6*	0,14	-0,17	0,53*	0,52*

- Mois Décembre

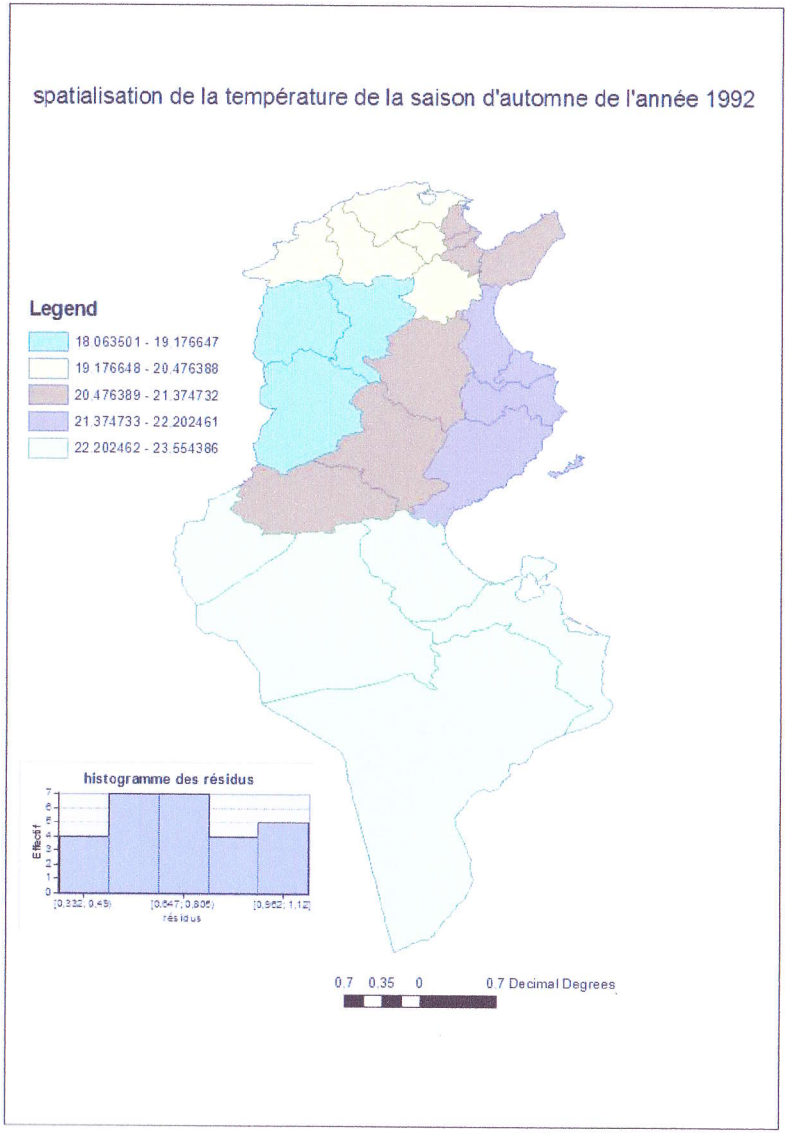
Température mensuelle	Stations							
	Bizerte	Tunis-carthage	kelibia	Nabeul	Zaghouan	Beja	Jendouba	Tabarka
Coefficient de Spearman	0,35**	0,40**	0,15	0,07	0,12	0,38**	0,23	0,12

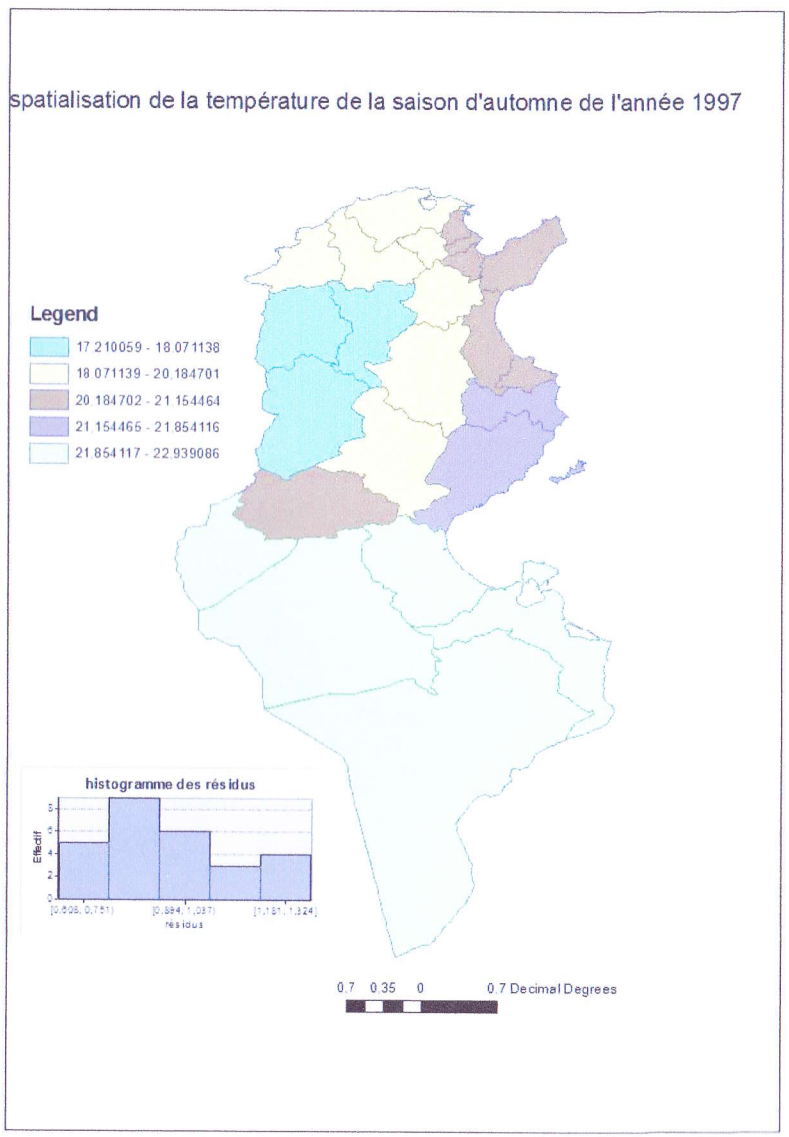
Température mensuelle	Stations								
	Kef	Siliana	Kairouan	Monastir	Mahdia	Sidi-bouzid	Sfax	Gabes	Médenine
Coefficient de Spearman	0,29	0,09	0,38**	0,37**	0,32**	0,23	0,45*	0,23	0,25

Température mensuelle	Stations								
	Djerba	Tataouine	Remada	Elborma	Gafsa	Kasserine	Thala	Tozeur	Kebili
Coefficient de Spearman	0,45*	0,14	0,13	0,24	0,28	-0,16	-0,39**	0,19	0,19

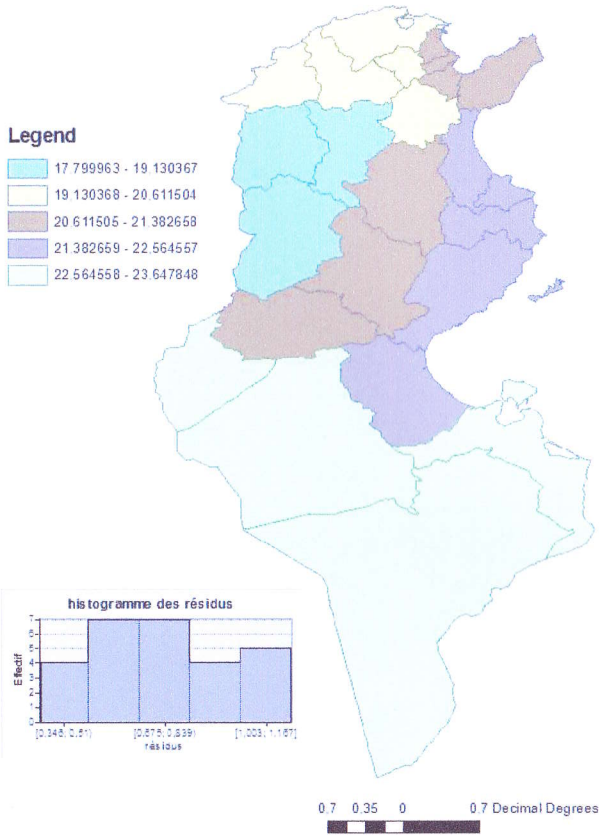
** Variable Significative à 5%, * Variable Significative à 10%

Annexe 5. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage universel de la température saisonnière et la précipitation saisonnière

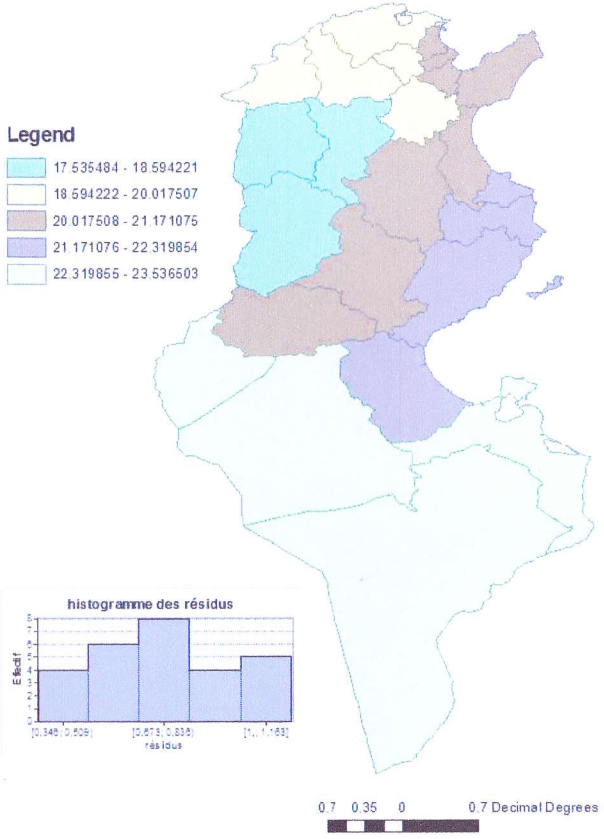




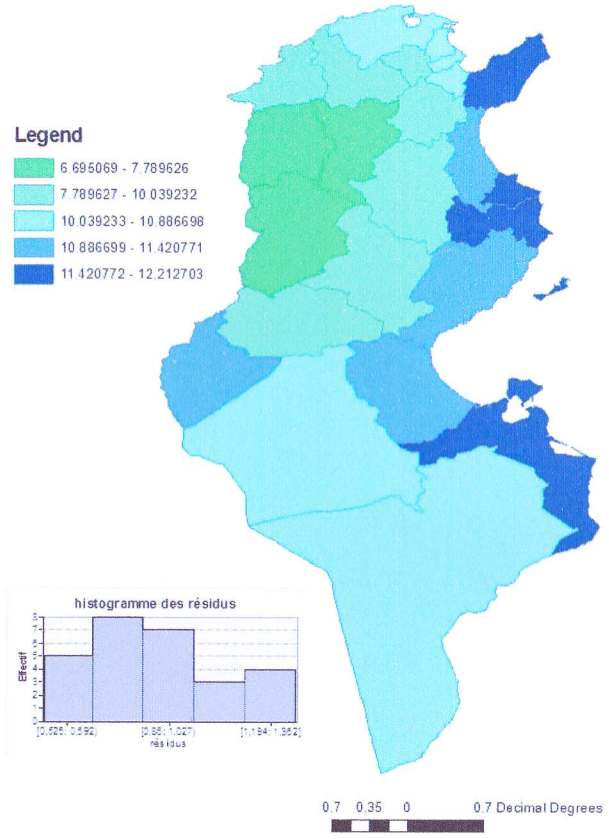
spatialisation de la température de la saison d'automne de l'année 2002



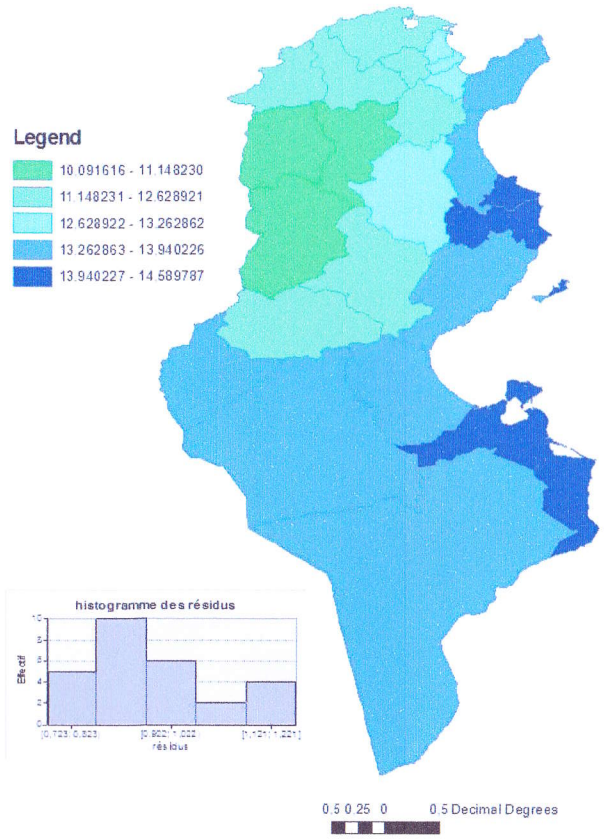
spatialisation de la température de la saison d'automne de l'année 2007



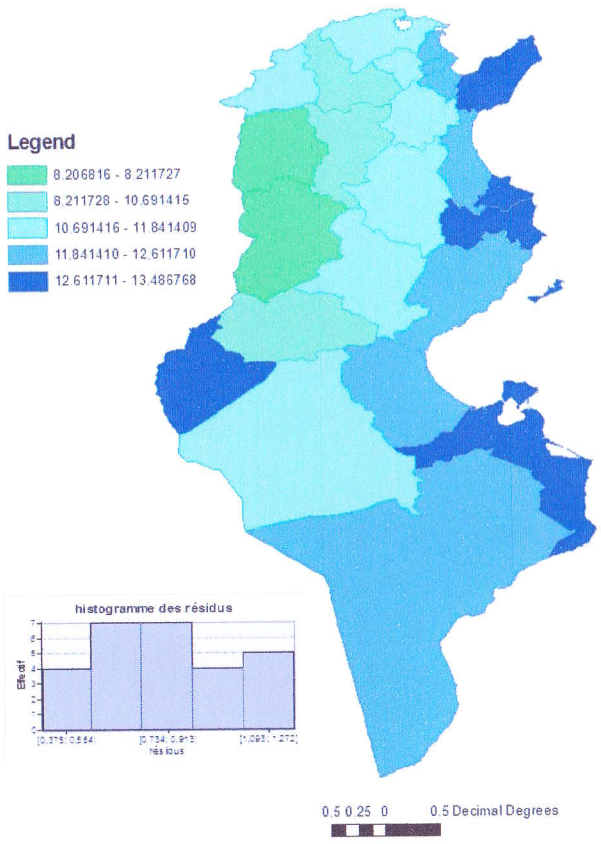
spatialisation de la température de la saison d'hiver de l'année 1992



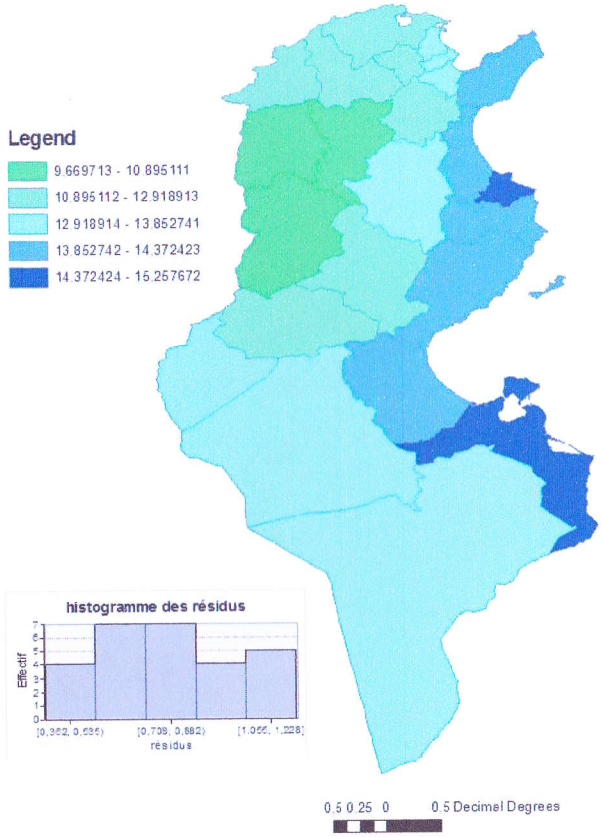
spatialisation de la température de la saison d'hiver de l'année 1997



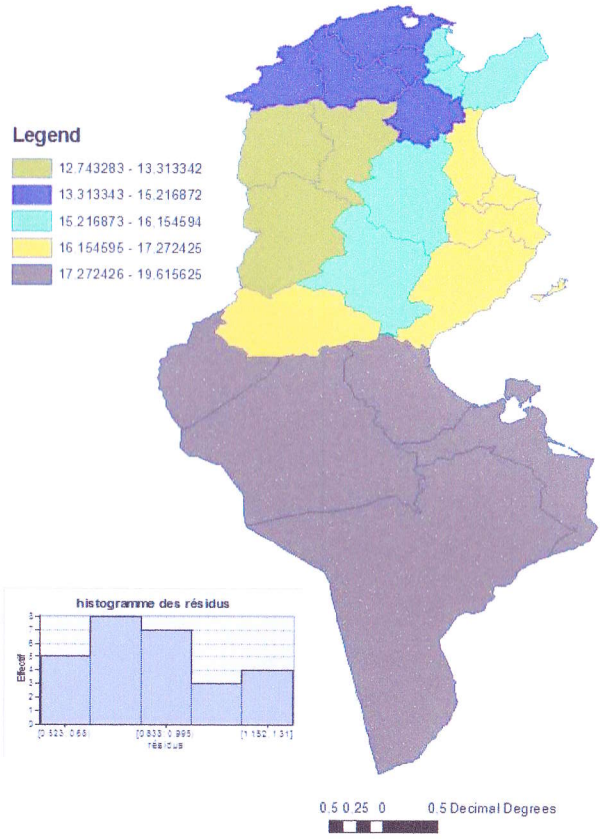
spatialisation de la température de la saison d'hiver de l'année 2002



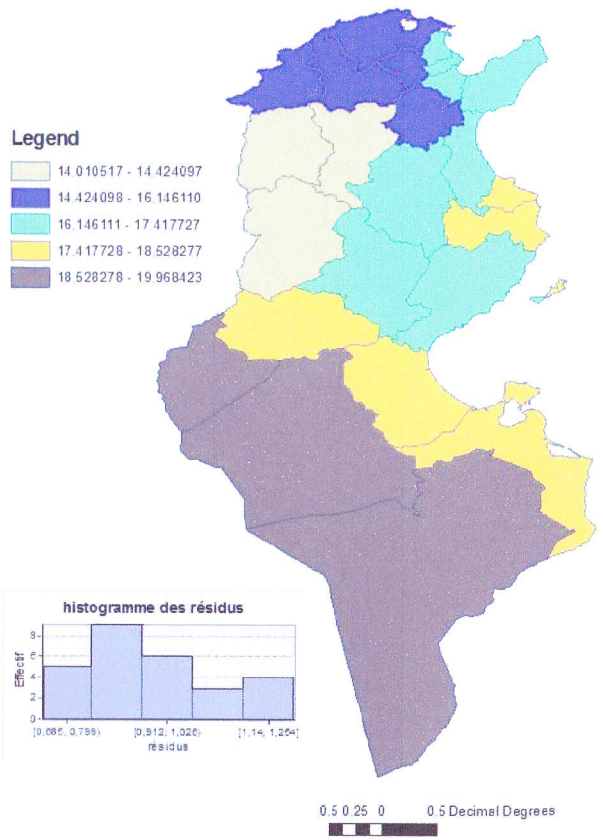
spatialisation de la température de la saison de l'hiver de l'année 2007



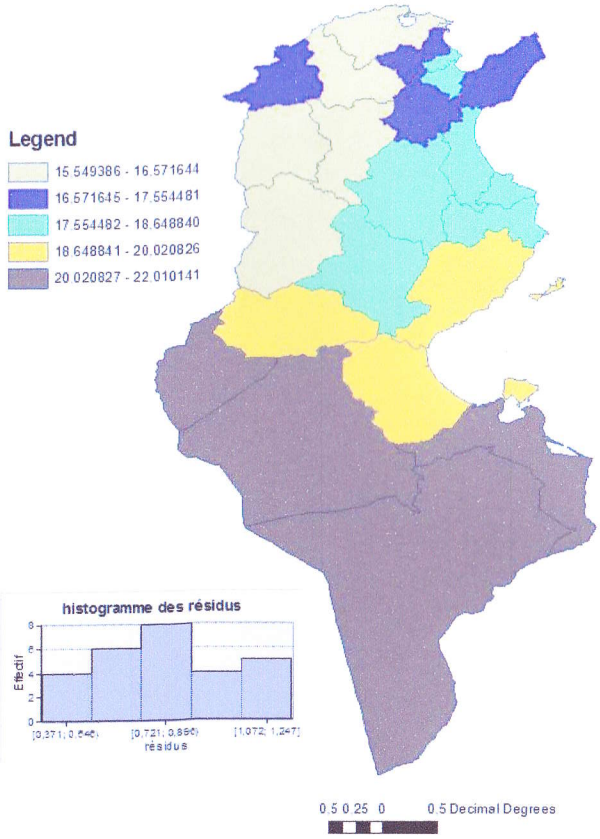
spatialisation de la température de la saison du printemps de l'année 1992



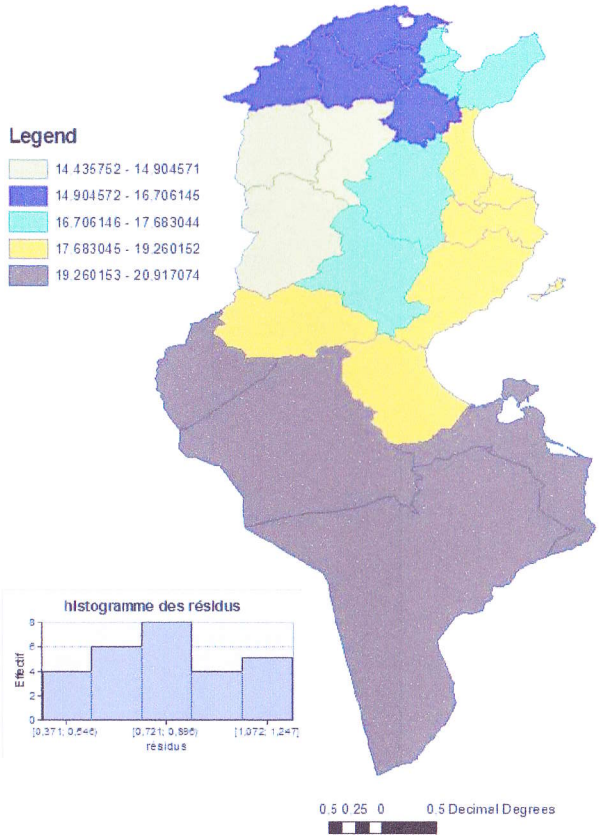
spatialisation de la température de la saison du printemps de l'année 1997



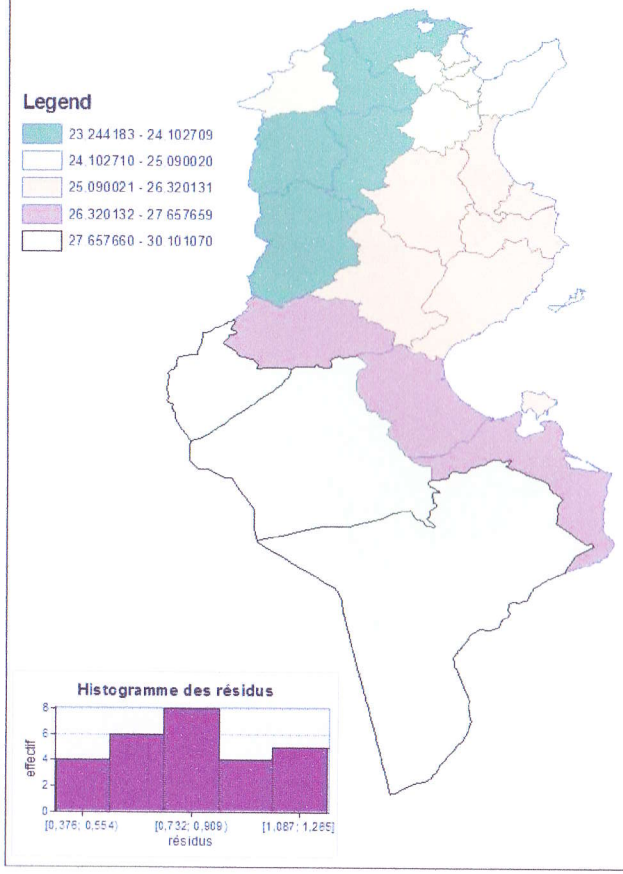
spatialisation de la température de la saison du printemps de l'année 2002



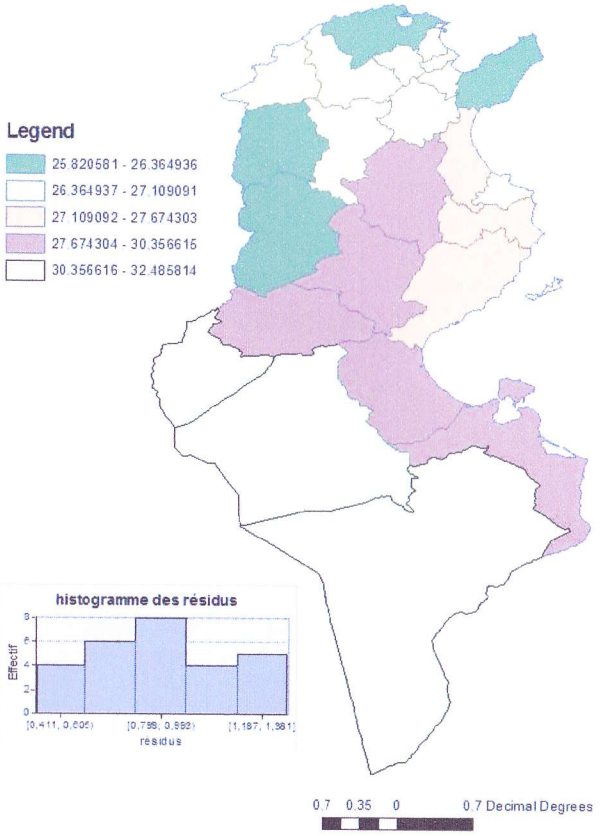
spatialisation de la température de la saison du printemps de l'année 2007



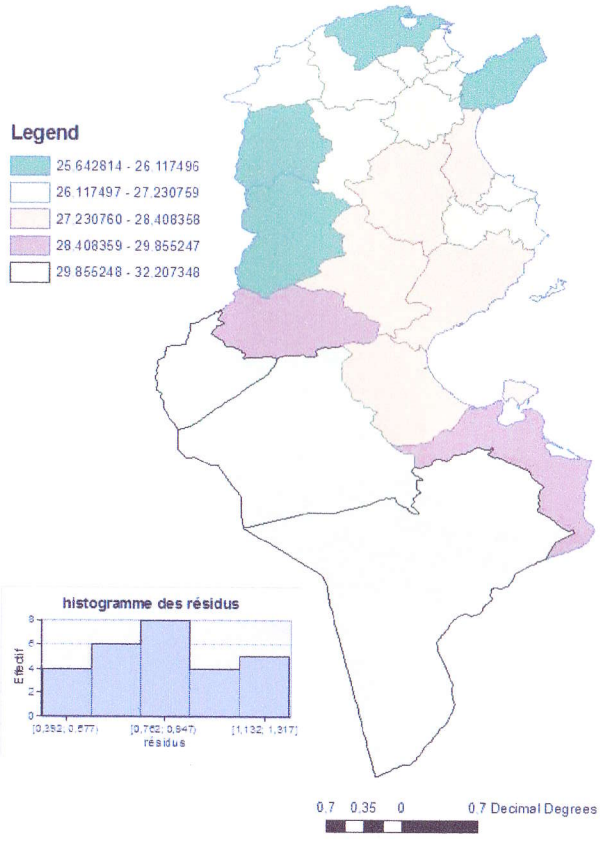
spatialisation de la température de la saison d'été de l'année 1992



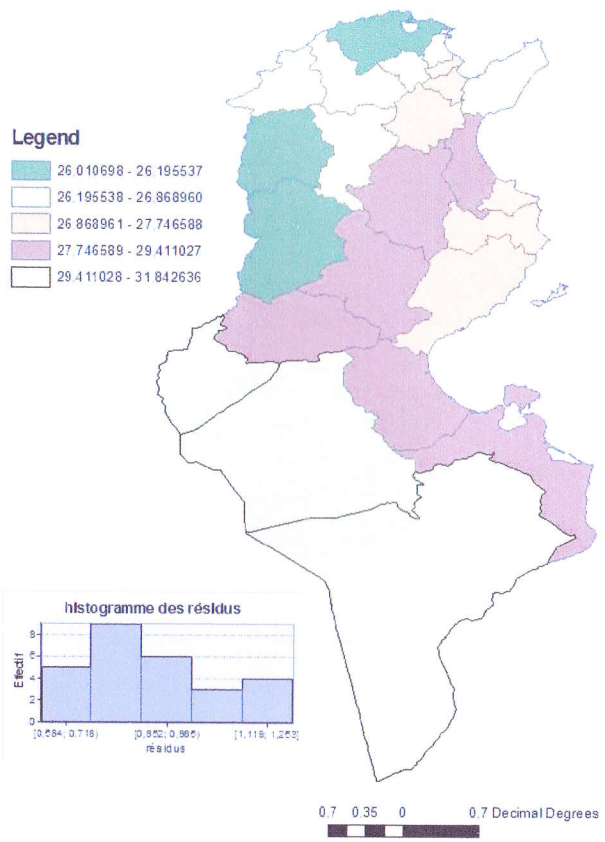
spatialisation de la température de la saison d'été de l'année 1997



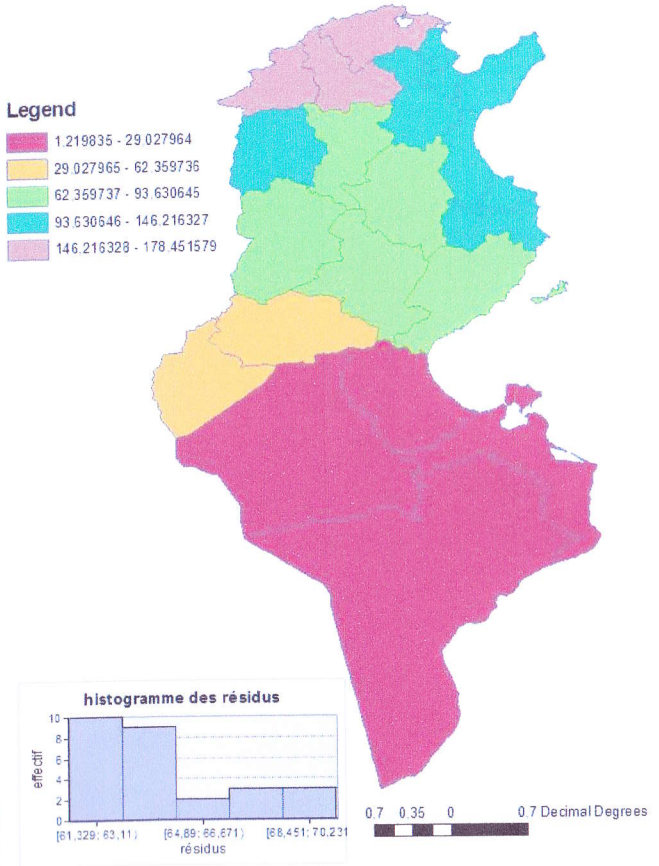
spatialisation de la température de la saison d'été de l'année 2002



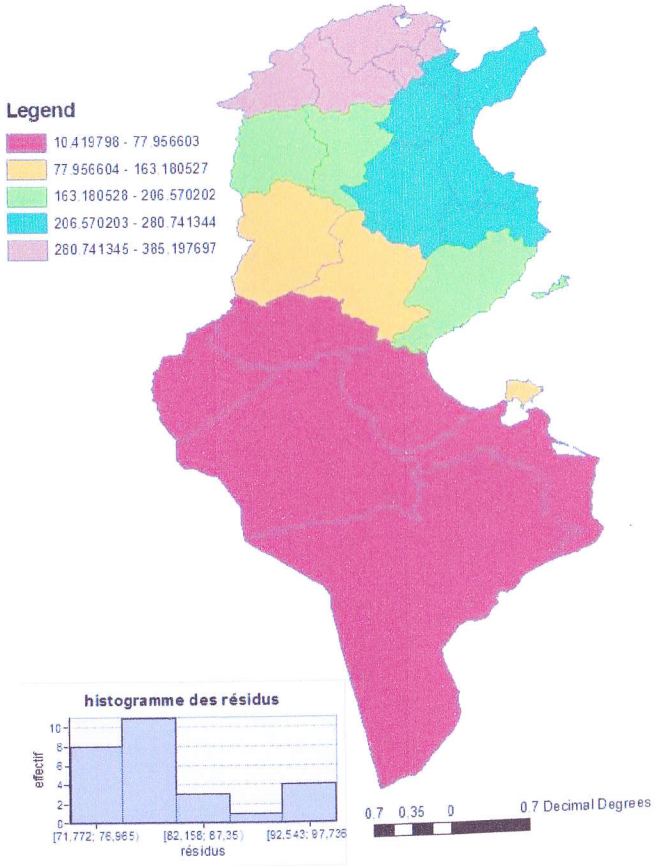
spatialisation de la température de la saison d'été de l'année 2007



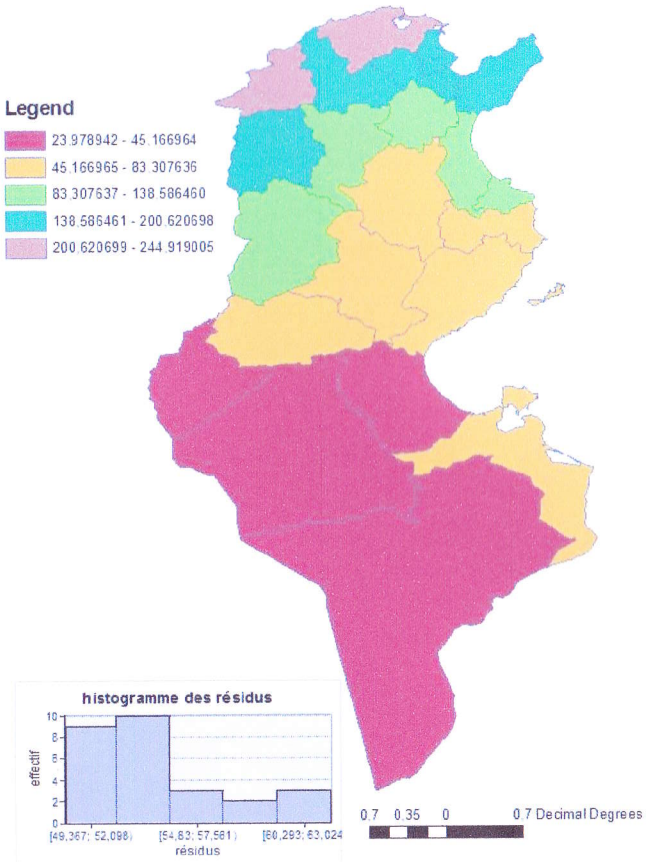
spatialisation des précipitations de la saiaon d'automne de l'année 1992



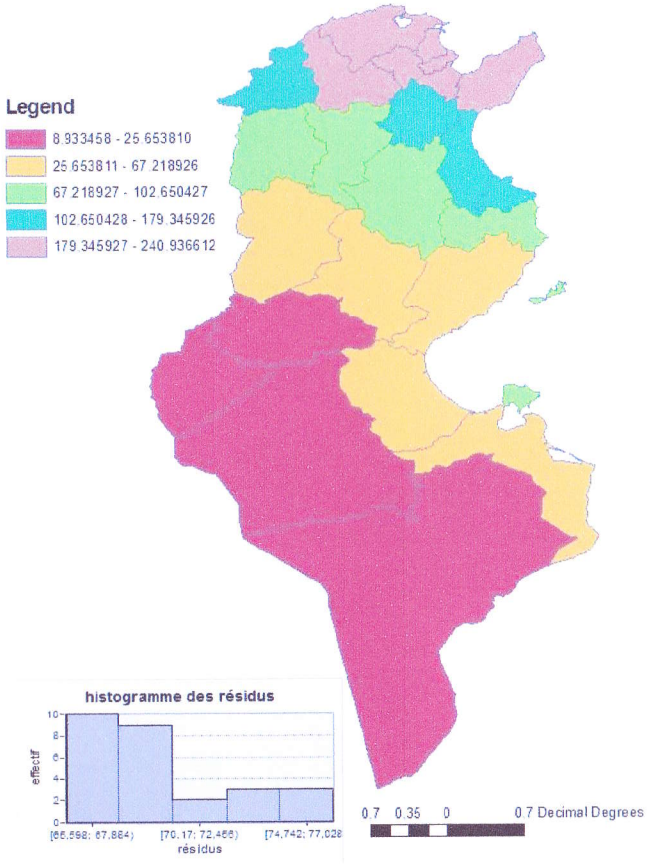
spatialisation des précipitations de la saiaon d'automne de l'année 1997



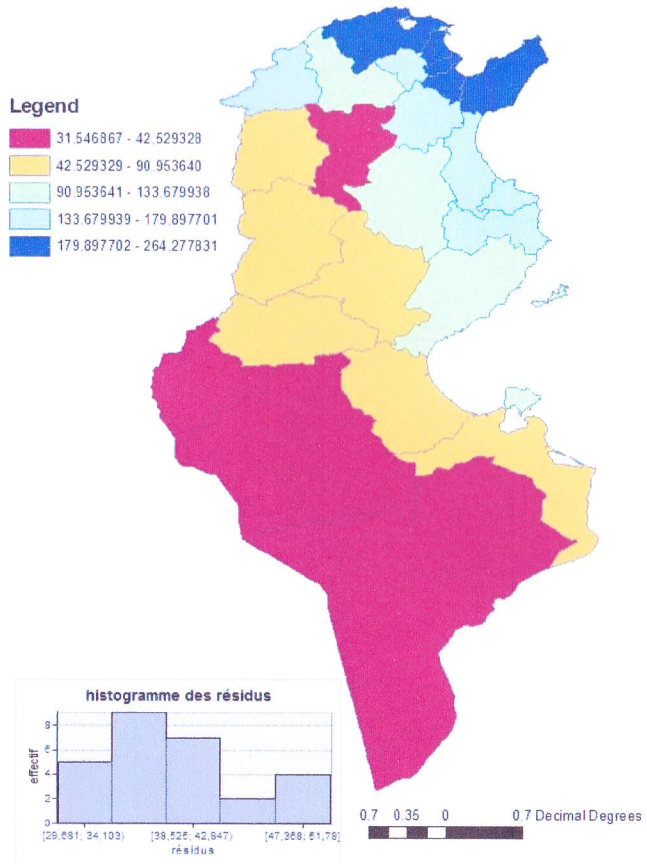
spatialisation des précipitations de la saiaon d'automne de l'année 2002



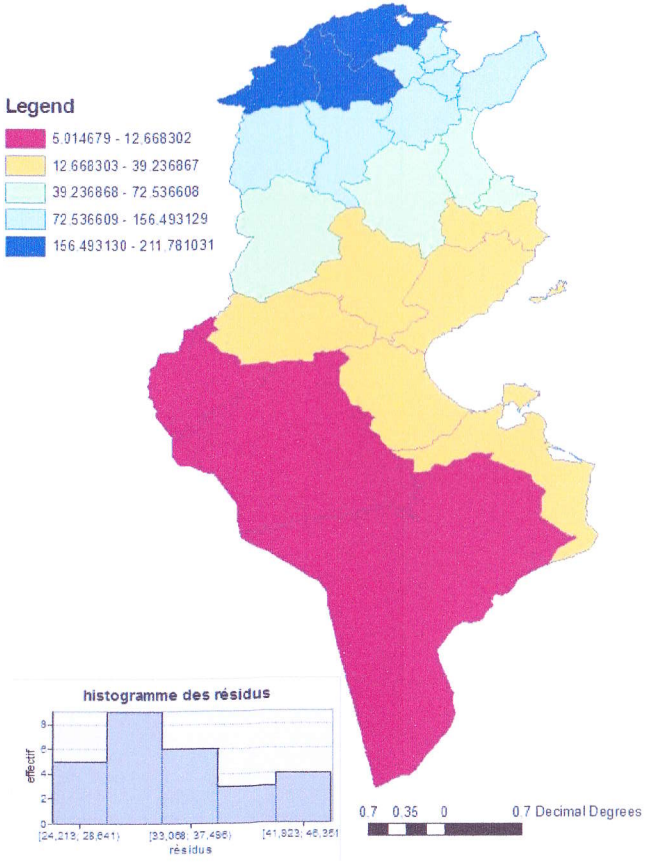
spatialisation des précipitations de la saiaon d'automne de l'année 2007

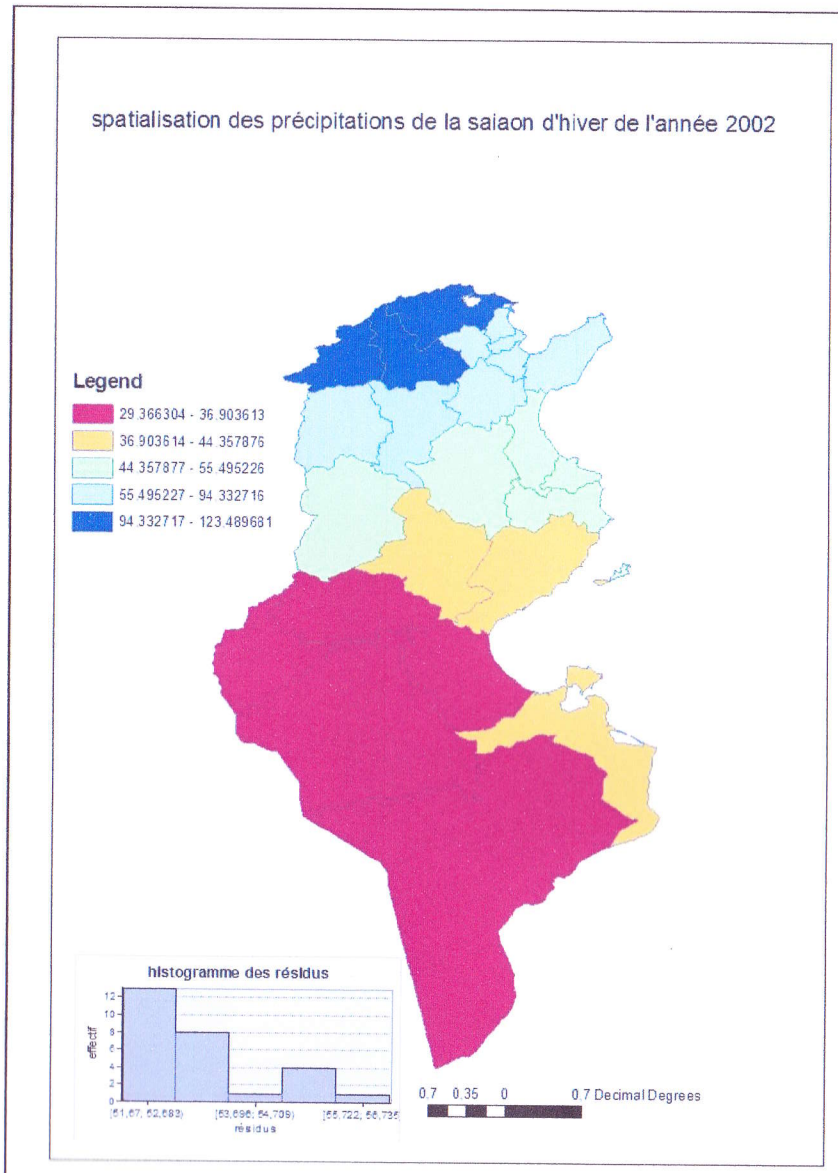


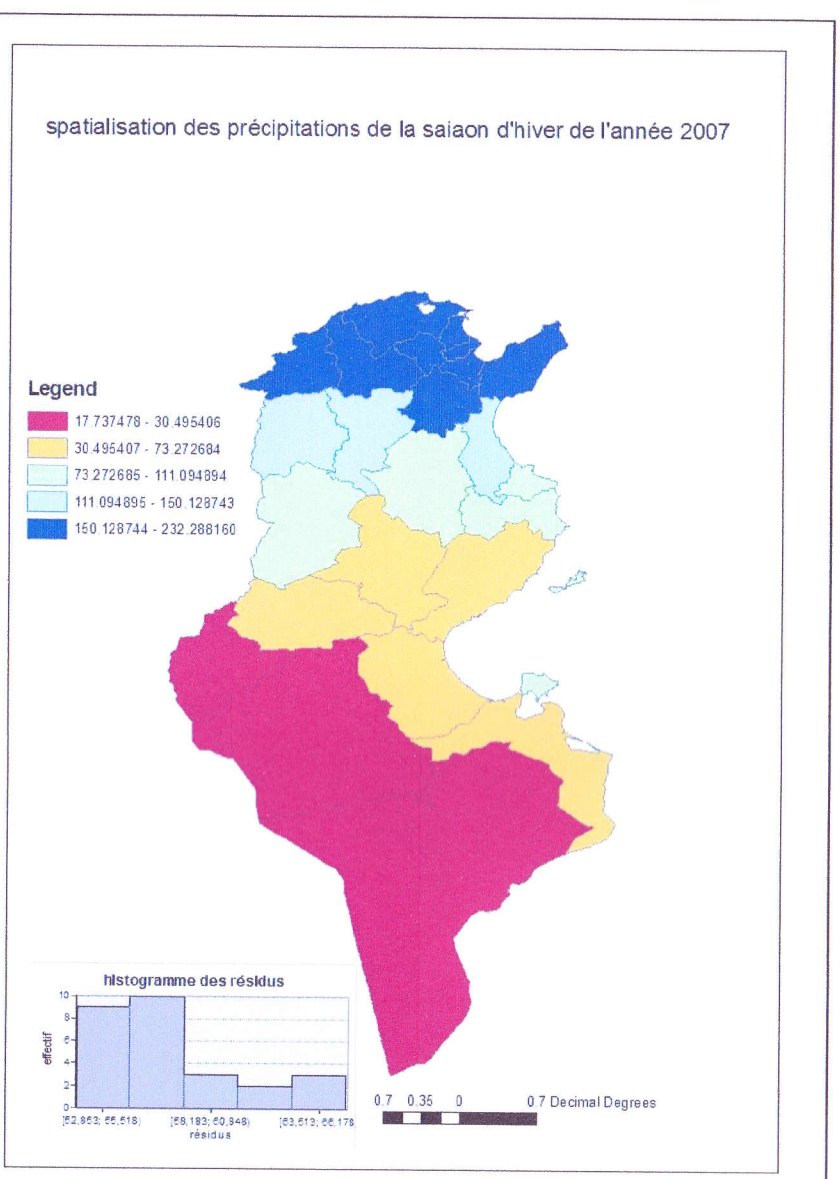
spatialisation des précipitations de la saiaon d'hiver de l'année 1992



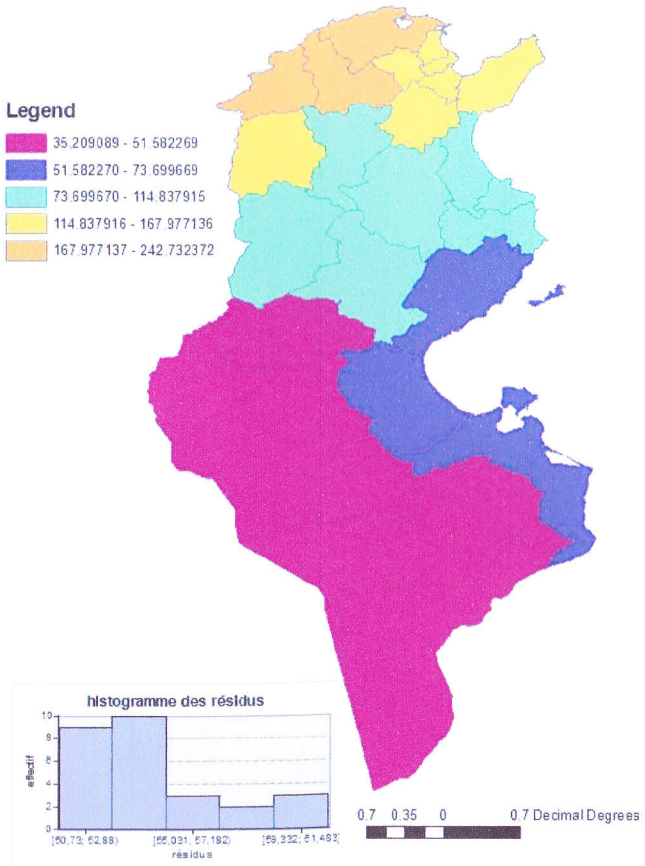
spatialisation des précipitations de la saiaon d'hiver de l'année 1997



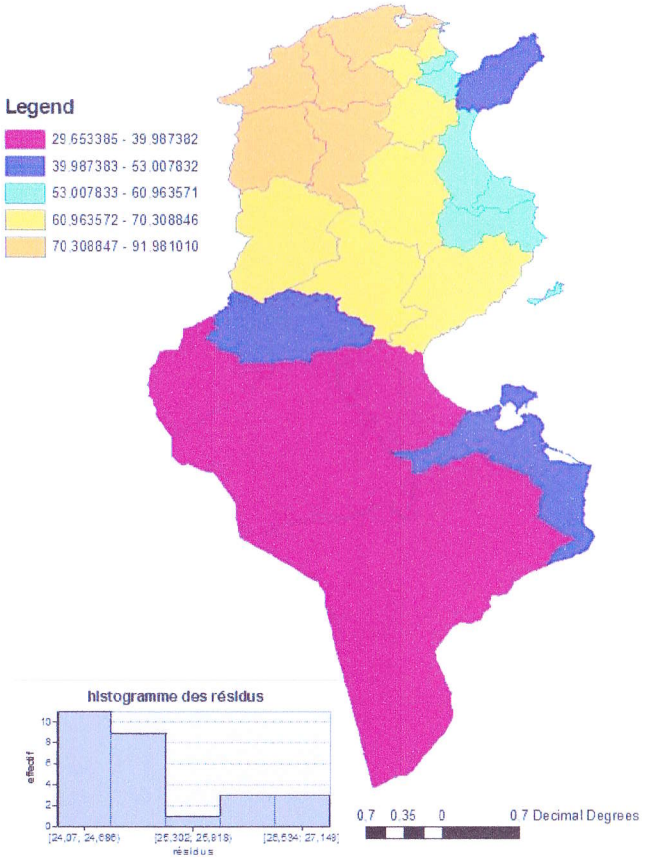

spatialisation des précipitations de la saiaon d'hiver de l'année 2002
Legend
29.366304 - 36.903613
36.903614 - 44.357876
44.357877 - 55.495226
55.495227 - 94.332716
94.332717 - 123.489681
histogramme des résidus
effectif
résidus
0.7 0.35 0 0.7 Decimal Degrees


spatialisation des précipitations de la saiaon d'hiver de l'année 2007
Legend
17.737478 - 30.495406
30.495407 - 73.272684
73.272685 - 111.094894
111.094895 - 150.128743
150.128744 - 232.288160
histogramme des résidus
effectif
résidus
0.7 0.35 0 0.7 Decimal Degrees

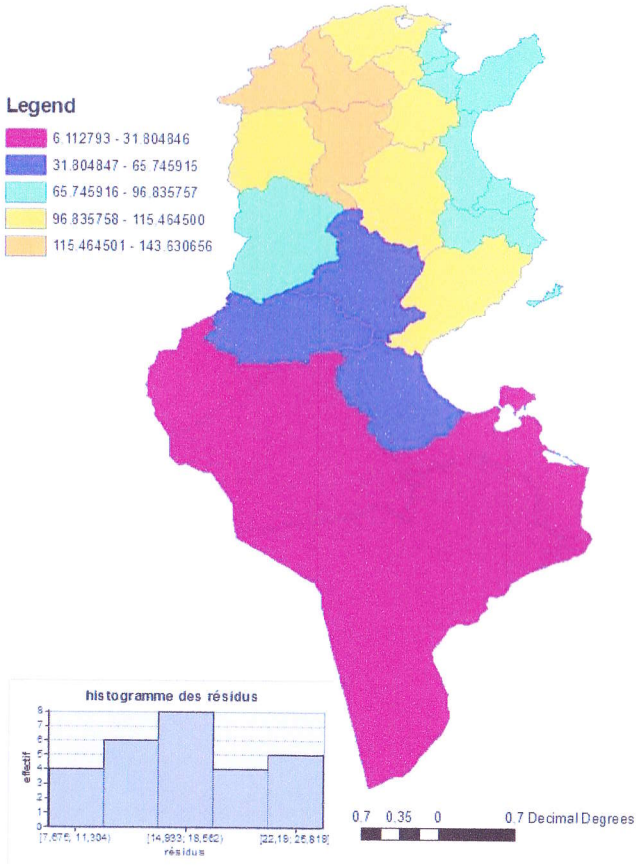
spatialisation des précipitations de la saiaon de printemps de l'année 1992



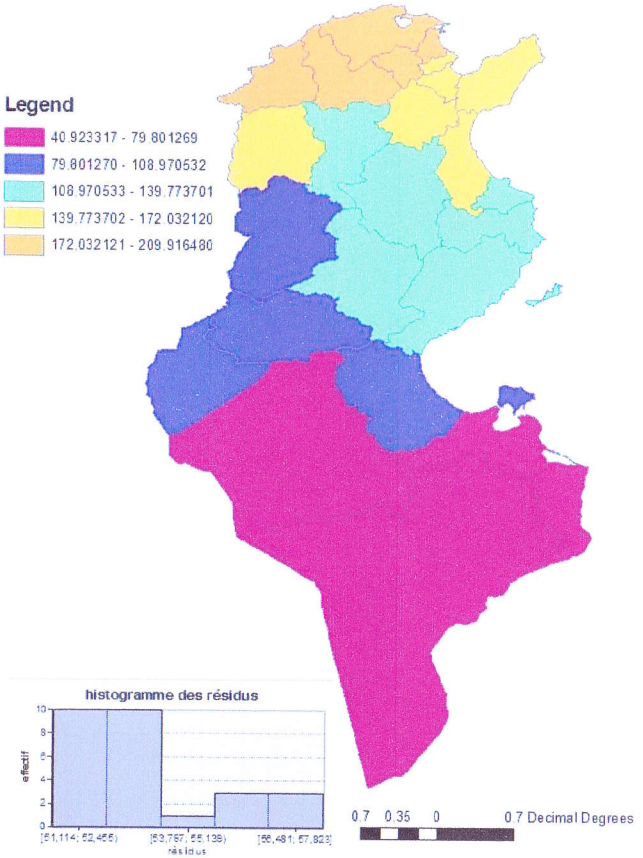
spatialisation des précipitations de la saiaon de printemps de l'année 1997



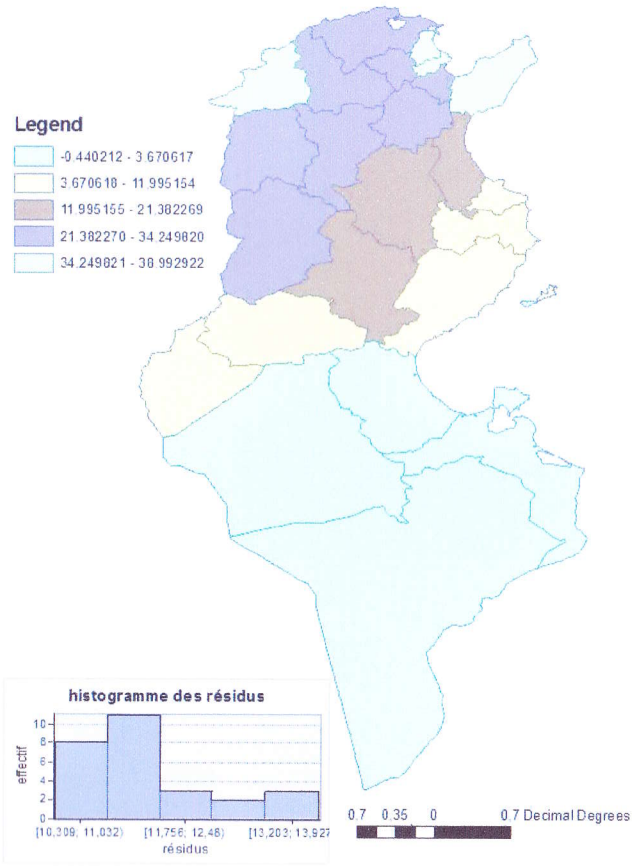
spatialisation des précipitations de la saiaon de printemps de l'année 2002



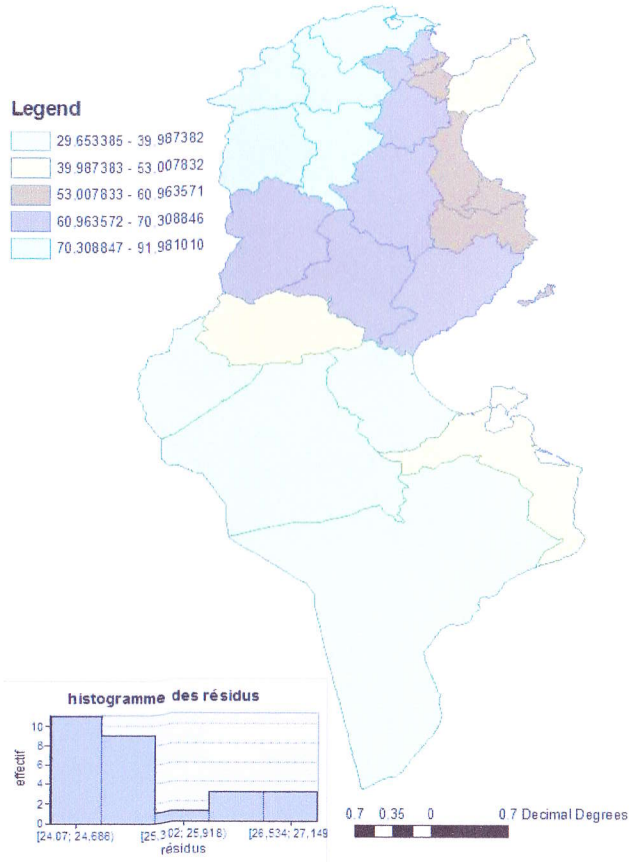
spatialisation des précipitations de la saiaon de printemps de l'année 2007



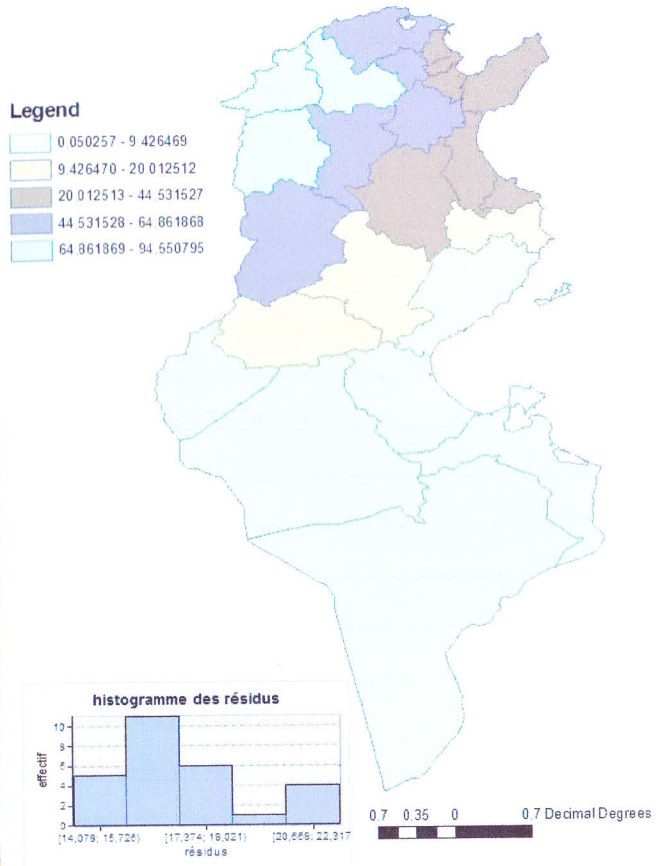
spatialisation des précipitations de la saiaon d'été de l'année 1992



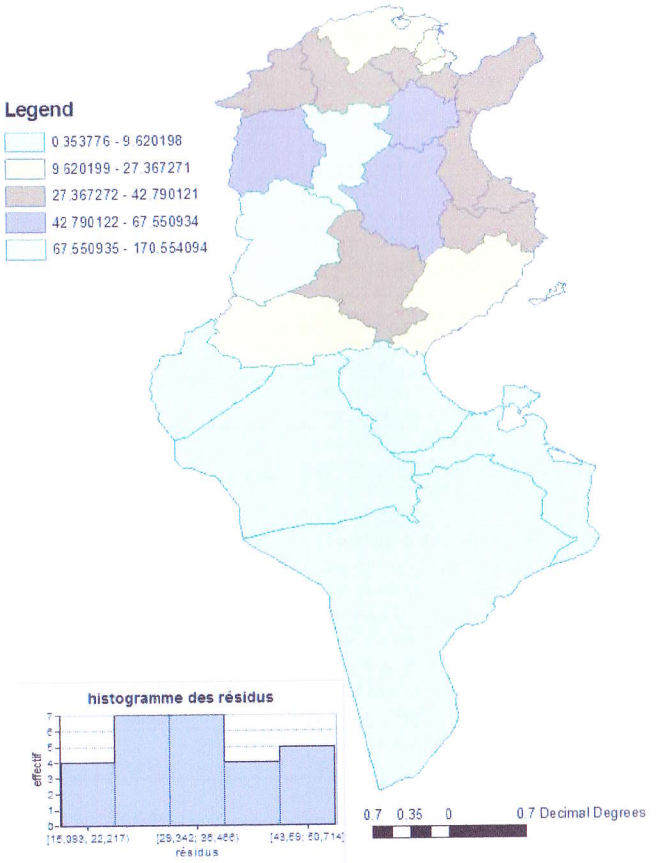
spatialisation des précipitations de la saiaon d'été de l'année 1997



spatialisation des précipitations de la saiaon d'été de l'année 2002



spatialisation des précipitations de la saiaon d'été de l'année 2007



Annexe 6. Description des paramètres du modèle ricardien

titre	sources	construit/ BRUT	paramètre du modèle ricardien	description
CLAF-FAO	SOTWIS-Tunisia, ver1.	brut	CLAF-FAO	SOTWIS-codes (code du type de sol selon la base de donnée) pour noté le type de sol (voir annexe)
surface sous chaque type de sol par gouvernorat	SOTWIS-Tunisia, ver1.	construite		répartition des surfaces sous chaque type de sol selon le gouvernorat
élévation	SOTWIS-Tunisia, ver1.	construit/ BRUT	elev	répartition de l'élévation du terrain selon le gouvernorat
longueur de la pente	SOTWIS-Tunisia, ver1.	construit	pente	répartition de la longueur de la pente selon le gouvernorat
CEREACULTURE	DGEA (enquête agricole)	BRUT	S1	répartition des superficies de céréacultures (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)
FOURRAGES	DGEA (enquête agricole)	BRUT	S2	répartition des superficies de fourrages (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)
MARAICHAIRES	DGEA (enquête agricole)	BRUT	S3	répartition des superficies de maraichages (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)
LEGUMINEUSES	DGEA (enquête agricole)	BRUT	S4	répartition des superficies de légumineuses (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)
ARBORICULTURE	DGEA (enquête agricole)	BRUT	S5	répartition des superficies d'arboricultures (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)
CULTURES INDUSTRIELLES ET AUTRES	DGEA (enquête agricole)	BRUT	S6	répartition des superficies de cultures industrielles et autres (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)
JACHERE	DGEA (enquête agricole)	BRUT	S7	répartition des superficies de jachères (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)
FORET	DGEA (enquête agricole)	BRUT	S8	répartition des superficies de forêts (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)
PARCOURS	DGEA (enquête agricole)	BRUT	S9	répartition des superficies de parcours (Hectare) selon le gouvernorat (1998-2007)
numéro de l'année	---	construit	numannée	le numéro de l'année est un rang (croissant) créé pour désigner l'année de la période (1970-2007)
code station		construit		code formé par les trois premières lettres du nom la station créé pour indiquer les stations météo
température annuelle moyenne	INM	construit	**TAnm**	moyenne arithmétique annuelle de la température de la période (1992-2007)
température annuelle normale	INM	construit	**TAnN**	moyenne arithmétique de la température de la période (1971-2001)
précipitation annuelle moyenne	INM	construit	**PAnm**	moyenne arithmétique annuelle de la précipitation de la période (1992-2007)
précipitation annuelle normale	INM	construit	**PAnN**	moyenne arithmétique de la précipitation de la période (1971-2001)

température de la saison d'été	INM	construit	**TEt**	moyenne arithmétique de la température des mois de la saison d'été
température de la saison d'hiver	INM	construit	**THi**	moyenne arithmétique de la température des mois de la saison d'hiver
température de la saison d'automne	INM	construit	**TAu**	moyenne arithmétique de la température des mois de la saison d'automne
température de la saison de printemps	INM	construit	**TPr**	moyenne arithmétique de la température des mois de la saison de printemps
température normale de la saison d'été	INM	construit	**TEtN**	moyenne arithmétique de la température de la saison d'été sur la période 1971-2001
température normale de la saison d'hiver	INM	construit	**THiN**	moyenne arithmétique de la température de la saison d'hiver sur la période 1971-2001
température normale de la saison d'automne	INM	construit	**TAuN**	moyenne arithmétique de la température de la saison d'automne sur la période 1971-2001
température normale de la saison de printemps	INM	construit	**TPrN**	moyenne arithmétique de la température de la saison de printemps sur la période 1971-2001
précipitation de la saison d'été	INM	construit	**TEt**	moyenne arithmétique des précipitations des mois de la saison d'été
précipitation de la saison d'hiver	INM	construit	**THi**	moyenne arithmétique des précipitations des mois de la saison d'hiver
précipitation de la saison d'automne	INM	construit	**TAu**	moyenne arithmétique des précipitations des mois de la saison d'automne
précipitation de la saison de printemps	INM	construit	**TPr**	moyenne arithmétique des précipitations des mois de la saison de printemps
précipitation normale de la saison d'été	INM	construit	**TEtN**	moyenne arithmétique des précipitations de la saison d'été sur la période 1971-2001
précipitation normale de la saison d'hiver	INM	construit	**THiN**	moyenne arithmétique des précipitations de la saison d'hiver sur la période 1971-2001
précipitation normale de la saison d'automne	INM	construit	**TAuN**	moyenne arithmétique des précipitations de la saison d'automne sur la période 1971-2001
précipitation normale de la saison de printemps	INM	construit	**TPrN**	moyenne arithmétique des précipitations de la saison de printemps sur la période 1971-2001
Déviation de la température de la saison d'été par rapport à la température normale	INM	construit	**T Dv été-N**	écart de la température de la saison d'été par rapport à la normale
Déviation de la température de la saison d'automne par rapport à la température normale	INM	construit	**T Dv Aut-N**	écart de la température de la saison d'automne par rapport à la normale
Déviation de la température de la saison d'hiver par rapport à la température normale	INM	construit	**T Dv Hiv-N**	écart de la température de la saison d'hiver par rapport à la normale
Déviation de la température de la saison de précipitation par rapport à la température normale	INM	construit	**T Dv Pr-N**	écart de la température de la saison de printemps par rapport à la normale
Déviation de la précipitation de la saison d'été par rapport à la précipitation normale	INM	construit	**P Dv été-N**	écart des précipitations de la saison d'été par rapport à la normale
Déviation de la précipitation de la saison d'été par rapport à la précipitation normale	INM	construit	**P Dv Aut-N**	écart des précipitations de la saison d'automne par rapport à la normale
Déviation de la précipitation de la saison d'été par rapport à la précipitation normale	INM	construit	**P Dv Hiv-N**	écart des précipitations de la saison d'hiver par rapport à la normale

Déviation de la précipitation de la saison d'été par rapport à la précipitation normale	INM	construit	**P Dv Pr-N**	écart des précipitations de la saison de printemps par rapport à la normale
Déviation de la température annuelle d'été par rapport à la température normale	INM	construit	**T Dv An-N**	écart de la température annuelle moyenne par rapport à la normale
Déviation de la précipitation annuelle par rapport à la précipitation normale	INM	construit	**P Dv An-N**	écart des précipitations annuelles moyennes par rapport à la normale
Taux des exploitants ayant niveau primaire ou alphabète	DGEA (enquêtes structure1994-1995 et 2004-2005)	brute	**T1**	nombre des alphabètes et ayant niveau primaire/nombre total exploitant
Nombre des tracteurs	DGEA (enquêtes structure1994-1995 et 2004-2005)	brute	**T2**	Nombre des tracteurs
Pourcentage des tracteurs âgés moins de 10 ans	DGEA (enquêtes structure1994-1995 et 2004-2005)	brute	**T3**	Pourcentage des tracteurs agés moins de 10 ans
Nombre des moissonneuses batteuses	DGEA (enquêtes structure1994-1995 et 2004-2005)	brute	**T4**	Nombre des moissonneuses batteuses
Pourcentage des moissonneuses batteuses âgés moins de 10 ans	DGEA (enquêtes structure1994-1995 et 2004-2005)	brute	**T5**	Pourcentage des moissonneuses batteuses âgés moins de 10 ans
Pourcentage de cadre permanent	DGEA (enquêtes structure1994-1995 et 2004-2005)	brute	**T6**	Nombre de cadre/ Total employés
taux de MOD familiale	DGEA (enquêtes agricoles)	brute	**T7**	Nombre de MOD familiale/ nombre total MOD
Densité	INS	construit	**T8**	total de la population recensée divisée par la surface totale dans chaque gouvernorat

Annexe 7. Description des groupes de sol résultants de l'analyse factorielle des types de sol

A partir d'une analyse statistique des données sur les propriétés des différents types de sols de la Tunisie fournies par la base de données SOTWIS-Tunisia (ver.1) nous définissons des fourchettes pour les quantités des groupes de types de sols.

Tableau 13. Analyse statistique des propriétés des différents types de sol

	CFRAG	SDTO	STPC	CLPC	BULK	PHAQ	GYPS	TOTC	TOTN
moyenne	9,54	46,61	28,72	24,67	1,40	7,76	69,64	9,52	0,83
médiane	6	46	33	21	1,39	8	1,09	7	0,7
max	24	93	59	71	1,62	9	846,79999	75,900002	4,2
min	2	1	0	5	1,08	5,1	0	0,7	0,25
écart type	26,09	29,81	27,33	28,00	25,38	25,14	194,22	27,00	25,41
quartile 0	2	1	0	5	1,08	5,1	0	0,7	0,25
quartile 1	4	36	22	16	1,35	7,75	1	4,45	0,48
quartile 2	6	46	33	21	1,39	8	1,09	7	0,7
quartile 3	16	57	37	26	1,43	8,12	8	9,98	0,9
quartile 4	24	93	59	71	1,62	9	846,79999	75,900002	4,2

Sachant que:

CFRAG	le volume en % de gros fragments (> 2mm)
SDTO	la masse de sable en %
STPC	la masse de limon en %
CLPC	la masse d'argile en %
PHAQ	ph mesuré dans l'eau
GYPS	la teneur en gyps (g kg^{-1})
TOTC	teneur en carbone organique (g kg^{-1})
TOTN	la dose totale d'azote (g N kg^{-1})

Tableau 14. Segmentation du CFRAG	
[2 ; 4]	le volume de gros fragments est faible
[4 ; 6]	le volume de gros fragments est moyen
[6 ; 16]	le volume de gros fragments est légèrement élevée
[16 ; 24]	le volume de gros fragments est élevée

Tableau 15. Segmentation du SDTO	
[1 ; 36]	la masse de sable est faible
[36 ; 46]	la masse de sable est moyen
[46 ; 57]	la masse de sable est légèrement élevée
[57 ; 93]	la masse de sable est élevée

Tableau 16. Segmentation du STPC	
[0 ; 22]	la masse de limon est faible
[22 ; 33]	la masse de limon est moyen
[33 ; 37]	la masse de limon est légérement élevée
[37 ; 59]	la masse de limon est élevée

Tableau 17. Segmentation du CLPC	
[5 ; 16]	la masse d'argile est faible
[16 ; 21]	la masse d'argile est moyen
[21 ; 26]	la masse d'argile est légèrement élevée
[26 ; 71]	la masse d'argile est élevée

Tableau 18. Segmentation du PHAQ	
[4,5 ; 5,5]	fortement basique
[5,5 ; 6,5]	légèrement basique
[6,5 ; 7,5]	neutre
[7,5 ; 8,5]	légèrement acide
[8,5 ; 9,5]	fortement acide

Tableau 19. Segmentation du TOTC	
[0,7 ; 4,45]	la teneur en carbone organique est très faible
[4,45 ; 7]	la teneur en carbone organique est faible
[7 ; 9,98]	la teneur en carbone organique moyenne
[9,98 ; 75,900002]	la teneur en carbone organique est élevée

Tableau 20. Segmentation du TOTN	
[0,25 ; 0,7]	la dose est minimale
[0,7 ; 0,83]	la dose est moyenne
[0,83 ; 4,2]	la dose est maximale

Tableau 21. Segmentation du GYPS	
[0 ; 8]	la teneur en gyps est faible
[8 ; 69,4]	la teneur en gyps est moyenne
[69,4 ; 846,79999]	la teneur en gyps est élevée

Tableau 22. Description des groupes de sol obtenus à partir de l'analyse factorielle

	CLAF		CFRAG	SDTO	STPC	CLPC	PHAQ	GYPS	TOTC	TOTN
F1	Alh	Haplic Alisol	de moyen à légèrement élevée	de légèrement élevée à élevée	de faible à élevée	de faible à élevée	de fortement basique à neutre	faible	de faible à élevée	moyenne à maximale
	Cmg	Gleyic Cambisol								
	Cmu	Humic Cambisol								
	Cmx	Chromic Cambisol								
F2	ARc	Calcaric Arenosol	de moyen à légèrement élevée	Élevée	de faible à moyen	de faible à moyen	de fortement basique à légèrement acide	faible	de très faible à élevée	minimale
	ARh	Haplic Arenosol								
	LPe	Eutric Leptosol								
	PLd	Dystric Planosol								
	RGe	Eutric Regosol								
F3	VRk	Calcic Vertisol	moyen	Faible	de faible à moyen	élevée	de neutre à légèrement acide	faible	élevée	maximale
	VRy	Gypsic Vertisol								
F4	FLs	Salic Fluvisol	de moyen à légèrement élevée	de légèrement élevée à élevée	de faible à élevée	de faible à élevée	légèrement acide	de faible à élevée	de faible à moyen	moyenne
	SCy	Gypsic Solonchak								
	SNh	Haplic Solonetz								
F5	GYh	Calcic Gypsisol	de moyen à légèrement élevée	Moyen	légèrement élevée	légèrement élevée	légèrement acide	de moyen à élevée	de faible à élevée	minimale
	SCn	Sodic Solonchak								
F6	CMe	Eutric Cambisol	de moyen à légèrement élevée	Moyen	moyen	élevée	de neutre à légèrement acide	faible	de très faible à élevée	de minimale à maximale
	KSk	Calcic Kastanozem								

	LPk	Rendzic Leptosol								
F7	CLl	Luvic Calcisol	faible	de faible à légèrement élevée	de faible à élevée	de faible à élevée	légèrement acide	de faible à élevée	de très faible à élevée	de minimale à maximale
	GYp	Haplic Gypsisol								
	SCg	Gleyic Solonchak								
F8	CLp	Petric Calcisol	de moyen à élevée	de faible à élevée	de faible à élevée	de faible à élevée	de fortement basique à fortement acide	de faible à élevée	de très faible à élevée	de minimale à maximale
	RGc	Calcaric Regosol								
	VRe	Eutric Vertisol								
F9	FLe	Eutric Fluvisol	de moyen à élevée	Moyen	moyen	légèrement élevée	de neutre à légèrement acide	de faible à élevée	de très faible à élevée	de minimale à moyenne
	GYh	Haplic Gypsisol								
F10	CLh	Haplic Calcisol	de faible à moyen	de faible à légèrement élevée	moyen	de faible à élevée	de fortement basique à légèrement acide	de faible à moyenne	de très faible à élevée	de minimale à moyenne
	LVj	Stagnic Luvisol								
	SNk	Calcic Solonetz								
F11	LVv	Vertic Luvisol	de moyen à légèrement élevée	de faible à moyen	élevée	de faible à élevée	de neutre à légèrement acide	faible	de faible à élevée	de minimale à maximale
	RGy	Gypsic Regosol								
F12	CMc	Calcaric Cambisol	de faible à légèrement élevée	de faible à élevée	de faible à élevée	de moyen à élevée	de fortement basique à fortement acide	faible	de faible à élevée	de minimale à maximale
	FLc	Calcaric Fluvisol								
	GLe	Eutric Gleysol								
	LVk	Calcic Luvisol								

Annexe 8. Matrice de pondération

L'utilisation d'une matrice de pondération est appropriée lorsque les données utilisées sont de type spatial. Les unités spatiales (gouvernorat pour notre travail) sont généralement interdépendant et il faut prendre en considération les positions relatives des unités les une par rapport aux autres pour contrôler l'interaction qui peut résulter entre deux unités voisins. Les matrices peuvent être classées en deux : matrice de contiguïté et matrice des poids généralisées.

1- Les matrices de contiguïté

La contiguïté implique que deux régions ont une frontière commune. Ainsi une matrice de contiguïté d'ordre 1 est une matrice carré, systématique et binaire ou chaque terme w_{ij} peut prendre la valeur 1 si les régions ont une frontière commune et 0 sinon.

$$W_{ij} : \begin{cases} 1 \text{ si les régions } i \text{ et } j \text{ sont voisines (dit aussi contiguës) à l'ordre 1} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

avec $W_{ii} = 0$.

La matrice de contiguïté peut être d'ordre K. Dans ce cas K est le nombre minimal des frontières à franchir pour arriver à j de i. Généralement c'est la matrice de contiguïté d'ordre 1 est la plus utilisée.

Le tableau ci-dessous présente le tableau de contiguïté de 21 régions[45] étudiées dans notre travail :

[45] G tun (grand Tunis qui regroupe les gouvernorats de Tunis, Ariana, Ben-arous), Biz (Bizerte), Bej (Béja), Jen (Jendouba), Zag (Zaghouan), Nab (Nabeul), Sou (Sousse), Mon (Monastir), Mah (Mahdia), Kai (Kairouan), Gaf (Gafsa), Sid (Sidi-bouzid), Kas (Kasserine), Sfa (Sfax), Gab (Gabes), Med (Médenine), Toz (Tozeur), Keb (Kebili), Tat (Tataouine), Sil (Siliana)

Tablau 23. Tableau de contiguïté (nombre total des frontières à franchir pour aller de i à j

	G Tu	Biz	Bej	Jen	Kef	Zag	Nab	Sou	Mon	Mah	Kai	Gaf	Sid	Kas	Sfa	Gab	Med	Toz	Keb	Tat	Sil
G Tu	0	1	1	2	2	1	1	2	3	4	2	5	4	3	4	4	5	5	5	5	3
Biz	1	0	2	1	2	3	3	4	5	6	3	5	5	4	5	6	6	6	6	6	3
Bej	1	2	0	1	1	1	3	3	4	4	2	4	3	2	4	5	5	4	4	5	2
Jen	2	1	1	0	1	2	3	3	4	4	3	4	4	3	5	6	6	5	5	6	2
Kef	2	2	1	1	0	3	4	4	4	4	3	4	4	2	4	6	6	4	5	6	1
Zag	1	3	1	2	3	0	1	2	3	4	1	3	2	3	3	4	4	3	4	4	3
Nab	1	3	3	3	4	1	0	1	2	3	2	4	4	4	3	5	5	5	5	5	4
Sou	2	4	3	3	4	2	1	0	1	2	1	3	2	4	1	3	3	4	4	4	3
Mon	3	5	4	4	4	3	2	1	0	1	2	4	2	4	2	2	3	4	4	3	4
Mah	4	6	4	4	4	4	3	2	1	0	3	4	1	4	1	1	2	4	4	2	3
Kai	2	3	2	3	3	1	2	1	2	3	0	2	1	3	2	3	4	3	3	4	1
Gaf	5	5	4	4	4	3	4	3	4	4	2	0	1	1	1	3	3	1	1	3	3
Sid	4	5	3	4	4	2	4	2	2	1	1	1	0	2	1	3	3	2	2	4	3
Kas	3	4	2	3	2	3	4	4	4	4	3	1	2	0	2	3	3	2	2	4	1
Sfa	4	5	4	5	4	3	3	1	2	1	2	1	1	2	0	1	2	2	2	3	3
Gab	4	6	5	6	6	4	5	3	2	1	3	3	3	3	1	0	1	3	3	2	5
Med	5	6	5	6	6	4	5	3	3	2	4	3	3	3	2	1	0	3	1	1	4
Toz	5	6	4	5	4	3	5	4	4	4	3	1	2	2	2	3	3	0	1	4	4
Keb	5	6	4	5	5	4	5	4	4	4	3	1	2	2	2	3	1	1	0	1	4
Tat	5	6	5	6	6	4	5	4	3	2	4	3	4	4	3	2	1	4	1	0	4
Sil	3	3	2	2	1	3	4	3	4	3	1	3	3	1	3	5	4	4	4	4	0

À partir du tableau ci-dessus, on peut élaborer une matrice de contiguïté d'ordre 1, ou 2, ou 3, ou 4…etc. Par exemple, pour élaborer la matrice de contiguïté d'ordre 1, il suffit de remplacer dans ce tableau les valeurs 0, 2, 3, 4, 5 et 6 par 0. Et si on veut élaborer une matrice d'ordre 4, dans ce cas on remplace la valeur 4 par 1 et les valeurs 0, 1, 2, 3, 5 et 6 par 0.

2- Les matrices de poids générales

Pour ces matrices, les termes représentent l'ampleur de l'interaction entre les deux régions indépendamment de la contiguïté. Différents critères peuvent être utilisés pour tenir compte de cette ampleur.

Premièrement, la distance entre 2 régions i et j est un critère largement utilisé pour construire la matrice de poids. Dans ce cas on suppose que l'ampleur de l'interaction spatiale entre deux régions dépend principalement de la distance[46] entre soit le centroïdes de ces régions ou entre leurs capitales. Les termes de la matrice de poids peut prendre aussi différentes formes fonctionnelles dont les plus connues sont la forme fonctionnelle inverse(1) et la fonction de l'inverse de la distance (2). Si d_{ij} est la distance entre deux régions alors les deux formes mentionnées peuvent se présenter comme suit :

$$W_{ij} = e^{-\alpha d_{ij}} \qquad (1)$$

[46] Cette distance peut être distance à vol oiseau ou distance par routes.

$$W_{ij} : \begin{cases} \frac{1}{d_{ij}^{\beta}} \; si \; d_{ij} \prec \bar{d} \\ 0 \sin on \end{cases} \qquad (2)$$

Où α et β sont des paramètres fixés à priori, $\bar{d}$ est la valeur seuil à partir de laquelle on peut supposer qu'il n'y a pas une interaction spatiale entre le deux régions i et j.

Deuxièmement d'autres extensions à ces deux formes fonctionnelles ont été développées. Cliff et Ord (1981) présentent une combinaison entre la mesure de la distance et la longueur de la frontière commune entre les régions. Les termes de la matrice de poids se présentent comme suit :

$$W_{ij} = (d_{ij})^{-\alpha} (\beta_{ij})^{\gamma}$$

où β_{ij} est la proportion de la frontière de la région i avec la région j, α et γ sont des paramètres fixés à priori.

Annexe 9. Différents tests d'autocorrélation spatiale et Test d'Hausman

I- Différents test d'autocorrélation

On distingue les tests d'autocorrélation spatiale et les indicateurs locaux d'association spatiale

1. Les tests globaux d'autocorrélation spatiale des données quantitatives

Les deux tests les plus utilisés dans la littérature sont le Test de Moran (1950) et le Test de Geary (1954). Ces deux tests permettent de vérifier l'existence d'une interaction spatiale au niveau de données quantitatives. Pour notre travail, ces deux tests nous permettent de vérifier s'il y a une similarité (autocorrélation spatiale positive) ou une dissimilarité (autocorrélation spatiale négative) en terme de la valeur ajoutée de la production agricole et surtout des variables climatiques (température et précipitation) des gouvernorats contiguës.

a. Test de Moran (1950)

C'est le test le plus généralement utilisé dans la littérature que le test de Geary. La statistique de Moran est définie comme suit :

$$M = \frac{N}{S} \frac{\sum_{g \neq j} C_{gj}(X_g - \overline{X})(X_j - \overline{X})}{\sum_{g} (X_g - \overline{X})^2}$$

où N : le nombre des gouvernorats

S : $\sum_{g \neq j} C_{gj}$, la somme des coefficients d'interaction spatiale de la matrice de pondération spatiale (matrice de contigüité),

X_g, X_i sont les valeurs de la variable au gouvernorat g et j,

$\overline{X}$: est la moyenne de la variable pour tous les gouvernorats.

D'après la définition de la statistique M de Moran, nous pouvons avancer que cette statistique se présente comme un ratio de la covariance entre les gouvernorats contigus ou voisins à la variance totale de l'échantillon.

La valeur de M varie entre -1 et 1 ; M = 0 : absence d'autocorrélation spatiale ; $0 \prec M \leq 1$: autocorrélation positive et $-1 \prec M \leq 0$: autocorrélation négative.

L'espérance de la statistique M est comme suit : $\mathrm{E}(M) : -\frac{1}{N-1}$

La variance est : $V(M) : \frac{N(NZ_1 - Z_2) + 3S}{(N^2-1)S} - \frac{1}{(N-1)^2}$

Avec $Z_1 : \frac{\sum_{g \neq j}(C_{gj} + C_{jg})^2}{2S}$, $Z_2 : \frac{\sum_{g}(C_g + C_j)}{S}$, $C_g : \sum_j C_{gj}$ et $C_g : \sum_j C_{jg}$

Pour le test de significativité, il faut déterminer la forme standardisée de la statistique :

$$T_M : \frac{M - \mathrm{E}(M)}{\sigma_M}$$

Et avec le test de normalité de l'hypothèse $T_M = 0$, on peut vérifier l'existence d'une autocorrélation spatiale. Si T_M est significativement positif (négatif) alors on prouve l'existence d'une autocorrélation positive (négative).

b. Test de Geary (1954)

La statistique de Geary (1954) est définie comme suit :

$$G = \frac{N-1}{2S} \frac{\sum_{g \neq j} C_{gj}(X_g - X_j)^2}{\sum_g (X_g - \overline{X})^2}$$

D'après la définition ci-dessus, à un facteur ½ prés, la statistique de Geary peut être interprétée comme le rapport de la variance des écarts entre gouvernorat voisins à la variance totale. On peut distinguer trois valeurs remarquables de G ; $0 \prec G \prec 1$: forte autocorrélation positive ; $G \geq 1$: forte autocorrélation négative ; G = 1 : absence d'autocorrélation spatiale.

L'espérance de la statistique de Geary est comme suit : $\mathrm{E}(G) : 1$

La variance est : $V(G) : \frac{(N-1)(2Z_1 + Z_2) - 4S}{2(N+1)S}$

Pour le test de significativité, il faut déterminer la forme standardisée de la statistique :

$$T_G : \frac{G - \mathrm{E}(G)}{\sigma_G}$$

Et avec le test de normalité de l'hypothèse $T_G = 0$, on peut vérifier l'existence d'une autocorrélation spatiale. Si T_G est significativement positif (négatif) alors on prouve l'existence d'une autocorrélation négative (positive).

2. Les indicateurs locaux d'association spatiale

À côté des tests d'autocorrélation spatiale globale, d'autres outils ont été développés pour vérifier l'existence d'une variation spatiale au niveau local. Il s'agit des tests sui permettent de décrire dans quelle mesure un gouvernorat particulier (g) présente une similarité avec ses voisins. Ces tests sont appelés « indicateurs locaux d'association spatiale (local Indicator of Spatial Association (LISA).

Nous présentons ci-dessous l'indice local de Moran pour chaque gouvernorat (g) développé par Anselin (1995) :

$$I_g = Z_g \sum_{g \neq j}^{N} W_{gj} Z_j$$

où Z_g et Z_j sont des variables dans la forme standardisée (moyenne nulle et variance égale à 1) d'une variable étudiée (valeur ajoutée de la production agricole ou variables climatiques ou autres). W_{gj} sont les coefficients de la matrice de pondération spatiale[47].

I_g se présente ainsi comme le produit de Z_g à la moyenne des gouvernorats voisins. Une valeur élevée positive (valeur négative) de I_g indique que le gouvernorat (g) est entouré par des gouvernorats ayant une valeur similaire (dissimilaire) de la variable étudiée (Mitchell 2005). L'indice local de Moran nous permet de mesurer le degré de ressemblance d'un gouvernorat (g) avec ses voisins.

L'espérance de l'indice local de Moran est

$$E(I_g) : -\frac{1}{N-1} \sum_j C_{gj}$$

LA variance est :

---

[47] Cet indicateur peut s'écrire aussi sous cette forme : $I_g = \frac{Z_g}{K} \sum_{g \neq j}^{N} W_{gj} Z_j$ où Z_g et Z_j sont les variables centrées par rapport à la moyenne de la variable étudiée et $K = \sum_g \frac{1}{N} Z_g^2$

$$V(I_g) : C_g(\frac{N-A}{N-1} + (C_g - 1)\frac{2(2A-N)}{(N-1)(N-2)} - \frac{C_g}{(N-1)^2}$$

Avec $A : N\frac{\sum_g Z_g^4}{(\sum_g Z_g^2)^2}$ et $Z_g : (X_g - \overline{X})$

II- Test d'Hausman

L'objectif de ce test est de préciser la nature des effets spécifiques, fixes ou aléatoires, lors de l'utilisation des données de panel comme dans notre travail.

Les procédures de ce test consistent à comparer les deux estimateurs, MCG et Within. Si les coefficients de deux estimateurs (fixes et aléatoires) sont statistiquement différents et montrent une divergence, cela s'explique par l'existence d'une corrélation entre les effets individuels (α_b) et les variables explicatives. Le modèle à effets fixes est donc le plus approprié et l'estimateur Within est convergent et efficace. Et si au contraire, les deux estimateurs ne présentent pas une différence significative, c'est le modèle avec effets individuel aléatoire qui est le plus approprié et l'estimateur des MCG serait alors l'estimateur BLUE.

L'hypothèse H0 de test de Hausman est la suivante :

H0 : $E(\alpha_i / x_i) = 0$

H1 : $E(\alpha_i / x_i) \neq 0$

Si H0 est retenue alors c'est le modèle avec effets individuels aléatoires à choisir et on doit alors travailler sur l'estimateur des MCG (estimateur convergent et efficace). Sinon, c'est le modèle avec effets individuels fixes à retenir.

Table de matières

A ma fille fleur de ma vie… ..... *i*

Remerciements ..... *ii*

INTRODUCTION *1*

1. Le problème du changement climatique *1*

1.1. Les enjeux du problème: *2*

1.2. Objectifs *3*

1.3. Thèse défendue *3*

2. Cadre théorique et méthodologie *4*

2.2. Cadre méthodologique *5*

2.3. Choix de la méthodologie de travail *6*

2.4. Présentation de la démarche *6*

Chapitre 1. Cadre conceptuel du problème de changement climatique *8*

Introduction *8*

1.1. Contexte du changement climatique : spécification du phénomène et de ses origines ... *8*

1.1.1. Evolution de la teneur en gaz *9*

1.1.2. Evolution potentielle du climat *10*

1.1.3. Interprétation du rapport entre l'accroissement des GES d'origine anthropique et le changement climatique *13*

1.1.3.a. Les modèles climatiques : l'accroissement des gaz à effet de serre est à l'origine du changement climatique **13**

1.1.3.b. Les controverses sur les modèles climatiques **15**

1.2. Prise en charge du problème du changement climatique par la communauté internationale *18*

1.2.1. Organisation de la réaction internationale : naissance de la Convention Climat *18*

1.2.2. Évolution du processus de négociations *23*

1.3. Enjeux du changement climatique : les conclusions générales du GIEC *25*

1.3.1. Évolution future du climat *26*

1.3.1.a. Méthodologie d'élaboration des données du climat futur **26**

i) les scénarios de projection 27

ii) les modèles climatiques 29

1.3.1.b. Les incertitudes inhérentes **30**

1.3.1.c. Les prévisons climatiques **32**

i) Au niveau mondial 32

ii) Au niveau régional 33

iii) La Tunisie 35

1.3.2. Les enjeux potentiels du changement climatique sur les systèmes humains et naturels au niveau mondial 36
1.3.2.a. La détermination et l'anticipation des enjeux : controverses sur les méthodes 36
1.3.2.b. Les enjeux potentiels futurs 38
1.3.3. Scepticisme sur les conclusions du GIEC 39
Conclusion 43
Chapitre 2. Changement Climatique et impacts sur l'agriculture : étude bibliographique . 45
Introduction 45
2.1. Les impacts potentiels du changement climatique sur l'agriculture 46
2.1.1. Les effets de l'accroissement du CO_2 sur la production végétale 47
2.1.2. Les effets de l'accroissement du rayonnement ultraviolet UV-B et de l'ozone (O3) sur la production agricole 49
2.1.3. Les effets de l'élévation de la température sur la production agricole 49
2.1.4. Les effets des changements dans le cycle hydrologique sur la production agricole ... 50
2.1.5. Les effets d'autres facteurs sur la production végétale au titre du changement climatique 52
2.1.6. Discussion : incertitudes irréductibles 52
2.2. L'approche expérimentale 54
2.2.1. Conception et chronologie de développement des modèles de cultures 54
2.2.1.a. Conception des modèles de cultures 54
2.2.1.b. Chronologie de développement 57
2.2.2.a. Présentation de la méthodologie 59
2.2.2.b. Formalisation 62
2.2.3. Discussions : naissance de la méthode Ricardienne 63
2.2.3.a. Disparités 64
2.2.3.b. les controverses quant à la méthodologie d'estimation 65
2.3. La Méthode Ricardienne 67
2.3.1. Fondements théoriques 68
2.3.2. Cadre formel 70
2.3.3. Estimation du modèle 72
2.3.4. Application aux pays en voie de développement 73
2.3.5. Les modifications dans le modèle standard 75
2.3.6. Controverses sur la méthode 77
Conclusion 79
Chapitre 3. Changement climatique et Tunisie : étude bibliographique de la vulnérabilité du secteur agricole 81
Introduction 81

3.1. Méthodologie 82
3.2. Contexte général 83
3.2.1. Aperçu général sur l'état du secteur agricole tunisien 83
3.3.2. Relief et paysages naturels de la Tunisie 85
3.3.3. Le climat 88
3.3.3.a. Le régime thermique 88
3.3.3.b. Le régime pluviométrique 90
3.3.4. Les zones agro-écologiques 91
i) le Grand Nord 91
ii) Le Centre 91
iii) Le Sud 92
3.4. Identification des risques climatiques pouvant affecter l'agriculture 93
3.4.1. Les ressource en sol 93
3.4.1.a. Etat des ressources en sol 93
3.4.1.b. La pression sur les ressources en sol 100
3.4.2. Les ressource en eau 102
3.4.2.a. Le potentiel des ressources en eau 103
i) Les ressources de surface 103
ii) Les ressources souterraines 105
3.4.2.b. Mobilisation des ressources 105
3.4.2.c. Vulnérabilité des ressources en eau 106
3.5. Le changement climatique en Tunisie 107
3.5.1. Evolution du climat tunisien 108
3.5.2. Le climat tunisien futur 110
Conclusion 113
Chapitre 4. La spécification des entrées du modèle Ricardien 114
Introduction 114
4.1. Spécification du modèle : focalisation sur les modifications du modèle standard 114
4.1.1. Le cadre formel 114
4.1.2. Spécification de l'unité d'observation 116
4.1.3. Spécification de la variable dépendante 120
4.2. Spécifications des variables de contrôle du modèle 129
4.2.1. Les entrées socio-économiques et techniques 129
i) Facteurs socio-économiques 129
ii) facteurs techniques 130
4.2.2. Spécification des entrées physiques du modèle : les ressources naturelles édaphiques 131
i) Présentation de la base de données 131
ii) Spécifications des paramètres édaphiques du modèle 132
4.3. Spécification de la variable d'intérêt : le climat 136

4.3.1. Spécification des paramètres climatiques 136
4.3.2. La base de données 137
4.3.3. Le problème de données manquantes 140
4.3.3.a. Détection des discontinuités dans les mesures 140
4.3.3.b. Les méthodes de reconstitution des séries temporelles 141
4.3.3.c. Reconstitution des séries temporelles 143
4.3.4. Contrôle de l'homogénéité des données 144
4.4. Etudes de la variabilité et de la tendance temporelle des mesures des paramètres climatiques 145
4.4.1. Choix de la méthode 145
4.4.2. Etudes de la variabilité et de la tendance des séries climatiques 147
Conclusion 150
Chapitre 5. Etude de l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne 151
Introduction 151
5.1. Spatialisation des mesures des paramètres climatiques : théorie et application 151
5.1.1. Aperçue bibliographique 151
5.1.2. Interpolation spatiale des mesures des paramètres climatiques 154
5.2. Spécification de la procédure d'estimation du modèle ricardien modifié 168
5.2.1. Présentation des modèles linéaires sans interaction spatiale sur données de panel. 169
i) Modèles à effets fixes 169
ii) Modèles à effets aléatoires 170
5.2.2. Les modèles avec interaction spatiale 171
i) Modèle avec autorégression spatiale 172
ii) Modèle avec autocorrélation spatiale (SEM) 172
5.3. Estimation de la réponse de la valeur ajoutée au climat et implications pour le changement climatique 173
5.3.1. Estimation du modèle sans autocorrélation spatiale 174
i) Analyse de l'effet saisonnier 176
ii) Analyse de l'effet annuel 181
5.3.2. Estimation du modèle avec autocorrélation spatiale 182
5.3.3. Implications pour le changement climatique 187
Conclusion 189
CONCLUSION 191
Annexes 216
Table de matières 273

Table des Tableaux

Tableau 1.1 évolution des différents gaz à effet de serre 10

Tableau 1.2. Les scénarios de projections SRES 28

Tableau 1.3. Classification des valeurs de l'incertitude lorsque l'incertitude est quantitative 31

Tableau 1.4. Classification des valeurs d'incertitude selon la probabilité d'occurrence 31

Tableau 1.5. Classification des états de connaissances faite par le GIEC. 32

Tableau 1.6. Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du 21ième siècle, à un niveau global 33

Tableau 2.1. Les principaux processus développés dans les modèles de cultures 58

Tableau 3.1. Vocation agronomique des principales familles de sols selon les zones physiographique, les régions naturelles et les étages bioclimatique 96

Tableau 4.1. Date de création et superficie des gouvernorats de la Tunisie 119

Tableau 5.1. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage universel de la normale de la température saisonnière 156

Tableau 5.2. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage ordinaire de la normale de la précipitation saisonnière 158

Tableau 5.3. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage universel de la température saisonnière de l'année 2007 161

Tableau 5.4. Résultats d'interpolation spatiale par le krigeage ordinaire des précipitations saisonnières de l'année 2007 163

Tableau 5.5. Résultats d'interpolation spatiale de la normale de la température et des précipitations annuelles 166

Tableau 5.12. Prévisions saisonnières du climat à l'horizon 2020 188

Tableau 5.13. Prévisions de la valeur ajoutée moyenne par hectare selon le modèle HadCM3 188

Table des Figures

Figure 1.1. Évolution de la température, du niveau de la mer et de la couverture neigeuse de l'hémisphère du nord 12

Figure 1.2. Complexité des interactions entre les composantes des systèmes climatique et terrestre 16

Figure 1.3. Spectre de température moyenne de modèles et des observations 17

Figure 1.4. Les étapes principales de l'établissement des rapports du GIEC 21

Figure 1.5. Contribution des régions et des secteurs aux émissions de CO_2 (cumul 1960-2004) 24

Figure 1.6. Trajectoires des émissions de GES selon les scénarios SRES 29

Figure 1.7. Les projections du réchauffement régional en surface pour les périodes (2020-2029) et (2090-2099) 34

Figure 1.8. Projections des variations du régime de précipitations 35

Figure 2.1. Principe du fonctionnement des modèles de cultures 56

Figure 2.3. Evolution de la fonction de production en fonction de la température 68

Figure 3.1. Croissance de la valeur ajoutée de l'agriculture et contribution au PIB 85

Figure 3.2. Géographie physique de la Tunisie 87

Figure 3.3. Irrégularité et anomalie des températures moyennes annuelles sur la période de 1901-2002 (période de référence 1961-1990) 89

Figure 3.4. Irrégularité et anomalie des précipitations moyennes annuelles sur la période de 1901-2002 (période de référence 1961-1990) 90

Figure 3.5. Répercussions des phénomènes extrêmes sur les sols 101

Figure 3.6. Répartition des ressources de surface sur le territoire tunisien 104

Figure 3.7. Les répercussions des phénomènes extrêmes sur les ressources en eau 107

Figure 3.8. Projections de la température moyennes annuelles (selon le modèle HadCM3 et le scénario A2) à l'horizon 2020 (gauche) et 2050 (droite) par rapport à la période de référence (1961-1990) 111

Figure 3.11. Projections des précipitations moyennes annuelles (selon le modèle HadCM3 et le scénario A2) à l'horizon 2020 (gauche) et 2050 (droite) par rapport à la période de référence (1961-1990) 112

Figure 4.1. Découpage des gouvernorats selon les délégations ; les municipalités et les secteurs 117

Figure 4.2. Découpage du territoire tunisien selon les régions de planification et selon les gouvernorats 118

Figure 4.3. Découpage du territoire tunisien selon les unités d'analyse 121

Figure 4.4. Valeur ajoutée en 1000DT estimée au prix constant de 1990 durant la période 1992-2007 123

Figure 4.5. Evolution tendancielle de la valeur ajoutée en Mille Dinars tunisien (MDT) dans chacun des gouvernorats de la Tunisie sur la période 1992-2007..... 128

Figure 4.6. Les types de sol du territoire tunisien..... 133

Figure 4.7. Résultats d'interpolation spatiale des variables élévation et longueur de la pente..... 135

Figure 4.8. Les divers types de station de mesure du réseau d'observation de l'INM..... 137

Figure 4. 9. Répartition des stations météorologiques sur le territoire tunisien..... 139

Figure 4.10. La répartition des données lacunaires par station..... 140

Evaluation de l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture : *étude théorique et application au cas de la Tunisie*

Résumé

La littérature n'est pas unanime quant à l'effet favorable ou défavorable du changement climatique sur les pays en voie de développement. En effet, si plusieurs travaux concluent que l'agriculture des pays en voie de développement est vulnérable au changement climatique à cause de la prédominance de l'agriculture à faible capital, d'autres suggèrent le contraire. Cette thèse a pour objectif d'étudier l'impact du changement climatique sur l'agriculture tunisienne en utilisant une analyse ricardienne de la valeur ajoutée agricole. Nous effectuons une analyse spatio-temporelle de la réponse de la valeur ajoutée agricole au changement climatique sur une base de données relative à 21 gouvernorats de la Tunisie qui couvre la période 1992-2007. Sur la base des résultats d'estimation de cette analyse, nous procédons à une simulation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture relativement aux projections d'un scénario modéré à l'horizon 2020. Les résultats suggèrent que le changement climatique combiné à une évolution du niveau technologique aurait des effets bénéfiques sur l'agriculture tunisienne. Ce résultat remettrait en question les conclusions de la majorité des travaux existants dans la littérature qui insistent sur les effets négatifs du changement climatique sur l'agriculture.

Mots clés : changement climatique, agriculture, méthode ricardienne, valeur ajoutée, interaction spatio-temporelle, Tunisie.

Evaluation of the economic impact of climate change on the agriculture: *theoretical and empirical analysis on international data*

Abstract

The literature is not unanimous as for the effect of the climatic change on developing countries. Indeed, if several studies conclude that the agriculture of developing countries is vulnerable to the climatic change because of the predominance of weak capital agriculture, others suggest that climate change will be benefit to agriculture. This thesis has for objective to study the impact of the climate change on the Tunisian agriculture while using an analysis ricardienne of the agricultural value added. We execute a spatiotemporal analysis of the answer of the agricultural value added to the climate change on a relative data base of 21 governates of Tunisia that covers the period 1992-2007. On the basis of results of evaluation of this analysis, we proceed to a simulation of the impact of the climate change on agriculture relatively on the projections of a moderate scenario on the 2020 horizon. Results suggest that the climate change combined to an evolution of the technological level would have some beneficial effects on the Tunisian agriculture. This result would put back in question findings of the existing study that insist on the negative effects of the climatic change on agriculture.

Key words: climate change, agriculture, ricardien method, added value, spatiotemporal interaction, Tunisie.