UNIVERSITÉ CHEIKH-ANTA-DIOP DE DAKAR

ÉCOLE DOCTORALE : **Sciences Juridiques, Politiques, Économiques et de Gestion**

FACULTÉ : **Sciences Économiques et de Gestion**

Année : 2018 N° d'ordre :

THÈSE DE DOCTORAT

Formation doctorale : **Économie et changement climatique**

Présentée par : **Amy Faye**

Climat et agriculture au Sénégal :

Analyse économique de la disponibilité de l'eau d'irrigation dans un contexte de variabilité des précipitations dans les niayes

Soutenue le 1er février 2018 devant le jury composé de :

Président et rapporteur : Ibrahima Thione DIOP, Maître de Conférences, Université Cheikh-Anta-Diop de Dakar.

Rapporteurs :

Egbendewe Y. G. AKLESSO, Maître de Conférences Agrégé, Université de Lomé.

Abdrahamane SANOGO, Professeur titulaire, Université de Bamako.

Examinateur : Ndiack FALL, Maître de Conférences Agrégé, Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Directeur de thèse : Ahmadou Aly MBAYE, Professeur titulaire, Université Cheikh-Anta-Diop de Dakar

L'université Cheikh-Anta-Diop de Dakar n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans cette thèse.
Ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Cette thèse a bénéficié du soutien financier du *Bureau d'analyses macro-économiques* de l'*Institut sénégalais de recherches agricoles* à travers les projets du *Programme de productivité agricole en Afrique de l'Ouest* et *Food Africa* du ministère des Affaires étrangères de la Finlande.

À mes parents pour leur amour inconditionnel et leur éducation
À mes sœurs et à mon frère
À ma nièce et à mon neveu

Remerciements

Je remercie le Bon Dieu de m'avoir guidé tout au long de ce chemin sinueux, exténuant… qu'est la thèse. Je n'ai pas de mots pour décrire cette expérience qui n'aboutit pas sans patience, persévérance et courage en plus des capacités intellectuelles mais qui vaut le coût d'être vécue.

Cette thèse n'aurait pas été possible sans l'assistance de certaines personnes qui n'ont ménagé aucun effort pour son amélioration et son aboutissement.

Au Professeur Ahmadou Aly MBAYE, je vous remercie d'avoir accepté d'encadrer cette thèse. Merci de n'avoir pas cessé de remettre en question mon travail et de me pousser à l'améliorer encore et encore. Merci pour votre lucidité dans l'appréciation du travail. Cela a été source de stress pour moi mais m'a montré l'importance de la rigueur scientifique et cela me suivra, merci beaucoup.

Merci aux rapporteurs, les professeurs: Egbendewe Y. G. AKLESSO, Abdrahamane SANOGO, Ibrahima Thione DIOP dont les commentaires m'ont aidé à améliorer le manuscrit.

Merci à Djiby, mon frère, mon chef et parfois mon confident. Tu as presque sacrifié ta carrière de chercheur pour nous les jeunes du Bame. Merci d'avoir rendu cette thèse possible. Merci pour ton affection, ton soutien sans faille et ta grande patience. Cela me touche de voir ton enthousiasme quand nous avançons. Que Dieu te comble et te garde !

Merci à Siwa Msangi de m'avoir initiée à la programmation mathématique en visitant le monde. Ton soutien m'a été très utile lorsque j'ai eu des impasses méthodologiques. Merci pour tes qualités humaines exceptionnelles, ta générosité et ton dévouement en termes de temps, de patience, de conseils et de partage de connaissances. Tu as grandement contribué à mon développement intellectuel et professionnel.

Merci à Sadibou pour les encouragements sans cesse et les conseils autant pour la thèse que pour le travail et la vie.

Merci à Katim TOURÉ de m'avoir accompagnée avec beaucoup d'enthousiasme et de patience lors de mes premières visites sur le terrain. Merci Katim.

Merci à Astou, ma collègue de bureau, ma sœur, ma confidente. Merci pour ton amour sincère, ta douceur ; ça rassure de te savoir là. Tu es une inspiration pour moi. Voir la rigueur avec laquelle tu travailles me motive à suivre ce chemin.

Merci à Yacine qui me considère et me traite comme sa propre sœur. Je suis sensible à cela Yacine, merci avec beaucoup d'amour.

Merci à ma sœur Nini, à ma maman du bureau Mme Diop, à Cheikh BA, et Pierre (mes compagnons des Niayes !) d'avoir facilité les missions sur le terrain.

Merci à Lorena DANESSI pour son assistance lors des voyages.

Un tout grand merci à mon ami, Ibrahima, d'avoir consacré de ton temps à la relecture de cette thèse de la première lettre au dernier point). Ton livre et tes corrections m'ont été d'une utilité considérable.

Merci à Assane BÈYE pour son assistance dans les démarches administratives et les encouragements.

Merci à Barry et Pape KANE pour les relectures précieuses.

Merci à ceux qui n'ont pas cessé de m'encourager: Ndèye Fatou FAYE MANÉ, Ndèye Fatou DIÉMÉ, Housseynatou DIALLO, Khady CAMARA, Serena FERRARI, Rassoul SY, Assane BÈYE, Barry, Pape BILAL, Pape KANE, Saer SARR, Mor NGOM, Syaka et tous les doctorants du Bame …, mes frères et sœurs de guerre que je porte dans mon cœur. La thèse et le Bame nous auront liés à jamais.

Merci à mon amie Ya Cor NDIONE avec qui j'ai cheminé tout au long de cette thèse sur tout: le travail, la thèse, ma vie personnelle.

Merci à toute l'équipe du Bame et de l'Isra.

Je remercie également les organisations de producteurs, la Sones, la D.G.P.R.E., l'Anacim et les producteurs pour avoir facilité la collecte de données et d'informations nécessaires à la réalisation de ce travail.

Merci à Alhassane CAMARA pour ton soutien moral et tes relectures.

Mention spéciale à mon adorable famille d'avoir supporté mes mauvaises humeurs, mon stress et mon indisponibilité durant toutes ces années (et certainement celles à venir). Merci de me donner la possibilité de travailler à tout moment sans contrainte. Cet espace ne suffit pas pour vous remercier mais sachez que vous représentez tout pour moi.

Sommaire

Remerciements 4

Sommaire 6

Résumé 7

Abstract 8

Introduction générale 9

Chapitre Premier
L'agriculture sénégalaise en proie au changement et à la variabilité climatique 18

Chapitre 2 :
Du climat comme bien public global aux externalités sur la production agricole, analyse théorique et empirique 61

Chapitre 3 :
Analyse économique de l'impact de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation dans la zone des *niayes* 99

Conclusion générale 151

Bibliographie des sources citées 158

Listes 171

Annexes 177

Table des matières 213

Résumé

Le climat constitue un facteur déterminant pour l'agriculture sénégalaise qui est fortement vulnérable au changement et à la variabilité climatique. Au Sénégal, l'agriculture irriguée, en particulier la production horticole, a moins attiré l'attention de la recherche en termes d'études axées sur le changement ou la variabilité climatique, comparée à celle des céréales cultivées dans les zones d'agriculture pluviales. Cette thèse a pour objectif de combler ce déficit en proposant une évaluation d'impact *ex ante* de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation dans la zone des *niayes* et ses implications sur la production horticole, notamment sur l'allocation des superficies aux spéculations, les revenus des agriculteurs et les implications en termes de politiques publiques.

Nous développons un modèle hydro-économique intégré constitué d'un modèle d'optimisation dynamique hydro-économique de gestion de la nappe des sables du quaternaire et d'un modèle de production agricole bioéconomique calibré aux données collectées sur un échantillon représentatif de 369 producteurs répartis dans la zone des *niayes* . Des scénarios de précipitations sur une période de dix ans à partir de 2014 sont générés en utilisant un modèle stochastique et intégrés au modèle hydro-économique. En plus des données sur la production, nous utilisons des données secondaires sur les aspects hydrologiques collectés à partir de la littérature, de la *Société nationale des eaux du Sénégal* (Sones), de la *Direction de l'exploitation et de la maintenance* (D.E.M.) et des données pluviométriques des régions de Dakar, Thiès, Louga, Saint-Louis de 1970 à 2011 provenant de l'Agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie (Anacim).

En comparant les différents scénarios (humide, sec et de référence), les résultats montrent que sur la période 2014-2023, plus le scénario de précipitation considéré est sec, plus la nappe est profonde et moins sont importants les prélèvements d'eau des agriculteurs. Cependant, nous constatons que la différence entre les différents scénarios est faible mais elle augmente avec le temps ; ce qui suggère que considérer une période plus longue montrerait plus l'effet du climat. Nos résultats montrent également que dans tous les scénarios climatiques, les prélèvements d'eau d'irrigation par les agriculteurs diminuent avec le temps en raison de la baisse du niveau de la nappe. Cela suggère que la recharge pluviométrique ne couvre pas les prélèvements. Nous trouvons que la recharge annuelle moyenne supplémentaire nécessaire à la stabilisation de la ressource s'élève à environ douze millions de mètres cubes d'eau. La baisse de la disponibilité de l'eau d'irrigation implique une baisse des superficies allouées aux différentes spéculations avec des réductions plus importantes pour les cultures les plus exigeantes en eau et qui sont moins rémunératrices, comme la carotte, et une baisse des revenus nets des agriculteurs. Les baisses sont légèrement plus importantes dans des scénarios plus secs. Les résultats montrent également qu'en termes de gestion de la ressource, la mise en place d'une taxe volumétrique permettrait une stabilisation de la ressource en eau mais mènerait à une baisse des superficies cultivées et donc de la production et des revenus nets des agriculteurs. Ainsi, les modes de gestion doivent permettre une durabilité de la ressource en eau mais également celle de la production horticole.

Mots clés

Variabilité climatique — Horticulture irriguée — Programmation Mathématique Positive — Modèle hydro-économique — Gestions des ressources en eau souterraine — Zone des *Niayes* — Nappe des sables du quaternaire.

Abstract

Climate is a determining factor for Senegalese agriculture, which is highly vulnerable to climate change and variability. In Senegal, irrigated agriculture, that of horticultural crops, has attracted less research attention in terms of studies focused on climate change or variability, compared to staple-growing, rainfed regions of the country. This thesis aims at filling this gap by proposing an ex ante evaluation of climate variability impact on the availability of irrigation water in the Niayes region and its implications for horticultural production, especially on the allocation of irrigated land to crops, farmers' incomes and policy implications.

We develop an integrated hydro-economic model composed of a dynamic hydro-economic optimization model of quaternary sand groundwater management and a bioeconomic farm model calibrated to data collected on a representative sample of 369 farmers distributed all along the Niayes area. Rainfall scenarios over a period of 10 years from 2014 are generated using a stochastic model and incorporated into the dynamic hydro-economic model. In addition to the production data, we use secondary data on hydrological aspects collected from the literature, the Senegalese water company (Sones), the Operations and Maintenance Department (DEM) and rainfall data on the four regions of the Niayes , i.e., Dakar, Thiès, Louga and St-Louis from 1970 to 2011 from the National Agency of Civil Aviation and Meteorology (Anacim).

By comparing the different scenarios (wet, dry and base), the results show that over the period 2014-2023, the drier the precipitation scenario considered, the higher the pumping distance to the aquifer (i.e. the 'lift') becomes and the smaller the amount of water withdrawn by farmers. However, we note that the difference between the different scenarios is small but increases over time ; thus sugesting a higher climate effect if a longer period of time were considered. Our results also show that in all climate scenarios, irrigation water withdrawals by farmers decrease over time due to decreasing groundwater levels. This suggests that rainfall recharge does not cover withdrawals. We find that the additional average recharge needed to stabilize the resource is approximately 12 million cubic meters per year in the considered period. The decrease in the availability of irrigation water implies a reduction in the area allocated to different crops with greater reductions for high water-demanding crops and which are less profitable, such as carrots and a decrease in farmers' net income. The declines are slightly larger in drier scenarios. The results also show that in terms of resource management, the introduction of a volumetric tax would stabilize the resource but would lead to a decrease in cultivated area and thus in production and farmers' income. Therefore, management methods should be carefully studied to allow sustainability of the groundwater resource but also to sustain production in the Niayes.

Key words

Climate variability — Irrigated horticulture — Positive Mathematical programming — Hydro-economic modeling — Groundwater management — Niayes region of Senegal — Quaternary sand aquifer.

Introduction générale

I. Contexte et problématique

Selon la classification des biens en économie (OSTROM & OSTROM, 1977), le climat est considéré comme un bien public global dont la fourniture est altérée par les émissions excessives de gaz à effet de serre, G.E.S. (STERN, 2007). Ces dernières, lorsqu'elles atteignent un certain niveau, entraînent des externalités négatives qui ont des répercussions sur les économies des pays, surtout les moins avancés qui contribuent le moins aux émissions (STERN, 2007 ; TOL, 2009 ; MENDELSOHN, 2012). Ces externalités se manifestent par des changements de variables climatiques qui persistent sur de longues périodes.

L'analyse économique des problèmes environnementaux se fait depuis plusieurs années avec des analyses orientées vers la pollution/dégradation de l'environnement et les externalités qui les causent (BAUMOL & OATES, 1988). L'objectif étant de mieux guider les politiques environnementales en proposant des mesures incitatives qui réduisent les externalités et préservent l'environnement. La théorie économique a ainsi été mobilisée pour étudier des phénomènes tels que le changement climatique (TIETENBERG & LEWIS, 201 ; STERN, 200 ; TOL, 2009…), l'un des plus importants problèmes environnementaux du fait de son caractère global et de sa complexité (TOL, 2009). La variabilité climatique et les phénomènes climatiques extrêmes (sécheresses et inondations) qui se superposent au changement climatique ont également été analysés [1].

L'analyse économique de ces phénomènes environnementaux a porté sur leurs impacts économiques, leurs causes et/ou les options d'adaptation pour y faire face. Cela a d'abord été préconisé à un niveau global (STERN, , 2007 ; TOL, 2009). Des études empiriques sectorielles et géographiquement localisées ont également été menées pour analyser les questions liées à l'impact de ces phénomènes du fait de leurs potentiels effets adverses sur les activités économiques (MENDHELSON *et al*., 1994 ; DESCHÊNES & GREENSTONE, 2007 ; NELSON *et al*., 2009). Ces études sectorielles se sont largement dirigées vers l'agriculture qui est l'un des secteurs les plus vulnérables au changement et à la variabilité climatique (STERN, 2007) car dépendant principalement de variables climatiques telles que les températures et les précipitations. En effet, les températures entraînent une modification des besoins en eau des spéculations et donc de la demande en eau des producteurs (NELSON *et al*., 2009) tandis que les précipitations jouent un rôle important dans la disponibilité de l'eau d'irrigation, notamment pour l'agriculture irriguée. Cette dernière dépend fortement des ressources en eaux souterraines et de surface qui sont également vulnérables au changement et à la variabilité climatique ainsi qu'aux phénomènes extrêmes (BOOKER *et al*., 1995 ; TANAKA, 2006 ; BATES *et al*., 2008 ; KUMAR, 2012).

Cette vulnérabilité de l'agriculture irriguée — et des ressources en eau dont elle dépend — au climat a suscité l'intérêt de plusieurs économistes (MEDELLÍN-AZUARA *et al*., 2010 ; HOWITT *et al*., 2012 ; BLANCO-GUTIÉRREZ *et al*., 2013 ; ESTEVE *et al*., 2015 ; VARELA-ORTEGA *et al*.,

1. — Les termes "changement climatique, variabilité climatique et phénomènes extrêmes" seront définis dans la section 1 du chapitre 1.

2016). Cependant, dans des pays comme le Sénégal, les études d'économistes sur les implications du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture irriguée et les ressources en eau sont moins répandues.

Cette thèse est motivée par le constat d'un déficit de connaissances sur l'analyse économique de l'impact du changement et de la variabilité climatiques sur l'agriculture irriguée au Sénégal qui est aussi vulnérable aux changements de précipitations et de temperatures observés ces dernières décennies et probablement ceux à venir comme le montre les études empiriques menées dans d'autres contextes (BOOKER *et al*., 1995 ; MEDELLÍN-AZUARA *et al*., 2010 ; HOWITT *et al*., 2012 ; BLANCO-GUTIÉRREZ *et al*., 2013 ; ESTEVE *et al*., 2015 ; VARELA-ORTEGA *et al*., 2016…).

Au niveau mondial, le changement climatique s'est manifesté par les températures qui ont augmenté ces dernières décennies (GIEC, 2001, 2007, 2014) ; les précipitations qui sont variables selon les localités et les périodes considérées. Les prévisions indiquent une hausse des températures comprise entre 0,3 ^{0}C et 0,7 ^{0}C sur la période 2016–2035 comparée à la période 1986-2005 (GIEC, 2014). Sur la période 2081-2100, il est prévu une hausse supérieure à 1,5 ^{0}C voire 2 ^{0}C comparé à la période 1850-1900 selon les scénarios d'émission R.C.P. (GIEC, 2014). Concernant les précipitations, les prévisions ne sont pas uniformes. À cela s'ajoutent la variabilité du climat et l'occurrence d'événements climatiques extrêmes.

En Afrique de l'Ouest, les modèles climatiques prévoient une augmentation entre +2 ^{0}C et +6 ^{0}C des températures en 2100 (tous scénarios d'émissions confondus) ; la pluviométrie quant à elle pourrait aussi bien diminuer qu'augmenter, selon les modèles employés (ROUDIER, 2012).

À l'instar de plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest, au Sénégal, le changement climatique s'est manifesté par une hausse des températures moyennes et une baisse de la pluviométrie (PANA, 2006 ; MCSWEENEY *et al.*, 2010 ; R.N.D.H., 2010) marquée par les événements de sécheresse dans les années 1970 (AGUIAR, 2009 ; ROUDIER, 2012) et dans les années 2000 (ANACIM *et al*., 2013). Les prévisions prédisent un réchauffement allant d'environ 1 ^{0}C à 3 ^{0}C d'ici les années 2050 et 2060 et des précipitations incertaines (MCSWEENEY *et al.*, 2010 ; KHOUMA *et al.*, 2013).

Au Sénégal, l'agriculture joue un rôle essentiel dans la réduction de la pauvreté, bien qu'elle n'ait contribué qu'à hauteur de 8,7 % du pib au cours de la période 2006-2012 (BANQUE MONDIALE, 2014). En effet, l'agriculture constitue le principal secteur d'activité dans le monde rural qui représente 54,8 % de la population (A.N.S.D., 2014) avec un taux de pauvreté estimé à 57,3 %, comparé à46,7 % pour la moyenne nationale (A.N.S.D., 2013). Sa multifonctionnalité en fait un secteur important aussi bien pour les exploitations agricoles que pour l'économie du pays. En effet, elle emploie 40 % de la population (BANQUE MONDIALE, 2014) et procure des matières premières aux autres industries telles que l'agro-industrie.

L'agriculture est pratiquée dans six zones agro-écologiques : la Vallée du fleuve Sénégal, la Casamance naturelle, le Bassin arachidier, la zone des *niayes*, le Sénégal oriental et la zone sylvo-pastorale. La majorité étant des zones d'agriculture pluviale à l'exception de de la Vallée du fleuve Sénégal où les deux types d'agriculture sont prédominants et la zone des *niayes* où les producteurs s'adonnent presque exclusivement à l'agriculture irriguée. La production est majoritairement assurée par des exploitations agricoles familiales (95 %

d'après la *Fédération des organisations non-gouvernementales du Sénégal*, Fongs, et la F.A.O. (2003).

Les phénomènes environnementaux tels que le changement et la variabilité climatique, les événements climatiques extrêmes (sécheresses et inondations) constituent un fléau pour le Sénégal qui, pour les raisons précédemment discutées, dépend fortement de l'agriculture. Les résultats du PANA (2006) montrent qu'au Sénégal, entre autres, les ressources en eau et les activités du secteur primaire (agriculture vivrière, élevage, maraîchage, arboriculture et pêche) sont exposées aux risques climatiques. La BANQUE MONDIALE (2014) argumente que le déficit du secteur agricole est en partie due aux chocs climatiques, à la sécheresse, aux inondations et/ou à l'irrégularité des précipitations.

Dans ce cadre, plusieurs études ont été menées pour évaluer l'impact des changements de températures et de précipitations dans l'agriculture, qu'ils résultent du changement ou de la variabilité climatique (y compris les événements climatiques extrêmes). Au Sénégal, la littérature a plus traité de l'impact de ces phénomènes climatiques sur les cultures pluviales, notamment les cultures céréalières : mil, maïs... (SÈNE, 2007 ; KHOUMA *et al*., 2013 ; SARR, 2016…) ou les légumineuses, telles que l'arachide (SÈNE, 2007 ; KHOUMA *et al*., 2013). Certaines études ont abordé les perceptions des agriculteurs sur le changement climatique et leurs stratégies d'adaptation en zone pluviale (BEYE, 2016) ; d'autres, leur vulnérabilité aux aléas climatiques (SALL, 2015). Le secteur de l'élevage a également fait l'objet d'études (DICKO, 2016). Ces études montrent la vulnérabilité du secteur agricole au changement de conditions climatiques.

Cependant, très peu d'études ont traité de l'agriculture irriguée, notamment de l'horticulture. BA & BARBIER (2015) se sont intéressés aux effets de pratiques horticoles dans les *niayes* , comme l'usage de pesticides et d'engrais minéraux sur l'environnement. L'effet possible d'une modification des variables climatiques et ses implications sur la production horticole n'a pas été exploré.

Au Sénégal, l'horticulture irriguée joue un rôle avéré pour l'économie. En effet, en 2013, elle a soutenu la croissance du secteur primaire avec une hausse de sa production d'environ 8 % (BANQUE MONDIALE, 2014). Ainsi,

> *dans un contexte où la productivité agricole a baissé au cours des dernières années, elle a été classée comme le sous-secteur le plus performant de l'agriculture sénégalaise.*
>
> (BANQUE MONDIALE, 2014)

Cela lui confère une place prépondérante dans les politiques agricoles actuelles du pays comme c'est le cas dans le *Programme d'accélération de la cadence de l'agriculture sénégalaise* (Pracas).

La zone des *niayes* occupe une place importante dans l'offre de produits horticoles, pour lesquels, elle constitue la principale zone de production avec près de 60 % de la production nationale en produits maraîchers et 50 % des exportations en produits horticoles (PADEN, 2013).

Dans les *niayes* , l'irrigation est possible grâce à l'existence d'une nappe affleurante, la nappe des sables du quaternaire, à laquelle les producteurs accèdent à travers des puits ou forages par exhaure manuelle ou mécanique (avec pompe). KUMAR (2012) soutient que les ressources en eau souterraines sont liées au changement climatique à travers l'interaction directe avec les ressources en eau de surface ou indirecte à travers le processus de recharge. Dans les *niayes*, les ressources en eau souterraines sont principalement

alimentées par les eaux de pluies (GAYE, 1990 ; FAYE, 1995 ; TINE, 2004 ; DASYLVA & COSANDEY, 2005 ; AGUIAR, 2009 ; AGUIAR *et al*., 2010) qui, depuis les sécheresses des années 1970 et 1980, sont restées en deçà des niveaux atteints lors des périodes humides. Elles sont passées en moyennes de 500 mm dans les décennies 1932-1960 (NDONG, 1995) à 321,42 mm sur la période 1970-1990 et 353,67 mm sur la période 1990-2011 (ANACIM, 2013) [2].

Les prévisions climatiques projettent, au Sénégal :

— des températures plus élevées (MCSWEENEY *et al*., 2010 ; JALLOH *et al*., 2013) qui augmenteraient les besoins en eau des plantes (NELSON et *al*., 2009 ; ESTEVE *et al*., 2015) ; ce qui, combiné à une hausse continuelle de la production horticole (hausse observée et prévue d'après les objectifs sur la production horticole affichés dans le Pracas) entraînerait une plus grande sollicitation de la ressource par les producteurs ;

— des précipitations incertaines (JALLOH *et al*., 2013).

Dans ce contexte d'incertitude climatique (changement et variabilité climatique inclus), si les précipitations continuent à être erratiques, la recharge des eaux souterraines pourrait être compromise, de même que la hauteur de la nappe. Ce qui aurait des implications sur l'accès à l'eau d'irrigation pour la production horticole, d'autant plus que les producteurs utilisent souvent des moyens d'exhaure manuelle (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013 ; DASYLVA & COSANDEY, 2010 ; DASYLVA, 2012) qui nécessitent une nappe peu profonde (DASYLVA & COSANDEY, 2010 ; DASYLVA, 2012).

Au regard de ces incertitudes climatiques et de l'importance des ressources en eau pour l'horticulture irriguée, il s'avère nécessaire de s'interroger, dès à présent, sur les effets possibles de la variabilité future des précipitations, sur la disponibilité de l'eau d'irrigation dans les *niayes* et ses implications sur la production horticole. Ainsi, cette thèse cherche à répondre à la question : quel est l'impact de la variabilité future des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation dans les *niayes* et quelles en sont les implications sur la production horticole ?

Du fait de sa complexité, ce questionnement mobilise différentes théories économiques pour faciliter sa compréhension et son analyse. Les ressources en eau souterraines étant considérées comme des ressources communes en économie, ce questionnement s'inscrit naturellement dans le cadre de la théorie économique sur les ressources communes (connues sous le nom de C.P.R., *common pool resources*) qui a émergée dans les années 1980, 1990. Dans la zone des *niayes*, cette ressource est utilisée par les agriculteurs pour produire des biens aux consommateurs. Ainsi, cette thèse s'inscrit également dans le cadre de l'économie de la production appliquée à l'agriculture irriguée, d'autant que les implications possibles d'une disponibilité de l'eau face au changement et à la variabilité climatique sur la production horticole seront également traitées.

OSTROM [3] (1990) caractérise les ressources communes comme des « systèmes de ressource » utilisés par des « appropriateurs » qui extraient des unités de ressource. Ce type de bien a deux caractéristiques :

2. — Calculs à partir des données de l'Anacim.

3. — OSTROM s'est vu décerner le prix nobel d'économie en 2009 (avec Oliver WILLIAMSON) « pour son analyse de la gouvernance économique et, en particulier, des biens communs ». « Ses travaux portent sur la

— la rivalité dans leur usage (contrairement aux biens publics qui sont non rivaux) du fait de leur soustractabilité qui entraîne que les unités de ressource utilisées par un « appropriateur » ne seront pas disponibles pour un autre (OSTROM & OSTROM, 1977) ;
— la difficulté d'exclure des utilisateurs potentiels (OSTROM, 1990 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012).

Ces deux caractéristiques font que ces ressources peuvent être surexploitées et cela peut mener à la tragédie des biens communs (HARDIN, 1968) si leur usage n'est pas bien réglementé. La tragédie des biens communs de Garrett HARDIN soutient que les actions des usagers de la ressource déterminent sa disponibilité dans le long terme.

Ainsi, en économie, les études empiriques sur ces ressources (GISSER & SANCHEZ, 1980 ; OSTROM, 1990 ; PROVENCHER & BURT, 1993 ; KNAPP & OLSON, 1995 ; GRIFFIN, 2006 ; WANG & SEGARRA, 2011 ; MSANGI & CLINE, 2016) se sont beaucoup orientées vers les aspects liés aux conséquences des décisions et actions des « appropriateurs » avec l'usage de la théorie des jeux, l'économie expérimentale… et à la gouvernance de ces biens (avec, entre autres, des outils de la nouvelle économie institutionnelle) pour assurer leur durabilité.

Les aspects liés à la disponibilité de ces ressources, par rapport au changement et à la variabilité climatiques dans un contexte d'augmentation de leurs usages, ont historiquement moins été abordés. Il existe cependant plusieurs applications empiriques sur les ressources en eau qui :
— analysent les questions habituelles sur leur gestion en intégrant les aspects climatiques avec ou non un focus sur l'agriculture ;
— ou analysent directement l'effet du changement et de la variabilité climatique et des événements climatiques extrêmes sur les ressources en eaux pour l'agriculture irriguée et les potentiels moyens d'adaptation (BOOKER *et al*., 1995 ; MEDELLÍN-AZUARA *et al*., 2010 ; HOWITT *et al*., 2012 ; BLANCO-GUTIÉRREZ *et al*., 2013 ; ESTEVE *et al*., 2015 ; VARELA-ORTEGA *et al*., 2016).

Pour ces analyses, qui sont majoritairement prospectives, les études utilisent principalement des modèles hydro-économiques (M.H.E.) intégrées qui mettent en relation différentes composantes (hydrologique, économique). Contrairement aux modèles purement hydrologiques, les M.H.E. intégrés se fondent sur la théorie néoclassique et permettent de prendre en compte la valeur économique de l'eau selon ses différents usages. Cela leur permet d'aller au-delà de la simple disponibilité de la ressource face au climat changeant mais également de voir ses implications sur les usagers. Pour le cas de l'agriculture, ces implications peuvent concerner les décisions des producteurs en termes d'allocation des superficies, les impacts sur leurs revenus nets et éventuellement les options de gestion des ressources pour une meilleure disponibilité de l'eau d'irrigation.

II. Objectifs de la thèse

Dans un contexte de changement climatique, l'objectif global du présent travail est de faire une analyse prospective de l'effet de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de

théorie de l'action collective et des biens publics et s'inscrivent dans le cadre de la nouvelle économie institutionnelle » (OSTROM, révision scientifique de BAECHLER, 2010).

l'eau d'irrigation dans la zone des *niayes* et d'en analyser les implications sur la production horticole.

Les objectifs spécifiques se déclinent ainsi :

— faire une analyse d'impact ex ante de la variabilité des précipitations sur la profondeur de la nappe et les comportements de prélèvements d'eau des producteurs ;

— faire une analyse prospective des implications de différents niveaux de disponibilité de l'eau d'irrigation sur la production horticole, notamment les décisions des producteurs en termes d'allocations de superficie et leurs revenus nets ;

— tester et discuter des options de gestion de la ressource en eau pour l'irrigation.

III. Hypothèses

Notre questionnement nous pousse à émettre la première hypothèse suivante :

— la variabilité des précipitations entrainera une baisse de la profondeur de la nappe et des prélèvements d'eau des producteurs horticoles dans les *Niayes* .

Les deuxième et troisième hypothèses sont motivées par la première :

— une baisse de la disponibilité de l'eau d'irrigation entrainera une baisse de la production horticole et des revenus nets des producteurs ;

— la mise en place d'une taxe sur les prélèvements d'eau par les producteurs entrainera un usage raisonnable de la ressource mais impactera négativement la production horticole.

IV. Approche méthodologique

Notre approche méthodologique découle :

— d'une part des approches utilisées par les économistes dans leurs études d'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture ;

— d'autre part des méthodes utilisées en économie pour modéliser les ressources communes, particulièrement les ressources en eau ; et également ;

— des approches de modélisation du comportement des agriculteurs utilisées en économie agricole.

Dans la littérature, les approches utilisées pour étudier l'effet du changement climatique sur l'agriculture, sont principalement l'approche fonction de production (ROUDIER, 2012 ; JALLOH *et al*., 2013 ; NELSON *et al*., 2013), l'approche ricardienne (MENDELSOHN *et al*., 1994), l'approche DESCHÊNES & GREENSTONE (D&G, 2006, 2007) et les approches intégrées (MEDELLÍN-AZUARA *et al*., 2010 ; FOFANA, 2011 ; HOWITT *et al*., 2012 ; BLANCO-GUTIÉRREZ *et al*., 2013 ; VARELA-ORTEGA *et al*., 2016…).

L'approche fonction de production est majoritairement utilisée par des agronomes avec les modèles de simulation de culture mais également par des économistes avec des modèles économétriques (SCHLENKER & ROBERTS, 2008). L'approche ricardienne et celle de D&G

sont autant d'outils utilisés par les économistes dans l'évaluation de l'effet du changement climatique sur l'agriculture. Ces approches se sont principalement intéressées aux effets des changements de précipitations et de températures sur les rendements des cultures pluviales et/ou des variables économiques telles que les revenus nets.

Cependant, elles ne sont pas adaptées à l'agriculture irriguée car elles considèrent les précipitations comme la seule source d'irrigation et que leur effet sur la production est direct. Or dans le cas de l'agriculture irriguée, ce lien est indirect, les agriculteurs utilisant les ressources en eau qui dépendent à leur tour des précipitations. Ainsi, pour mieux traiter des questions sur le changement de variables climatiques dans l'agriculture irriguée, les études se sont orientées vers des approches intégrées particulièrement des modèles hydro-économiques intégrés (MEDELLÍN-AZUARA *et al*., 2010 ; HOWITT *et al*., 2012 ; BLANCO-GUTIÉRREZ *et al*., 2013 ; ESTEVE *et al*., 2015 ; VARELA-ORTEGA *et al*., 2016) qui mettent en relations plusieurs composantes pour prendre en compte la disponibilité de l'eau et également les comportements d'ajustement des producteurs. Ces composantes sont souvent des modèles climatique, agronomique, économique et hydrologique qui nécessitent l'interaction entre plusieurs disciplines.

Dans notre cas, nous nous inscrivons dans la démarche intégrée. Ainsi, en nous inspirant des efforts entrepris par les économistes pour modéliser les ressources en eau (GISSER & SANCHEZ, 1980 ; KNAPP & OLSON, 1995 ; GRIFFIN, 2006 ; MSANGI, 2008 ; WANG & SEGARRA, 2011 ; MSANGI & CLINE, 2016…), nous utilisons comme composante principale un modèle d'optimisation hydro-économique que nous adoptons à notre contexte et à nos objectifs.

Notre modèle d'optimisation hydro-économique (qui est dynamique) permet de représenter sur une période de dix ans à partir de 2014 :

— la fonction-objectif des producteurs utilisant la nappe qui est constituée d'une fonction de bénéfice qui représente les bénéfices que les producteurs maraîchers tirent de l'usage de l'eau d'irrigation et d'une fonction de coûts qui représente les coûts d'extraction de l'eau d'irrigation. La fonction de bénéfice et la fonction de coût dépendent directement de la profondeur annuelle de la nappe et de la quantité annuelle d'eau extraite par les producteurs ;

— la profondeur annuelle de la nappe dépend à son tour des précipitations annuelles, des extractions d'eau des producteurs et des autres agents utilisateurs de la ressource.

Un sous modèle d'optimisation économique sur la production agricole, qui s'inspire des travaux de HOWITT (1995) et SADOULET & DE JANVRY (1995), nous permet d'estimer la fonction de bénéfice en eau des producteurs intégrée au modèle hydro-économique. Ce modèle sera également utilisé pour analyser les implications de la disponibilité de l'eau d'irrigation sur les décisions d'allocation des superficies des producteurs et leurs revenus nets.

Les deux modèles nous permettrons d'analyser l'impact de la mise en place d'une taxe sur la ressource en eau et ses implications sur la production horticole.

Des scénarios de précipitation sur la période de dix ans sont générés par un modèle de simulation stochastique et intégrés au modèle hydro-économique.

Les données que nous utilisons sont de deux types :

— des données primaires sur les producteurs maraîchers de la zone des *niayes* que nous avons collectées durant la campagne de contre-saison de 2014. Notre échantillon contient 369 producteurs maraîchers et les données portent sur les coûts et revenus tirés de la production et leurs pratiques agricoles ;
— des données secondaires sur les aspects hydrologiques provenant de la littérature (FAYE, 1995 ; GAYE, 1990 ; TINE, 2004 ; DASYLVA & COSANDEY, 2005 ; AGUIAR, 2009 ; AGUIAR *et al.,* 2010), de la Sones et de la *Direction de l'exploitation et de la maintenance* (Dem) et des données sur les précipitations des régions de Dakar, Thiès, Louga, Saint-Louis de 1970 à 2011 provenant de l'*Agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie* (Anacim).

V. Contribution de la thèse à la connaissance

La contribution de cette thèse réside :
— dans la pertinence de la question de recherche posée ;
— dans l'approche méthodologique mobilisée dans le contexte ouest-africain.

Concernant la question de recherche, par rapport à la littérature sur le changement et la variabilité climatique sur l'agriculture, nos résultats constituent une évidence supplémentaire à la vulnérabilité de l'agriculture irriguée aux incertitudes climatiques. Par ailleurs, au Sénégal, les économistes agricoles ne se sont pratiquement pas intéressés aux questions relatives aux ressources en eau, encore moins aux autres questions évoquées, malgré l'importance de cet intrant dans l'agriculture irriguée. Ces questions ont été l'apanage d'autres disciplines telles que la géographie, l'hydrologie qui ne font pas nécessairement un lien explicite avec l'agriculture. Or, en s'appuyant sur la théorie économique des ressources communes et l'économie agricole, les économistes ont également leur contribution à apporter à ce type de question.

Concernant l'approche méthodologique, à ce jour, cette thèse constitue, à notre humble connaissance, la première tentative de développement d'un modèle hydro-économique intégré avec représentation à la fois de l'usage d'une ressource en eau souterraine et du comportement des producteurs dans une zone d'agriculture irriguée au Sénégal. Les études sur les ressources en eau au Sénégal s'orientent davantage sur les aspects hydrologiques et n'intègrent pas explicitement les aspects économiques.

Par ailleurs, dans la zone des *Niayes* , DASYLVA & COSANDEY (2010), DASYLVA (2012), AGUIAR (2009), AGUIAR *et al*. (2010) — principalement des géographes — ont tenté d'analyser les relations entre la variabilité des précipitations et les ressources en eau. Dans leurs approches, ils ont fait la comparaison entre les niveaux de la nappe et les précipitations ou calculé le bilan hydrique dans différentes conditions climatiques. Ainsi, ils utilisent des approches qui n'intègrent pas explicitement les comportements des acteurs. Or, la théorie sur les ressources communes démontre l'influence des utilisateurs sur la ressource. Ainsi, il est important, lorsque l'on analyse la disponibilité de ces ressources, de prendre en considération les changements possibles des facteurs externes, notamment ceux liés au climat mais également les comportements des producteurs, principaux utilisateurs de la ressource.

Notre démarche, en s'inscrivant dans le cadre de la théorie économique des ressources communes et de l'économie de la production, se distingue de ces approches en intégrant à la fois les facteurs climatiques et les comportements des producteurs dans l'analyse de l'impact de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation. Elle permet par ailleurs de quantifier les implications sur la production agricole sur des variables telles que l'allocation des superficies des producteurs, leurs revenus nets… et de tester et discuter des instruments de gestion de la ressource.

Enfin, les outils développés dans cette thèse constituent un acquis considérable car peuvent être mobilisés dans d'autres recherches, en prenant en compte les limites de l'approche que nous détaillons dans la conclusion, pour approfondir les questions traitées ou en explorer d'autres.

Ce travail est organisé en trois chapitres.

Le chapitre 1 revient sur la définition de quelques concepts et retrace le contexte climatique en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal. Il traite ensuite des implications du changement et de la variabilité climatique sur le secteur agricole sénégalais dans les différentes zones agroécologiques avec un focus sur la zone de production horticole des *niayes*. Le cadre institutionnel sur le changement climatique au Sénégal est également passé en revue en se focalisant sur les efforts d'adaptation et d'atténuation amorcés au niveau national et par les acteurs non étatiques (recherche, O.N.G., producteurs et organisations de producteurs…). L'intérêt de ce chapitre pour notre questionnement, est qu'il fait un diagnostic sur la vulnérabilité de l'agriculture sénégalaise au changement et à la variabilité climatique et met en évidence l'absence d'études sur le cas de l'agriculture irriguée.

Le chapitre 2 est consacré au contexte théorique et empirique en rapport avec le changement climatique, la variabilité climatique et la production agricole. Il revient sur :

— la théorie économique et le changement climatique dans une perspective globale (cadre mondial) ;

— avant de voir le lien entre changement climatique, variabilité climatique et production agricole en partant de la théorie de la production et de son application dans l'agriculture.

Dans ce chapitre, nous faisons également une revue de la littérature sur les études sur le climat et l'agriculture en nous intéressant davantage aux méthodes d'évaluation d'impact du changement et de la variabilité climatique dans le domaine agricole en analysant leur adaptabilité au cas de l'agriculture irriguée. Pour cette dernière, nous faisons un focus sur les modèles hydro-économiques intégrés et la théorie économique qui les sous-tend. Enfin, pour les différentes approches utilisées, nous discutons les principaux résultats, particulièrement en Afrique de l'Ouest.L'intérêt de ce chapitre est qu'il nous permet de mieux comprendre la place du changement climatique dans la théorie économique et de faire le lien entre changement climatique, variabilité climatique et agriculture pluviale et irriguée. Ce chapitre nous éclaire également sur le choix de notre approche méthodologique.

Enfin, le chapitre 3 aborde notre approche méthodologique et l'application empirique que nous en faisons, le processus de collecte des données utilisées et leur description, les résultats obtenus sur l'effet de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation ainsi que l'analyse de ses implications sur la production horticole et les options d'amélioration de la disponibilité de l'eau d'irrigation dans la zone des *niayes* dans un contexte de climat changeant.

Chapitre Premier
L'agriculture sénégalaise en proie au changement et à la variabilité climatique

Pour introduire notre question de recherche, nous jugeons nécessaire de revenir sur le contexte dans lequel elle s'insère au Sénégal et qui la justifie : le contexte climatique et la vulnérabilité du secteur agricole et des ressources dont il dépend au changement et à la variabilité climatique.

Comme stipulé dans l'introduction, le Sénégal est fortement dépendant de l'agriculture pratiquée dans six zones agroécologiques représentées sur la FIG. 1.

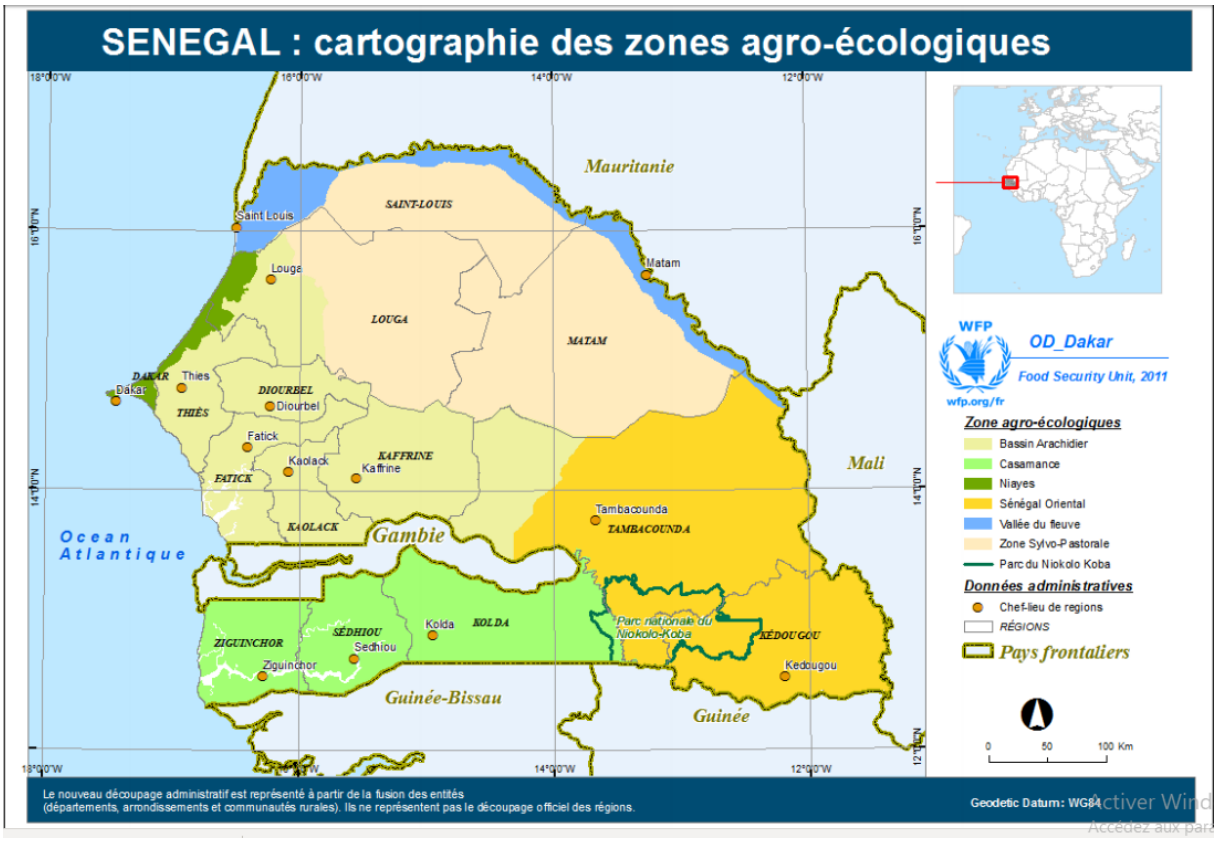

FIG. 1. — Zones agro-écologiques du Sénégal. Source : W.F.P. (2011).

Chaque zone a ses spécificités en termes de spéculations cultivées, types d'exploitations présentes, degré de mécanisation des opérations culturales, type de main-d'œuvre utilisée, etc. Les différences biophysiques et socio-économiques font que la vulnérabilité au climat serait plus ou moins prononcée selon la zone.

Le bassin arachidier est subdivisé en bassin nord couvrant les régions de Thiès, Diourbel et une partie de Louga et en bassin sud couvrant les régions de Fatick, Kaffrine et Kaolack.

Les exploitations y sont majoritairement familiales et cultivent principalement l'arachide et le mil (HATHIE *et al.,* 2015). D'autres spéculations telles que le maïs, le sorgho, le niébé, le manioc, la pastèque et le riz pluvial y sont cultivées.

La zone sylvo-pastorale concentre une bonne partie du cheptel national (PANA, 2006), avec l'élevage extensif comme principale activité (F.A.O., 2003 ; F.A.O. & C.S.E., 2007). L'agriculture pluviale s'y pratique aussi.

La Casamance couvre les régions de Ziguinchor, Sedhiou et Kolda. Comme dans le bassin arachidier, l'agriculture pluviale y est pratiquée avec la culture de céréales (riz pluvial, mil et sorgho) et de l'arachide. La culture du riz de bas-fond avec un faible usage d'intrants y est aussi notée. Il existe aussi des périmètres aménagés irrigués où se fait la culture du riz irrigué (F.A.O., 2003).

Le Sénégal oriental couvre les régions administratives de Tambacounda et de Kédougou. L'agriculture pluviale y est pratiquée avec les céréales (mil, sorgho, maïs, riz et fonio). Il existe aussi un système de rotation coton-céréales. Concernant l'élevage, il est surtout bovin et s'associe à l'agriculture (F.A.O., 2003). C'est une zone riche en ressources minières. Ainsi, l'activité minière procure des revenus en dehors des activités agricoles.

La Vallée du fleuve Sénégal se situe dans la partie nord du pays et s'étend le long du fleuve Sénégal de Saint-Louis à Bakel (FALL, 2006). La zone est subdivisée en quatre sous zones, la haute vallée, la moyenne vallée (amont et aval), le delta qui se trouvent dans trois régions administratives. La haute vallée se trouve dans le département de Bakel situé dans la région de Tambacounda, la moyenne vallée amont se trouve dans la région de Matam et la partie avale dans la région de Saint-Louis ; le delta se trouve également à Saint-Louis (FALL, 2006). Une autre subdivision de la zone se fait suivant ses types de sol : le Waalo, le Diéri et le Diédiogol qui correspond à la zone de transition entre le Waalo (au bord du fleuve) et le Diéri (F.A.O., 2003 ; FALL, 2006).

Les systèmes de culture sont :

— le pluvial (principalement dans le Diéri) avec le mil, le niébé, le sorgho et le béréf (FALL, 2006) ;
— la culture de décrue (principalement dans le Waalo) avec comme principales spéculations le sorgho, la patate douce, le maïs et le niébé en association avec les céréales (FALL, 2006) ;
— les cultures irriguées (essentiellement dans le delta) avec comme principales cultures le riz (FALL, 2006), le maraîchage, en contre-saison froide, avec la tomate (FAYE *et al*., 2007), l'oignon et la pomme de terre (F.A.O., 2003 ; FALL, 2006).

On note également l'agro-pastoralisme avec des éleveurs qui pratiquent de l'élevage extensif dans le Ferlo avec la transhumance des bovins et petits ruminants. La culture de la canne à sucre y est aussi notée avec la *Compagnie sucrière sénégalaise* (C.S.S.).

La présence de l'agro-industrie avec des entreprises telles que la C.S.S., la *Société de conserves alimentaires au sénégal* (Socas) et la Linguère dans la tomate offre des opportunités d'emploi aux populations locales (FALL, 2006). Ainsi, en marge des activités agricoles, les membres des exploitations de type familial s'adonnent à des activités non agricoles.

En dehors de la zone des *niayes* [4] et de la Vallée du fleuve Sénégal, dans les différentes zones, des activités horticoles (maraichage et arboriculture) se pratiquent de plus en plus majoritairement dans de petits périmètres maraîchers gérés par des *groupements de promotion féminines* (G.P.F.) ou des *groupements d'intérêt économique* (G.I.E.) (F.A.O., 2003). Dans les zones d'agriculture pluviale, la production est majoritairement destinée à l'autoconsommation et le surplus est vendu. Selon les spéculations, une partie peut aussi être réservée pour les semences de l'année suivante. L'orientation vers le marché se fait davantage pour la production de cultures irriguées. C'est le cas de la zone des *niayes* avec les produits horticoles et du delta du fleuve Sénégal avec des produits maraîchers tels que la tomate et l'oignon et de plus en plus avec le riz.

L'agriculture a comme fonction, de procurer des revenus aux producteurs, de générer des emplois pour le monde rural, d'apporter une contribution à l'économie à travers un équilibre de la balance commerciale, de nourrir la population, de gérer les ressources naturelles par des pratiques agricoles qui respectent l'environnement (FAYE *et al*., 2007). Les exploitations agricoles assurent ainsi l'approvisionnement en produits alimentaires (céréales sèches, légumes, riz…) au niveau local et contribuent à l'exportation de produits agricoles (produits horticoles, arachide). Elles permettent, par ailleurs, aux familles rurales d'en vivre puisqu'une part importante de la production est destinée à l'autoconsommation dans les zones de production de cultures vivrières. Cependant, elles ont besoin d'assistance financière et d'appui-conseil, de formation, de sécurité foncière… pour mieux jouer leur rôle.

De la période coloniale à nos jours, plusieurs politiques agricoles ont été mises en place par les pouvoirs politiques. De l'économie de traite arachidière durant l'époque coloniale au programme agricole entre 1960 et 1980, l'État était engagé dans le développement du secteur agricole. Le pays exportait l'arachide et importait les produits finis ; il vivait de ses recettes d'exportations issues de l'arachide (FAYE *et al*., 2007).

À la suite de l'indépendance, le tarif préférentiel dont le Sénégal bénéficiait pour la vente de l'arachide était supprimé par la France. Avec l'installation du régime socialiste au pouvoir après l'indépendance en 1960, nous assistons à une politique orientée vers la sécurité alimentaire avec le mil et l'arachide ; tout ceci, dans le cadre du programme agricole (FAYE *et al*., 2007). Des structures d'encadrement et d'appui aux producteurs sont mises en place avec les *centres régionaux d'assistance au développement* (Crad) en 1964 (DIENG & GUÈYE, 2005), l'*Office national de coopération et d'assistance pour le développement* (Oncad) en 1966, etc. Vers la fin des années 1970, sous les directives des institutions de Bretton Woods (la *Banque mondiale* et le *Fonds monétaire international*, F.M.I.), le Sénégal, à l'instar d'autres pays en développement, se lance dans les politiques d'ajustement structurelles qui se traduisent par un désengagement de l'État dans l'agriculture.

En 2000, avec la prise du pouvoir par le *parti démocratique sénégalais* (P.D.S.) et la fin de l'ajustement structurel, on assiste à l'émergence de nouvelles politiques et de nouveaux programmes. La *loi d'orientation agro-sylvo-pastorale* (Loasp) a été mise en place en 2004 dans le but d'être un cadre de développement de l'agriculture sénégalaise sur vingt ans. Des programmes de développement sectoriels sont également élaborés: le *Programme national de développement agricole* (P.N.D.A.), le *Programme national de développement de l'élevage* (P.N.D.E.) et le *Plan d'action forestier du Sénégal* (Pafs). Le plan de *Retour vers*

4. — Cette zone a été en partie présentée dans l'introduction et nous reviendrons plus en détail sur sa présentation dans la section 3 de ce chapitre 1.

l'agriculture (Reva) en 2006, la *Grande Offensive pour la nourriture et l'abondance* (Goana) en 2008 pour faire face à la crise alimentaire mondiale de 2007-2008.

Ces politiques et programmes, largement influencés par les institutions de Bretton Woods et les autres partenaires au développement, n'ont pas réussi à faire assurer à l'agriculture les principales fonctions qui ont été évoquées précédemment. Des facteurs tels que le climat contribuent en grande partie à la baisse de la performance de l'agriculture qui est fortement tributaire des aléas climatiques. On distingue deux saisons : une saison sèche allant de novembre à mai et une saison des pluies allant de juin à octobre, sa durée peut être variable selon que l'on se trouve dans le sud ou dans le nord du pays.

Au XXe siècle, le Sénégal a connu un climat marqué par une hausse des températures et une baisse des précipitations qui ont eu un impact sur les rendements. Les prévisions montrent une hausse probable des températures et un dérèglement des précipitations. Des baisses de rendements sont aussi prévues pour les spéculations céréalières, de même que l'arachide. Les cultures horticoles ont moins fait l'objet d'études sur le changement et la variabilité climatique. Cependant, la zone des *niayes*, principale zone de production des spéculations horticoles, est aussi sujette à l'incertitude climatique.

Des stratégies d'adaptation et des mesures d'atténuation sont entreprises à différents niveaux pour faire face au changement et à la variabilité climatique. Le gouvernement est engagé dans des échanges internationaux et a mis en place, dans le cadre de ces engagements, un plan national d'adaptation au changement et à la variabilité climatique et des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les O.N.G. telles que *Green Sénégal* et l'Enda sont engagées aussi dans des projets. Il en est de même pour la recherche avec des structures nationales telles que l'*Institut sénégalais de recherches agricoles* (Isra), l'Anacim, le *Centre de suivi écologique* (C.S.E.) en collaboration avec des institutions partenaires telles que les organisations internationales (Ifpri : *International Food Policy Research Institute* ; le C.C.A.F.S. : *Climate Change Agriculture and Food Security*). De leur côté, les producteurs développent et adoptent des stratégies telles que des variétés à cycle court, la diversification des activités, l'usage de technologies à même de faciliter la restauration des sols tels que le Zaï… pour faire face aux incertitudes climatiques.

Ce chapitre s'articule en quatre sections. La première section revient sur la définition de quelques concepts utilisés dans la thèse. La deuxième section est axée sur le contexte climatique en Afrique de l'Ouest et au Sénégal en particulier. Elle revient sur les changements de températures et de précipitations au Sénégal dans le XXe siècle et les prévisions ainsi que les événements climatiques extrêmes (sécheresses et inondations). La troisième section traite des implications de ce climat changeant sur l'agriculture Sénégalaise. De manière spécifique, elle analyse la vulnérabilité de l'agriculture pluviale et irriguée au changement et à la variabilité climatique (y compris les événements extrêmes) dans les différentes zones agro écologiques en insistant sur les effets passé et prévu de ces phénomènes sur la production. Cette partie fait, en particulier, un focus sur la zone des *niayes*, notre zone d'étude, en insistant sur l'importance de cette zone dans l'offre de produits horticoles, les activités agricoles, les contraintes auxquelles les producteurs font face parmi lesquelles les aléas climatiques. Enfin, la quatrième section discute des interventions des différents acteurs (État, chercheurs, société civile et producteurs) destinées à faire face aux effets du changement et à la variabilité climatique, notamment les stratégies d'adaptation et les initiatives de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Section 1 : Définition des concepts

Avant de commencer ce chapitre, il nous parait important de revenir sur la définition des principaux concepts utilisés dans ce document. Nous revenons sur la définition :

— des concepts climatiques ;
— de l'adaptation et de l'atténuation ;
— de la vulnérabilité au changement climatique, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes ;
— de l'horticulture.

1.1. Concepts climatiques

Dans cette section, nous revenons sur les définitons du Giec, du climat, du changement climatique, de la variabilité climatique et des évènements climatiques extrêmes.

Le Giec est le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (ou I.P.C.C. : Intergovernmental Panel on climate change) créé en 1988 par le Programme des Nations unies pour l'environnement (Pnue) et l'Organisation mondiale de la météorologie (0 U.N.F.C.C.C., 2006). C'est un organisme intergouvernemental, ouvert à tous les pays membres de l'Organisation des Nation unies (Onu). Sa mission est :

> *d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue.*

Le Giec publie de manière régulière des rapports sur la recherche sur le climat.

Dans le rapport du Giec de 2007 :

> *au sens étroit du terme, le climat désigne en général le temps moyen ou, plus précisément, se réfère à une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire des millions d'années. Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, la hauteur de précipitation et le vent. Dans un sens plus large, le climat désigne l'état du système climatique, y compris sa description statistique.*

Le GIEC (0 2014) définit le *changement climatique* comme :

> [la] *variation de l'état du climat, qu'on peut déceler* […] *par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou* […] *des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère* […].

La convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques, C.C.N.U.C.C. (NATIONS UNIES, 1992) le définit comme :

> *des changements de climat* […] *altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.*

La C.C.N.U.C.C. (NATIONS UNIES, 1992) stipule que les changements de climat sont imputables « directement ou indirectement à une activité humaine ». Ainsi, il semble y avoir un manque de consensus sur les causes du changement climatique. En effet, la définition du Giec suggère que le changement climatique est due à l'acivité humaine mais également à des processus naturels. Cependant, la C.C.N.U.C.C. considère que les causes sont entièrement anthropiques.

> *Contrairement au changement climatique qui est une modification du climat sur une longue période (des décennies), la variabilité du climat consiste en une modification du climat sur une période de temps plus courte, telle qu'un mois, une saison ou une année (W.M.O., 2017 ; DINSE, 2011). Le GIEC (2014) la définit comme* :[une] *variations de l'état moyen et d'autres variables statistiques (écarts types, fréquence des extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles spatiales et temporelles au-delà de la variabilité propre à des phénomènes météorologiques particuliers. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne) ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe).*

Le GIEC (2007) définit un *événement climatique extrême* [6] comme :

> [un] *événement rare en un endroit et à un moment de l'année particuliers.* […] *un événement météorologique extrême devrait normalement être aussi rare, sinon plus, que le dixième ou le quatre vingt dixième percentile de la fonction de densité de probabilité observée.*

Les phénomènes climatiques extrêmes peuvent varier d'un endroit à un autre (GIEC, 2007). Dans le cadre de cette thèse, nous faisons référence aux inondations et aux sécheresses lorsque nous évoquons ces phénomènes extrêmes.

1.2. De l'adaptation à l'atténuation : nuance et synergie

Pour réduire les effets du changement climatique deux types de stratégies existent: l'adaptation et l'atténuation qui sont complémentaires dans la lutte contre le changement climatique.

Selon MENDELSOHN (2012), *l'adaptation* est le changement dans le comportement et le capital motivé par le changement climatique. Il le définit encore comme tout changement de comportement qu'un agent (consommateur, producteur ou gouvernement) entreprend pour réduire les dommages (augmenter les bénéfices) causés (provenant) par le (du) changement climatique. La définition des stratégies d'adaptation au changement climatique par MENDELSOHN (2012) est en parfait accord avec celle du GIEC dans son rapport de 2001 selon laquelle, l'adaptation est l'ensemble des…

> *initiatives et mesures prises pour réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets des changements climatiques réels ou prévus.*

6. — Ou extrême climatique ou phénomène météorologique ou climatique extrême.

Ces définitions de MENDELSOHN (2012) et du GIEC (2001) n'évoquent que le changement climatique. Or, l'adaptation sert également à faire face à la variabilité climatique et aux évènements extrêmes. Ainsi, avec le progress scientifique, la définition de l'adaptation par le GIEC a évolué en des definitions plus ouvertes à l'inclusion des autres phénomènes climatiques qui ont également des répercussions sur des activités telles que l'agriculture. De ce fait, nous nous référons dans cette thèse à la définition du GIEC (2014) selon laquelle l'adaptation est une « démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences ».

Les stratégies d'adaptation peuvent être de différents types: anticipée ou réactive (MENDELSOHN, 2012 ; GIEC, 2001). MENDELSOHN (2012) stipule cependant qu'il est plus probable que l'adaptation soit réactive. En effet, une adaptation anticipée nécessite une connaissance du climat local futur qui est incertain et difficile à prédire par les modèles climatiques surtout pour les précipitations comme le montrent ROUDIER (2012) et JALLOH *et al*. (2013). Quant à l'adaptation réactive, elle ne dépend pas des prévisions. Selon HARRIS & CODUR (2004), il serait bénéfique de combiner les stratégies d'adaptation anticipatives et réactives. Le GIEC (2001) rajoute que l'adaptation peut être de « caractère privé ou public, autonome ou planifiée » (GIEC, 2001).

Selon la théorie économique, seules les stratégies d'adaptation efficaces doivent être entreprises. Celles-ci sont telles que les bénéfices que l'on peut en tirer excèdent leurs coûts (HARRIS & CODUR, 2004 ; MENDELSOHN, 2012).

L'adaptation planifiée est souvent considérée comme découlant d'une décision politique pour minimiser les pertes ou augmenter les bénéfices provenant du changement climatique (SMIT *et al*., 2001). Elles sont qualifiées de « stratégies d'intervention » (SMIT *et al*., 2001). L'adaptation autonome est considérée par LEARY (1999) comme des initiatives entreprises par des agents privés (consommateurs, producteurs) au lieu des pouvoirs politiques. Cela s'apparente à l'"adaptation privée" pour laquelle la décision de s'adapter ou non incombe aux agents et affecte leur propre bien-être (MENDELSOHN, 2012). Dans cette forme d'adaptation, les coûts et les bénéfices sont supportés par l'agent. Ainsi, puisqu'ils maximisent leur bien-être, les stratégies d'adaptation qu'ils entreprendront seront efficaces.

Contrairement à l'adaptation privée, l'adaptation publique faite au niveau national ou international, bénéficie à plusieurs agents en même temps (MENDELSOHN, 2012).

Concernant *l'atténuation*, elle a une dimension internationale et consiste plus à promouvoir la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GIEC, 2007 ; MENDELSOHN, 2012 ; GIEC, 2014) à travers des actions des pays au niveau national dans le cadre de régime coopératif ou non coopératif. Ainsi le GIEC (2001) la définit comme :

> [...] *la mise en œuvre de politiques destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à renforcer les puits* [7].

7. — Un puits est défini comme « tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre ou d'aérosol ».

1.3. Vulnérabilité au changement et à la variabilité climatique

Dans le domaine du changement climatique, la *vulnérabilité* est définie comme la capacité d'un système à :

> *faire face aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes. Elle est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de l'évolution et de la variation du climat à laquelle le système considéré est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation.*
>
> (GIEC, 2007)

La vulnérabilité a ainsi trois composantes : l'exposition, la sensibilité au risque/choc et la capacité d'adaptation ou « capabilité » (ROUSSEAU, *s. d.* ; GIEC, 2007 ; FELLMAN, 2012). L'exposition renvoie à la « nature et au degré d'exposition d'un système à des variations climatiques significatives » (GIEC, 2001). La sensibilité est :

> [le] *degré auquel un système est influencé, positivement ou négativement, par la variabilité du climat ou les changements climatiques. Les effets peuvent être directs (par exemple la modification des rendements agricoles due à un changement de la valeur moyenne, de l'amplitude ou de la variabilité de la température) ou indirects (par exemple les dommages causés par une augmentation de fréquence des inondations côtières en raison d'une élévation du niveau de la mer).*
>
> (GIEC, 2007)

FELLMAN (2012) fait remarquer que l'exposition et la sensibilité correspondent à l'impact potentiel du changement climatique. La capacité d'adaptation est :

> *le degré d'ajustement d'un système à des changements climatiques (y compris la variabilité climatique et les extrêmes) afin d'atténuer les dommages potentiels, de tirer parti des opportunités ou de faire face aux conséquences* [9].

Ainsi, selon la capacité d'adaptation qui dépend des ressources disponibles [ressources naturelles, socio-économiques telles que le capital physique, humain (éducation, santé), social, financier, les institutions (ROUSSEAU, *s. d.* ; FELLMANN, 2012) et des aptitudes…

> *à utiliser efficacement ces ressources pour obtenir un revenu, de la nourriture ou d'autres choses essentielles.*
>
> (ROUSSEAU, *s. d.*)

l'impact du changement climatique pourrait être atténué.

Concernant le secteur agricole, la vulnérabilité pourrait être décrite par l'exposition aux températures élevées, la sensibilité des spéculations à ces températures, à la variabilité pluviométrique et les stratégies de réponses des producteurs face à ces contraintes (changement de variétés plus résistantes à la chaleur, abandon ou réduction des superficies allouées à certaines spéculations pour d'autres... (FELLMAN, 2012).

9. — <**https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-fr.pdf**>.

1.4. Horticulture et maraîchage

L'horticulture est définie dans le Larousse comme une « branche de l'agriculture comprenant la culture des légumes, des fleurs, des arbres et des arbustes fruitiers et d'ornement » [10].

Selon NDAO (2012),

> [le] *maraîchage, ou horticulture maraîchère, est la culture de légumes et de certains fruits, de manière intensive et professionnelle, c'est-à-dire dans le but d'en faire un profit. C'est un type d'agriculture intensive, qui vise à maximiser l'utilisation du sol et à produire dans des cycles de temps très courts.*

Section 2 : Contexte climatique et implications sur l'agriculture au Sénégal

Cette section a pour objet de passer en revue le contexte climatique au Sénégal et d'analyser ses implications sur l'agriculture, en nous fondant principalement sur la littérature.

2.1. Contexte climatique en Afrique de l'Ouest : cas du Sénégal

2.1.1. Climat passé : un xxe siècle réchauffé avec des précipitations erratiques

Différentes études ont été menées sur le climat au Sahel dans le passé. Selon le GIEC (FOFANA, 2011), dans le Sahel, les précipitations ont connu une tendance à la baisse entre 1900 et 2005. L'HÔTE *et al*. (2002) montrent un régime pluviométrique marqué par trois grandes périodes : la période 1896-1949 marquée par une succession de périodes sèches, normales et humides ; la période 1950-1969 marquée par vingt ans d'humidité exceptée l'année 1968 ; enfin, la période 1970-2000 marquée par la sécheresse des années 1970 avec des périodes sèches et très sèches sauf pour les années 1975, 1994 et 1999 qui ont été humides. La sécheresse des années 1970 est aussi observée par LEBELL & ALI (2009). Ils constatent que dans l'ouest du Sahel, en moyenne, le déficit pluviométrique est toujours aussi intense dans la période 1990-2007 que dans la période 1970-1989. Cette reprise des pluies est controversée dans la littérature. En effet, contrairement à MAHÉ (2009), L'HÔTE *et al*. (2002) constatent que la sécheresse est toujours au rendez-vous à la fin des années 2000.

10. — <**http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/horticulture/40448**>.

Au Sénégal, GAYE & SYLLA (2013, *in* KHOUMA *et al*., 2013) notent des anomalies de précipitations dans le pays en particulier durant les mois de juillet et août. MCSWEENEY *et al*. (2010) constatent une période de fortes pluies au début des années 1960 alors que les années 1980 étaient sèches. Entre 1960 et 2006, ils notent une baisse significative des précipitations allant de 10 à 15 mm par décennie dans les régions du sud du Sénégal pendant la saison des pluies (juillet, août et septembre). De fortes précipitations ont été observées particulièrement pendant la saison sèche (janvier, février et mars) au cours de la période 2000-2006 (MCSWEENEY *et al.*, 2010).

Il est reporté dans le Pana (2006) que la pluviométrie a globalement baissé de 35 % avec un raccourcissement de la période pluvieuse et une baisse de la fréquence des jours de pluie entre la période 1950-1965 et la période 1970-1995.

En se basant sur les données des stations de Kolda et Bakel, MALOU (2004) note trois phases dans l'évolution du climat du pays: la période humide 1960-1970. La période 1970-1990 est marquée par une instabilité climatique avec une baisse continue des précipitations. Cette période correspond à la sécheresse des années 1970 au Sahel qui a engendré le déficit hydrologique actuel. Enfin, MALOU (2004) note une troisième période qui débute par une abondance pluviométrique à partir des années 1990.

Concernant la température, le climat en Afrique a connu la même évolution que le reste du monde (HULME *et al.,* 2001). D'après HULME *et al*. (2001), durant le XXe siècle, le continent africain s'est réchauffé à une vitesse de 0,5 ^{0}C par siècle. Entre 1979 et 2010, le GIEC note un réchauffement de 0,15 ^{0}C par décennies pour l'Afrique tropicale (COLLINS, 2011). Le réchauffement s'est plus ressenti pendant les saisons de juin à août et de septembre à novembre que lors de celles de décembre à février et de mars à mai. Durant ce siècle, ils situent les six années les plus chaudes en Afrique après 1987 avec 1998 la plus chaude année. Le GIEC (2007) va dans le même sens que HULME *et al.* (2001) quant à l'augmentation des températures en Afrique durant le XXe siècle avec une hausse plus prononcée pour le Maghreb et l'Afrique australe.

En Afrique de l'Ouest, HULME *et al*. (2001) notent quelques rafraîchissements autour du Nigeria, la côte du Sénégal et la Mauritanie. Cependant, le réchauffement est à son maximum de près de 2 ^{0}C dans les pays méditerranéens du nord de l'Afrique de l'Ouest. Concernant la répartition des températures, NEW *et al*. (2006) montrent une hausse de la fréquence des vagues de chaleur et une hausse du nombre de jours et de nuits extrêmement chauds en Afrique du Sud et de l'Ouest.

Au Sénégal, selon MCSWEENEY *et al*. (2010) les températures moyennes annuelles ont augmenté de 0,9 ^{0}C depuis 1960 avec un taux de croissance moyen de 0,2 ^{0}C par décennie.

2.1.2. Prévisions climatiques : réchauffement à l'horizon et précipitations toujours incertaines

BATTISTI & NAYLOR (2009) montrent que dans les pays tempérés, les saisons les plus chaudes enregistrées deviendront la norme dans plusieurs zones. HULME *et al*.(2001) confirme le réchauffement en Afrique et stipule que durant le XXIe siècle, le réchauffement augmentera entre moins de 0,2 ^{0}C et plus de 0,5 ^{0}C par décade.

Au Sénégal, les modèles prédisent également une hausse des températures d'ici à 2050 avec un minimum de 1 ^{0}C à 1,5 ^{0}C (KHOUMA *et al*., 2013). La température la plus élevée

prévue est obtenue avec le modèle Echam 5 et atteint 3 ^{0}C (KHOUMA *et al*., 2013). MCSWEENEY *et al*. (2010) prévoient également une hausse des températures allant de 1,1 à 3,1 ^{0}C d'ici la fin de 2060 et de 1,7 à 4,9 ^{0}C dans les années 2090.

Dans la deuxième communication nationale à la *Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques* (D.E.E.C., 2010), il est prévu qu'en Afrique de l'Ouest et au Sénégal en particulier, les températures augmenteraient jusqu'à 3 ^{0}C sur la période 2031-2050.

Contrairement aux températures, les prédictions des *modèles de circulation générale* (M.C.G.) ne sont pas unanimes sur la tendance des précipitations en Afrique de l'Ouest (HULME *et al*.,2001 ; ROUDIER, 2012 ; JALLOH *et al*., 2013). En effet, il y aurait une incertitude sur l'ampleur et le sens de l'évolution des pluies en Afrique de l'Ouest. Selon HULME *et al.* (2001), dépendant du scénario et du modèle, certaines régions de l'Ouest auront des précipitations les mois de juin, juillet et août. BIASUTTI & SOBEL (2009) projettent une saison des pluies plus courte qui commencera plus tard que d'habitude.

Au Sénégal, en 2050, les précipitations devraient rester plus ou moins stables dans de nombreuses régions du pays, l'ampleur du changement varierait entre – 50 mm et + 50 mm selon le modèle de circulation générale utilisé (KHOUMA *et al*., 2013). Cependant, ceci ne s'applique pas à la région de la Casamance et du Sénégal oriental. En effet, deux modèles de circulation générale (3.2 Miroc de résolution moyenne et C.N.R.M. C.M.3) montrent des précipitations qui augmenteraient d'environ 50 mm à 100 mm en Casamance en 2050. Ces prévisions semblent être en contradiction avec le PANA (2006), dans lequel il est stipulé que, quelles que soient les prévisions, le sud s'assèchera plus que le nord. Pour le Sénégal oriental, le modèle Echam 5 projette une évolution des précipitations de l'ordre de - 50 à 200 mm. MCSWEENEY *et al*. (2010) prédisent des pluies qui auront plus tendance à diminuer surtout durant la saison des pluies, même s'ils ont noté une large fourchette de changements dans les précipitations (41 à 48 % dans les années 2090 durant la saison des pluies).

2.1.3. Fréquence des événements climatiques extrêmes au Sénégal : des sécheresses et des inondations

Une étude sur le risque climatique et la sécurité alimentaire (ANACIM *et al*., 2013) montre que les événements extrêmes tels que les inondations ou les sécheresses ont aussi un effet sur les différents secteurs de l'économie, notamment, le secteur agricole. Ces évènements résulteraient de la variabilité climatique. En effet, la baisse de la fréquence des précipitations saisonnières d'entre la fin des années 1960 et le milieu des années 1990, a entraîné une baisse du nombre de jours pluvieux, une saison des pluies plus courte et des avènements de sécheresse plus longs (LE BARBÉ & LEBEL, 1997).

Cependant, il a été difficile d'estimer la fréquence d'occurrence des sécheresses (ANACIM *et al.*, 2013). En effet, certaines sources rapportent que depuis 2000, il n'y a eu des sécheresses qu'en 2002 et 2011 alors que d'autres sources indiquent qu'il y aurait eu des sécheresses en 2000 et 2006/2007 (ANACIM *et al.*, 2013). La sécheresse de 2011/2012 est considérée comme celle ayant affecté le plus grand nombre d'individus.

Concernant les inondations, leur fréquence a augmenté ces dernières années, entre autres, du fait d'une plus grande occurrence de pluies fortes. ANACIM *et al*. (2013).) rapportent qu'entre 2000 et 2012, les inondations ont eu lieu au moins sur huit années et ont engendré des effets négatifs sur les infrastructures et équipements (publics et privés). Il est aussi noté

une recrudescence des maladies dues à l'eau stagnante. ROUDIER *et al.* (2011) rapportent que depuis 2000, la majorité des inondations sont liées à la variabilité inter-saisonnière durant la mousson qui serait liée au changement climatique (à l'effet de long terme).

2.2. L'agriculture sénégalaise et sa vulnérabilité au changement et à la variabilité climatique

Partant de la définition de la vulnérabilité dans la section 1, l'analyse de la vulnérabilité du secteur agricole face au changement climatique et à la variabilité climatique requiert l'identification du degré d'exposition et de la sensibilité des spéculations au changement et à la variabilité climatique qui sera étudié dans cette section mais aussi la capacité d'adaptation des producteurs qui sera, en partie, traitée dans la section 3 (il s'agira du cadre institutionnel qui facilite l'adaptation). Nous ne reviendrons pas ici sur la vulnérabilité socio-économique. L'objectif n'est pas de faire une étude exhaustive de la vulnérabilité mais de montrer la sensibilité de la production agricole au changement du climat et les implications possibles sur celle-ci.

Comme stipulé dans l'introduction, au Sénégal, la production agricole provient de différentes zones agro-écologiques dont les caractéristiques physiques/écologiques et les orientations en matière de spéculations et de destination de la production font que la sensibilité aux changements de conditions climatiques est plus ou moins prononcée d'une zone à une autre.

2.2.1. Une agriculture pluviale vulnérable au changement et à la variabilité climatique

Les études sur le secteur agricole sénégalais montrent que ce dernier est très vulnérable au changement et à la variabilité climatique (PANA, 2006 ; D.E.E.C., 2010 ; ANACIM *et al*., 2013 ; KHOUMA *et al*., 2013 ; SALL, 2015). SALL (2015) soutient que l'aléa climatique fait partie des risques les plus difficiles à maîtriser par les agriculteurs.

Les études précitées montrent particulièrement que la variabilité inter-saisonnière, interannuelle et inter-décennale a un impact sur la production agricole. Ainsi, en considérant la période 1960-2010, ANACIM *et al.* (2013) observent que la production alimentaire est plus élevée durant des années humides que pendant des années marquées par des précipitations moins importantes. Pour illustrer cette observation, ils utilisent des données de la production sur la période 1960-2010 pour montrer la relation entre la variabilité climatique et la production. Leurs résultats montrent que la variation interannuelle des précipitations, à elle seule, explique 50 % des variations de la production totale de l'arachide, du mil, du sorgho, du riz et du maïs. L'étude n'inclut cependant pas les autres facteurs climatiques et non-climatiques qui pourraient expliquer les rendements. De tels facteurs seraient les intrants utilisés, les techniques d'irrigation, le contexte économique, etc.

À l'échelon régional, des calculs de corrélation entre les précipitations et la production leur permettent de conclure qu'il existe une forte corrélation entre les précipitations et la production de céréales avec la plus basse corrélation notée à Saint-Louis principalement

avec la riziculture de décrue (coefficient de Pearson = 0,34). Les plus fortes corrélations sont notées, par ordre décroissant, dans les régions de Thiès, Kaolack, Louga et Ziguinchor (coefficients de PEARSON respectifs : 0,73 ; 0,63 ; 0,57 et 0,56). Ces régions semblent ainsi être les plus vulnérables à la variabilité climatique. En effet, la corrélation positive signifie que les précipitations et la production évoluent dans le même sens.

Ces résultats sont semblables à ceux trouvés dans la deuxième communication nationale à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (D.E.E.C., 2010) pour les régions du centre. Pour les régions du sud, les résultats semblent distincts. Ils (D.E.E.C., 2010) comparent l'évolution des précipitations annuelles à celle des rendements au niveau régional sur la période 1960-2008: au sud du Sénégal, à Kolda et au centre, à Diourbel. À Kolda, où ils rapportent une moyenne pluviométrique annuelle de 1 003 mm sur cette période, ils remarquent une tendance à la baisse des précipitations qui s'accompagne, cependant, d'une tendance à la hausse des rendements du mil et de l'arachide. Ce résultat semble être en contradiction avec la corrélation précédemment trouvée (ANACIM *et al.*, 2013) au sud dans la région de Ziguinchor.

Cette contradiction ne s'observe pas dans le centre, à Diourbel (caractérisé par une moyenne pluviométrique de 501 mm sur la période 1960-2008 et des températures élevées) où la production d'arachide suit la même tendance que la pluviométrie. Les rendements du mil sont néanmoins restés constants au cours de la période 1960-2002, malgré la diminution de la pluviométrie. Ils (D.E.E.C., 2010) expliquent ce résultat par le fait que le mil est moins exigeant en eau et serait plus résistant à la sécheresse comparé à l'arachide. Les résultats sur la corrélation positive entre pluviométrie et production d'arachide dans le centre sont en cohérence avec les analyses de SALL (2015) qui fait remarquer que durant les vingt-cinq dernières années, au Sénégal, six années ont subi des dérèglements pluviométriques. Cela a entraîné une baisse de la production d'arachide, surtout dans le Bassin arachidier. SALL (2015) évoque également les pauses pluviométriques, qui, peu importe le type d'hivernage (qu'il soit « bon ou mauvais »), peuvent affecter négativement la production.

Les précipitations ont aussi un effet indirect sur la production. En effet, les inondations dues aux précipitations excédentaires pourraient engendrer, entre autres, des pertes pour les spéculations ne supportant pas l'inondation et un accroissement de la fréquence des maladies des plantes (D.E.E.C., 2010). Cela est conforté par SALL (2015) qui soutient que « les contraintes climatiques sont souvent liées au développement des maladies ou à la pullulation des insectes ».

En outre, la fréquence de la sécheresse est négativement corrélée au rendement, particulièrement à celui du mil, du sorgho et de l'arachide (ANACIM *et al.*, 2013). Ainsi, l'ANACIM *et al*. (2013) soulignent que la production d'arachide au Sénégal a significativement baissé dans les années de sécheresse en 1972, 1977, 1984, 2002, et 2007. Cependant, ces effets peuvent être atténués par des mesures d'adaptation. En effet, ANACIM *et al.* (2013) observent des hausses de production après l'avènement des sécheresses des années 1970 et du début des années 1980 et après les sécheresses de 2002 et 2007. Ces observations suggèrent une réponse du gouvernement à la sécheresse, notamment à travers des politiques et stratégies d'adaptation.

Concernant l'effet des températures, une hausse de celles-ci entrainera une augmentation des besoins en eau des végétaux dont le déficit s'aggravera, ce qui se répercutera sur les rendements et la production de biomasse (D.E.E.C., 2010 ; NDIAYE, 2014). Certaines zones qui font face à des problèmes de salinité, notamment, la culture du riz pluvial dans le bassin

arachidier et dans le sud (régions de Fatick, Kaolack, Ziguinchor et Kolda) seront davantage pénalisées.

Ces effets du climat sur la production menacent la sécurité alimentaire. En effet, la disponibilité et l'accès à la production sont menacées par l'effet des évènements extrêmes tels que les inondations sur les infrastructures qui peuvent empêcher l'accès aux marchés (ANACIM *et al.*, 2013). Des précipitations plus élevées seraient associées à un régime alimentaire plus diversifié et suffisant en termes de quantités (ANACIM *et al*., 2013).

KHOUMA *et al*. (2013) font des estimations de rendements futurs dans un contexte de changement climatique pour certaines cultures céréalières: l'arachide, le maïs, le mil, le sorgho et le riz. Sous l'hypothèse que les spéculations avec le même métabolisme photosynthétique réagiront identiquement au changement climatique dans une même zone (NELSON *et al*., 2013), ils font l'hypothèse que les effets du changement climatique sont les mêmes pour le maïs, le mil et le sorgho dans la même zone géographique.

Dans leur étude (KHOUMA *et al*., 2013), la majorité des modèles prédisent une baisse des rendements de l'arachide entre 5 et 25 %. Pour le maïs (et le mil), les rendements varieront, à l'horizon 2050, entre 5 et 25 % (hausse ou baisse) avec une évolution surtout inférieure à 5 %. Enfin, les prédictions de rendements sont plus optimistes pour le riz pluvial qui connaîtra des hausses de rendements et des variations inférieures ou égales 5 %. On note à peine des baisses de rendements dans les zones où la culture est pratiquée (Bassin Arachidier, Casamance et Sénégal Oriental).

2.2.2. Qu'en est-il de l'agriculture irriguée : cas de la Vallée du Fleuve Sénégal [12]

Contrairement à l'agriculture pluviale, l'agriculture irriguée n'a pas fait l'objet de plusieurs études d'impact du changement et de la variabilité climatique.

KHOUMA (2011), à travers son étude sur la vulnérabilité de l'agriculture et de l'élevage dans la Vallée du fleuve Sénégal, soutient qu'une hausse des températures dans la Vallée entrainera une baisse des rendements et favorisera la multiplication de mauvaises herbes et des nuisibles. Il affirme que les impacts du changement climatique sont soit directs sur les cultures et le bétail ou indirects, notamment sur la disponibilité et/ou les prix des aliments et sur les revenus agricoles. Selon RASMUSSEN (2001, cité *in* KHOUMA, 2011), une hausse de la concentration en CO_2 et une modification de variables climatiques telles que la température, la pluviométrie, l'humidité relative mènera à des changements sur les choix de spéculations à cultiver.

Dans son étude KHOUMA (2011) trouve à travers des entretiens avec les producteurs que ces derniers notent un « décalage et un raccourcissement de la période favorable » à la production de spéculations telles que la tomate, l'oignon, la pomme de terre et le haricot vert. Cependant, il observe que la période chaude plus favorable à la culture du riz est plus longue même si le cycle du riz est parfois ralenti « suite à des périodes plus froides » (SAED, 2010, cité *in* KHOUMA, 2011).

12. — N'ayant pas pu trouver beaucoup de documents sur l'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture irriguée dans la Vallée du fleuve Sénégal, cette partie se fonde principalement sur KHOUMA (2011).

En dehors d'un changement dans les saisons, KHOUMA (2011) soulève la « réapparition de certaines maladies bactériennes sur le riz » qui méritent une attention particulière.

Par ailleurs, les sécheresses prolongées et les inondations ont des effets sur la production agricole. En effet, les premières ont un effet négatif sur la demande évaporative et la disponibilité de l'eau d'irrigation ; ce qui entraine une baisse des superficies irrigables et réduit les opportunité de faire de la culture de décrue. Quant aux inondations, l'on peut être confronté à un problème de gestion de l'excès de l'eau (KHOUMA, 2011) qui n'est pas uniquement imputable à la catastrophe naturelle mais également aux capacités d'adaptation. Ainsi, KHOUMA stipule que :

> *les petits périmètres irrigués aménagés avant l'an 2000 sont les plus vulnérables aux crues dévastatrices du fait qu'ils ne sont pas, dans leur grande majorité, protégés contre les crues.*

Lors de la saison des pluies 2010, il note 3 365 ha de terres inondées dans la Vallée du fleuve Sénégal réparties dans les départements de Dagana avec 2 629 hectares sur 23 398 hectares emblavés, Podor avec 611 hectares sur 8 094 hectares emblavés, la région de Matam avec 125 hectares sur 4 516 hectares emblavés. Aussi, les pluies hors saison (par exemple celles de 2002) ont entraîné des dommages aux récoltes (KHOUMA, 2011).

Hormis les inondations et sécheresses, d'autres facteurs tels que la salinisation des terres réduisent les superficies cultivables. Ainsi, avec l'ouverture de la brèche de la langue de Barbarie en 2003 dont l'objectif était de protéger la ville de Saint-Louis des inondations, on note la salinisation des terres du Gandiolais par l'eau de mer. KHOUMA (2011) souligne cependant que depuis l'existence de la brèche, les populations s'adonnent à l'extraction du sel qui leur procure des revenus.

Section 3 : Climat et agriculture irriguée au Sénégal : cas particulier de la zone des niayes, principale zone de production horticole au Sénégal [13]

L'objet de cette section est tout d'abord de montrer l'importance du secteur horticole au Sénégal et de la zone des *niayes* dans la production horticole. Elle ambitionne également de montrer les principales caractéristiques physiques et activités économiques de la zone ainsi que les contraintes de la filière horticole dans les *niayes*. Nous analysons aussi le contexte climatique dans la zone sur la période 1960-2011 (à partir de la littérature et de nos propres calculs) et ses implications sur la production horticole.

13. — Les données de la section 3.1. proviennent de nos calculs à partir des statistiques horticoles de la Direction de l'horticulture. Voir annexe 7 pour plus de détails.

3.1. Importance du secteur horticole au Sénégal et de la zone des *niayes* dans la production horticole

Au Sénégal, comme démontré dans l'introduction générale, l'horticulture occupe une place non négligeable dans l'agriculture. Pour moins de 5 % des superficies agricoles, elle arrive à satisfaire une bonne partie de la demande locale en produits horticoles et à conquérir les marchés mondiaux.

La production horticole a connu une hausse ces dernières années grâce aux efforts politiques (politique de protectionnisme, accompagnement des producteurs à travers des projets tels que le Paden), aux acquis de la recherche, à l'existence d'une forte demande en croissance avec l'urbanisation, les potentialités de conquête des marchés mondiaux (surtout européens) qui motivent la production. La production de légume passe ainsi de 640 000 tonnes en 2010-2011 à 886 130 tonnes en 2014-2015 (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, *s. d.*).

L'analyse des statistiques horticoles sur la période 2010-2011 à 2013-2014 montre qu'en termes de production, les principaux légumes sont l'oignon avec une part dans la production de légumes qui s'élève à 32 % sur la période 2010/2011-2013/2014 ; suivie de la tomate industrielle dont la part dans la production nationale de légume sur la même période est de 12,5 %. La tomate cerise vient en troisième position avec une part de production de 12 % et le chou pomme en quatrième position avec 8 %. Ces productions sont pour la plupart en hausse avec des taux de croissance annuels moyens positifs. Ainsi, la pomme de terre a un taux de croissance annuelle moyen sur la période 2010-2011 à 2013-2014 de 24 %, suivie de la tomate cerise avec 13,5 %, de l'oignon, avec 6,6 %. Quant à la production de tomate industrielle, elle a un taux de croissance annuel moyen négatif qui s'élève à environ – 3 % ; cela témoigne d'une baisse de la production de tomate industrielle entre 2010-2011 et 2013-2014. Cependant, entre 2012-2013 et 2013-2014 la production a presque doublé.

Concernant les fruits, la mangue occupe la première place en termes de production avec une part dans la production totale de fruits de 50 % sur la période 2010-2011 à 2013-2014. Elle est suivie de la production d'agrumes avec 18 %, puis de la banane avec une part de 13 %. Enfin, le melon vient en quatrième position avec une part d'environ 7 %. En termes de croissance de la production sur la période 2010-2011 à 2013-2014, le melon a le taux de croissance annuel moyen le plus élevé avec 7,45 % et la banane avec 4,35 %. La mangue a un taux de croissance plus faible qui s'élève à 2,31 %.

Cette performance de la production horticole permet au Sénégal, non seulement de satisfaire une partie de sa demande locale mais également de conquérir les marchés internationaux. Ainsi, sur la période 2011-2014, les exportations s'élèvent en moyenne à environ 63 000 tonnes par an. Les exportations de fruits et légumes concernent principalement, le melon, en tête des exportations sur la période, suivie de la mangue, la tomate cerise, le maïs doux, la pastèque, le haricot vert, etc.

Les exportations sont majoritairement destinées au marché européen et en moindre mesure au marché sous régional (statistiques horticoles de la Direction de l'horticulture ; PADEN, 2013).

Cependant, malgré les exportations, la demande locale reste toujours à satisfaire. Du fait de la saisonnalité des produits horticoles, la production locale ne s'étale pas sur l'année et ne permet donc pas de satisfaire la demande. Pour combler la demande locale, le pays a recours à des importations. Sur la période 2011-2014, les importations s'élèvent à environ 214 000 tonnes par an, nettement supérieur aux exportations. L'oignon est le produit horticole le plus importé, principalement de la Hollande (PADEN, 2013) avec 57 % des importations sur la période 2011-2014, suivie de la pomme de terre avec 31 %, puis la banane (environ 7 %) et enfin la carotte (environ 4 %), provenant principalement de la France, la Belgique, l'Espagne, la Turquie et la Hollande (PADEN, 2013).

Cependant, ces importations viennent concurrencer l'offre de produits horticoles locaux surtout en termes de qualité, surtout en période de forte production. En effet, lorsque les importations coïncident avec la période de forte production locale, cela implique soit une saturation du marché national qui provoque la baisse des prix ou encore une préférence des consommateurs vers les produits importés au détriment de la production locale. Cela a parfois pour effet de décourager les producteurs qui n'arrivent pas à écouler leur production et ne peuvent pas le stocker du fait de l'insuffisence d'infrastructures de stockage et de la réticence de certains producteurs à utiliser celles qui existent [14] (FAYE, 2014). Dans ce cadre, des politiques de protectionnisme sont mis en place pour mieux réguler les filières horticoles et permettre l'écoulement de la production locale lors des périodes de récoltes (lorsque l'offre est suffisante pour combler la demande). Ces politiques concernent, à ce jour l'oignon, la pomme de terre et la carotte.

Ces interventions ont eu pour effet une baisse des importations comme en témoigne le calcul du taux de croissance annuel moyen qui donne un taux négatif pour l'oignon (environ - 7 %) et la pomme de terre (environ - 2 %), ce qui témoigne d'une tendance à la baisse des importations d'oignon et de pomme de terre.

Ce potentiel de l'horticulture qui améliore l'équilibre de la balance commerciale et contribue à la satisfaction de la demande nationale lui confère une place importante dans le Pracas. Pour ce qui est des spéculations horticoles, ce dernier vise l'autosuffisance en oignon et l'augmentation de la production des fruits et légumes de contre-saison pour accroître les exportations (notamment vers l'Europe). L'atteinte de ces objectifs ne peut se faire sans la contribution de la zone des *niayes* qui constitue aujourd'hui la principale zone de production maraîchère du Sénégal à coté de la Vallée du fleuve Sénégal, des régions de Tambacounda, Kolda et Ziguinchor (PADEN, 2013). Les *niayes* procurent environ 60 % de la production et 50 % des exportations horticoles (PADEN, 2013). La production dans les *Niayes* est tributaire des ressources en eau souterraines. Ces dernières pourraient cependant être menacées par le climat changeant dans un contexte de hausse de leur usage.

14 — Selon SONKO (2012), certains producteurs ne sont pas favorables à l'usage de magasins de stockage car ils pensent que l'oignon doit être produit et vendu et non stocké au risque de ne pas trouver d'acheteurs par la suite.

3.2. Délimitation géographique et aspects biophysiques de la zone des *niayes*

3.2.1. Délimitation géographique et aspects physiques de la zone des *niayes*

Située au nord-ouest du Sénégal, la zone des *niayes* est à cheval entre les quatre régions administratives de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis. Elle s'étend de Dakar à Saint-Louis sur une longueur de cent quatre-vingts kilomètres et une largeur variant entre cinq et trente kilomètres (CISSÉ *et al*., 2001). Elle est limitée à l'Ouest par l'océan Atlantique, à l'Est par la route nationale Dakar-Saint-Louis, au Nord par la région de Saint-Louis (FIG. 2).

FIG. 2. — Localisation de la zone des *niayes*. Source : Site Paden 15. La zone couvre les communautés rurales répertoriées dans le TABLEAU I.

15. — <**ttp://www.paden-senegal.org/**>.

TABLEAU I

Communautés rurales de la zone des *niayes*

COMMUNAUTÉ RURALE	DÉPARTEMENT	RÉGION
Bambilor	Rufisque	Dakar
Diender Guedj	Thiès	Thiès
Keur Moussa		
Fandene		
Notto Gouye Diama	Tivaouane	
Taiba Ndiaye		
Darou Khoudoss		
Méouane		
Kab Gaye	Kébémer	Louga
Diokoul NDiawrigne		
Thieppe		
Bandeigne		
Léona		
Ndiébène Gandiol	Saint-Louis	Saint-Louis
Gandon		
Source des données : PADEN (2013).		

3.2.2. Aspects physiques

3.2.2.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Dans la zone des *niayes*, les ressources en eaux souterraines constituent un potentiel important pour l'agriculture irriguée, l'alimentation en eau potable de Dakar et environs ainsi que les industries et les populations rurales.

3.2.2.1.1. LE BASSIN SÉDIMENTAIRE SÉNÉGALO-MAURITANIEN

Les aquifères de la zone des *niayes* font partie du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien d'une superficie de 340 000 km^2 et s'étend sur 1 400 km du nord de la Mauritanie au sud-est de la Guinée (D.G.P.R.E., 2005).

Le bassin sédimentaire sénégalais comprend un ensemble supérieur et un ensemble inférieur. Le premier est un ensemble hétérogène avec des aquifères superficielles et semi-profonds: les nappes du quaternaire, le continental terminal, l'Oligo-Miocène, l'Éocène et le Paléocène (D.G.P.R.E., 2005). Le second ensemble est homogène ; il est constitué d'une nappe captive appelée *nappe maastrichtienne* (D.G.P.R.E., 2005).

3.2.2.1.2. HYDROGÉOLOGIE DANS LA ZONE DES NIAYES

Les relations entre les aquifères de la zone du littoral (*niayes* et environs) sont représentées en trois principales couches (EL FAID, 1999 ; D.G.P.R.E., 2009) :

— la couche supérieure ;
— la couche intermédiaire ;
— la couche inférieure.

La couche supérieure

NAPPE DES SABLES QUATERNAIRES

Elle comprend trois aquifères :

— la nappe des sables de la presqu'île du Cap-Vert ;
— la nappe des sables quaternaires sur le reste du littoral septentrional ;
— les calcaires Éocènes.

LA NAPPE DES SABLES DE LA PRESQU'ÎLE DU CAP-VERT

Elle est constituée par la nappe captive à semi-captive des sables infra basaltique située sur la pointe de Dakar qui est spatialement séparée des autres systèmes aquifères et de la nappe libre des sables du quaternaire de Thiaroye (de Dagoudane Pikine à Kayar). Cette dernière fait partie de celles exploitées pour l'alimentation en eau potable de Dakar. L'eau qui y est prélevée est relativement constante (10 000 m^3 en moyenne, rapport SONES, cité dans D.G.P.R.E., 2005). Au niveau de Thiaroye sur mer, la nappe a une profondeur maximale de trois à six mètres (D.G.P.R.E., 2005). Elle couvre une superficie de 300 km² (D.G.P.R.E., 2005).

LA NAPPE DES SABLES QUATERNAIRES SUR LE RESTE DU LITTORAL SEPTENTRIONAL

Le reste de l'aquifère couvre une superficie d'environ 2 300 km² (AGUIAR, 2010). La recharge de cette nappe se fait essentiellement par infiltration de l'eau de pluie (D.G.P.R.E., 2005). Cette nappe est par ailleurs exploitée par les forages ruraux de la D.E.M., les *Industries chimiques du Sénégal* (I.C.S.) et les forages villageois (D.G.P.R.E., 2005). Elle est aussi la principale nappe utilisée pour le maraîchage dans la zone des *niayes*.

LES CALCAIRES ÉOCÈNES

L'Éocène et le Paléocène se trouvent à l'est de la route nationale Dakar-Saint-Louis (EL FAID, 1999) et sont plus utilisées par la S.D.E. (entretien M. FALL, D.G.P.R.E., 2014).

La couche intermédiaire

Elle est composée des formations aquitards du tertiaire supérieur et Eocène, de la nappe paléocène, de la formation aquitard du Danien (D.G.P.R.E., 2005, 2009).

La couche inférieure

Elle est composée de la nappe maastrichtienne (D.G.P.R.E., 2005, 2009).

La FIG. 3 illustre les différentes couches d'aquifères dans la zone.

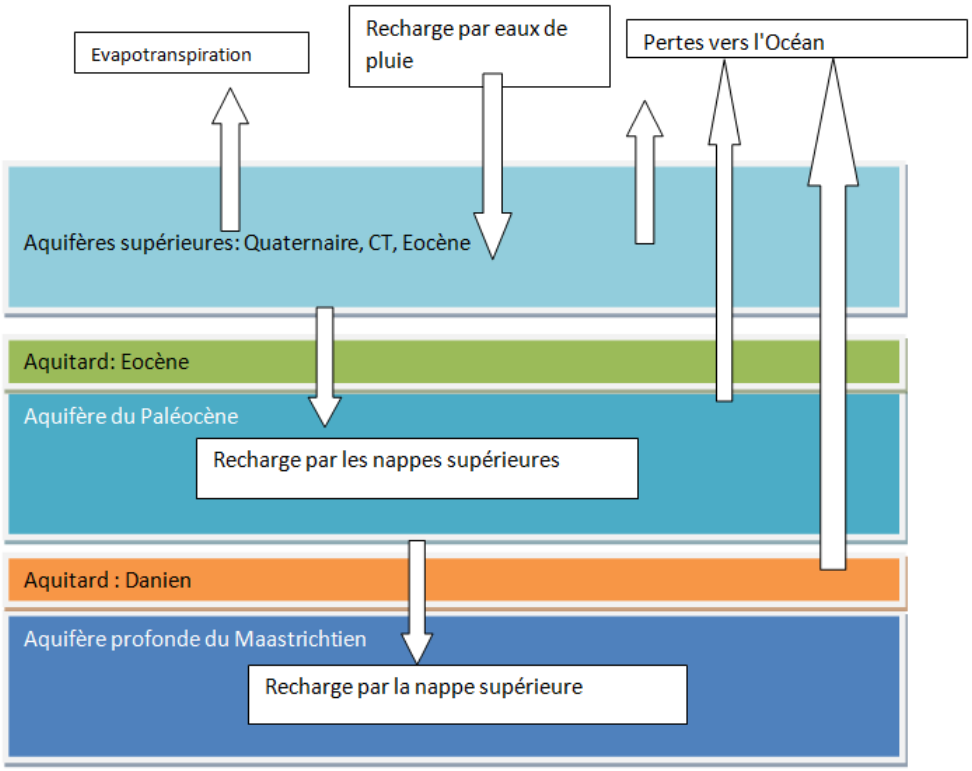

FIG. 3. — Les couches d'aquifères dans les *niayes*. Source : FAYE (Amy), adapté de D.G.P.R.E. (2009).

3.2.2.2. LES TYPES DE SOL

Dans les *niayes*, les sols sont majoritairement sablonneux (PADEN, 2013). Les principaux types de sol sont les sols ferrugineux tropicaux non lessivés, *Dior*, sablonneux et pauvres en argile, les sols ferrugineux tropicaux non lessivés ou peu lessivés, sur colluvion, *Deck*, les sols *Deck Dior*, les sols Hydromorphe, *Khour* (CISSÉ *et al.*, 2001) pour plus d'informations sur les types de sol).

3.3. Les systèmes de production dans les *niayes* [16]

3.3.1. Des saisons de culture déterminées par le climat

L'analyse des données de précipitation sur les quatre stations des *niayes* (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis) sur la période 1970-2011 (FIG. 4) montre l'existence de deux saisons :

— une saison sèche d'octobre à juin ;
— une saison des pluies.

16. — Cette partie est traitée en utilisant des données secondaires provenant de la direction de l'horticulture et des études menées dans le cadre du projet Paden (SY, 2012 ; DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013 ; PADEN, 2013).

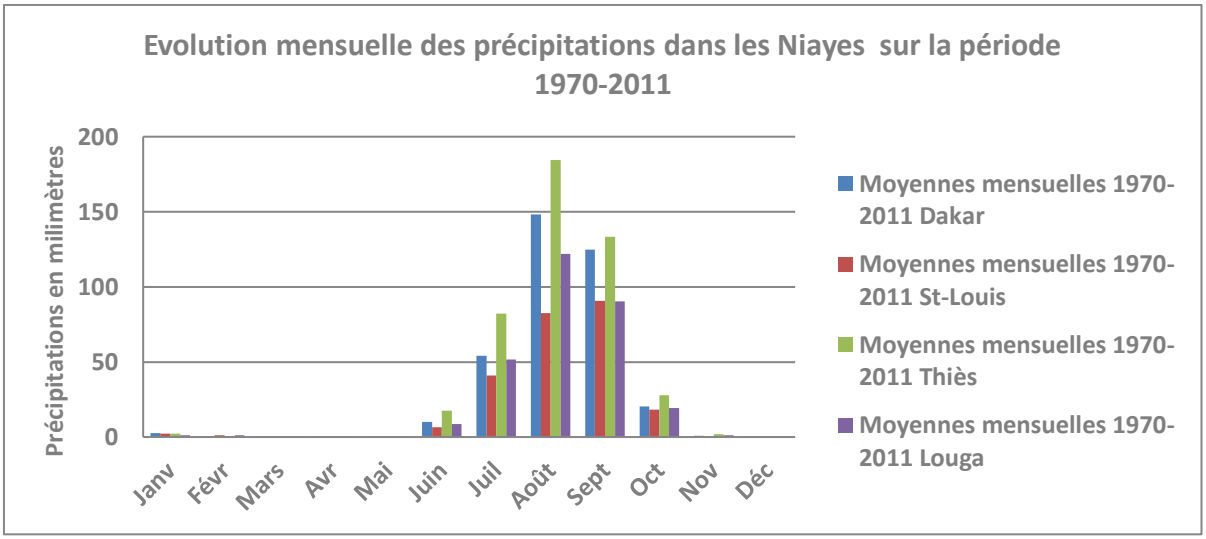

FIG. 4. — Évolution mensuelle des précipitations sur la période 1970-2011 entre les mois de janvier et décembre dans les stations météorologiques des *niayes*. Source : Calculs de l'auteur auteurs à partir des données de l'ANACIM (2013).

LA SAISON SÈCHE

Une saison sèche d'octobre à juin (TOURÉ & SECK, 2005) avec des pluies occasionnelles appelées *heug* ou « pluies des mangues » (CISSÉ *et al.*, 2001). Du fait de l'influence des vents (l'harmattan qui peut être frais ou froid la nuit et chaud le jour et l'alizé maritime, vent humide), la saison sèche comprend une saison sèche froide qui va de novembre à mai et une saison sèche chaude, de mai au début de la saison des pluies (PADEN, 2013).

Dans la zone, les températures minimales, sont enregistrées en début de saison sèche entre novembre et février (FIG. 5). Les valeurs minimales sont atteintes le mois de février pour Dakar (environ 17 ^{0}C), le mois de janvier pour Saint-Louis (environ 16 ^{0}C) et pour Thiès et Louga (environ 16 ^{0}C) comme le montre la FIG. 5.

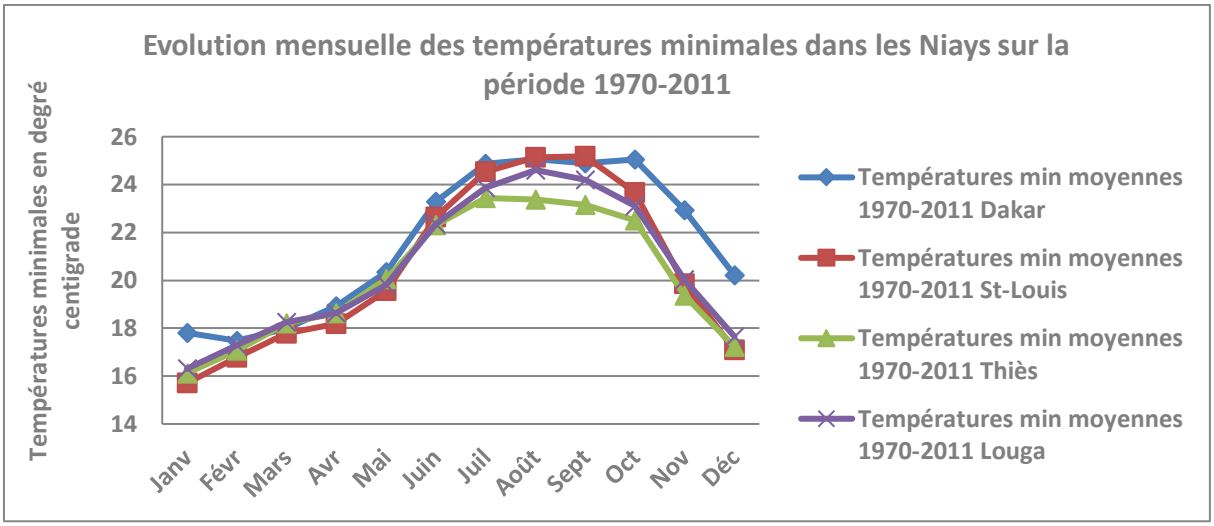

FIG. 5. — Évolution mensuelle des températures minimales sur la période 1970-2011 entre les mois de janvier et décembre dans les stations météorologiques des *niayes*. Source des données : Calculs de l'auteur à partir des données de l'ANACIM (2013).

Cette saison sèche constitue la principale saison de culture des spéculations maraîchères telles que l'oignon, la tomate, la carotte, la pomme de terre, le haricot vert, l'aubergine, le chou pommé, le navet, le *jaxatu*, etc. (PADEN, 2013).

LA SAISON DES PLUIES

Une saison des pluies encore timide au mois de juin et s'installant définitivement en juillet avec une plus forte intensité des pluies en août et septembre. Elle s'étend jusqu'en fin septembre. Durant la saison des pluies, la zone est caractérisée par la mousson avec des températures plus élevées que durant la présence de l'alizé maritime (en saison sèche).

Cependant, sur la période 1970-2011, les données montrent que les températures maximales moyennes sont majoritairement atteintes soit en milieu de saison sèche (chaude) ou en fin de saison des pluies voire en début de saison sèche (FIG. 6). Les valeurs maximales sont atteintes le mois d'octobre pour les stations de Dakar (environ 31 ^{0}C), Saint-Louis (environ 34 ^{0}C), Louga (environ 37 ^{0}C) et en novembre pour Thiès (environ 35 ^{0}C) comme le montre la figure 4.

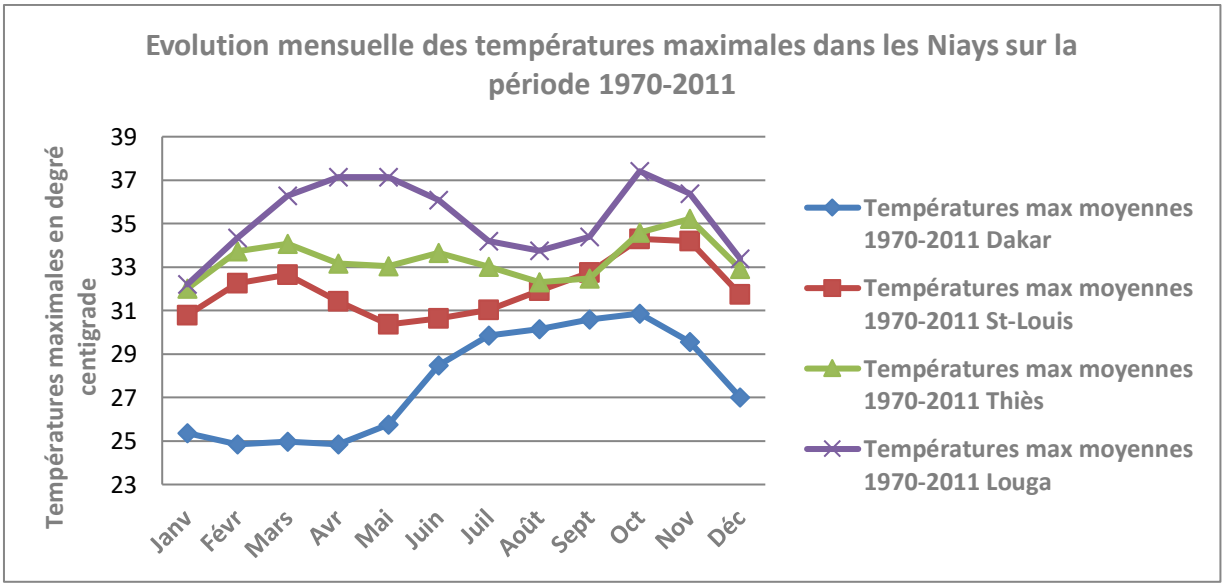

FIG. 6. — Évolution mensuelle des températures maximales sur la période 1970-2011 entre les mois de janvier et décembre dans les stations météorologiques des *niayes*. Source des données: Calculs de l'auteur à partir des données de l'ANACIM (2013).

Durant la saison des pluies, l'activité maraîchère est moins intense. Cependant,

> *grâce aux acquis de la recherche et à la rusticité de certaines espèces, les légumes suivants sont produits en hivernage: la patate douce, le gombo, le manioc, la courge, l'oseille (bissap), le chou pomme, la tomate, le piment, le jaxatu et l'aubergine.*
>
> (PADEN, 2013)

3.3.2. Les principales activités source de revenus dans la zone

Dans la zone, l'agriculture irriguée est dominante. Plus de la majorité des exploitations s'adonnent à la production horticole irriguée (75 % dont 70,3 % sont ruraux et 4,7 % sont périurbains), 25 % des exploitations combinent l'agriculture irriguée (horticulture) et l'agriculture pluviale.

Le maraîchage est l'activité la plus pratiquée dans les *niayes* avec 95 % des exploitations qui s'y adonnent. La deuxième activité la plus pratiquée est la production fruitière qui occupe 38 % des exploitations suivie de l'élevage des petits ruminants pratiquée par 33 % des exploitations, de l'agriculture pluviale pratiquée par 30,4 % des exploitations et de la production d'arachide irriguée pratiquée par 14,7 % des exploitations.

Concernant les fruits, la mangue est la première culture fruitière avec 80 % des surfaces plantées. La mandarine et le citron occupent respectivement 4,4 % et 4,3 % des superficies Les spéculations telles que la banane, l'orange, la papaye, le pamplemousse, la goyave et le corossol occupent de manière individuelle moins de 1 % des terres cultivées. La zone de Bambilor demeure la principale zone de culture fruitière des *niayes* (44 % à 97 % des superficies quelle que soit la spéculation considérée).

3.3.3. Les exploitations dans la zone : répartition spatiale, types et modes de commercialisation

Le recensement de l'horticulture dans la zone permet de dénombrer 10 163 exploitations horticoles réparties dans les communautés rurales des *niayes*. Le sud et le centre des *niayes* contiennent plus d'exploitations horticoles (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013). Ces exploitations peuvent être de petite taille, 0,2 à 1 ha, de taille moyenne, 1 à 20 ha, ou de grande taille, plus de 20 ha (PADEN, 2013). Les petites et moyennes exploitations sont constituées des exploitations familiales traditionnelles (voir encadré 1 en annexe 5 pour une définition de ces exploitations), des maraîchers du dimanche… Les exploitants horticoles (hors agribusiness) sont majoritairement des hommes (90,4 %) avec seulement 9,6 % de femmes (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013). La majorité des exploitants horticoles ont entre trente-six et cinquante-neuf ans (51,8 %) suivi des plus de soixante ans (27,1 %) et des moins de trente-cinq ans (20,7 %) (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013). Par ailleurs, le recensement révèle une faible alphabétisation des exploitants (seuls 16,7 % savent lire et écrire). Concernant les types d'exploitations, ils sont majoritairement individuels (99 %). Seul 1 % est organisé en groupements de production.

Pour les exploitations traditionnelles, le recours à la main-d'œuvre familiale est majoritaire. Elles font cependant appel à une main-d'œuvre externe de type sourga (PADEN, 2013) qui sont des employés permanents pour toute ou une partie de la saison sèche. Des salariés temporaires sont également employés selon les besoins pour des opérations culturales ponctuelles telles que la préparation du sol, le semis ou le repiquage, l'arrosage, les récoltes, etc.

Les producteurs effectuent leurs ventes principalement par écoulement direct au marché (56,8 % des exploitations). La vente au bord des champs est le deuxième mode de commercialisation le plus répandu, elle est pratiquée par 52,2 % des producteurs. Ensuite vient la vente par l'intermédiaire de *coxer* (40,7 %). La vente par contractualisation apparaît très faible (1,2 %), de même que les exportations (0,6 %).

Concernant les grandes exploitations, elles sont souvent des agrobusiness (PADEN, 2013) et sont constituées d'entreprises privées et d'exploitations paysannes. Ces exploitations sont minoritaires et ne représentent que 5 % des superficies allouées à l'horticulture dans les *niayes* (PADEN, 2013). Les entreprises privées dans les régions de Dakar et Thiès sont plus orientées vers les cultures d'exportations telles que le haricot vert, la tomate cerise et la mangue (PADEN, 2013).

Pour les besoins en eau d'irrigation, les producteurs exploitent majoritairement les ressources en eau souterraines. Selon la taille de l'exploitation, les systèmes d'irrigation sont manuelles (arrosoirs, seaux) et/ou mécaniques (motopompes) et les sources d'eau sont majoritairement des puits, pour 42,9 % des exploitations (PADEN, 2013 ; DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013). D'autres sources d'eau sont aussi utilisées (Recensement de l'horticulture dans les *niayes*, DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013) : la pluie (11,6 %), les forages (11,6 % des exploitations), les *céanes* [17] (11,4 % des exploitations), les branchements de la S.D.E. (2,6 %), les bassins de rétention (1,1 %), les eaux de surface (0,5 %). Les *céanes* sont plus utilisés dans le sud à Bambilor, pour 49,3 % des producteurs, Diender Guedj, pour 12,7 % des producteurs (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013). Il en est

17. — Les *céanes* sont des puits traditionnels peu profonds.

de même pour l'eau de la S.D.E., les bassins de rétention et l'eau de la pluie qui ne sont quasiment utilisés que dans le sud et une partie du centre-sud (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013).

3.3.4. Des contraintes au développement de la filière horticole dans les *niayes*

Les producteurs horticoles des *niayes* font face à de multiples contraintes relatives à l'accès au financement, l'accès à la terre, la gestion de la main-d'œuvre, la menace sur les ressources en eau… En effet, les données du recensement de l'horticulture (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013) montrent que seuls 2,5 % des producteurs ne font face à aucune contrainte. Par ordre d'importance, l'accès aux intrants, au crédit et aux ressources en eau constituent les principales contraintes des producteurs horticoles de la zone des *niayes*. En effet, environ 80,9 % des producteurs de la zone ont un problème d'accès aux intrants avec une répartition des avis plus ou moins homogène le long de la zone. 58,3 % évoquent des problèmes d'accès au crédit qui semblent plus accentués vers le nord (par exemple dans les communautés rurales de Léona et Gandon) et 57,6 % ont des problèmes d'accès aux ressources en eau. Ensuite, viennent les problèmes de main-d'œuvre (29,8 %) plus accrus vers le nord (communautés rurales de Léona, Ndiébène Ngandiolé, Gandon où en moyenne plus de 80 % des producteurs évoquent le problème de la main-d'œuvre). Les problèmes liés au foncier sont aussi répertoriés avec 15,6 % des exploitations exposés (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013).

FINANCEMENT DE L'AGRICULTURE DANS LA ZONE : FAIBLE ACCÈS AU CRÉDIT

Concernant le financement des activités, deux types de crédits existent : le crédit d'investissement et le crédit de campagne. En moyenne, seul 15,3 % des exploitations ont un accès au crédit d'investissement et seule 18,9 % ont un accès au crédit de campagne (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013). Cependant, cet accès est inégalement réparti dans la zone comme le montre la FIG. 7.

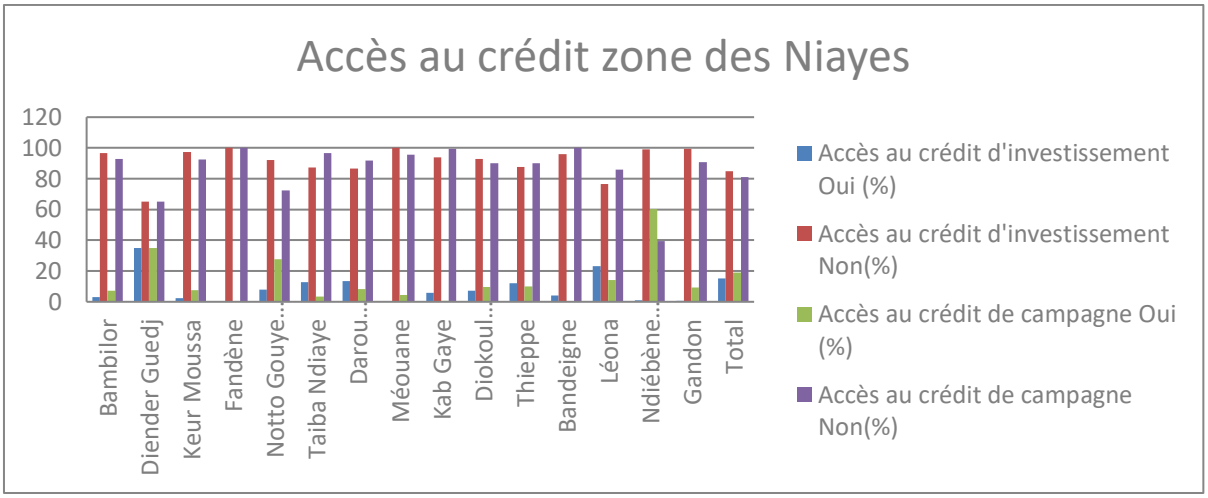

FIG. 7. — Répartition de l'accès au crédit dans la zone des *niayes*. Source : Calcul de l'auteur à partir des données du recensement de l'horticulture dans les *niayes* (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013).

Les principales sources de crédits sont les banques, les *systèmes financiers décentralisés* (S.F.D. [18]), les projets et subventions (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013). Les systèmes financiers décentralisés constituent la première source de financement avec 70,6 % pour l'ensemble de la zone, suivis de la banque (18,9 %) et des projet/subvention (11,1 %). Les crédits d'investissements ont pour but de financer les charges d'extension de l'exploitation (19,9%), les travaux d'aménagement des terres (27,8 %), l'installation de systèmes d'irrigation (56,9 %), la construction d'infrastructures post-récoltes, l'achat de matériel agricole d'exploitation (46,9 %) et l'achat de matériel de mise en marché (1,7 %).

Pour les crédits de campagne, les systèmes financiers décentralisés constituent aussi la première source de financement avec 65 % pour l'ensemble de la zone, suivis des projets/subventions (22,4 %) et de la banque (14,1 %) (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013). Le crédit de campagne est utilisé pour l'achat de semences (92,9 %), d'engrais (88,7 %), de produits phytosanitaires (71,3 %), de carburant (21,1 %), pour supporter les charges salariales (14 %) et les charges liées au fonctionnement (44,6 %).

Cependant, il peut exister d'autres sources de financement telles que les tontines, l'autofinancement (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013).

LE FONCIER

La terre est l'un des facteurs de production les plus importants dans la production agricole. Comme pour tous les producteurs du monde rural, l'accès à la terre dans la zone des *niayes* est régi par la loi sur le domaine national. Avec cette loi, les producteurs ne sont pas

18. — Un *système financier décentralisé* (S.F.D.) est une institution dont l'objet principal est d'offrir des services financiers à des personnes qui n'ont généralement pas accès aux opérations des banques et établissements financiers tels que définis par la loi portant réglementation bancaire et habilitée aux termes de la présente loi à fournir ces prestations. Source : <**http://www.microfinance.sn/page-248-1.html**>, dernière consultation le 6 oct. 2015.

propriétaires des terres qu'ils cultivent. L'insécurité liée à la possibilité de perdre le droit d'usage ne favorise pas l'investissement. Cette loi est ainsi considérée comme étant inadaptée aux traditions et réalités des populations rurales (F.A.O., 2003). Elle a encouragé des comportements corruptifs ayant comme conséquences des conflits fonciers. Par ailleurs, MENDELSOHN (2012) fait remarquer que lorsque les producteurs ne sont pas propriétaires des terres qu'ils cultivent, ils ne sont pas incités à sauvegarder leur qualité. Une réforme foncière est en cours d'étude pour résoudre les problèmes liés au foncier. Malgré l'existence de la loi, dans les *niayes*, les producteurs accèdent à la terre sous différentes formes (PADEN, 2013) : par emprunt, selon la loi coutumière (par héritage) ou encore des achats de terre. La possibilité d'accéder à la terre par le prêt se raréfie car peut engendrer des tensions. En effet, les emprunteurs, sous prétexte d'avoir mis en valeur les terres, en sollicitent parfois l'affectation. Ainsi, les prêts de terre s'opèrent de plus en plus entre individus qui entretiennent des relations de confiance (TOURÉ & SECK, 2005 ; PADEN, 2013). Concernant l'achat de terres, la législation foncière interdit la vente de terres sans titre foncier, ces ventes sont ainsi confidentielles (PADEN, 2013).

AUTRES TYPES DE CONTRAINTES

La commercialisation est aussi un autre obstacle pour les producteurs. En effet, la saisonnalité des produits fait que les producteurs font face à un problème de forte disponibilité de certains produits lors de la saison sèche durant laquelle (environ 82 % des producteurs font face à ce type de problème) ils peinent parfois à évacuer leur production due à la saturation du marché. Cela est accentué par l'enclavement des zones de productions lié à l'état des infrastructures (28 % des producteurs ont un problème d'enclavement, surtout dans les communautés rurales de Thieppe et Léona) et les difficultés liées aux transports (40,4 % des producteurs surtout dans le centre-nord et nord à partir de la C.R. de Thieppe). Cette situation est aggravée par le caractère périssable des produits horticoles et les difficultés de stockage auxquelles font face les producteurs. Ainsi, d'autres types de problèmes sont liés à la conservation/transformation (environ 77,2 % des producteurs) et au conditionnement (environ 35,8 % des producteurs).

L'EAU, LES ATTAQUES PARASITAIRES, LES INDUSTRIES

Les problèmes liés à l'accès à l'eau sont sont dus à sa disponibilité en termes de quantité, ou à sa qualité qui peut se détériorer. Pour les producteurs utilisant l'eau de la S.D.E., ils sont exposés au tarif maraîcher qui est relativement cher et ils sont souvent victimes de coupures d'eau au niveau des périmètres maraîchers, la priorité de la S.D.E. étant de satisfaire les besoins en eau potable des populations (PADEN, 2013). Par ailleurs, dépendant du niveau de la nappe, l'accès à l'eau peut être plus ou moins couteux du fait des modes d'exhaure qui sont manuels (nécessitent de la main-d'œuvre) ou mécaniques (nécessitent de l'énergie). Concernant la qualité de l'eau, on assiste dans certaines parties à l'avancé du biseau salé avec la salinisation de l'eau de la nappe lorsque son niveau est plus bas que celui de l'eau de la mer (PADEN, 2013). Par ailleurs, la nappe est contaminée par les effluents domestiques et les engrais et pesticides.

Il existe aussi des problèmes liés aux attaques des parasites qui entrainent souvent des pertes non négligeables (PADEN, 2013). La présence d'industries dans la zone peut également entraîner une pollution des nappes (PADEN, 2013).

3.4. Qu'en est-il de la contrainte climatique ?

Au Sénégal, la littérature montre que le secteur agricole est largement touché par les aléas climatiques. Dans la zone des *niayes* où l'agriculture est dominée par les cultures maraîchères irriguées à partir de la nappe d'eau souterraine, l'effet du climat est indirect car passe par la disponibilité de l'eau d'irrigation comme expliqué dans l'introduction générale. Dans cette section, nous démontrons que le changement et la variabilité climatique peuvent affecter l'activité maraîchère dans la zone. Pour cela, nous analysons, à partir de la littérature et des données climatiques de l'ANACIM l'évolution des températures et précipitations et leur effet avéré ou possible sur la production horticole.

3.4.1. Climat passé dans la zone des *niayes*, quelles implications sur la production horticole ?

CLIMAT PASSÉ DANS LA ZONE

ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES SUR LA PÉRIODE 1970-2011 DANS LES NIAYES

L'analyse de l'évolution des températures maximales sur la période 1970-2011 dans les quatre régions des *niayes* montre une tendance à la hausse des températures maximales plus prononcée pour la région de Dakar (voir figures en annexe 6). Pour la région de Louga, une tendance à la baisse est notée. Cela peut paraitre surprenant dans un contexte de changement climatique où une hausse des températures est observée. Concernant les températures minimales sur la période 1970-2011, elles sont majoritairement à la hausse (voir figures en annexe).

Sur cette période, les températures maximales sont atteintes en 2009 à Dakar avec 29,26 ^{0}C, en 2008 à Saint-Louis avec 34,22 ^{0}C, en 1973 à Louga avec 38,42 ^{0}C. Les températures minimales sont atteintes en 1974 à Dakar avec 20,01 ^{0}C ; en 2000 à Saint-Louis avec 19,30 ^{0}C et en 1974 à Louga avec 18,72 ^{0}C. Pour la région de Thiès, les évolutions sont données en annexe 6 mais la série de données contient des ruptures.

VARIABILITÉ INTERANNUELLE DES PRÉCIPITATIONS ET COMPARAISON DES MOYENNES PLUVIOMÉTRIQUES SUR PLUSIEURS DÉCENNIES

Dans toutes les stations de la zone des *niayes* (quatre stations climatiques situées dans les régions de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis), les précipitations ont connu une évolution à tendance croissante entre 1970 et 2011 (voir figures en annexe 6). En moyenne, dans l'ensemble de la zone, les précipitations ont atteint un maximum de 569,73 mm (en 2010) et un minimum de 163,30 mm (en 1972) sur la période 1970-2011 (données ANACIM). Il y a cependant une variabilité spatiale notable dans les niveaux de précipitations. Les régions

plus au sud comme Dakar et Thiès ont enregistré des précipitations plus élevées que les régions du nord (Louga et Saint-Louis) (voir figures en annexe 6).

Nous calculons l'*indice de précipitation standardisé* (I.P.S. [19]) de la zone des *niayes* sur la période allant de 1970 à 2011. La FIG. 8 montre les résultats du calcul. La courbe bleue, qui représente cet indice, montre une grande variabilité des précipitations sur la période 1970-2011 avec l'occurrence d'événements très secs à extrêmement secs principalement dans la décennie 1970 et au début des années 1980 (par exemple années 1972, 1977 et 1983). Cela est en accord avec la littérature qui montre que depuis les années 60 le climat de la zone des *niayes* a connu une évolution non homogène tant sur le plan spatial que temporel avec des périodes humides et des périodes sèches (AGUIAR, 2009 ; AGUIAR *et al*., 2010 ; CAMARA, 2010 ; SARR, 2010).

La courbe de tendance linéaire coupe l'axe des abscisses entre 1990 et 1991 (FIG. 8). Cela montre que la période est marquée par une période sèche allant de 1970 à 1992 et une période humide allant de 1993 à 2011. Une seule année d'extrême humidité est notée en 2010.

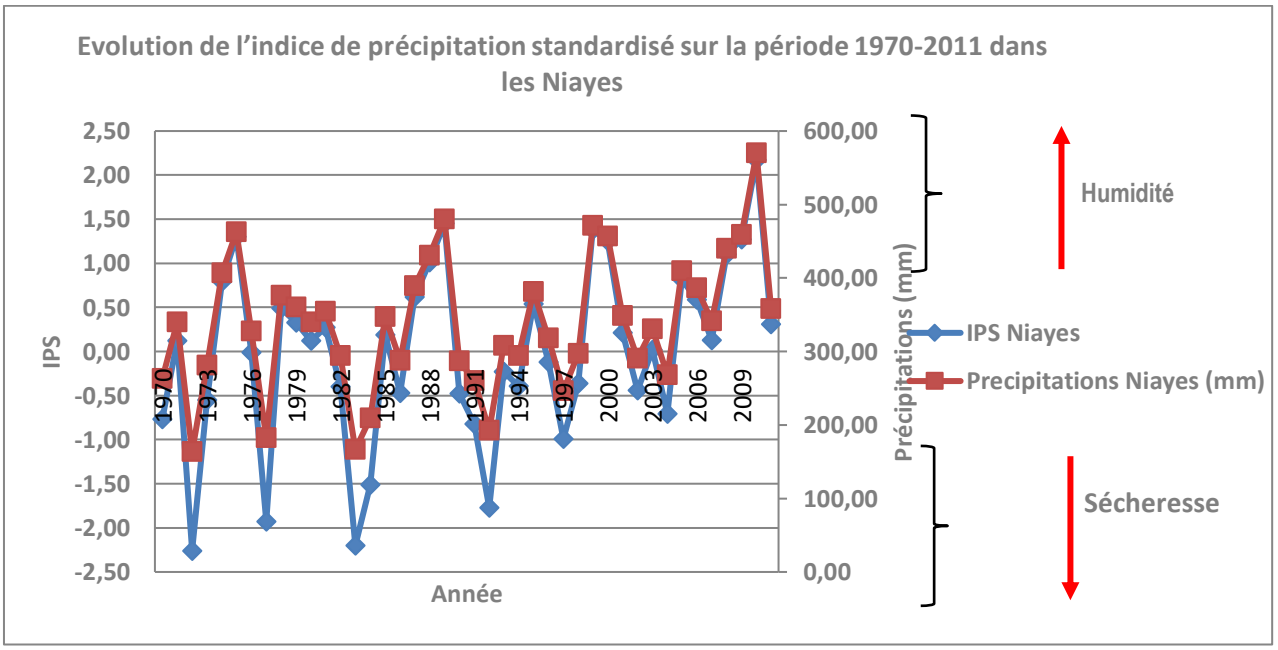

FIG. 8. — Indice de précipitation standardisé des *niayes* sur la période 1970-2011. Source : Calcul de l'auteur à partir des données de l'ANACIM (2013).

SARR (2010) observe que sur la période 1950-2009, la pluviométrie dans la zone connaît des périodes d'humidité et de sécheresse séparées par deux années de rupture: 1969 et 1999. Il note trois périodes : une période humide de 1950 à 1969 (majorité d'années humides), une période sèche des années 1970 aux années 1999 et 2000, et une période marquée par une alternance d'années humides et d'années sèches. SARR (2010) montre que l'année 1969 est la seule année de rupture pour la majorité des stations des *niayes*. Pour les quatre stations de la zone, la pluviométrie moyenne a connu une baisse variant entre 28 % et 42 %, selon la station, entre la période avant la rupture de 1969 et celle d'après.

19 — Voir chapitre 3 pour plus d'informations sur le calcul de cet indice.

Ces résultats sont confirmés par AGUIAR (2009) et AGUIAR *et al*. (2010) qui étudient l'évolution des précipitations entre 1950 et 2004 avec des données des quatre stations de la zone. En considérant la variabilité interannuelle, ils trouvent deux périodes séparées par une année de rupture en 1970: 1950-1969 et 1970-1989. Entre les deux périodes, la moyenne pluviométrique annuelle a baissé de 39 % à Thiès, 46 % à Dakar, 35 % à Saint-Louis et 44 % à Louga, soit une variation régionale de plus de 41 %.

En faisant la moyenne des précipitations sur la période 1970-2011, nous trouvons une valeur de 337,55 mm. Nous calculons également les moyennes sur la période 1970-1990 et 1990-2011 et trouvons respectivement 321,42 mm et 353,67 mm. En comparant ces valeurs avec les normales climatiques [20] de 1932-1960 (avant les sécheresses des années 1970 et 1980) qui s'élèvent à environ 500 mm (NDONG, 1995) dans la zone (FIG. 9), nous remarquons que les précipitations sont en deçà de leurs valeurs durant la période pré-sécheresse. Ce qui témoigne d'un déficit pluviométrique persistant, même si les tendances sont à la hausse.

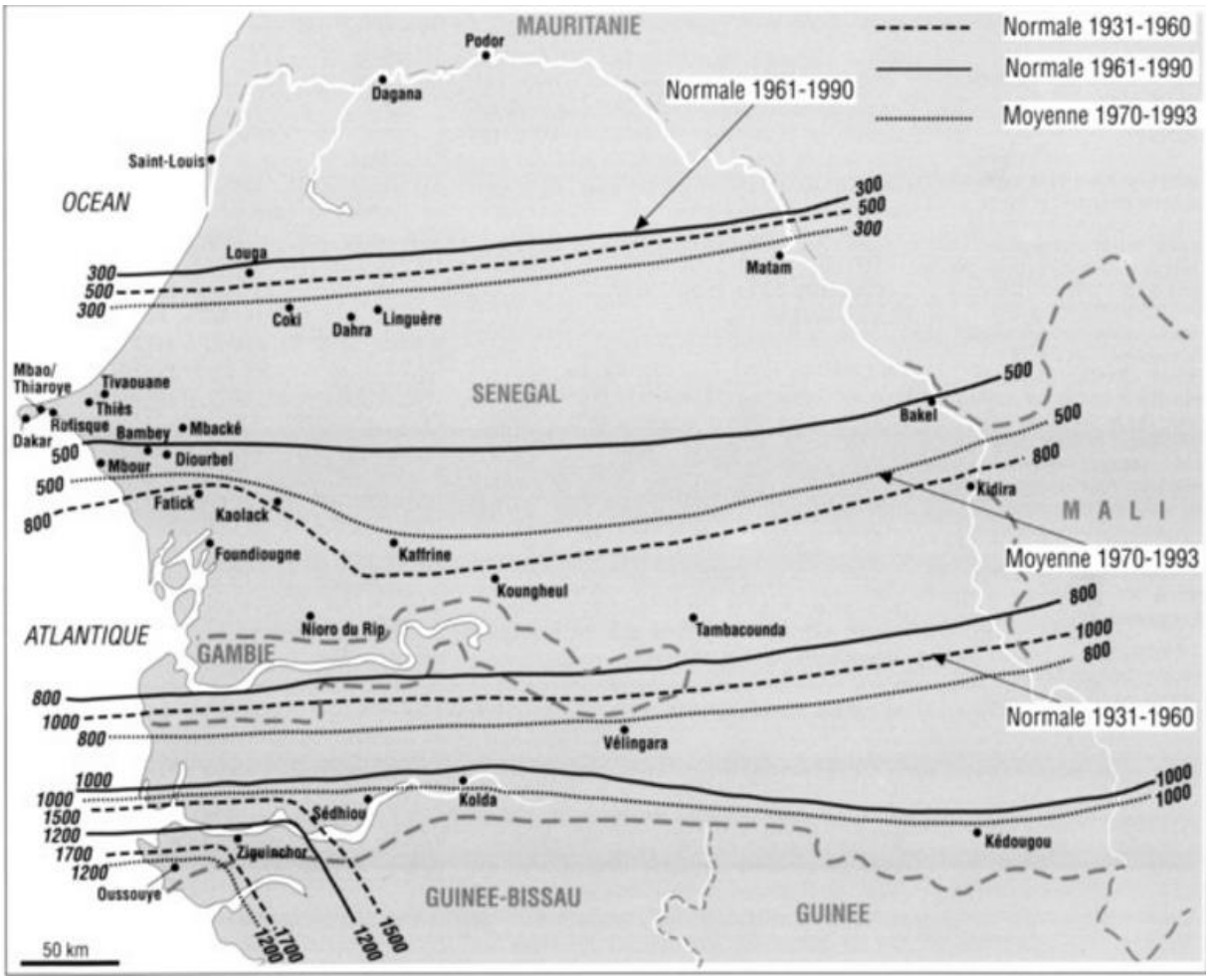

FIG. 9. — Évolution des isohyètes sur la période 1931-1990 au Sénégal. Source : NDONG (1995).

Selon AGUIAR (2009, chap. 2), le déficit pluviométrique noté dans la zone depuis 1960 au cours de la mousson est dû à la réduction du nombre de jours pluvieux (le pourcentage de

20 — La normale climatique est une valeur de référence d'une grandeur climatique en un lieu donné (PFISTER *et al*., 2005, . Ces normales, calculées sur une durée de trente ans sont utilisées pour comparer les climats des différentes régions du globe et ceux de différentes époques (*e. g*. climat actuel et climat futur).

jours pluvieux a régressé de plus de 30 %) et d'une hausse du nombre maximum de jours secs consécutifs au cours de la saison de mousson sur une période de dix ans. Par ailleurs, le nombre de jours dépassant les fortes valeurs de précipitations a baissé.

Il a été également noté un raccourcissement de la longueur de la saison des pluies dans les années 1980 (SARR, 2010). Cette tendance est confirmée par AGUIAR (2009, chap. 2) qui montre que la durée de la saison pluvieuse est passée de plus de cinq mois à près de trois mois entre 1950 et 2004.

QUELLES IMPLICATIONS SUR L'ACTIVITÉ HORTICOLE DANS LES *NIAYES*

Les variations de températures (surtout les hausses) peuvent avoir des répercussions sur les besoins en eau des plantes (NELSON *et al*., 2009 ; SITTA, 2011 ; ESTEVE *et al*., 2015).

Par ailleurs, pour une production optimale, les légumes de type « européen » incluant l'oignon, la pomme de terre, la carotte, le poivron, la tomate, préfèrent la fraicheur de la saison sèche (BENIEST *et al*., 1987).

Or, comme le montrent les données, les températures maximales et minimales sont majoritairement en hausse dans la zone sur la période 1970-2011. Par ailleurs, comme indiqué dans la section 1, les prévisions climatiques prévoient une hausse des températures au Sénégal. Ainsi, l'on s'attendrait à une hausse des besoins en eau des plantes. Ce qui augmenterait le stress hydrique, sauf si les producteurs irriguent. Cela nécessite que la ressource en eau soit toujours disponible.

Comme précisé dans l'introduction, les précipitations constituent la principale source de recharge de la nappe des sables du quaternaire, intrant incontournable pour l'irrigation dans les *niayes*. Sur la période couvrant les années allant de 1950 à 2000, des recherches menées dans la zone des *niayes* mettent en évidence le lien entre les variations pluviométriques et les niveaux des ressources en eau (AGUIAR, 2009 ; AGUIAR *et al*., 2010 ; DASYLVA & COSANDNEY, 2005 ; DASYLVA & COSANDEY, 2010 ; DASYLVA, 2012 ; SARR, 2010 ; CAMARA, 2010).

Ces études montrent que les niveaux de la nappe ont été influencés négativement par la variabilité et/ou l'insuffisance du volume des précipitations dans le passé. Or, les prévisions montrent que la pluviométrie continuera à être incertaine ; ce qui pourrait menacer l'accès à l'eau et affecter l'activité maraîchère dans le long terme.

D'autres implications existent certainement, notamment les conséquences possibles des températures, des vents chauds et secs, de l'humidité… sur la fréquence et l'intensité des attaques parasitaires.

Dans cette thèse, nous nous orientons davantage sur les aspects liés à la disponibilité de l'eau d'irrigation qui est davantage ressortie lors de nos entretiens qualitatifs auprès des groupements de producteurs dans les *niayes* (voir la section collecte de données dans le chapitre 3).

3.4.2. Peu d'études sur le changement et la variabilité climatique et l'agriculture dans les *niayes*

Dans les *niayes*, peu d'études se sont intéressées à l'effet du changement et de la variabilité climatique sur la production horticole. Comme dit précédemment, AGUIAR (2009), AGUIAR *et al*. (2010), DASYLVA & COSANDNEY (2005) montrent l'effet passé de la variabilité de précipitations sur la nappe d'eau et discutent (sans quantifier) les implications possibles sur l'activité agricole irriguée dans la zone.

DIAGNE (2013) fait une analyse de la perception de la vulnérabilité et des stratégies locales d'adaptation aux variations et changements climatiques au niveau des exploitations agricoles de la commune rurale de Keur Moussa. D'après ses résultats plus de 65 % des producteurs trouvent « qu'il y a baisse, irrégularité ou mauvaise répartition des pluies ». Cela entraine « l'apparition de maladies des végétaux, d'insectes destructeurs des récoltes, l'extension de la période de croissance des plants ou la destruction des puits ». Il trouve également que l'accès à l'eau est une contrainte à laquelle font face les producteurs qui utilisent l'eau de pluie, les eaux souterraines à travers les puits, s'abonnent à la S.D.E. ou combinent plusieurs sources d'eau.

Concernant les températures, les producteurs remarquent qu'elles sont à la hausse comparée aux décennies antérieures. Cela a des conséquences sur les spéculations horticoles telles que la tomate qui est détruite par des vents de la zone septentrionale de la commune.

Section 4 : Mesures d'atténuation et d'adaptation au changement et à la variabilité climatique au Sénégal [21]

Après avoir fait le tour du contexte climatique au Sénégal et ses implications sur l'agriculture pluviale et irriguée, il apparaît important de voir les mesures prises pour faire face au changement et à la variabilité climatique. Ces mesures peuvent contribuer à réduire la vulnérabilité de l'agriculture aux aléas climatiques. Cette section traite des actions faites au niveau national mais également par les acteurs non étatiques (O.N.G., structures de recherche, producteurs…) particulièrement dans le cadre de l'agriculture pluviale, celle irriguée et les ressources en eau pour l'irrigation.

Au Sénégal, différentes stratégies d'adaptation et d'atténuation sont mises en œuvre pour faire face au changement climatique mais également à la variabilité climatique et aux évènements extrêmes. Différents acteurs interviennent dans la prise d'initiative ou dans la mise en œuvre de ces stratégies : les pouvoirs politiques, la société civile et les organismes de recherche nationaux et internationaux à travers des projets ou programmes. Dans l'agriculture, les acteurs concernés par les effets du changement et de la variabilité

21. — Cette section se fonde principalement sur la deuxième communication nationale à la *Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques* (D.E.E.C., 2010) et d'autres sources (PANA, 2006).

climatique (exemple les producteurs) entreprennent également des stratégies pour faire face aux effets de ces phénomènes climatiques. Dans ce qui suit, nous exposons principalement les stratégies d'adaptation et d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre prises au niveau national (à caractère public ou planifié). Nous évoquons également les stratégies d'adaptation entreprises par les O.N.G. et les producteurs (adaptation privée ou autonome) dans le domaine agricole.

4.1. Politiques du gouvernement sur l'environnement et le changement climatique

Le gouvernement du Sénégal entreprend des stratégies d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation au changement climatique. Ces actions s'inscrivent dans le cadre de stratégies mises en place au niveau international. Ainsi, à l'instar de la plupart des pays du monde (développés et en voie de développement), le Sénégal a ratifié la *Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques* .....en juin 1994, la *Convention cadre de lutte contre la désertification* (C.C.D.) entrée en vigueur en 1996 (BRAUN, 2010) et le *protocole de Kyoto* en juillet 2001 (NDIAYE, 2014) [22].

Dans ce cadre, différentes actions sont prises pour respecter les engagements arrêtés lors de ces rencontres internationales. Dans le cadre de la C.C.N.U.C.C., un *Comité national changements climatiques* (Comnacc) est mis en place en 1994 (NDIAYE, 2014). Le Comnacc doit fédérer l'ensemble des acteurs impliqués dans les questions relatives aux changements climatiques (services techniques administratifs, secteur privé, O.N.G., société civile, structures de recherche, associations d'élus locaux, universités, etc.) et est chargé du suivi des activités développées dans le cadre de la mise en œuvre de la C.C.N.U.C.C. Il joue, à cet effet, un rôle de conseil scientifique et technique (D.E.E.C., 2010). Le Sénégal a entrepris deux communications internes. La première communication nationale, publiée en 1997 (NDIAYE, 2014) a permis d'explorer des secteurs sensibles comme la zone côtière et les ressources en eau. La deuxième communication a pris en compte d'autres secteurs stratégiques comme la santé, l'agriculture et la pêche. Elle rend aussi compte des estimations des émissions de gaz à effet de serre du Sénégal et rappelle, par ailleurs, les actions d'adaptation entreprises pour faire face aux impacts des changements climatiques (Pana), la stratégie d'adaptation nationale au changement climatique (Snacc) ainsi que les mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

Par ailleurs, un point focal changement climatique est assuré par le ministère en charge de l'Environnement à travers la *Direction de l'environnement et des établissements classés* (D.E.E.C.) qui est aussi le point focal opérationnel du *Fonds pour l'environnement mondial* (Fem). Cette direction assure aussi le rôle d'autorité nationale désignée du *mécanisme de développement propre* (M.D.P.). Le point focal du *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (Giec) est l'*Agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie* (Anacim).

22. — Voir le chapitre 2 pour plus d'information sur ces accords internationaux.

Dans le cadre de la *Convention cadre de lutte contre la désertification* (C.C.D.), le Sénégal, à l'instar des autres parties signataires, élabore le *Plan d'actions national de lutte contre la désertification* (Pan/L.C.D.) en 1998, intégré dans le *Plan national d'actions pour l'environnement* (Pnae) (BRAUN, 2010).

Les aspects liés au changement climatique sont par ailleurs pris en compte dans le cadre du code de l'Environnement. Dans le deuxième communiqué (D.E.E.C., 2010), il est stipulé que ce code constitue le cadre juridique fondamental pour la prévention et la lutte contre les pollutions et nuisances, la protection des milieux (air, eau et sol) et des installations classées pour la protection de l'environnement. La révision du code de l'environnement (en cours) prévoit d'intégrer des dispositions relatives à la lutte contre les changements climatiques. D'autres codes prennent en compte aussi la dimension changement climatique notamment, le code de l'urbanisme. De plus, la loi sur le littoral (en cours) permettra de renforcer la législation sur le domaine maritime.

D'autres efforts ont été consentis par l'État avec l'élaboration de documents tels que : la *stratégie nationale de conservation de la biodiversité*, la *stratégie nationale pour le développement durable* (S.N.D.D.), la *stratégie de réduction de la pauvreté* (S.R.P.), la *stratégie de croissance accélérée* (S.C.A.)… Les stratégies portent souvent sur les secteurs les plus vulnérables au changement climatique, notamment le secteur agricole, les ressources en eaux, les zones côtières… (PANA, 2006 ; D.E.E.C., 2010).

4.2. Cas du secteur agricole et des ressources en eau pour l'irrigation

4.2.1. Le secteur agricole, grand émetteur de gaz à effet de serre, cible des mesures d'atténuation des émissions au Sénégal

Au Sénégal, les mesures d'atténuation se font davantage pour les secteurs les plus émetteurs.

Comme dit précédemment, la deuxième communication du Sénégal pour la C.C.N.U.C.C. a permis de faire un inventaire des émissions de gaz à effet de serre au Sénégal (inventaire requis en tant que pays ayant ratifié la convention). Cet inventaire a été fait en considérant l'année 2000 comme année de référence et a concerné les secteurs de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture, des déchets, de l'affectation des terres et changement d'affectation des terres et de la foresterie. Il apparaît qu'en 2000, le gaz carbonique (CO_2) et le méthane (CH_4) [23] sont les principaux gaz à effet de serre émis au Sénégal. Les émissions de CO_2 proviennent principalement des secteurs de l'énergie avec 95 % des émissions en 2000, du secteur de l'industrie avec seulement 4 % et enfin la foresterie qui n'émet que 1 %. Les secteurs qui émettent le plus de méthane sont le secteur agricole avec 69% des émissions et celui des déchets avec 29 % des émissions.

23. — Voir le chapitre 2 pour plus d'informations sur les gaz à effet de serre.

Converti en équivalent CO_2, le secteur de l'énergie reste le plus grand émetteur de gaz à effet de serre avec 49 %, suivi du secteur agricole avec 37 %, puis du secteur des déchets avec 12 % et les procédés industriels avec seulement 2 % (D.E.E.C., 2010). Ces chiffres montrent que l'agriculture fait partie des secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre.

Pour ce secteur, la réduction des émissions se concentrerait sur un meilleur usage de la fumure d'élevage, un usage moins intensif de la fertilisation par engrais minéral, une meilleure gestion des terres en évitant par exemple la jachère nue qui serait favorable à l'érosion, la pratique de la rotation avec des cultures de légumineuses qui serait une bonne méthode d'atténuation des gaz à effet de serre, la promotion de l'agroforesterie… (D.E.E.C., 2010).

Concernant le secteur de l'affectation des terres et changement d'affectation des terres, des actions telles que la mise en défens permettraient de séquestrer le carbone et d'atténuer les émissions. Plusieurs programmes d'atténuation ont été identifiés avec une option particulière pour la mise en défens enrichie dans le bassin arachidier.

4.2.2. Le Pana et la Snacc, documents phares dans la mise en œuvre de stratégies nationales d'adaptation

Concernant les stratégies d'adaptation, au niveau national, elles sont plus orientées vers les secteurs identifiés comme vulnérables au changement climatique. Il est ressorti du PANA (2006) qu'il s'agit du secteur des ressources en eau, du secteur agricole et des zones côtières.

À travers le Pana, et d'autres documents de stratégies d'adaptation au changement climatique, des programmes sont proposés pour faire face au changement climatique dans l'agriculture. C'est notamment le cas de la *stratégie nationale d'adaptation au changement climatique* (Snacc). Ici, nous nous concentrons principalement sur le Pana et la Snacc.

LA STRATÉGIE NATIONALE D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE-SNACC

La stratégie nationale constitue un cadre de référence sur lequel l'ensemble des acteurs et institutions doivent prendre appui pour davantage inscrire leurs actions dans une approche intégrée. Cette stratégie se veut être la feuille de route sur la base de laquelle devront être appréciées toutes les décisions stratégiques visant une meilleure adaptation au changement climatique. Elle devra, plus tard, être intégrée à la stratégie nationale de développement.

Les objectifs de la Snacc sont de prévenir et de réduire les effets du changement climatique sur la croissance et le développement économique et social du Sénégal. De façon spécifique, il s'agit de :

— protéger les populations face aux conséquences des changements climatiques, en particulier les groupes vulnérables ;
— développer les capacités de résistance des acteurs face aux risques climatiques ;
— promouvoir une gestion durable rationnelle des ressources naturelles.

Ils doivent servir de cadre de référence pour la réalisation des meilleurs investissements sectoriels, en vue d'assurer un développement soutenu intégrant l'impact du risque climatique.

La stratégie est définie suivant trois axes :

— développement des connaissances sur les effets du changement climatique et le transfert de technologies adaptées ;
— renforcement de la prévention et de la lutte contre les chocs ;
— promotion de la gestion durable des ressources naturelles telles que les ressources en eau, l'agriculture, la pêche, les zones côtières, la forêt et biodiversité.

Pour la mise en œuvre de cette stratégie, différents programmes sont mis en œuvre. Des actions transversales et sectorielles seront mises en œuvre durant cinq ans dans les divers secteurs. Les actions ont été regroupées dans cinq principaux programmes :

— développement des connaissances sur les changements climatiques ; cette action vise l'amélioration des systèmes d'information et de communication sur le changement climatique ;
— promotion des technologies et du partenariat, par exemple, à travers la mise en œuvre d'options d'adaptation adaptées au contexte local, à travers la recherche, le partage et le transfert de technologies ;
— prévention et gestion des risques par les *systèmes d'alerte précoce, par l'assurance agricole* ;
— renforcement de la mobilisation des ressources en eau ;
— promotion de la bonne gouvernance des ressources naturelles.

PLAN D'ACTION POUR L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES (PANA)

Le Sénégal fait partie des pays les moins avancés qui sont considérés par le Giec comme étant les plus vulnérables au changement climatique, car, du fait de leur faible niveau de développement, ils ne disposent pas de suffisamment de ressources financières et techniques pour faire face au changement climatique. Conformément à l'article 4 de la C.C.N.U.C.C. qui prône la mise en place de politiques nationales d'adaptation au changement climatique et la décision 28 de la 7e conférence des parties, les pays les moins avancés ont joui d'un financement du Fem pour établir leur plan national d'action national pour l'adaptation au changement climatique. Au vu de leur vulnérabilité aux changements climatiques, ce projet, exécuté par le *Programme des Nations unies pour l'environnement* (Pnue), a pour but d'identifier les besoins d'adaptation prioritaires des pays les moins avancés (PANA, 2006). C'est dans ce cadre que le Pana est mis en place.

Au Sénégal, pour son exécution, une étude de vulnérabilité a été faite en premier lieu afin d'évaluer la vulnérabilité des secteurs agricole, de l'eau, et des zones côtières au changement climatique et d'identifier les stratégies prioritaires pour chaque secteur. Des programmes ont ensuite été proposés : programme de développement de l'agroforesterie, d'utilisation rationnelle des eaux, de protection du littoral, d'éducation et de sensibilisation des populations, etc.

Dans les différentes initiatives nationales, pour le secteur agricole, des actions d'adaptation possibles sont :

— de promouvoir la recherche-développement pour la mise en place de variétés adaptées aux changements de températures, à la sécheresse et à la salinité ;
— de favoriser l'accès à l'information météorologique, afin de permettre aux producteurs d'ajuster leur date de semis par exemple ;
— de réduire la vulnérabilité à travers l'assurance agricole ;

— d'encourager des pratiques agricoles durables par la rotation céréales-légumineuses [24] ;
— de favoriser les systèmes intégrés agriculture-élevage où les déchets organiques peuvent être utilisés comme engrais en lieu et place de l'engrais minéral ;
— d'utiliser des variétés à cycle court, etc.

Pour le Bassin arachidier, par exemple, des stratégies de reboisement et de mise en défens (*espèces halophiles*) sont prévues, ainsi que la réalisation d'aménagements hydro-agricoles (digue anti sel). Dans la zone septentrionale, les actions portent sur le reboisement avec des espèces adaptées, la micro-irrigation, la récupération des eaux de ruissellement, la protection des aménagements du littoral… Les mesures proposées pour la zone méridionale concernent la mise en défens, la restauration de la mangrove, la réalisation des ouvrages de protection du littoral, etc.

Concernant les ressources en eau, les stratégies proposées dans les différentes initiatives nationales sont principalement :
— de favoriser une gestion rationnelle des ressources en eau à travers la revitalisation du réseau hydrographique, en retenant les eaux par des bassins de rétention, des aires de recharge des nappes, etc. ;
— de protéger les réserves disponibles en veillant à l'équilibre entre les prélèvements des nappes et leur recharge et en évitant leur pollution (eaux usées, produits chimiques), etc. ;
— de sensibiliser les utilisateurs, etc.

Pour la zone des *niayes* (le littoral Nord), les options d'adaptation retenues sont l'utilisation rationnelle des eaux, la recharge de la nappe et les aménagements côtiers.

4.3. Faire face au changement et à la variabilité climatique dans le domaine de l'agriculture : place de la recherche, la société civile, les organismes nationaux et internationaux

En dehors des actions gouvernementales, les O.N.G., la recherche à travers les institutions internationales et nationales et les acteurs locaux interviennent dans la lutte pour faire face aux changements de conditions climatiques. Dépendant des acteurs, l'intervention se fait soit à travers des projets de développement ou de recherche ou les deux à la fois. Les interventions étant multiples, en guise d'illustration de l'engagement des acteurs non étatiques, nous donnons ici quelques exemples des réalisations de l'Isra pour répondre au changement et à la variabilité climatique et quelques exemples de structures travaillant aussi dans ce cadre.

24 — Elle permet de réduire les quantités d'engrais azotés minéraux et par voie de conséquence les émissions de protoxyde d'azote (N2O) (D.E.E.C., 2010).

Réponses de l'Isra au changement et à la variabilité climatique

Pour faciliter l'adaptation, la recherche a mis en place de nouvelles technologies. Lors de la foire de partage de connaissances du réseau AfricAdapt (MAMOUDA & BARRY, 2013), les chercheurs ont eu l'occasion de partager leurs expériences de réponse aux aléas climatiques. Ainsi, M. Mbaye DIOP, chercheur à l'Isra, a exposé les réponses de sa structure pour faire face à la variabilité et au changement climatique. Il rapporte que :

> *L'Isra a développé des espèces forestières plus performantes et a permis, entre autres, la maîtrise des techniques de sylviculture, l'amélioration génétique, l'agroforesterie... L'isra a aussi sélectionné et homologué des variétés culturales à cycle plus court et adaptés. Par exemple, l'Isra a homologué en 2009 cinq variétés de riz pluvial (Nerica) et onze variétés de riz irriguées adaptées à la sécheresse. En 2011, l'Institut a homologué une variété de mil de 95 jours. L'isra intervient aussi dans la promotion de l'assurance agricole, un outil potentiel de gestion des risques pour appuyer la productivité, stabiliser et sécuriser les crédits, favoriser l'investissement agricole et donc augmenter et maintenir la productivité. L'assurance agricole indicielle constitue un exemple d'assurance moins chère et plus opérationnelle,* [...].
>
> (MAMOUDA & BARRY, 2013 : p. 16)

Importance du « travailler ensemble » dans la mise en place de stratégies d'adaptation au changement et à la variabilité climatique

Il est important de souligner que le défi des technologies d'adaptation générées par la recherche est leur diffusion au niveau des populations ciblées. GAFSI *et al*. (2007, chap. 24, p. 349) définissent l'innovation comme un « processus socio-économique de changement, accompli par un groupe social et fondé sur des inventions endogènes ou exogènes ». Le processus d'introduction de ces innovations semble donc très important. Il devient dès lors primordial d'impliquer les acteurs concernés (les producteurs) afin de faciliter la diffusion de technologies provenant de la recherche et d'encourager leur adoption, d'autant plus que selon ROBERTSON (1971) l'adoption est définit comme « l'acceptation et l'utilisation de manière continue d'une innovation ».

C'est dans le même ordre d'idées que M. THIAO de la Fongs, lors de la foire de partage de connaissances du réseau AfricAdapt (MAMOUDA & BARRY, 2013), rappelle la nécessité d'accompagner les producteurs dans leurs efforts d'adaptation et stipule que :

> [...] *les stratégies d'adaptation réussies sont le plus souvent portées par des paysans avertis et informés d'où la nécessité d'un renforcement de capacité des paysans.*
>
> (MAMOUDA & BARRY, 2013 : p. 22)

Par ailleurs, en dehors des populations ciblées, en matière de changements liés au climat, plusieurs acteurs non étatiques et des disciplines multiples sont interpellés, ainsi, le « travailler ensemble » est un impératif pour faciliter le partage de connaissances afin de favoriser le développement de stratégies d'adaptations adéquates et de faciliter leur intégration en milieu paysan.

Ainsi, les acteurs non étatiques se sont investis dans « le travailler ensemble » à travers des projets à partenariats multiples. L'Isra, par exemple, participe, à la production de connaissances en matière d'impact du changement et de la variabilité climatique sur la production agricole, le monde rural à travers des analyses d'impact par des approches sociologiques ou économiques et en partenariat avec des chercheurs provenant d'instituts de recherche internationaux telles que les CGiar.

À l'instar de l'Isra, l'Anacim ainsi que d'autres structures telles que le laboratoire de la physique de l'atmosphère de l'Ucad (L.P.A.) produisent aussi de la connaissance en matière d'information climatique. La recherche sur le changement climatique se fait aussi à l'université Cheikh-Anta-Diop de Dakar à travers des programmes de recherche tels que le Wascal.

Parallèlement à la production de connaissances, des projets de développement sont mis en œuvre pour mieux faciliter l'adaptation, à travers le partage de connaissances en partenariats multiples. L'Anacim, par exemple, sous financement du C.C.A.F.S. et en partenariat avec d'autres structures telles que l'Isra, mène des activités dans le cadre de projets d'adaptation à Kaffrine à travers la mise en place d'un système d'alerte précoce qui permet aux producteurs d'avoir accès à l'information climatique afin d'ajuster leurs pratiques agricoles aux aléas climatiques. Ce projet, développé depuis 2011, s'intitule : *Assistance au monde paysan à l'utilisation de la prévision climatiques pour améliorer les rendements agricoles* (DIOUF *et al*., 2014 : pp. 136-137).

D'autres structures telles que le Centre de suivi écologique (C.S.E.), sous financement du Centre de recherche pour le développement international (C.R.D.I.), en partenariat avec l'O.N.G. Green Senegal, le Laboratoire de physique atmosphérique, la Fongs, etc., se sont engagées dans le projet Infoclim « Plateforme d'information sur les changements climatiques » :

> *Le projet InfoClim, implémenté dans la région de Thiès, se propose de réaliser une plateforme participative d'information qui facilitera l'intégration de l'information scientifique, des stratégies locales d'adaptation et des politiques de réduction de la vulnérabilité au Sénégal. Il a mis en place un observatoire sur les changements climatiques, sensibilisé les acteurs locaux, identifié et mis en œuvre les stratégies d'adaptation des populations vulnérables afin d'améliorer leurs conditions de vie ou du moins freiner leur rétrogradation. L'observatoire sera accessible aux acteurs locaux et nationaux, notamment le Comité national sur les changements climatiques du sénégal (Comnacc) ; il servira de base pour la conception et la diffusion de différentes stratégies d'adaptation que les communautés pourront tester, modifier ou adopter pour faire face aux problèmes qu'elles rencontrent.*
>
> (DIOUF *et al.,* 2014 : p. 146)

Toujours, dans le cadre de partage de connaissances et de partenariats multiples, la *Plateforme nationale de dialogue science-politique sur le changement climatique*, *l'agriculture et la sécurité alimentaire du sénégal* (C-Casa) est mise en place.

Concernant les O.N.G., elles sont nombreuses à intervenir au Sénégal à travers des projets de développement. Des exemples sont Enda, *Green Senegal*. Cette dernière a travaillé dans différents projets sur la maîtrise de l'eau et l'adaptation aux changements climatiques dans le bassin arachidier entre 2009 et 2012. Par exemple, un des projets s'intitule *Partenariat multi-acteurs et diversification de la base de l'économie pour l'adaptation des populations vulnérables à la salinisation des sols induite par les changements climatiques au Sénégal* entre 2009 et 2012 à Fatick en partenariat avec Caritas, Tara, l'Isra/C.N.R.F. et l'université Cheikh-Anta-Diop de Dakar.

Le *Programme alimentaire mondial* (Pam) des Nations unies, l'O.N.G. *Oxfam America* et d'autres partenaires travaillent pour améliorer la sécurité alimentaire des producteurs vulnérables à travers l'initiative R4 pour la résilience rurale (*Rural Resilience Initiative*) (ANACIM *et al.*, 2013).

L'importance des connaissances endogènes

Comme les acteurs de la recherche et du développement, les producteurs aussi jouent un rôle important dans la mise en place de stratégies pour faire face au changement et à la variabilité climatique. Ils développent ainsi des stratégies de réponse à ces phénomènes climatiques (voir exemples dans D.E.E.C., 2010 ; DIAGNE, 2013 ; DIOUF *et al*., 2014 ; BEYE, 2016). En effet, au Sénégal, depuis plusieurs décennies, les producteurs ont adopté des stratégies d'adaptation face à l'irrégularité et l'insuffisance des pluies (D.E.E.C., 2010). Les adaptations concernent principalement l'usage de variétés à cycle court, la diversification des activités, etc. Aussi :

> *les eaux de pluie stockées naturellement dans les dépressions et les mares ont été utilisées traditionnellement pour l'abreuvement du cheptel et les usages domestiques pendant la saison des pluies et même jusqu'à deux à trois mois après l'hivernage.*
>
> (D.E.E.C., 2010 : p. 112)

Par ailleurs, des technologies comme le *Zaï* sont développées par des producteurs du nord du Burkina Faso (DIOUF *et al.*, 2014). Les producteurs s'adonnent aussi à la mise en place de haies vives, de cordons pierreux pour lutter contre l'érosion hydrique, l'association de cultures pour la gestion des terres (MAMOUDA & BARRY, 2013 ; DIOUF *et al*., 2014 ; BEYE, 2016). L'importance actuelle est de chercher à les préserver et à les améliorer (MAMOUDA & BARRY, 2013).

Dans ce sens, dans le cadre du C-Casa, DIOUF *et al.* (2014) ont mis en place un recueil de bonnes pratiques d'adaptation au changement climatique qui peuvent constituer une base de connaissances pour développer des options d'agriculture intelligente face au climat et qui seront utiles aux différents acteurs à tous les niveaux d'échelle (DIOUF *et al*, 2014). Ces pratiques englobent des bonnes pratiques endogènes: des pratiques de restauration des terres dégradées (*e. g*. le Zaï, le compostage) ; des techniques de lutte contre l'érosion (*e. g*. l'aménagement de cordons pierreux) ; des pratiques de régénération des forêts et des terres cultivées (*e. g*. la mise en défens, l'agroforesterie) ; des techniques de protection des ressources en eaux (*e. g*. la pratique de la micro irrigation, la Réutilisation des eaux usées, la collecte des eaux de pluies, la gestion intégrée des ressources en eau) (DIOUF e*t al*., 2014).

L'encadré 1 (en annexe 5), inspiré des travaux de DIAGNE (2013) montre un exemple des pratiques d'adaptation initiées par les producteurs dans les *niayes* avec l'appui ou non de structures externes.

La FIG. 10 représente les acteurs non-étatiques intervenant dans les efforts d'adaptation au changement et à la variabilité climatique.

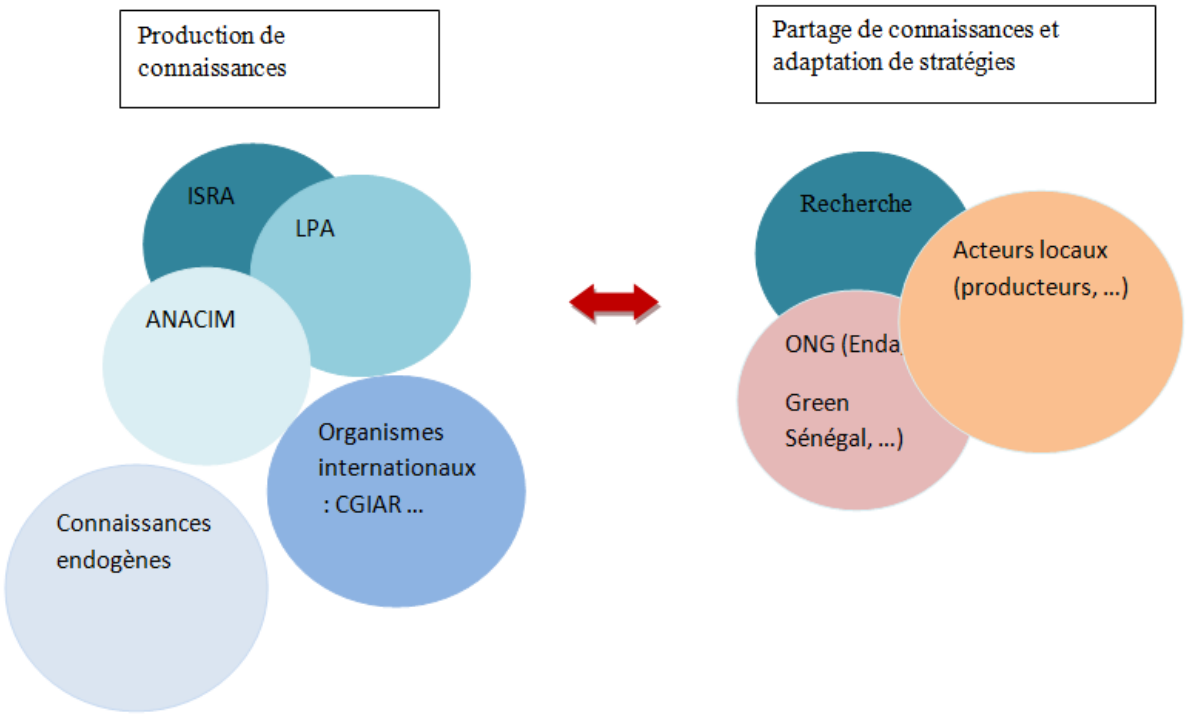

FIG. 10. — Interactions des acteurs dans l'adaptation au changement climatique.
Source : FAYE (2018).

Conclusion partielle

Ce chapitre nous montre dans un premier temps la situation passée et prévue du changement et de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest et particulièrement au Sénégal. Il montre un XXe siècle marqué par un réchauffement et des précipitations erratiques avec des périodes humides, sèches et mixtes des années 1960 à nos jours. Pour le climat futur, il est prévu de manière unanime un réchauffement du pays et des précipitations incertaines pour lesquelles les prédictions ne font pas l'unanimité car varient selon le modèle utilisé.

Ces aléas climatiques rendent l'agriculture vulnérable, en plus de la vulnérabilité socio-économique due aux insuffisances en termes de capital humain (éducation, notamment le besoin de formation des producteurs…), en termes de capital financier (accès limité au financement, revenus agricoles), en termes de capital physique (infrastructures, sécurité foncière, vétusté du matériel agricole, etc.).

Cependant, des efforts sont faits pour renforcer la capacité d'adaptation de l'agriculture au changement et à la variabilité climatique aussi bien au niveau étatique qu'au niveau non étatique (structures de recherches nationales et internationales, O.N.G., producteurs…). Au niveau étatique, dans le cadre d'accords internationaux tels que la C.C.N.U.C.C., C.C.D., le protocole de Kyoto…, le Sénégal a entrepris des stratégies de mitigation et d'adaptation au changement climatique à travers la mise en place de stratégies nationales (exemples la Snaac et le Pana). Pour les autres acteurs, de nombreux projets montrent l'engagement des acteurs non-étatiques en réponse au changement et à la variabilité climatique avec des

stratégies d'adaptation soit développées par la recherche ou endogènes. Ces interventions sont parfois effectuées de manière individuelle (par structure) ou en partenariat (entre acteurs de recherche, O.N.G., acteurs locaux…). Cette approche participative semble être la plus efficace pour éviter les redondances dans les actions.

Nous remarquons, à travers ce chapitre, que la vulnérabilité au changement et à la variabilité climatique a plus été mise en évidence pour l'agriculture pluviale (cultures céréalières et légumineuses) qui a fait l'objet de nombreuses études dans les différentes zones agro écologiques.

Concernant l'agriculture irriguée, principalement pratiquée dans la Vallée du fleuve Sénégal et dans les *niayes*, la littérature s'est révélée moins fournie.

Pour la Vallée du fleuve Sénégal, les études montrent un impact négatif des aléas climatiques sur les superficies cultivables qui se voient réduites du fait :

— de la salinisation des terres causée par l'ouverture de la brèche ;
— des inondations ;
— des sécheresses qui ont réduit les possibilités de culture de décrue et les terres irrigables et ont affecté la disponibilité de l'eau.

Pour le cas de la zone des *niayes*, principale zone de production horticole du Sénégal, les études sur le changement et la variabilité climatique ont principalement porté sur l'évolution des variables climatiques (températures et précipitations).

Ainsi, la littérature montre, dans les *niayes*, une forte baisse des précipitations entre la période humide (avant 1970) et la période sèche après 1970 avec des températures majoritairement en hausse. Les implications seraient une hausse des besoins en eau des plantes qui pourrait être comblée par l'irrigation. Cependant, les ressources en eau (notamment la nappe des sable du quaternaire, principale nappe utilisée par les producteurs pour l'irrigation) dépendent de la recharge pluviométrique. Ainsi, des études mettent en évidence le lien entre la baisse du niveau de la nappe des sables du quaternaire sur la période 1958-2002 et la baisse des précipitations qui pourrait affecter négativement la production horticole dans la zone des *niayes*. Les prévisions climatiques qui empêchent l'optimisme poussent à s'interroger sur l'avenir de la production horticole face à un déficit pluviométrique persistant (comparé aux niveaux des précipitations avant les sécheresses des années 1970) qui pourrait compromettre l'accès à l'eau d'irrigation dans un contexte de hausse de la demande en eau (des plantes avec la hausse des températures et l'accroissement de la population).

Chapitre 2
Du climat comme bien public global aux externalités sur la production agricole, analyse théorique et empirique

Pour mieux appréhender la question de recherche posée dans le cadre de cette thèse, nous nous proposons dans ce chapitre de faire une revue de littérature. Cette revue couvrira les aspects théoriques liés de près ou de loin à notre question de recherche, les résultats empiriques des études et les méthodes utilisées dans la littérature pour répondre aux questions relatives à l'effet du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture pluviale et irriguée. Notre question requiert :

— une compréhension du climat et son analyse dans la théorie économique ;
— une conceptualisation des effets possibles du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture pluviale et irriguée en insistant sur les ressources en eau d'irrigation pour cette dernière ;
— une analyse des méthodes utilisées pour évaluer l'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture pluviale et irriguée. Cette thèse étant davantage orientée vers l'agriculture irriguée, nous faisons un focus sur les modèles hydro-économiques intégrés et leurs applications pour l'analyse du changement et de la variabilité climatique.

Cela nous permettra de mieux situer notre recherche dans la littérature et d'orienter notre approche méthodologique.

Dans le chapitre premier, nous avons vu les effets négatifs possibles du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture sénégalaise. Ces effets proviennent :

— d'externalités négatives (hausse des températures, incertitudes des précipitations, événements extrêmes) — qui peuvent être positives dans d'autres contextes — causées par la mauvaise fourniture du bien public global qu'est le climat (notamment à travers les émissions excessives de gaz à effet de serre) ;
— de la variabilité naturelle du climat superposée au changement climatique et de l'occurrence d'événements climatiques extrêmes.

L'altération du climat par les émissions excessives de gaz à effet de serre a été mise en évidence par des travaux sur plusieurs décennies.

Le scientifique genevois Horace Bénédict DE SAUSSURE (années 1770) fut l'un des premiers à faire un pas vers la découverte de la notion de changement climatique avec l'invention d'un appareil appelé "héliothermomètre" qui lui permit de comprendre les différences de température entre les montagnes et les plaines [25]. Pour comprendre ces différences, DE

25. — Voir :
<http://www.lycee-jeanmonnet.org/mont-blanc2010/experiences/saussure-capteursolaire.pdf>.

SAUSSURE construisit un héliothermomètre [26] qu'il exposa aux rayons du soleil en montagne et en plaine et observa :

— des températures internes plus élevées que les températures externes ;
— la même élévation de la température intérieure de son appareil dans les mêmes conditions d'ensoleillement.

Les observations de DE SAUSSURE furent interprétées par FOURRIER (DUFRESNE, 2006) qui assimile les vitres de la boîte à l'atmosphère [27] et remarque que les vitres « sont transparentes au rayonnement visible et opaques au rayonnement infrarouge ».

Le parallélisme est fait avec l'atmosphère :

> *Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère et transporte de l'énergie jusqu'à la surface de la terre. Celle-ci absorbe une partie du rayonnement solaire, gagne de l'énergie qu'elle perd en émettant du rayonnement infrarouge. L'atmosphère absorbe ce rayonnement infrarouge, ce qui limite les pertes d'énergie vers l'espace.*
>
> (DUFRESNE, 2006).

D'après FOURRIER :

> [...] *la chaleur trouve moins d'obstacle pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure.*
>
> (FOURRIER, 1890 [28], cité *in* DUFRESNE, 2006).

Cela explique la hausse des températures.

À la suite des travaux de DE SAUSSURE, dans les années 1859, John TYNDALL, un scientifique britannique du XIXe siècle, est le premier à faire des expériences qui confirment l'effet de serre. À cette époque, le terme « effet de serre » n'était pas synonyme de réchauffement de la planète et le peu de scientifiques qui s'intéressaient au changement climatique pensaient, bien au contraire, au refroidissement de la planète et au retour d'un âge de glace.

Toujours au XIXe siècle un autre scientifique suisse, Louis AGASSIZ, avance que la terre a expérimenté des changements de températures et des conditions climatiques [29]. Selon YERGIN, « Agassiz était le vrai inventeur de l'idée du climat ». Ainsi, la notion de changement de climat commença à surgir.

Dans les années 1890 et 1930, plusieurs scientifiques expliquent l'origine du réchauffement de la planète. En 1894, le chimiste suédois Svante ARRHENIUS arpente les pas de TYNDALL et observe que la concentration du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère réchauffe la planète. Guy CALLENDAR (1938) évoque une production artificielle de CO_2. Il démontre que la température moyenne de la terre a augmenté et que cette augmentation est due à la production artificielle de CO_2 (c'est-à-dire le CO_2 provenant des activités anthropiques). Cette période correspond à la révolution industrielle. Cependant, ses arguments ont fait l'objet de controverses. À la suite de cela, d'autres recherches furent effectuées pour comprendre la

26. — Voir description de l'appareil : p. 2 <**http://www.lycee-jeanmonnet.org/mont-blanc2010/experiences/saussure-capteursolaire.pdf**>.

27. — Selon FOURRIER (1890, cité *in* DUFRESNE, 2006), l'atmosphère est similaire à une serre qui protège la surface et les habitants de la terre des températures extrêmes.

28. — Il s'agit d'un recueil des œuvres de FOURRIER. Ses travaux sur l'effet de serre ont été publiés pour la première fois en 1824.

29. — Voir <**http://danielyergin.com/history-of-climate-change/**>.

météo et le climat dans les années 1950. YERGIN [30] soutient que la science moderne sur le climat commença dans les années 1950 avec des travaux sur la température des différentes couches de l'océan, thème sur lequel l'océanographe Roger REVELLE et ses collègues ont largement travaillé. REVELLE est parmi les scientifiques qui se sont penchés sur la compréhension de la météo et du climat dans les années 1957 et 1958.

Les avancements dans les images satellitaires et les modélisations ont renforcés l'idée d'un réchauffement de la planète. Ces modèles ont aussi montré que les activités anthropiques ont joué un rôle important dans ce changement climatique en émettant du CO_2 dans l'atmosphère à travers la combustion d'hydrocarbures.

À la fin des années 1990, NORDHAUS (1999) stipulait que :

> *Aucun doute n'est permis en ce qui concerne la tendance à l'accumulation de CO_2, et peu de scientifiques doutent aujourd'hui de la vraisemblance d'un réchauffement de la planète au cours du siècle prochain et au-delà, si les tendances actuellement observées d'accumulation des gaz à effet de serre se prolongent dans l'avenir.*

Il y a actuellement un consensus sur la réalité du changement climatique même s'il y a encore des positions controversées sur les causes anthropiques. Ainsi, le GIEC (2014), conclut que :

> *il est extrêmement probable que l'influence de l'homme est la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XXe siècle.* [31].

La théorie économique suggère d'internaliser les externalités causées par les émissions de gaz à effet de serre afin d'atténuer le changement climatique. La coopération des États dans la lutte contre l'accentuation du changement climatique est aussi préconisée par les économistes.

Ce chapitre est divisé en trois sections :

— dans la première section, nous faisons une analyse de la relation entre climat et biens publics globaux et des stratégies d'atténuation du changement climatique qui existent dans la théorie économique et celles empiriques. Cela est suivi d'une analyse des implications possibles du changement et de la variabilité climatique sur la production agricole, partant de la théorie de la production ;

— dans la deuxième section, nous procédons à une revue de la littérature sur les méthodes d'évaluation d'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture en analysant leur adaptabilité au cas de l'agriculture irriguée. Nous revenons également sur les principaux résultats des applications de ces méthodes dans le contexte ouest-africain ;

— la deuxième section nous ayant permis de trouver l'approche méthodologique adéquate pour l'agriculture irriguée, les M.H.E. intégrés, dans la troisième section, nous revenons sur le cadre théorique de cette approche avant de l'expliquer en détail et d'en présenter quelques exemples d'application.

30. — Voir <**http://danielyergin.com/history-of-climate-change/**>.

31. — <**https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_fr.pdf**>.

Section 1 : Théorie économique, changement et variabilité climatiques et implications sur la production agricole

Comme plusieurs disciplines, l'économie est également interpellée dans l'analyse de phénomènes climatiques et de leurs effets. À un niveau global, l'intervention des économistes sur les questions climatiques a davantage concerné la problématique du changement climatique. Celle-ci a plus été axée sur les aspects liés à la gestion des émissions de gaz à effet de serre dans le monde, notamment aux solutions pour la fourniture d'un climat de qualité dans un contexte où les contributions aux émissions sont disparates et les effets différents d'un pays à un autre.

En dehors de cet aspect global, l'économie de la production s'est également penchée sur la question du changement climatique mais également celle de la variabilité climatique et s'est davantage intéressée à l'aspect micro-économique. Ainsi, il y a eu des études d'économistes sur l'impact du changement et de la variabilité climatique sur les agents de secteurs tels que l'agriculture. L'impact a davantage porté sur les rendements, la disponibilité de l'eau d'irrigation… des variables économiques telles que les profits. D'autres études économiques ont porté sur les stratégies d'adaptation des producteurs.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons tout d'abord aux réflexions sur le changement climatique dans un cadre global avant de nous intéresser au cadre microéconomique en rapport avec la production agricole.

1. La théorie économique dans le débat sur le changement climatique : dimension globale

1.1.1. Le climat : un bien public global altéré par les émissions de gaz à effet de serre

À l'opposé d'un bien privé qui est consommé par un individu (celui qui l'acquiert) et ne profite généralement qu'à cet individu, un bien public est tel que :

— la consommation du bien par un agent économique ne réduit pas les possibilités de consommation des autres agents. C'est le caractère non rival du bien ;

— aucun agent ne peut être exclu des bénéfices (ou dommages) que procurent (ou causent) le bien, qu'il ait contribué à sa fourniture ou pas. Cela correspond au caractère non exclusif du bien (SAMUELSON, 1954 ; NORDHAUS, 1999 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012).

Le caractère particulier d'un *bien public global* (B.P.G.) est qu'il procure (ou cause) des bénéfices (ou dommages) répartis dans le temps et dans l'espace (NORDHAUS, 1999 ; GRASSO, 2004).

Lorsque l'on parle de bien public, l'un des principaux problèmes est sa fourniture. En effet, ils sont caractérisés par l'absence de mécanismes économiques et/ou politiques qui permettent de les gérer de manière efficace et effective (NORDHAUS, 1999 ; GRASSO, 2004 ; HARRIS & CODUR, 2004). Pour les biens publics globaux, cette difficulté de gestion est d'autant plus accentuée par leur caractère global (NORDHAUS, 1999 ; GRASSO, 2004 ; MENDELSOHN, 2012).

Comme l'indique sa définition, le changement climatique est une conséquence des émissions de gaz à effet de serre provenant des agents économiques (consommateurs, producteurs…). En économie environnementale, ces émissions de carbone sont considérées comme une externalité négative (HARRIS & CODUR, 2004, HARRIS, ROACH & CODUR, 2015), du fait de leur effet sur la qualité du climat. Une externalité existe lorsque le bien-être d'un agent (producteur ou consommateur) ne dépend pas uniquement de ses propres activités mais aussi de celles d'un autre agent (TIETENBERG & LEWIS, 2012 : chap. 2).

L'existence des externalités conduit à des imperfections de marchés qui mènent à une fourniture non optimale du bien. Dans le cadre du changement climatique, ce bien public global serait le climat et l'enjeu serait de fournir un climat de qualité.

1.1.2. Contraintes liées à la fourniture d'un climat de qualité

RÉPARTITION SPATIALE ET TEMPORELLE DES RESPONSABILITÉS EN TERMES D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFETS DE SERRE

Dans le cas spécifique du changement climatique, la fourniture du bien public global consiste en la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cela est rendu difficile par l'existence de facteurs et/ou de situations qui n'incitent pas les États à diminuer leurs émissions. Parmi ces facteurs, la distribution inégale des responsabilités en termes d'émissions de gaz à effet de serre et des bénéfices/dommages qui résultent d'une atténuation des émissions tant d'un point de vue spatial que temporel. Ceci est un fait qui n'incite pas tous les pays à réduire leurs émissions.

Selon MENDELSOHN (2012), les pays en développement souffriront plus du changement climatique alors qu'ils ne sont que minoritairement responsables avec seulement 7 % des émissions globales. Quant aux pays développés qui seraient les moins lésés dans le futur, ils sont responsables de 45 % des émissions et les pays émergents de 48 % (MENDELSOHN, 2012). Cela soulève, selon MENDELSOHN (2012), des problèmes d'équité. Ainsi pourrait-il s'avérer difficile de déterminer les comportements à changer, les pays dans lesquels cela devrait se faire, de même que le moment (MENDELSOHN, 2012).

Sur le plan temporel, les émissions de gaz à effet de serre des générations actuelles auront un impact sur les générations futures. En effet, ces gaz s'accumulent lentement et lorsqu'ils sont visibles, il est souvent trop tard car les effets se manifestent de manière durable (NORDHAUS, 2005). Aussi, la magnitude des effets n'est pas connue avec certitude par les générations actuelles comme en témoignent les projections des modèles climatiques qui ne sont pas unanimes (ROUDIER, 2012 ; JALLOH *et al*., 2013). Ainsi est-il difficile de noter les effets de ces émissions dans le présent.

Cela ne motiverait pas un État non altruiste car les bénéfices de ses actions ne sont pas immédiats.

RÉPARTITION DES RESPONSABILITÉS EN TERMES DE COÛTS ET BÉNÉFICES D'UNE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS

Toutes ces préoccupations soulèvent la question de savoir quels pays seraient prêts à participer à la diminution des émissions de gaz à effet de serre (MENDELDSOHN, 2012 ; HARRIS & CODUR, 2004).

La difficulté de répondre à cette question est accentuée par les coûts et bénéfices d'une politique de réduction des émissions (MENDELSOHN, 2012). Les bénéfices que l'on peut tirer de la réduction du réchauffement consistent en la diminution des risques qu'une hausse de température pourrait causer (GRASSO, 2004). Quant aux coûts, ils correspondent principalement au coût d'opportunité d'une politique de réduction des émissions, c'est-à-dire ce dont la société doit se dessaisir pour mettre en place une telle mesure (GRASSO, 2004).

GRASSO (2004), souligne, une fois de plus, le déséquilibre entre les responsabilités et les bénéfices/dommages en faisant remarquer que les coûts de mitigation sont spécifiques aux pays alors que les bénéfices sont profitables au monde entier. Un meilleur climat profite donc à tout le monde mais les coûts d'accès à ce climat sont supportés par les pays réduisant leurs émissions. Ainsi note-t-on des asymétries dans les coûts et/ou les bénéfices d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre. D'après NORDHAUS (1999), ces asymétries rendraient difficile voire impossible la conclusion d'un accord entre États car l'unanimité requise pour les décisions, et qui serait compromise par les intérêts individuels, est une excuse pour l'inaction. Selon MENDELSOHN (2012), ceux qui bénéficient plus du bien public en voudraient plus; ceux qui paient plus pour sa fourniture en voudraient moins.

Aussi, les différents acteurs adoptent des positions stratégiques: les coûts d'abattement [32] sont élevés alors que les actions prises de manière individuelle (au niveau national) pour réduire les émissions n'ont pas un effet significatif au niveau global. L'action individuelle insignifiante combinée au caractère non exclusif du bien pousse à adopter un comportement de passager clandestin (GRASSO, 2004). En d'autres termes, même si un État ne participe pas à la fourniture d'un climat de qualité, il en profitera. Ainsi, s'il n'a pas un intérêt particulier à participer à sa fourniture, il s'en abstiendra.

Par ailleurs, l'absence de pouvoir supranational instauré par le dilemme westphalien limite les actions des États pris de manière individuelle et nécessite la coopération pour la fourniture du bien public global. Le système westphalien (NORDHAUS, 1999, 2005) [33] contraint les États à limiter leur pouvoir à leur territoire. Au niveau national, les gouvernements bénéficient d'un pouvoir et d'une autorité. Ainsi peuvent-ils gérer la fourniture de biens publics nationaux en désignant une structure qui se charge de sa fourniture et assurer son financement par imposition par exemple (NORDHAUS, 1999 ; GRASSO, 2004). Avec le système westphalien, seuls des États consentants peuvent accepter

32. — Coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

33. — Signature du traité de Westphalie en 1648.

des obligations internationales. La mise en place d'accords internationaux est donc une nécessité.

1.1.3. Solutions pour la fourniture d'un climat de qualité

1.1.3.1. QUE PROPOSE LA THÉORIE ÉCONOMIQUE ?

Pour faire face à ces problèmes, les économistes penchent pour des solutions faisant appel aux mécanismes de marchés tels que la taxe Pigouvienne ou un système d'échange de permis (HARRIS & CODUR, 2004 ; HARRIS, ROACH & CODUR, 2015) qui poussent les agents à intérioriser l'externalité causée par les émissions de gaz à effet de serre. Pour un bien privé, l'ajustement des prix et des comportements des agents permet de restaurer l'équilibre entre l'offre et la demande. Face au changement climatique, par exemple, la production agricole peut être compromise durant une année *t* donnée et causer une baisse de l'offre. Cependant, l'année suivante les producteurs peuvent ajuster leur production en faisant face au changement climatique en adoptant des stratégies pour augmenter leur productivité et satisfaire la demande par la même occasion. Les consommateurs, de leur côté, peuvent décider de consommer des biens substituts. L'État peut aussi intervenir en important ce bien pour satisfaire la demande nationale. Ces mécanismes de marché ou politiques permettent de gérer ce bien privé de sorte que l'offre satisfasse la demande. Ces mécanismes de marché et gouvernementaux sont absents pour un bien public global car il n'existe pas de marché pour l'échanger comme tout bien public et il n'y a pas de structure supranationale qui pourrait se charger de sa gestion (GRASSO, 2004 ; MENDELSOHN, 2012).

LA MISE EN PLACE D'UNE TAXE CARBONE

Concept

De manière conceptuelle, la taxe carbone est une taxe Pigouvienne. D'après BAUMOL & OATES (1988), lorsque des émissions d'un pays affectent négativement l'environnement d'autres pays, la solution optimale serait d'imposer une taxe pigouvienne sur les émissions du pays pollueur. Cette taxe serait égale au dommage marginal que la pollution engendre dans les autres pays. La taxe carbone est prélevée sur les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) qui proviennent de la combustion de carburants fossiles (POTERBA, 1991 ; HARRIS & CODUR, 2004).

Avantages

La taxe carbone serait pour les États qui l'appliquent et surtout ceux ayant une grande consommation de carburants fossiles un important moyen de gagner des revenus (TIETENBERG & LEWIS , , 2012, chap. 16). En dehors de la notion de pollueur payeur, la taxe inciterait les producteurs et consommateurs à diminuer leur consommation de biens qui nécessitent l'usage de carburants fossiles au profit de technologies pro-environnementales par exemple (POTERBA, 1991 ; HARRIS & CODUR, 2004 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 16). Ainsi, ce type de mesure est bénéfique car permet de réduire les émissions de CO_2.

Quelle institution pour l'implémenter ?

POTERBA (1991) précise que les avocats de la taxe carbone suggèrent une coordination multinationale des actions pour un effet significatif car la contribution d'un seul pays aux émissions de gaz à effet de serre est relativement petite, voire négligeable. L'établissement d'une telle taxe par une institution internationale serait également difficile car les États pourraient s'opposer à ce que de tels revenus soient déversés à une institution internationale (NORDHAUS, 2007). Cette idée d'institution internationale est remplacée par l'idée de taxes carbones nationales harmonisées au niveau international dont les revenus seraient collectés au sein des pays (NORDHAUS, 2007 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 16). Cependant, une telle taxe devra prendre en compte les subventions et/ou taxes carbones ou équivalents qui existent déjà dans les pays (NORDHAUS, 2007). D'autres questions relatives aux pays à taxer surgissent. Ainsi, les pays en développement devraient-ils payer une telle taxe ? Il peut donc exister des pays sans taxe.

L'action unilatérale pourrait, cependant, servir de modèle aux nations qui n'adoptent pas de taxe carbone (POTERBA, 1991). Ainsi, des pays tels que la Finlande, la Suisse et les Pays-Bas ont décidé de manière unilatérale d'adopter les taxes carbones (POTERBA, 1991).

Exigences/Inconvénients

Selon POTERBA (1991), une taxe trop basse n'aurait pas d'impact sur la réduction des émissions venant des carburants fossiles. HARRIS & CODUR (2004) soutiennent cette idée. En effet, d'après MANNE & RICHELS (1992, cités *in* HARRIS & CODUR, 2004), pour que cette taxe permette de réduire les émissions, elle devra être assez importante. Cependant, imposer une taxe de cette envergure serait politiquement difficile car les populations pourraient s'y opposer. En effet, la mise en place de taxes élève les prix à un niveau supérieur à leur niveau optimal. Cela génère une perte sèche pour la société. Pour pallier cela, les revenus provenant de cette mesure peuvent permettre une baisse d'autres taxes (HARRIS & CODUR, 2004 ; NORDHAUS, 2007).

Par ailleurs, cette taxe qui serait une charge pour les entreprises pourrait entraver leur compétitivité (TIETENBERG & LEWIS, , 2012 : chap. 16). En effet, dans les pays taxés, les entreprises pourraient augmenter les prix des biens dans le but de transférer les coûts vers les consommateurs. À leur tour, ces derniers pourraient substituer ces biens dont les prix augmentent par des biens importés des pays non taxés si ceux-ci sont moins chers. Cela pourrait diminuer les parts de marchés des entreprises domestiques et éventuellement les motiver à aller produire dans les pays non taxés pour diminuer leurs coûts de production. Ce qui pourrait engendrer des pertes d'emplois. Aussi, cela n'entraînerait qu'une délocalisation des émissions (TIETENBERG & LEWIS,, 2012 : chap. 16).

POTERBA (1991) argumente que l'une des raisons qui pourraient dissuader la mise en place d'une taxe carbone dans les pays développés est qu'elle désavantage plus les ménages aux revenus faibles car ceux-là consomment plus d'énergie (à travers leurs équipements) que les ménages aux revenus élevés. Pour faire face à cela, POTERBA (1991) souligne l'importance du mécanisme de mise en place de la taxe carbone. L'État peut par exemple augmenter les transferts pour les ménages à faibles revenus.

LA MISE EN PLACE DE MARCHÉS D'ÉCHANGE D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE

Concept

Dans cette approche, les pays sont octroyés des quantités fixes d'émissions de gaz à effet de serre qu'ils consomment à leur convenance en tenant compte des objectifs de réduction des émissions. Les pays peuvent consommer la totalité de leurs permis d'émissions ou une partie et ont la possibilité de les échanger (HARRIS et CODUR, 2004 ; NORDHAUS, 2007). Cet échange peut aussi se faire entre entreprises au niveau national ou international (HARRIS et CODUR, 2004).

Exigences/Inconvénients

À l'instar des autres solutions, cette approche a aussi des inconvénients. Selon NORDHAUS (2007), dans un marché d'émissions de carbone, l'incertitude liée à la demande, l'offre et les mesures de régulation causerait une volatilité des prix des permis d'émissions de carbone. Par ailleurs, la demande et l'offre des permis d'émissions sont fortement inélastiques dans le court terme. Cela signifie que les quantités offertes et demandées varient peu lorsque le prix augmente. Ce qui accentuerait la volatilité des prix. Ces derniers peuvent être réduits par la possibilité de faire des prêts d'émissions (cela suppose que les pays aient la possibilité d'utiliser leurs permis d'émissions dans le futur ou de faire des épargnes) (NORDHAUS, 2007). Cependant, d'un point de vue environnemental, cette pratique serait inutile car les dommages causés par les émissions ne dépendent pas des flux courants ou futurs mais du stock de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (ELLERMAN, 2000).

Selon NORDHAUS (2007), une autre préoccupation réside dans le fait que la limitation des émissions mène à la rareté d'un bien qui ne l'était pas avant. Cela favorise un comportement de recherche de rente.

Par ailleurs, d'après ELLERMAN (2000), le système de permis d'émissions échangeables fait face à d'autres critiques car il est perçu comme immoral. En effet, à travers les permis d'émissions, cette approche donne aux pays le droit de polluer, alors que la pollution a des conséquences négatives sur la qualité du climat. Enfin, la propriété privée serait considérée comme inappropriée pour des ressources communes (ELLERMAN, 2000).

Malgré ces aspects négatifs, il y a des expériences d'échanges de permis qui se sont révélées réussies aussi bien du point de vue économique qu'environnemental. C'est le cas des États-Unis avec le programme d'échange du dioxyde de sulfure ($S0_2$) (ELLERMAN, 2000).

1.1.3.2. SOLUTIONS DE MITIGATION EMPIRIQUES : LES ACCORDS MONDIAUX

Comme le montre la littérature, pour obtenir des résultats notables en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les politiques climatiques nécessitent une action collective au niveau international (NORDHAUS, 1999 ; HARRIS & CODUR, 2004 ; NORDHAUS, 2005, 2009 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 2, 16 ; MENDELHSON, 2012 ; HARRIS, ROACH & CODUR, 2015).

Plusieurs accords ont été négociés sur le plan international pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces accords appliquent un ou plusieurs solutions théoriques pour l'atténuation des émissions. Il existe principalement deux accords notables:

LA CONVENTION CADRE DES NATIONS UNIES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La *Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques* (1992) est l'un des premiers efforts des États sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (NORDHAUS, 2007). Elle s'est tenue en 1992 à travers une rencontre organisée à Rio. Comme stipulé dans le document de la convention (NATIONS UNIES, 1992), cette rencontre se justifie par plusieurs préoccupations parmi lesquelles :

— les effets de l'activité anthropique sur l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre ;
— la grande majorité des émissions de gaz à effet de serre qui proviennent des pays développés ;
— les émissions des pays en développement faibles mais ayant une tendance évolutive pour des besoins de développement ;
— la nécessité de coopération entre pays pour faire face au changement climatique.

L'objectif de la convention est de préserver le système climatique pour les générations présentes et futures, plus précisément :

> *l'objectif de la Convention* [...] *est de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.*
>
> (NATIONS UNIES, 1992).

La convention est régie par des principes (article 3 de l'accord) qui tiennent compte des responsabilités des parties et de leurs capacités. D'après ces principes, les pays développés seront les leaders dans la lutte contre le changement climatique. Cela prend en compte les préoccupations des scientifiques (HARRIS & CODUR, 2004 ; NORDHAUS, 2007 ; MENDELSOHN, 2012) sur les principes d'équité en termes de responsabilités en matière d'émissions de gaz à effet de serre et de répartition de leurs effets dans le monde.

Conformément à l'article 4 de la convention, les États participants se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (spécialement les pays développés). Selon la Convention, cela peut se faire à travers plusieurs engagements :

— encourager la séquestration du carbone ;
— préparer en coopération, l'adaptation à l'impact du changement climatique en mettant en place des actions pour la gestion des zones côtières, les ressources en eau, l'agriculture, la protection des zones touchées par la sécheresse, la désertification, les inondations, notamment en Afrique ;
— tenir compte des considérations liées aux changements climatiques dans les politiques nationales, etc.

Les pays développés doivent, par ailleurs, engager des actions afin d'aider les pays en développement à faire face au changement climatique à travers la fourniture de moyens financiers, le transfert de technologie, la formation/l'éducation sur le changement climatique et ses effets, etc.

Cependant, cet accord n'est pas contraignant car ne fixe aucune mesure quantifiable de réduction des émissions (TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 16) et ne sanctionne pas les États qui participent en cas de non-respect des engagements.

LE PROTOCOLE DE KYOTO

Le protocole de Kyoto est le premier accord contraignant sur le changement climatique. Il a été mis en place lors d'une rencontre à Kyoto en 1997 sous la tutelle des Nations unies (HARRIS & CODUR, 2004). Entré en vigueur en 2005 (TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 16), ce protocole contraint les pays l'ayant ratifié à diminuer leurs émissions d'un taux fixé à, au moins, 5 % par an par rapport à leur niveau de 1990 sur une période de cinq ans allant de 2008 à 2012 (article 3 du protocole de Kyoto, NATIONS UNIES, 1998 ; GAUTIER & MAZOUNIE, 2015 ; ; ELLERMAN, 2000 ; NORDHAUS, 2007 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 16). Cette période est prolongée jusqu'en 2020 (GAUTIER & MAZOUNIE, 2015 ;). Les gaz à effet de serre inclus dans le protocole sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O), les hydrofluorocarbures (HFCs), les perfluorocarbures (PFCs) ou hydrocarbures perfluorés et l'hexafluorure de soufre (SF_6), (ELLERMAN, 2000 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 16).

Pour son implémentation, le protocole permet aux parties dans l'annexe B (pays industrialisés et économies en transition) :

— des échanges de quotas d'émissions ;

— la mise en œuvre conjointe selon laquelle un pays de l'annexe B peut obtenir des crédits de réduction d'émissions lorsqu'il aide à financer des projets qui réduisent les émissions dans un autre pays ;

— le mécanisme de développement propre qui permet aux pays de l'annexe B de financer des projets de réduction des émissions dans des pays ne se trouvant pas dans l'annexe B (principalement les pays en développement ; ce qui leur permet d'obtenir des réductions d'émissions certifiées qu'ils peuvent utiliser pour respecter leurs obligations de réduction d'émissions (TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 16 ; article 17 du protocole de Kyoto, NATIONS UNIES, 1998).

L'implémentation du protocole est plus renforcée dans l'Union européenne à travers leur système d'échange de quotas d'émissions mis en place au sein de l'union (NORDHAUS, 2007). En effet, pour se préparer aux engagements de Kyoto, l'Union européenne avait mis en place un système interne d'échange de quotas à travers une directive en 2003. Le marché d'échange de quotas d'émissions a été ouvert en janvier 2005 et ne concernait que les émissions de CO_2 pour sa période de fonctionnement allant de 2005 à 2007 [34].

Malgré les contraintes de limitation des émissions, le protocole de Kyoto a des failles liées à l'exclusion des pays en développement (NORDHAUS, 2007 ; HARRIS & CODUR, 2004), en l'absence d'un mécanisme permettant d'inclure de nouveaux pays et le fait que l'entente soit limitée à une seule période, 2008-2012 (NORDHAUS, 2007).

D'après NORDHAUS (2007) les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre doivent être efficaces sur le plan spatial et temporel. L'efficacité spatiale est atteinte lorsque les coûts marginaux de réduction des émissions sont les mêmes d'un pays à un autre, d'une industrie à une autre. L'efficacité inter-temporelle nécessite que le prix du carbone, qui correspond au coût marginal de réduction des émissions, croisse à un taux égal au taux d'intérêt réel du carbone [35].

35. — Le taux d'intérêt réel du carbone correspond au taux d'intérêt réel diminué du taux de disparition du CO2 dans l'atmosphère.

Concernant l'efficacité spatiale, le protocole de Kyoto n'inclut pas des pays tels que les États-Unis d'Amérique et la Chine qui font partie des plus gros pollueurs ainsi que les pays en développement. L'inclusion de ces derniers pourrait, cependant, mener à se poser des questions sur l'équité, les priorités de développement et les stratégies de négociation. NORDHAUS (2007) suggère ainsi que la participation des pays en développement, prenne en considération leurs aptitudes financières à participer.

En outre, la fixation des taux de réduction d'émissions par rapport à leur niveau de 1990 serait, d'un pays à un autre, un avantage ou un inconvénient (NORDHAUS, 2007). En effet, un pays ayant des émissions faibles en 1990 peut augmenter ses émissions dans les années subséquentes pour son développement économique. Ainsi, réduire ses émissions à une période ultérieure pourrait être handicapant si cela coïncide avec une période de forte croissance économique nécessitant des émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, la limitation des émissions peut entraver le développement économique. HARRIS & CODUR (2004) soutiennent cet argument en stipulant que les pays en développement sont réticents à accepter de limiter leurs émissions dans le court terme car craignent d'empêcher le développement de leurs économies.

Par rapport à l'efficacité inter-temporelle, les mesures de réduction des émissions ne concernent qu'une seule période, 2008-2012 (NORDHAUS, 2007). Cet argument peut cependant être nuancé avec la prolongation du protocole jusqu'en 2020.

Les études montrent aussi que si le protocole maintient les taux de réduction fixés, il aura peu d'impact sur le changement climatique (NORDHAUS, 2007). En effet, même avec l'existence du protocole de Kyoto, les émissions globales seraient proches d'une situation sans politiques de réduction des émissions (NORDHAUS,2007).

Par ailleurs, le protocole mènerait à une répartition spatiale inefficiente des coûts d'abattements (NORDHAUS, 2007).

QUELS MÉCANISMES POUR INCITER LES PAYS À INTÉGRER LES ACCORDS INTERNATIONAUX ?

Malgré les efforts consentis, notamment la convention cadre, le protocole de Kyoto, la création du Giec, etc., la décision d'intégrer un accord dont l'objectif est de réduire les émissions de gaz à effet de serre n'est pas une obligation et découle des intérêts des États (; GRASSO, 2004). En économie, la théorie des jeux est la branche la plus utilisée pour analyser les mécanismes qui peuvent être utilisés pour inciter les pays à intégrer les accords et éviter le problème du passager clandestin (BARRETT, 1990, cité *in* TIETENBERG & LEWIS, , 2012, chap. 16). Plusieurs stratégies d'incitation existent :

— usage de stratégies efficientes en coûts : ce type de mesures politiques réduirait les coûts de participation sans pour autant affecter les bénéfices, cela devrait motiver les parties à rejoindre les accords (TIETENBERG & LEWIS, 2009, chap. 16). Un exemple peut être le marché d'échange d'émissions instauré dans le protocole de Kyoto qui permet aux pays de réduire les coûts d'abattement des gaz à effet de serre (GRASSO, 2004) ;

— inclure les actions de réduction des gaz à effet de serre dans un accord plus large qui intègre d'autres aspects pouvant être bénéfiques aux pays (GRASSO, 2004 ; NORDHAUS, 2007 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012 : chap. 16). Cela peut être par exemple des accords sur le commerce international, la coopération sur la recherche-développement (NORDHAUS, 2007 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 16). Ce type d'accords augmenterait les chances d'avoir plus de monde

car certains pays peuvent bénéficier de la réduction de gaz à effet de serre alors que d'autres peuvent davantage bénéficier de l'autre composante (TIETENBERG & LEWIS, 2012, chap. 16) ;

— stratégie de transfert des plus bénéficiaires aux moins bénéficiaires : ce type de stratégie consiste à effectuer des transferts d'un pays qui bénéficie plus d'un accord climatique vers un pays qui en bénéficierait moins (TIETENBERG & LEWIS, 2012 : chap. 16). Le mécanisme de développement propre ou la mise en œuvre conjointe du protocole de Kyoto ci-dessus expliqués constituent des exemples. Cela pourrait motiver les deux types de pays à intégrer un accord climatique.

1.2. La production agricole face au changement et à la variabilité climatique, quel ancrage théorique

La branche de l'économie qui s'intéresse à l'impact du changement et de la variabilité climatique sur la production agricole est l'économie agricole. GUÈYE (2015 : p. 111) stipule que :

> *l'économie agricole est un domaine d'étude portant sur l'application de la théorie de l'économie à des problèmes et à des questions qui ont trait à la production, à la transformation, à la distribution…*

Ainsi, l'économie agricole interpelle plusieurs branches de l'économie pour traiter des questions relatives à la production agricole, la transformation, la distribution, la consommation, aux politiques agricoles… En nous fondant sur les études des économistes sur le changement et la variabilité climatique et la production agricole (MEDELLÍN-AZUARA *et al*., 2010 ; TIETENBERG & LEWIS, 2012 ; HARRIS, ROACH & CODUR, 2015), nous pouvons conclure que cette partie de l'économie agricole (la production agricole) est à cheval entre l'économie de la production et celle de l'environnement et des ressources naturelles et éventuellement la nouvelle économie institutionnelle (notamment dans la mise en place de mesures d'adaptation ou d'atténuation ou dans la gestion des ressources naturelles intrants à la production agricole).

Dans cette section, nous essayons de montrer l'effet possible du changement et de la variabilité climatique sur la production agricole qu'elle soit pluviale ou irriguée en partant de la théorie de la production.

Cette dernière trouve sa source dans la théorie néoclassique, qui, à l'opposé des classiques « qui ont une vision macroscopique de l'économie » (SAMUELSON, 1997 : p. 33), s'intéresse aux individus (producteurs et consommateurs) qui composent la société, à leurs caractéristiques et à leur comportement. L'objet n'étant pas ici de revenir sur les controverses entre ces deux théories, ni sur la théorie du consommateur, nous nous focaliserons sur le producteur. Nous n'avons pas non plus pour vocation de controverser la théorie du producteur mais de voir comment elle nous aide à mieux comprendre l'effet du changement et de la variabilité climatique sur la production agricole, particulièrement celle irriguée. Un producteur peut être définit comme étant un agent rationnel « qui combine des facteurs de production pour effectuer une production » (SAMUELSON, 1997 : p. 135). Sa rationnalité se trouve dans le fait qu'il essaie de trouver la combinaison des facteurs de production et de quantité produite qui lui permettent de maximiser son profit dans un contexte

de ressources limitées et d'incertitudes. Cette relation facteurs-quantité produite est représentée par la fonction de production.

« L'analyse néo-classique assimile le producteur à l'entreprise » (SAMUELSON, 1997 : p. 180). La particularité du producteur agricole est qu'il utilise une multitude de ressources pour produire une multitude de spéculations destinées à l'autoconsommation ou à la vente. Parmi ces facteurs, on peut citer le travail, le capital (machines), la terre, l'eau… La « fonction de production » s'apparente à la fonction de rendement dans le cas de la production agricole.

Les incertitudes sont liées au marché (demande, prix des facteurs et des produits incontrôlés…), aux « accidents politiques et sociaux » (DIARRA, 2009)… ou encore au climat (températures élevées, précipitations incertaines comme en témoigne la vulnérabilité du secteur agricole sénégalais à ces variables ; voir chap. 1). BOUSSARD (1987), cité dans DIARRA (2009), souligne le rôle de l'incertitude climatique en agriculture : la récolte peut substantiellement changer avec les mêmes facteurs de production dépendant de la météorologie.

En présence de changement et de variabilité climatique, la production peut être directement ou indirectement affectée. Ces effets diffèrent selon que l'on soit en agriculture pluviale ou irriguée.

Dans le cas de l'agriculture pluviale, le facteur de production « eau » dépend directement de la quantité de pluies tombées. Ainsi, lorsque la température et/ou les précipitations changent (exemple, en hausse pour les températures et en baisse ou irrégulières pour les précipitations), le rendement est directement impacté. En effet, une hausse des températures aura tendance à augmenter les besoins en eau des plantes (NELSON *et al*., 2009). Dans cette situation, une rareté des précipitations aggrave le stress hydrique. Dans ce type d'agriculture, en l'absence de ressources en eau d'irrigation, le producteur subit directement le changement et la variabilité climatique. Cet effet peut cependant être atténué selon que le producteur entreprend ou non des stratégies d'adaptation. Ce caractère vulnérable notable de l'agriculture pluviale lui a valu l'attention prononcée pour les études relatives à l'impact du changement climatique sur ce type d'agriculture à travers le monde comparée à l'agriculture irriguée.

Pour le cas de cette dernière, lorsque les besoins en eau augmentent suite à une hausse des températures, l'agriculteur a la possibilité d'irriguer car ayant accès aux ressources en eau. Cependant, ces dernières sont également tributaires du climat (KUMAR, 2012 ; ESTEVE *et al*., 2015), en sus de l'usage multiple auquel elles font face. Dans ce cadre, l'intérêt serait plus porté vers l'impact du changement et de la variabilité climatique sur la ressource utilisée par les producteurs et ses implications sur les décisions des producteurs en termes d'allocation des facteurs de production utilisés, notamment, les terres, d'usage des intrants, d'usage des ressources en eau… et leurs revenus nets. Cela permettra ensuite de juger de la nécessité d'intervention pour assurer une meilleure disponibilité de la ressource et d'envisager de meilleures options de gouvernance pour assurer sa disponibilité. L'évaluation de ce type d'impact ne pourra se faire en ignorant la théorie économique sur les ressources communes, particulièrement sur les ressources en eau. Nous reviendrons sur cette théorie dans la section 3 de ce chapitre.

Section 2 : Méthodes d'évaluation d'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture et résultats de recherche

Dans la littérature, nombreuses sont les études qui se sont intéressées à l'analyse de l'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture (MENDELSOHN *et al*., 1994 ; SÈNE, 2007 ; SITTA, 2011 ; ROUDIER, 2012). Elles ont, pour la plupart, travaillé sur l'agriculture pluviale (MENDELSOHN, 1994 ; SÈNE, 2007 ; ROUDIER, 2012) puis de plus en plus sur l'agriculture irriguée (MEDELLIN-AZUARA *et al.*, 2011 ; ESTEVE *et al*., 2015 ; VALERA ORTEGA *et al*., 2016).

Les approches utilisées pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture peuvent également être adéquates pour évaluer l'impact de la variabilité climatique et parfois celui des évènements climatiques extrêmes sur ce secteur; l'horizon temporel considéré est ce qui diffère le plus. Ces études utilisent des méthodes diverses dans différentes localités à travers le monde. Elles se distinguent par :

— la dimension étudiée (économique ou socio-économique, biophysique) ;
— l'échelle de temps considéré (court terme, moyen terme ou long terme) qui reflète plus ou moins le phénomène climatique étudié (changement climatique, variabilité climatique ou évènement extrême) ;
— l'échelle de l'analyse (niveau producteur, national ou une combinaison des différents niveaux…) ;
— la prise en compte ou non des stratégies d'adaptation... Selon la (ou les) dimension(s) étudiée(s), une ou plusieurs des autres aspects peut être prise en compte.

Ici, nous nous intéressons aux approches méthodologiques qui étudient les dimensions économiques et biophysiques et qui s'appliquent à l'échelle du producteur. Nous ne limiterons pas les autres aspects car les approches sont transversales (par exemple la même approche utilisée pour analyser l'effet du changement climatique peut être utilisée pour analyser l'effet de la variabilité climatique).

Les études qui s'intéressent à la dimension biophysique utilisent la méthode « approche fonction de production » qui consiste à utiliser des modèles de simulations de cultures (exemple ROUDIER, 2012), des méthodes économétriques (ex. SCHLENKER et ROBERTS, 2008) ou la programmation mathématique pour évaluer l'impact du changement climatique sur des variables telles que les rendements. Les études qui s'intéressent à la dimension économique utilisent des méthodes économétriques (ex. MENDELSOHN *et al*., 1994), ou la programmation mathématique ou les approches intégrées qui combinent plusieurs modèles (biophysique, économique, climatique…). Ces dernières permettent également de prendre en compte les deux dimensions en même temps.

Ces méthodes, quelles que soient les dimensions étudiées, peuvent être *ex ante* ou *ex post*. Ici l'analyse *ex post* peut se définir comme une évaluation qui permet de mesurer l'effet du changement et/ou de la variabilité climatique passé. L'analyse *ex ante* se définirait, elle, comme une évaluation qui permet de mesurer l'effet du changement et/ou de la variabilité climatique futur (prédit).

Dans ce qui suit, nous utiliserons davantage le terme « changement climatique » car c'est le choc climatique le plus étudié avec ces approches. Nous prenons cependant le soin de mentionner l'échelle de temps d'application possible des approches.

Nous exposerons, en premier lieu, les méthodes utilisées dans l'analyse d'impact du changement climatique sur des aspects biophysiques. En second lieu, nous évoquerons les méthodes utilisées dans le cas d'analyses de l'impact du changement climatique sur les dimensions économiques et également sur les méthodes qui permettent la prise en compte de ces deux dimensions dans une même étude. Pour chaque méthode, nous présenterons les principaux résultats trouvés par quelques études, particulièrement celles effectuées dans le contexte africain.

2.1. Impact du changement climatique sur des variables agronomiques : l'approche fonction de production

L'approche fonction de production consiste à employer des modèles de simulation de culture ou des méthodes économétriques pour évaluer l'impact du changement climatique sur les rendements des cultures. L'approche fonction de production peut être utilisée pour des anlayses de court ou long terme (DE SALVO *et al*., 2014).

2.1.1. Les Modèles de Simulation de Culture (MSC)

Les modèles de simulation de culture (Ceres, Soygro, D.S.S.A.T., Cropsyst, Sarra-H) sont surtout utilisés par les agronomes et certains agro-économistes/économistes et se fondent sur le processus physiologique de croissance des plantes. Selon SCHLENKER et ROBERTS (2008), le potentiel de développement d'une plante serait lié à la température. Par ailleurs, l'absence d'autres facteurs, tels que l'hydratation et les nutriments, pourrait limiter la croissance (SCHLENKER & ROBERTS , 2008). D.S.S.A.T. est l'un des modèles de simulation de culture les plus utilisés.

Ces modèles se fondent sur des données climatiques, l'application de nutriments et prennent en compte les conditions initiales du sol pour simuler les rendements. Leur force est qu'ils prennent en compte la distribution des températures sur toute une saison, ce qui n'est pas le cas des modèles économétriques qui utilisent généralement les moyennes des variables météorologiques (SCHLENKER & ROBERTS, 2008). Cependant SCHLENKER & ROBERTS (2008) ont développé un modèle économétrique leur permettant de prendre en compte la distribution des variables météorologiques sur toute une saison. Ces modèles permettent de simuler l'effet de stratégies d'adaptation exogènes, notamment, l'ajustement des quantités d'intrants par l'utilisateur du modèle, sur les rendements des spéculations.

Le problème des modèles de simulation de culture est l'incertitude liée au processus biologique et la multitude de paramètres fortement non-linéaires (SCHLENKER & ROBERTS, 2008). Par ailleurs, ils ne prennent pas en compte les réactions possibles des producteurs au niveau exploitation (en tenant compte de l'ensemble des activités agricoles) du fait de leur hypothèse sur le caractère exogène des systèmes de production tels que les choix de cultures et les pratiques de gestion (SCHLENKER & ROBERTS, , 2008) de l'exploitation.

Par ailleurs, les modèles agronomiques ne prennent pas en compte les aspects économiques (NELSON *et al*., 2009). De manière concrète, ces modèles n'intègrent pas des changements qui interviennent dans l'économie.

Cette approche a principalement été utilisée dans le cadre de cultures pluviales ou céréalières. Les rendements des cultures irriguées telles que les spéculations maraîchères n'ont pas beaucoup été calibrés dans ces modèles, particulièrement dans le contexte ouest africain (SITTA, 2011) ; leur usage pour ce type de spéculations peut donc s'avérer difficile. Par ailleurs, pour intégrer les aspects liés à l'irrigation tels que les quantités d'eau disponibles applicables à la plante, ces modèles sont souvent combinés à une composante hydrologique (NELSON *et al*., 2009 ; MEDELLÍN-AZUARA *et al*., 2010). Cette approche intégrée sera développée dans la section 2.2.2.

Il existe plusieurs applications de l'approche fonction de production. Dans le contexte ouest africain, ROUDIER (2012) utilise l'approche M.S.C. avec le modèle Sarra-H pour évaluer l'impact du changement climatique sur trois variétés contrastées de mil et trois de sorgho en Afrique de l'Ouest et trouve une « évolution négative du rendement moyen principalement due à l'augmentation des températures que la pluie peut seulement atténuer ou aggraver ». Il trouve que cet impact est « plus négatif pour les variétés à cycle court et constant que pour les variétés sensibles à la photopériode ».

NELSON *et al*. (2009) utilisent le D.S.S.A.T. pour mesurer les effets directs du changement climatique avec et sans fertilisation CO_2 sur les rendements des cultures irriguées et pluviales dans les pays développés et en développement. Les spéculations sont principalement le riz, le blé, le maïs, le soja et l'arachide. Pour les cultures telles que le mil, le sorgho et la canne à sucre, ils supposent…

> *que les plantes ayant des chemins métaboliques de photosynthèse semblables réagiront de manière semblable à un effet du changement climatique donné dans une région géographique donnée.*

Ainsi, ces spéculations (mil, sorgho et canne à sucre) qui suivent le même chemin métabolique (C4) que le maïs, ont les mêmes résultats que celui-ci dans une région géographique donnée.

Leurs résultats montrent des changements de rendements plus importants pour les pays en développement que pour les pays développés où certaines spéculations peuvent se retrouver avec des hausses de rendement sous l'effet du changement climatique. Pour le premier groupe de pays, des baisses de rendement « prédominent pour la plupart des cultures sans fertilisation CO_2 ». Le blé et le riz irrigué sont les plus touchés. Dans le groupe des pays en développement, particulièrement en Afrique subsaharienne, dans le calcul des projections, ils trouvent des baisses ou hausses peu importantes des rendements du maïs « et des effets fortement négatifs sur le blé en culture pluviale ».

SITTA (2011) analyse l'impact ex ante du changement climatique sur des cultures maraîchères irriguées au Niger en utilisant deux types de modèles de simulation de culture Cropwat et D.S.S.A.T. Avec Cropwat elle trouve que les besoins en eau d'irrigation saisonniers augmenteraient de 7 % vers les années 2050 et de 11 % vers les années 2100 pour le chou, la pomme de terre et la tomate. Elle trouve des hausses moins importantes pour le poivron et l'oignon avec respectivement 2 % et 3 % vers les années 2050 et 7 % et 5 % vers les années 2100. Avec D.S.S.A.T., ses résultats montrent une diminution des besoins en eau pour la pomme de terre, la tomate et le poivron de respectivement 20 %, 13 % et 18 % vers les années 2100. Elle trouve le contraire pour les besoins en eau

d'irrigation du chou qui augmenteraient de 34 %. Concernant les rendements, ils baissent pour toutes les spéculations à cause de la hausse des températures vers les années 2050 et 2100. La tomate et la pomme de terre ont les baisses de rendements les plus importantes.

Dans son analyse, SITTA (2011) a cependant fait face à des difficultés de calibrage des M.S.C. pour les spéculations maraîchères. En effet, ces spéculations ont été peu étudiées avec ces modèles agronomiques (SÈNE, 2007).

2.1.2. Modèles économétriques

Cette méthode évalue l'impact du changement climatique sur les rendements par une régression. Dans cette dernière, le rendement est considéré comme variable dépendante et les variables explicatives (exogènes) sont composées de variables climatiques telles que les températures, les précipitations et d'autres variables qui ont un impact sur les rendements, notamment les prix des spéculations ou la technologie. La plupart des études se sont plus intéressées à la température et à la précipitation comme variables climatiques (SCHLENKER & ROBERTS , 2008).

Les différences au sein de ce type d'études sont notées sur le choix des variables explicatives et la nature des données utilisées.

SCHLENKER & ROBERTS (2008) utilisent aussi des données de panels mais se focalisent particulièrement sur la distribution des températures. D'autres études utilisent d'autres types de données avec plus ou moins de variables exogènes.

L'usage de l'approche fonction de production serait pertinent si l'on ne s'intéressait qu'à l'impact du changement climatique sur une spéculation particulière car elle n'intègre pas des stratégies d'adaptation au changement climatique endogènes qu'un producteur maximisant son profit adopterait (par exemple la conversion à une autre activité) (MENDELSOHN *et al*., 1994). Dans cette approche, le producteur subirait le changement climatique sans y répondre, il serait qualifié de *dumbfarmer* (MENDELSOHN *et al*., 1994.). Cela est dû au fait que cette approche s'intéresse à une spéculation spécifique et ne peut donc prendre en compte les opportunités externes. Par conséquent, MENDELSOHN *et al*. (1994) stipulent qu'il est impossible pour l'approche fonction de production de prendre en compte certains types d'adaptations, notamment ceux relatifs à la substitution d'une activité économique par une autre plus profitable, par exemple la reconversion à d'autres spéculations. Cela a tendance à surestimer l'impact du changement climatique et donc à fournir des estimations biaisées. La FIG. 11 illustre le biais de l'approche fonction de production.

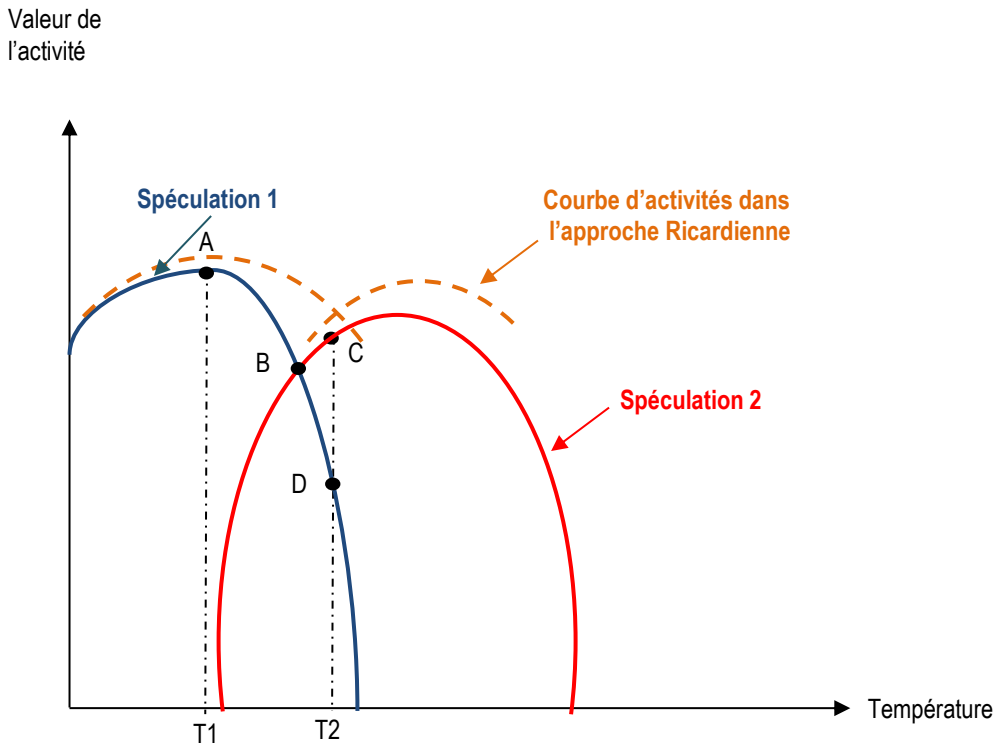

FIG. 11. — Biais de l'approche fonction de production. Source : Auteur, adapté de DESCHÊNES & GREENSTONE (2006 et 2007) et de MENDELSOHN *et al*. (1994).

Initialement, le producteur cultive la spéculation 1 et cette activité lui rapporte une valeur monétaire A à une température égale à $T1$. Lorsque la température augmente et passe de $T1$ à $T2 > T1$, le producteur a le choix entre continuer cette activité (spéculation 1) et gagner D ou se reconvertir à une autre activité (ici la spéculation 2) et gagner $C > D$. Dans l'approche fonction de production, il continue avec la spéculation 1 tout en essayant d'optimiser son rendement, en utilisant une nouvelle variété par exemple ou en modifiant le dosage de fertilisants. Dans l'approche ricardienne [36], il cultive la spéculation 2 pour gagner plus. La courbe en pointillé représente la courbe d'activités du producteur dans l'approche Ricardienne.

Il est cependant important de souligner que cette logique de substituer une spéculation à une autre en se basant sur les gains monétaires est propre au producteur avec une rationnalité néoclassique comme expliquée dans la section 1.2 du présent chapitre.

Il convient de noter que la programmation mathématique peut également être utilisée pour évaluer l'impact du changement et de la variabilité climatique sur les rendements mais cela se fait souvent dans le cadre d'approches intégrées que nous verrons par la suite.

36. — Voir la section suivante pour plus d'explications sur cette approche.

2.2. Impact du changement climatique sur des variables économiques : approche ricardienne et approches intégrées

2.2.1. Approche ricardienne ou hédonique

Pour corriger le biais de l'approche fonction de production, MENDHELSON *et al*. (1994) ont développé l'approche ricardienne, en référence à la théorie sur la rente foncière de David Ricardo. Cette méthode est utilisée pour la première fois par MENDHELSON *et al*. (1994) pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture américaine. Concrètement, l'approche consiste à évaluer l'impact du climat de différentes régions sur la valeur des terres ou les revenus nets par une régression liant le revenu net ou la valeur de la terre aux variables climatiques et à d'autres variables édaphiques et socio-économiques. Dans le modèle initial, la valeur des terres, considérée comme la valeur actuelle des revenus nets futurs générés par les activités agricoles, est la variable dépendante utilisée. Le lien établit entre la variable dépendante et le climat est ensuite utilisé pour prédire l'impact du climat futur en utilisant les projections climatiques.

À l'opposé de l'approche fonction de production, l'approche ricardienne repose sur l'hypothèse implicite que les exploitations s'adaptent car représente un producteur maximisant son profit pour produire différents outputs à partir d'un certain nombre d'inputs. Ainsi, elle permet de prendre en compte les possibilités de substitution entre inputs, d'introduction (ou de substitution à) d'autres activités agricoles (spéculations). Cette approche a plus été utilisée pour analyser les changements de long terme (DE SALVO *et al*., 2014).

La FIG. 11 illustre la différence entre les approches ricardienne et fonction de production.

Bien qu'étant largement utilisée à travers le monde, cette approche a certaines limites. Elle a reçu plusieurs critiques dans la littérature. L'usage de la valeur des terres, qui se réfère à l'approche hédonique en économie, a été très controversé. En effet, d'après MARTIN & VAITKEVICIUTE (2016)…

> *la théorie économique sous-tendant la méthode des prix hédoniques s'applique plus directement à des biens de consommation qu'à des facteurs de production.*

Par ailleurs, DESCHÊNES & GREENSTONE (2006) soulignent que l'utilisation de l'approche hédonique nécessite que toute variable non observée ayant un impact sur la valeur de la terre soit indépendante des variables climatiques. Ils articulent que les normales climatiques co-varient avec les caractéristiques du sol, la densité de la population, le revenu alors que certaines de ces variables ne sont pas incluses dans les variables explicatives de l'approche Ricardienne initiale. Le biais de l'approche hédonique est donc lié au fait que certaines variables non observées pourraient être corrélées aux variables explicatives du modèle. D&G (2006, 2007) assument que l'approche hédonique confondrait l'effet des variables climatiques (températures et précipitations) avec celui des variables omises.

La méthode est encore critiquée pour son caractère statique (DE SALVO *et al*., 2014 ;). En effet, MENDELSOHN *et al*. (1994) ont utilisé des données en coupe transversale (sur une année). Les effets observés peuvent être dus à un choc particulier survenu durant l'année de collecte des données. Aussi, la nature des données mènerait à l'estimation de paramètres qui ne prendraient pas en considération les changements structurels tels que la mise en

place de politiques publiques qui peuvent influer sur les prix (supposés constants dans cette approche), les technologies de production, etc. Cela donne des prédictions qui n'intègrent pas tous ces changements.

Une autre limite de l'approche ricardienne est qu'elle ne permet pas de distinguer les stratégies d'adaptation car les met toutes dans un même ensemble avec l'hypothèse implicite qu'elles sont toutes prises en compte alors que :

— les stratégies peuvent ne pas être une réponse au changement climatique ;
— ne pas distinguer les stratégies et leurs effets ne permet pas de mesurer leur efficacité ;
— les coûts de transition d'une spéculation à une autre ou d'un input à un autre ne sont pas pris en compte (LY, 2014) ;
— les prix constants peuvent également créer un biais car le modèle peut mésestimer les coûts (LY, 2014).

Cela est conforté par ROUDIER (2012) qui a fait une revue de littérature sur plusieurs études ricardiennes et qui stipule que cette méthode ne permet ni d'isoler les résultats en fonction des options de stratégies d'adaptation, ni de mesurer l'impact sans adaptation. Cette méthode ne serait donc pas adéquate pour tester l'efficacité d'une stratégie d'adaptation spécifique. Par ailleurs, ROUDIER (2012), à travers une méta-analyse d'études utilisant l'approche ricardiennes, remarque une grande dispersion des résultats, même au sein d'un même article (ROUDIER, 2012).

Enfin, cette méthode ne s'intéresse qu'aux activités agricoles. Ainsi, elle ne prendrait en compte que les stratégies d'adaptation relatives à ces activités alors qu'il peut exister dans certaines zones des producteurs qui s'adonnent à des activités non agricoles qu'ils considèrent comme alternatives aux activités agricoles en termes de gains monétaires.

Concernant les aspects liés à l'irrigation, l'approche ricardienne n'intègre pas la quantité d'eau disponible pour le producteur. Les M.S.C. seraient plus adaptés pour cela à condition qu'ils soient liés à un module hydrologique. Dans le même sens, SCHLENKER *et al*. (2005) soulignent que l'approche ricardienne se fonde sur l'hypothèse que les précipitations mesurent l'eau apportée à la plante. Cette hypothèse serait valable dans un contexte d'agriculture pluviale où les producteurs ne dépendent que des précipitations pour irriguer. Dans un contexte d'agriculture pluviale avec irrigation ou d'agriculture exclusivement irriguée, cette hypothèse ne serait pas pertinente. Pour montrer l'importance de faire la distinction entre l'agriculture pluviale et celle irriguée en utilisant l'approche hédonique, SCHLENKER *et al*. (2005) comparent l'équation de la valeur des terres dans les zones irriguées et celles non irriguées. Ils trouvent que l'évaluation de l'impact économique du changement climatique sur les besoins agricoles doit se faire de façon différente selon que l'on soit dans un cas d'agriculture pluviale ou irriguée. Ils avancent que les variables climatiques locales ne permettent pas de mesurer l'apport en eau dans les zones irriguées et qu'avec le mode de fixation des coûts d'accès à l'eau, l'approche hédonique peut mésestimer les coûts futurs associés à l'eau.

Dans la littérature, elle est largement utilisée pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture (SÈNE, 2007 ; SEO & MENDELSOHN, 2007).

Au Sénégal par exemple, SÈNE (2007) l'utilise dans le cadre de sa thèse pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture Sénégalaise. Il utilise le revenu net comme variable expliquée et fait tourner plusieurs modèles avec des variables explicatives.

Un premier modèle n'intègre que les températures et les précipitations. Dans un second, il ajoute au premier des variables telles que les données du sol qui permettent de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale. Dans un troisième modèle, il intègre des variables socio-économiques et l'irrigation. Enfin, dans un quatrième modèle il intègre les changements climatiques. Dans ses résultats, il trouve pour tous les modèles qu'une température plus élevée a un impact négatif sur le revenu net tandis qu'une hausse des précipitations a un impact positif sur le revenu net. Pour la saison des pluies, ce dernier effet est vérifié « jusqu'à un certain seuil à partir duquel toute hausse de pluie aura un impact négatif sur le revenu net». Pour ce qui est de la saison sèche, une hausse des pluies réduit le revenu net. Cependant, il fait remarquer que :

> *Les régressions montrent que l'effet du climat sur le revenu n'est pas linéaire. Ainsi, une conclusion systématique n'est pas possible sur l'impact des changements climatiques sur le revenu agricole uniquement sur la base de régressions.*

Au Burkina Faso, OUÉDRAOGO (2012) utilise l'approche ricardienne pour évaluer l'impact du changement climatique sur les revenus agricoles dans cinquante et un départements. Dans la spécification de son modèle, OUÉDRAOGO considère le revenu net comme variable dépendante et comme variables explicatives, il considère les variables climatiques (température et précipitation), les caractéristiques du sol et celles de l'exploitation. Enfin, il intègre une variable sur le ruissellement comme source supplémentaire d'eau en plus des précipitations.

Comme SÈNE (2007), OUÉDRAOGO (2012) intègre les variables de manière séquentielle. Dans un premier temps, il fait tourner le modèle avec les variables climatiques uniquement. Il intègre ensuite les variables hydrologiques puis les variables liées aux caractéristiques du sol. Enfin, les variables liées aux caractéristiques des exploitations et à leur environnement « socio-institutionnels » sont intégrées. Il trouve qu'avec ses modèles, plus de la majorité de la variation du revenu net reste inexpliquée. Identiquement à SÈNE (2007), il trouve une relation non linéaire entre le revenu et le climat. Ses résultats sur l'effet des variables climatiques sont relativement semblables à ceux trouvés par SÈNE (2007). En effet, il trouve que la température et les précipitations ont un effet positif sur le revenu jusqu'à un niveau au-delà duquel toute hausse de ces variables devient négatif pour les cultures. Pour la saison humide, il trouve que la relation entre le revenu agricole et les variables climatiques (précipitations et températures) est en forme de U. Par contre, dans la saison sèche, cette relation se transforme en U inversé. En appliquant les prévisions du Giec à son modèle, il trouve qu'avec une hausse des températures de 2,5 ^{0}C les revenus agricoles baisseront en moyenne de 46 % (ou de 93 % lorsque la hausse des températures est de 5 ^{0}C) pour l'ensemble des exploitations. Quant aux précipitations moyennes annuelles, une baisse de 7 % entraînera la perte totale des revenus pour l'ensemble des exploitations. Il reste cependant optimiste que dans de telles situations, les agents concernés s'adapteraient et que cela atténuerait les effets.

SEO *et al*. (2008) utilisent l'approche ricardienne pour évaluer l'impact du changement climatique sur différentes zones agro-écologiques en Afrique. Ils utilisent différents modèles: un modèle à deux saisons, un modèle avec intégration des températures et précipitations, un modèle à effet fixe qui prend en compte les effets spécifiques des pays et un modèle avec quatre saisons.

Ils trouvent que les variables climatiques sont des déterminants des revenus nets des producteurs en Afrique. En effet, tous leurs modèles montrent qu'une petite hausse des températures causerait un effet négatif sur les revenus nets en Afrique. Concernant les

précipitations, ils montrent que selon le modèle considéré, une légère hausse des températures peut être négatif (modèle avec effet fixe) ou positif (modèle avec usage de l'estimateur des moindres carrés). Avec différents scenarios climatiques, ils analysent l'effet du changement climatique à l'horizon 2020 et 2100. En considérant les effets fixes des pays, ils prédisent une baisse des revenus de 10 % ou 24 % selon le scenario en 2020. Cet impact augmente un peu avec le temps. Sans considérer les effets fixes des pays, ils trouvent une vulnérabilité croissante des producteurs au changement climatique (passant de 16 % en 2020 à 27 % en 2100) dans le temps sous certain scénario. Avec des scénarios non pessimistes, ils prédisent que les producteurs pourraient même tirer profit du changement climatique. Ils trouvent également que les effets du changement climatique varient d'un pays à un autre.

2.2.2. Approche intégrée

La critique commune aux approches développées précédemment est qu'elles ne considèrent pas suffisamment les aspects économiques ou biophysiques. Aussi, ces approches ont plus été utilisées dans le cadre d'agriculture pluviale ou de cultures céréalières et ne prennent pas suffisamment en compte les aspects liés à l'irrigation, si elles ne sont pas couplées avec d'autres modèles.

Les méthodes d'évaluation intégrée permettent de remédier à ce défaut car combinent l'approche fonction de production à d'autres modèles économiques, climatiques, hydrologiques, etc. En termes d'analyse d'impact du changement climatique, cette approche est essentiellement utilisée dans le cas d'analyses ex ante. ROUDIER (2012) trouve qu'il est pertinent de réaliser une telle approche pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture africaine.

Les approches intégrées associent des modèles de différentes disciplines (climatiques, agronomiques, hydrologiques, économiques...) pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture. Elles sont souvent utilisées par des équipes pluridisciplinaires composées de climatologues, d'agronomes, d'économistes, d'hydrologues et parfois d'autres disciplines. L'échelle de temps pouvant être analysé dépend des composantes de l'approche. La FIG. 12 montre quelques exemples d'approches intégrées).

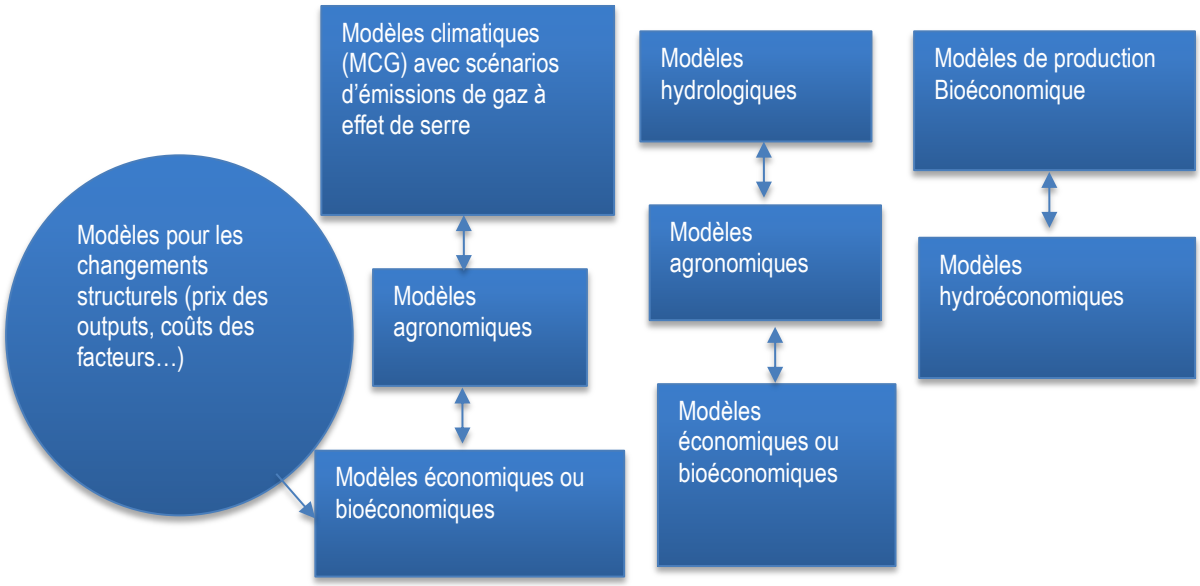

FIG. 12. — Exemples d'approches intégrées. Source : FAYE (Amy), 2018.

Ce schéma montre que selon les modèles considérés, les approches intégrées permettent d'évaluer l'impact du changement climatique sur une large palette de variables liées à la production agricole et aux producteurs. Les variables peuvent être agronomiques (rendements), économiques (revenus ou autres), liées à l'irrigation... Le premier type est par exemple utilisé dans le cadre du projet AgMip (*Agricultural Model Intercomparison Project* [37]). Un exemple d'application du second type peut être trouvé dans NELSON *et al*. (2009). Enfin, le troisième exemple a été utilisé par MEDELLÍN-AZUARA *et al*. (2010).

Toutes ces étapes ne sont pas forcément suivies par toutes les approches intégrées. Par exemple, pour le premier exemple, certaines se limitent aux deux dernières étapes ou à la dernière étape et utilisent les intrants d'autres études pour obtenir des données sur les projections du climat et les prévisions des rendements. Plusieurs exemples d'application de l'approche intégrée existent. JALLOH *et al*. (2013) font des prévisions sur les rendements des céréales en Afrique de l'Ouest en combinant des données de modèles climatiques à un modèle agronomique. FOFANA (2011) utilise aussi une approche intégrée pour évaluer l'impact du changement climatique sur des cultures céréalières et des légumes cultivés par une grande exploitation agricole. Dans son étude, il utilise un modèle biophysique (Cropsyst) qu'il combine à un modèle économique représentant un producteur maximisant son profit.

Nous nous proposons dans les points qui suivent, de définir les principales composantes d'une approche intégrée et de donner quelques exemples d'application.

2.2.2.1. LES COMPOSANTES CLIMATIQUES

Les modèles climatiques (M.C.G.) permettent de modéliser la physique et la chimie de l'atmosphère et ses interactions avec les océans et la surface de la terre (JALLOH *et al*., 2013, chap. 2). Ils permettent de comprendre le climat actuel et passé et d'avoir une projection du climat à divers horizons temporels. Selon JALLOH *et al*. (2013, chap. 2), les émissions de gaz à effet de serre modifient l'atmosphère et induisent un changement des températures et des précipitations. Par conséquent, des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont combinés aux M.C.G. pour prédire le climat futur (ROUDIER, 2012). La plupart des scénarios d'émissions sont tirés du Rapport Sres (I.P.C.C., 2000). Ces modèles ne représentent pas exactement la réalité, ce qui réduit leur habilité à prédire de manière fiable le climat futur. Les incertitudes liées aux modèles climatiques mènent à des résultats différents d'un modèle à un autre et au sein d'un même modèle pour différents scénarios. Des exemples de modèles climatiques sont : Csiro, Miroc, Echam 5,... (JALLOH *et al*., 2013).

D'autres approches, principalement stochastiques sont également utilisées pour remplacer les modèles climatiques lorsque ces derniers sont non accessibles/mobilisables ou n'ont pas une bonne résolution pour l'échelle d'analyse considérée. Un bon nombre de ces approches se basent principalement sur le développement de matrices de transition de probabilité à partir d'une chaine de Markov qui est ensuite utilisée pour générer une série de données climatiques (exemple des précipitations). Des exemples d'application peuvent être trouvés dans SAFOUANE *et al*. (2016), DLAMINI *et al*. (2015).

37. — <**http://www.agmip.org/**>.

2.2.2.2. LES COMPOSANTES AGRONOMIQUES

Ce sont les modèles de simulations de culture qui permettent de prédire l'impact du climat futur sur les rendements. Ces modèles utilisent les outputs des modèles climatiques, particulièrement les prédictions de changement de températures et de précipitations.

Les régressions économétriques peuvent aussi être utilisées pour évaluer l'impact futur du changement climatique sur les rendements.

2.2.2.3. LES COMPOSANTES ÉCONOMIQUES

Les modèles économiques utilisent les productions des modèles provenant des autres composantes et d'autres données socio-économiques pour évaluer l'impact du changement climatique sur des variables économiques. Dans la littérature, différents types de modèles sont utilisés dans les approches intégrées. Ces modèles peuvent être purement économiques (sans intégration de fonctions biophysiques, physiologiques,…) ou bioéconomiques/agroéconomique, hydroéconomiques, etc. Nous nous limitons ici aux modèles purement économiques et bioéconomique. Les modèles hydroéconomiques seront traités dans la section 3 de ce chapitre.

LES MODÈLES PUREMENT ÉCONOMIQUES

Le modèle TOA-MD 5

Le modèle TOA-M.D. 5 (*Tradeoff Analysis for Multi-Dimensional impact assessment model*) est un outil de simulation ex ante permettant d'évaluer l'adoption de nouvelles technologies et l'impact du changement climatique sur une population de producteurs (ANTLE, 2011 ; ANTLE & VALDIVIA, 2011). Il est utilisé comme modèle économique dans certaines approches intégrées telles que celles du Projet AgMip et est combiné à des modèles climatiques et des modèles agronomiques comme D.S.S.A.T. Dans le cadre du changement climatique, il permet d'évaluer, sur une population de producteurs, les pourcentages de producteurs négativement et positivement impactés par le changement climatique, l'impact de ce dernier sur les revenus nets, la pauvreté et possiblement sur d'autres variables de choix.

La valeur ajoutée de ce modèle est qu'il permet d'évaluer *ex ante* l'impact du changement climatique sur une population de producteurs (CLAESSENS *et al*., 2012), ce qui constitue une différence avec plusieurs modèles qui se focalisent sur un producteur représentatif. Par ailleurs, le modèle permet de contrôler les stratégies d'adaptation car il donne la possibilité d'évaluer l'impact du changement climatique en supposant que les producteurs ne s'adaptent pas dans un premier temps; il est ensuite possible d'inclure différentes stratégies d'adaptation une par une pour voir quelles sont les plus efficaces en comparant leur impact. Cette flexibilité n'est, par exemple, pas possible avec l'approche ricardienne qui met toutes les stratégies d'adaptation dans un même lot.

Aussi, le modèle Toa-M.D. permet d'intégrer les stratégies d'adaptations non agricoles comme la conversion à une activité non agricole (agriculture au sens strict) telle que

l'élevage. Toa permet, par ailleurs, de mesurer l'impact sur d'autres variables telles que la consommation, la pauvreté, etc.

Concrètement, pour évaluer l'impact du changement climatique, le modèle repose sur l'existence de deux systèmes de production: S1 et S2. Le premier est la situation observée et le deuxième est la situation future avec l'effet du changement climatique. Dans chaque système, la situation des producteurs est représentée : leurs activités économiques (spéculations cultivées, activités d'élevage, d'aquaculture ou d'autres activités), les rendements et prix des productions pour chaque activité, les quantités d'input utilisées, les coûts variables et fixes associés à l'activité et les caractéristiques des exploitations (leurs superficies exploitées, la taille de leur ménage).

Le système 1 est renseigné en utilisant les données collectées. Concernant le système 2, le changement climatique n'est pas directement mesuré car il n'y a aucune variable climatique prise en compte, ni de variables édaphiques ou liées à l'irrigation. Le changement climatique est pris en compte à travers les changements de rendements suite à une baisse de la pluviométrie par exemple. D'autres changements tels que les changements sur les coûts des facteurs et les prix des productions peuvent être intégrés. Pour renseigner ce deuxième système, l'utilisateur du modèle se base sur les prévisions des autres modèles (climatiques, agronomiques…). Un logiciel permet à l'utilisateur d'intégrer les informations relatives aux deux systèmes.

La structure du modèle TOA-M.D. lui confère plusieurs limites. Le modèle n'est pas comportemental car les choix et réactions des agents ne sont pas explicites. Ainsi, les seules stratégies d'adaptation prises en compte sont celles imposées par le modélisateur. Par ailleurs, tous les changements survenus à cause du changement climatique dans le système 2 sont renseignés par l'utilisateur grâce à d'autres modèles.

Le modèle permet de donner une idée de la façon dont une population de producteurs serait affectée par l'adoption d'une technologie ou le changement climatique mais ne nous permet pas de connaître les profils des producteurs positivement affectés et ceux lésés. L'utilisateur peut, cependant, procéder à une stratification avant de tourner le modèle.

LES MODÈLES ÉCONOMÉTRIQUES

Comme déjà spécifié, ces modèles peuvent permettre de prédire l'impact du changement climatique sur les revenus nets d'un producteur représentatif en utilisant les prévisions climatiques.

LES MODÈLES BIOÉCONOMIQUES

Les modèles bioéconomiques sont utilisés par les économistes et des non économistes et pour beaucoup de cas dans un cadre pluridisciplinaire selon l'approche. Ces modèles sont qualifiés de « bioéconomiques » car ils possèdent des caractéristiques biophysiques et économiques (KRAGT, 2012). KRAGT (2012) souligne que l'intégration des aspects biophysiques dans les modèles économiques est toujours un défi et cela s'applique également à la situation inverse. Les modèles bioéconomiques peuvent être développés par différents outils parmi lesquels la régression économétrique ou la programmation mathématique (KRAGT, 2012) en combinaison ou non avec des modèles biophysiques.

Les méthodes économétriques utilisent des estimations statistiques d'une fonction de production adaptée à la zone considérée en se basant sur les relations observées entre les

prix, les intrants utilisés, les caractéristiques physiques du sol… (KRAGT, 2012). Ces modèles peuvent être utilisés pour prédire l'effet du changement de variables climatiques ou de changements sur les ressources environnementales (telles que l'eau, la qualité des sols) ou sur la production agricole (KRAGT, 2012). Cependant, l'approche régression nécessite des séries d'observations qui ne sont souvent pas disponibles pour les variables environnementales (WEERSINK *et al*. 2002, cités *in* KRAGT, 2012). Par ailleurs, les modèles de régression sont construits à partir de données historiques ; ce qui pourrait questionner leur habilité à prédire le futur (JANSSEN & VAN ITTERSUM, 2007, cités *in* KRAGT, 2012). Enfin, les modèles de régression ne permettent pas de prendre en compte les interactions entre production agricole et conditions environnementales (KRAGT, 2012).

Pour la programmation mathématique, les modèles utilisés sont de deux types selon l'imbrication des composantes :

— une approche agronomique/biophysique-économique qui combine deux modèles (un biophysique et un économique) séparéments construits qui communiquent à travers un échange de variables ;

— une approche agro-économique qui inclut dans le même modèle les aspects biophysiques et économiques.

La programmation mathématique permet de représenter les décisions des agents économiques (maximisation de profit ou d'utilité selon que l'agent représenté soit producteur ou ménage) en intégrant leurs contraintes techniques (exemple disponibilité des pesticides et autres intrants…) et environnementales (climat, sol, eau…). La programmation mathématique peut être positive ou normative (GRAVELINE, 2013). La programmation positive cherche à reproduire le comportement du producteur qui est validé par le processus de calibrage. Une fois que le modèle est calibré (c'est-à-dire qu'il reproduit les données observées), l'on considère qu'il reproduit le comportement du producteur. À partir de là, lorsque des chocs sont implémentés, le modèle reproduit la réponse que le producteur aurait eue.

L'approche normative est le contraire et suppose que ce qui est observé n'est pas l'optimum et cherche l'optimum. Les modèles suivant cette approche ne sont pas calibrés (GRAVELINE, 2013).

Les approches que nous discutons ci-après sont des approches positives.

UTILISER DES MODÈLES ÉCONOMIQUES AVEC DES CARACTÉRISTIQUES BIOPHYSIQUES : APPROCHE AGROÉCONOMIQUE

Dans ce type d'approche, un modèle d'optimisation économique est utilisé pour optimiser la fonction-objectif du producteur en incluant une composante qui mesure les aspects biophysiques. Dans la plupart des cas, cette composante est une fonction de rendement endogène (par exemple une fonction de production C.E.S.) ou une équation biologique (BROWN, 2000) qui permet de représenter de manière explicite les quantités d'intrants utilisées par unité de terre, permettant ainsi la substitution entre intrants de manière transparente. Cette fonction de production est intégrée dans la fonction-objectif, par exemple le profit maximisé :

$$Max(Profit = py(x1, \dots xn).superficie - c.q)$$

sous contraintes où p est le vecteur des prix des spéculations, y(x1,…,xn) est le rendement des spéculations, « superficie » est la superficie allouée aux spéculations, c est

le vecteur des coûts unitaires des intrants et q est le vecteur des quantités d'intrants utilisées. Des exemples d'application de ces modèles peuvent être trouvés dans BROWN (2000).

UTILISER DES MODÈLES ÉCONOMIQUES AVEC UNE COMPOSANTE MESURÉE GRÂCE À UN SOUS-MODÈLE BIOPHYSIQUE : APPROCHE AGRONOMIQUE/BIOPHYSIQUE-ÉCONOMIQUE

Dans ce cas, la même fonction-objectif que précédemment peut être utilisée avec cependant un rendement exogène (qui est donc une valeur fixe) estimé avec un sous modèle biophysique qui est souvent un modèle de simulation de culture. La fonction de coût sera la seule à intégrer explicitement les quantités d'intrants et les coûts associés. Des exemples d'application de ces modèles peuvent être trouvés dans FOFANA (2011), FLICHMAN & ALLEN (*s. d.*), BROWN (2000).

Dans les deux cas, ces modèles peuvent être dynamiques ou statiques (FLICHMAN & ALLEN, *s. d.*). Contrairement au modèle Toa et aux modèles économétriques, les modèles bioéconomiques utilisant la programmation mathématique permettent de tenir compte (de manière endogène) des réactions ou stratégies d'adaptation des producteurs lorsque les conditions de production changent. Cette approche ne nécessite pas forcément l'usage de longues séries temporelles comme la plupart des méthodes économétriques, les données sont souvent une moyenne sur un nombre limité d'années ; parfois il suffit d'avoir des informations sur une année (HAZELL & NORTON, 1986 ; DIARRA, 2009). Cette méthode permet d'intégrer les potentiels changements structurels dans l'économie. En effet, au niveau micro (producteur), le modèle peut permettre de connaître les implications de différentes politiques agricoles (taxes ou subventions sur les prix), de différentes situations dans les marchés, de l'introduction de nouvelles technologies, etc. (HAZELL & NORTON, 1986).

Pour ce qui est du changement climatique, il peut être intégré de manière exogène à travers les rendements (simulés avec un sous modèle), les quantités d'intrants disponibles (exemple quantité d'eau disponible mesurée par les précipitations par exemple ou par un sous modèle hydrologique)… Des exemples d'applications de ces modèles bioéconomiques dans le cadre d'évaluation d'impact du changement climatique sont : FOFANA (2011) évoqué plus haut. Cependant, dans le contexte de l'Afrique de l'Ouest, ces modèles ont plus été utilisés à d'autres finset peu ou pas pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture.

La construction de modèles bioéconomiques pour évaluer l'impact du changement climatique fait, cependant, face à certains défis majeurs. Les difficultés de calibration et donc de validation de ces modèles au contexte de l'étude peuvent facilement s'avérer pénibles (BROWN, 2000 ; FLICHMAN & ALLEN, *s. d.*). Les formes fonctionnelles utilisées pour les fonctions de production (rendement) et les types de décisions représentées y jouent un grand rôle. En effet, s'ils ne représentent pas bien les processus de production et de prise de décisions, cela peut rendre le calibrage impossible. Cependant, il existe différentes approches de calibrage qui permettent de calibrer ces modèles avec peu de données (voir annexe 3 sur l'approche P.M.P. pour voir les méthodes de calibrage).

Section 3 : Les modèles hydro-économiques intégrés (*integrated hyro-economic models*) et leur usage pour l'évaluation d'impact du changement et de la variabilité climatique en agriculture irriguée

Les approches intégrées sont les plus utilisées pour évaluer l'impact du changement et de la variabilité climatique pour le cas de l'agriculture irriguée. Comme déjà stipulé, la spécificité de cette dernière est sa dépendance aux ressources en eau de surface ou souterraines qui, comme argumenté dans l'introduction générale, dépendent des variables climatiques. Ainsi, l'analyse économique de l'impact du changement ou de la variabilité climatique sur l'agriculture irriguée ne peut occulter la prise en compte des aspects hydrologiques.

Les modèles hydro-économiques combinées à des modèles de production agricole sont largement utilisés dans le cadre d'évaluation d'impact du changement climatique sur l'agriculture irriguée. Dans ce qui suit, nous reviendrons d'abord sur la théorie économique sur les ressources en eau d'irrigation, particulièrement les ressources en eau souterraines. Nous présenterons ensuite les spécificités des modèles hydro-économiques intégrés et leurs applications en insitant sur les applications empiriques traitant de l'analyse de l'impact de changements liés au climat sur l'agriculture irriguée.

3.1. Théorie économique et ressources en eau d'irrigation : Les nappes souterraines comme ressources communes

En dehors des hydrologues et des hydrogéologues, les économistes se sont beaucoup intéressés aux ressources en eau de surface et souterraine. Les nappes souterraines sont des ressources en eau que les agriculteurs utilisent pour l'irrigation afin de produire des biens aux consommateurs (BOOKER *et al*., 2012). En économie, elles sont considérées comme des ressources communes (OSTROM, 1990, 2010 ; WANG & SEGARRA, 2011 ; BOOKER *et al*., 2012). Ainsi, puisque cette thèse s'intéresse à l'effet de la variabilité des précipitations sur la nappe des sables du quaternaire et ses implications sur l'horticulture irriguée dans les *niayes*, nous revisitons les bases de la théorie des ressources communes afin de mieux cadrer notre approche méthodologique présentée dans le chapitre 3.

D'après OSTROM (1990, 2010), le terme *ressource commune*…

> *désigne un système de ressource suffisamment important pour qu'il soit coûteux (mais pas impossible) d'exclure ses bénéficiaires potentiels de l'accès aux bénéfices liés à son utilisation.*

Cela renvoie au caractère non exclusif de ces biens, c'est-à-dire à « accès ouvert », du moins pour la communauté d'utilisateurs qui y ont accès (GRIFFIN, 2006). OSTROM (1990, 2010) assimile les ressources communes à des systèmes de ressource (comparables à des

variables de stock) qui produisent des flux d'unités de ressource (comparables à des variables de flux) que les individus utilisent. Pour le cas d'une nappe, ces unités de ressource correspondent aux mètres cubes d'eau.

Les systèmes de ressources peuvent être utilisés conjointement (OSTROM, 1990, 2010). Cependant, les unités de ressources ne peuvent pas l'être. Par exemple, la nappe d'eau peut être utilisée par plusieurs acteurs en même temps mais l'eau utilisée dans le champ d'un agriculteur ne peut l'être sur celui d'un autre (OSTROM, 1990, 2010). En d'autres termes, lorsque x unités d'eau sont utilisées par un agent (producteur ou autre), cette quantité n'est pas disponible pour les autres (GRIFFIN, 2006, chap. 4).

Ainsi, contrairement aux biens publics qui sont non rivaux, c'est-à-dire que tout le monde peut bénéficier du bien sans altérer sa consommation par un autre (OSTROM, 1990), l'utilisation d'une ressource commune par un utilisateur peut réduire sa disponibilité pour les autres (HARRIS, Roach & CODUR, 2015). Cela renvoie au caractère rival (« avec concurrence dans l'utilisation ») des ressources communes (GRIFFIN, 2006) qui mène à des externalités négatives parmi lesquelles l'externalité de stock qui existe lorsque l'usage par un individu affecte le stock d'eau disponible et par là augmente le coût d'extraction des autres usagers (LLAMAS & CUSTODIO, 2002). PROVENCHER & BURT (1993) appellent le second effet une externalité de coût. Cette externalité de stock peut aussi être temporelle, c'est-à-dire qu'une unité extraite à une période t par un usager réduit les possibilités d'extraction pour les autres usagers à la période t + 1. Cette externalité entre périodes est appelée externalité temporelle par LLAMAS & CUSTODIO (2002).

D'autres types d'externalités telles que les externalités spatiales et environnementales existent (LLAMAS & CUSTODIO, 2002). Ces externalités ne sont cependant pas toujours intégrées dans les études économiques. Il existe également des externalités de qualité qui altèrent la qualité de la ressource.

En présence d'externalité de stock, plus la ressource est sollicitée par les différents usagers plus sa disponibilité sur le long terme pourrait se voir réduite et cela peut mener à la tragédie des communs de HARDIN (1968). Cette dernière est la tendance à la surexploitation des ressources communes car personne n'a d'incitation à conserver la ressource alors que les incitations financières individuelles favorisent l'exploitation (HARRIS, Roach & CODUR, 2015). En effet, comme le suggère GORDON (1954, cité *in* OSTROM, 1990 : p. 3, 2010 : p. 15)

> *la richesse accessible à tous n'est appréciée par personne car celui qui est assez téméraire pour attendre le moment opportun pour l'utiliser ne pourra que constater qu'un autre l'a fait à sa place* […]. *Les poissons présents dans la mer sont sans valeur pour le pêcheur car il n'existe aucune certitude qu'ils seront là pour lui demain s'ils sont laissés à l'abandon aujourd'hui.*

Cela renvoie à l'externalité stratégique de NEGRI (1989).

L'existence des externalités entraine des niveaux d'extraction d'eau non efficients pour la collectivité (LLAMAS & CUSTODIO, 2002 ; WANG & SEGARRA, 2011). Cela suggère la nécessité d'une régulation pour assurer un usage optimal de la ressource. Ces externalités montrent l'effet potentiel du comportement d'usage de la ressource sur sa disponibilité et les autres usagers.

Dans un système de ressource commune, utilisée par des « appropriateurs », OSTROM (1990, 2010) évoque l'existence d'incertitudes qui peuvent être externes ou internes. Les sources d'incertitudes internes sont liées à la ressource ou aux utilisateurs (comme en témoignent les externalités). L'influence des utilisateurs sur la ressource ne peut donc être

écartée dans l'évaluation de l'effet de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de la ressource.

Quant aux incertitudes externes, OSTROM (1990 : p. 33 ; 2010 : p. 48) les assimile à…

> *la quantité et le moment des chutes de pluie, la température et la quantité de lumière, la présence ou l'absence de vecteurs pathogènes et la valeur marchande de divers intrants ou produits finaux.*

Ainsi, le climat est considéré comme un facteur qui affecte la disponibilité de la ressource.

Pour modéliser les ressources en eau souterraine en économie, les modèles hydro-économiques intégrés ont plus été utilisés.

3.2. Modélisation des ressources en eau souterraines en économie et applications empiriques

3.2.1. Les modèles hydro-économiques

DE L'IMPORTANCE DE LA VALEUR ÉCONOMIQUE DE L'EAU

En économie, la modélisation des ressources en eau s'est principalement faite à travers des modèles hydro-économiques qui s'inspirent principalement de l'économie néoclassique. Ces modèles représentent à travers la modélisation les aspects hydrologiques, environnementaux, économiques des systèmes de ressource en eau à l'échelon régional (HAROU *et al*., 2009).

Les modèles hydro-économiques sont nés d'un besoin de prendre en compte la valeur économique de l'eau dans les modèles purement « d'ingénieurs ». En effet, dans ces derniers, les demandes en eau sont représentées par des quantités fixes. Or, la valeur de l'eau change avec la quantité et le type d'utilisation (agriculture, industries, consommation ménage, comme un bien intermédiaire ou final…). Ainsi, les modèles économiques permettent de considérer la demande en eau en se basant sur la notion de valeur en économie. Un concept central est que les demandes en eau ne sont pas fixes mais des fonctions où les quantités d'eau utilisées à différents moments ont des valeurs économiques totales et marginales variables (HAROU *et al*., 2009). Ces demandes en eau sont les demandes en eau des différents usagers (producteurs, entreprises, ménages …) et sont estimées avec différentes approches : économétrique ou par la programmation mathématique (BOOKER *et al*., 2012 ; HAROU *et al*., 2009) [38]. Dans ces modèles, l'allocation de l'eau dépend de la valeur économique qu'elle génère (HAROU *et al*., 2009).

38. — Pour le cas de l'agriculture, nous reviendrons sur la méthode d'évaluation de la demande en eau dans le chapitre 3.

L'APPROCHE HOLISTIQUE VS *L'APPROCHE MODULAIRE*

Ces modèles sont soit construits selon une approche holistique (v. ex. HAROU *et al*., , 2009 et GRAVELINE, 2013) ou une approche modulaire (v. ex. GRAVELINE, 2013 et ESTEVE *et al*., 2015). L'approche holistique consiste à intégrer l'ensemble des composantes/modèles dans un seul et unique modèle. Les avantages de cette approche sont qu'elle permet des interractions directs entre les composantes (GRAVELINE, 2013).

Dans l'approche modulaire ou compartimentée (GRAVELINE, 2013), les différentes composantes sont modélisées indépendamment et communiquent par échange de variables ou de fonctions. La principale difficulté de cette approche réside dans l'interraction indirecte entre les composantes. Cela fait qu'à chaque fois qu'un scénario est simulé, tous les modèles sont indépendamment tournés et le modélisateur est chargé de faire l'interraction entre les différents modèles en intégrant les productions d'un modèle dans un autre modèle où ils deviennent des intrants.

LES APPROCHES POSITIVES VS *NORMATIVES*

Les modèles hydro-économiques peuvent être des modèles de simulation qui répondent à la question « what if » ou d'optimisation qui répondent à la question « what is best » (HAROU *et al*. ; , 2009 ; BEKCHANOV *et al*., 2015). Nous nous intéressons ici davantage aux modèles d'optimisations qui ont davantage été utilisée par les économistes.

Ces modèles d'optimisation hydro-économiques sont normatives ou positives. La plupart des applications sont normatives et ont peu ou pas été calibrées (GRAVELINE, 2013). Nous remarquons que les applications qui utilisent l'approche normative ont accès à des données sur les prélèvements et d'autres caractéristiques hydrologiques sur plusieurs années qui leur facilite le calibrage mais également adoptent une approche holistique (exemple GRAVELINE, 2013) ou utilisent l'approche modulaire avec une composante purement hydrologique et une composante agro-économique calibrées séparément (exemple dans ESTEVE *et al*., 2015).

L'échelle de temps considérée peut être une période (statique) ou multi-période (dynamique).

3.2.2. Applications

L'usage des modèles hydro-économiques remonte aux années 1960, 1970 en Israël et aux États-Unis d'Amérique (HAROU *et al*., 2009). Les premiers cadres conceptuels sur les modèles hydro-économiques à un échelon régional ont été développés dans les études de BEAR & LEVIN (1970, cités dans HAROU *et al*, 2009), GISSER & MERCADO (1973). Par la suite, les chercheurs en ont fait différentes applications et extensions (voir HAROU *et al*., , 2009 pour des exemples d'applications) avec différentes composantes (économique, hydrologique, agronomique, institutionnel…) et différents degrés d'intégration des composantes : hydrologique-économique-agronomique, économique-hydrologique-agronomique, hydro-économique… (HAROU *et al*., 2009). HAROU *et al*. (2009) emploient le terme « hydroéconomique » par mesure de simplicité, indépendemment du degré d'intégration.

Plusieurs applications de ces modèles existent. Ces applications peuvent être catégorisées selon la thématique (régulation des extractions et politiques de gestion, analyse du changement climatique et des évènements extrêmes tels que les sécheresses), les variantes intégrées dans les différentes études (intégration de nouvelles sources de recharge, prise

en compte de la qualité, intégration du progrès technique), l'échelle d'analyse (niveau micro-économique ou macroéconomique) et les hypothèses des modèles sur le comportement des usagers (usage optimal, myope ou stratégique) et sur la représentation des aquifères (un seul réservoir ou plusieurs réservoirs).

Les analyses sur la régulation des extractions portent principalement sur la recherche d'une solution optimale permettant de gérer la ressource. En l'absence de gestion, l'hypothèse avancée est que les utilisateurs ont un comportement myope qui correspond à une situation dans laquelle chaque agent maximise sont bénéfice net courant pour choisir la quantité d'eau à extraire sans se soucier de l'action des autres agents ni de la disponibilité de la ressource dans le futur (GISSER & SANCHEZ, 1980 ; KNAPP & OLSON, 1995 ; GRIFFIN, 2006 ; MSANGI, 2008 ; WANG & SEGARRA, 2011 ; MSANGI & CLINE, 2016). Ce comportement mène à une surexploitation de la ressource (HARDIN, 1968 ; BOOKER *et al*., 2012). Ainsi, ces études essaient de trouver cette solution optimale qui correspond à une situation dans laquelle la ressource est gérée par un planificateur social qui maximise la somme des bénéfices nets actualisés de tous les agents à toutes les périodes considérées. Cette solution qui correspond à une situation de gestion optimale de la ressource permet d'internaliser les externalités.

GISSER & SANCHEZ (1980) montrent cependant que les gains de gestion de la resource (comparé à la situation myope) sont faibles voire négligeables. Cette conclusion est en premier controversée par KOUNDOURI (2004) qui a analysé les types de modèles utilisés dans GISSER & SANCHEZ (1980) et les études subséquentes et montra que les specifications des modèles impactent les résultats. En effet, il montre que des paramètres tels que le taux d'intérêt, l'élasticité de la function de demande de l'eau et des considerations hydrologiques sont des paramètres qui influencent les résultats. Ses controverses sont ensuite appuyées par un bon nombre d'études qui ont sophistiqué davantage les modèle hydro-économiques en prenant en compte certains aspects tels que les dommages environnementaux (ESTEBAN & ALBIAC, 2011), en analysant les formes fonctionnelles des fonctions de coût et de bénéfice net d'extraction d'eau (TOMINI, 2014), en intégrant le progrès technique — en endogénéisant les techniques d'irrigation — (KIM *et al*., 2015)...

D'autres applications sont les modèles utilisant la théorie des jeux. Ces applications considèrent le problème comme un jeu dynamique dans lequel les utilisateurs de la ressource adoptent un comportement stratégique (DIXON, 1988, cité *in* WANG & SEGARRA, 2011 ; NEGRI, 1989 ; PROVENCHER & BURT, 1993 ; BEKCHANOV *et al*., 2015). Dans ce dernier cas, des solutions dans lesquelles les utilisateurs agissent de manière stratégique sont trouvées. Les choix myope et optimal sont deux extrêmes entre lesquelles se trouvent les équilibres des modèles utilisant la théorie des jeux (WANG & SEGARRA, 2011 ; BOOKER *et al*., 2012).

D'autres études traitent du problème de l'usage conjoint des ressources en eau de surface et souterraines dans des contextes où les deux ressources importantes (KNAPP & OLSON, 1995 en Californie…) en analysant les interractions entre les deux types de ressource, les effets des externalités causées par les usagers et les politiques de gestion. Certaines de ces études ont pris en compte l'effet d'une baisse de la qualité dans un contexte d'usage conjointe des deux ressources.

Les modèles hydro-économiques sont également utilisés pour des analyses macro-économiques. Dans ce cas ils peuvent être intégrés dans des modèles d'équilibre générale

calculables (M.E.G.C.). Plus d'informations peuvent être trouvées dans BOOKER *et al*. (2012) et dans BEKCHANOV *et al*. (2015).

Les applications sur l'analyse des aspects climatiques sont plutôt récentes et se sont multipliées durant les années 2000, 2010 (MEDELLIN-AZUARA *et al*., 2009, 2010, 2011 ; HOWITT *et al*., 2012 ; ESTEVE *et al*., 2015 ; VALERA ORTEGA *et al*., 2016). Nous reviendrons plus en detail sur les études empiriques utilisant ces modèles pour l'analyse de l'impact de changements liés au climat dans la section 3.2.4.

3.2.3. Quelques limites des modèles hydro-économiques

La plupart des modèles hydro-économiques modélisent les ressources en eaux souterraines comme un seul reservoir. Peu d'études considèrent plusieurs reservoirs (MSANGI, 2008 ; BROZOVIC *et al*., 2010 ; MSANGI & CLINE, 2016). L'usage de modèles à un réservoir est plus large du fait, entre autres, de la nécessité plus réduite de données. L'approche "réservoir unique" est sous-tendue par l'hypothèse que l'aquifère répond de manière uniforme sur toute la zone qu'il couvre (BOOKER *et al*., 2012). Ainsi, la profondeur et le coût d'extraction sont identiques sur toute la zone (BOOKER *et al*., 2012). BROZOVIC *et al*. (2010) montrent que pour de petits aquifères confinés, l'approche "réservoir unique" permet une approximation raisonnable. Pour des aquifères confinés, plus larges (des milliers de kilomètres carrés), l'approche "réservoir unique" sous-estime les externalités spatiales.

Une autre limite constitue la prise en compte de la qualité des ressources en eau qui n'est pas systématique dans les études. Il existe cependant des applications qui l'intègrent (v. HAROU *et al*., 2009 ; BOOKER *et al*., 2012 ; BEKCHANOV *et al*., 2015). Ainsi, ROUMASSET & WADA (2011, cités *in* BOOKER *et al*., 2012) ont modélisé la gestion optimale d'un aquifère côtier de Hawaii où des excès de prélèvements peuvent induire une intrusion de l'eau de mer et la destruction de l'aqufère, où le recyclage des eaux usées est une option de recharge et où le dessalement de l'eau de mer est une recharge de secours.

Par ailleurs, dans la littérature, les études sur la modélisation des ressources en eau supposent pour la plupart une technologie d'exhaure ou d'irrigation fixe. Celles qui endogénéisent les technologies d'exhaure ou d'irrigation existent mais cela ne se fait pas automatiquement. Des exemples existent dans KIM *et al.* (2015).

3.2.4. Études empiriques qui utilisent les approches intégrées hydro-économique pour évaluer l'impact du changement climatique dans l'agriculture irriguée

Les modèles hydro-économiques sont aussi utilisés dans le cadre d'évaluation d'impact du changement climatique (y compris la variabilité climatique et les événements extrêmes), particulièrement lorsque l'agriculture est irriguée.

Dans le cadre de l'agriculture, ces modèles sont économique-hydrologique-agronomique (LEFKOFFE & GORELICK, 1990, *in* HAROU *et al*., 2009), hydrologique-agronomique-économique (CAI *et al*., 2003 ; *in* HAROU *et al*., 2009), hydro-économique-agro-économiques (MSANGI & CLINE, 2016), hydrologique-agro-économique (ESTEVE *et al*., 2015)... Les composantes sont donc : hydrologique, agronomique et économique intégrées de manière holistique (exemple dans MEDELLÍN-AZUARA *et al*., 2010 ; GRAVELINE, 2013 ; MSANGI & CLINE, 2016) ou modulaire (exemples dans VALERA ORTEGA *et al*., 2016 ; ESTEVE *et al*., 2015…).

Les informations climatiques sont dans la plupart des cas intégrées à la composante hydrologique.

L'approche hydro-économique a été plus utilisée dans des contextes non africains. Cependant, il existe quelques applications empiriques en Éthiopie et surtout en Afrique du Sud s'intéressant aux effets du changement climatique sur les ressources eau et l'agriculture de manière agrégée en utilisant des modèles d'équilibre général calculable (YUN YOU & RINGER, 2010) qui intègrent l'offre et la demande en eau ainsi que les aspects économiques sur l'activité agricole et une composante climatique pour leurs scénarios.

MEDELLÍN-AZUARA *et al*. (2010) combinent un modèle d'optimisation hydrologique avec des aspects économiques (Calvin) et un modèle d'optimisation agro-économique (*Statewide Agricultural Production Model-Swap*) selon une approche modulaire. Tous les deux modèles sont à l'échelle étatique (État de la Californie aux États-Unis d'Amérique) et permettent (combinés) d'évaluer l'impact du climat et de l'adaptation sur l'agriculture en Californie. Le modèle Calvin leur permet d'avoir des informations sur les aspects hydrologiques non disponibles dans le modèle Swap. Le modèle agro-économique Swap, calibré avec l'approche *programmation mathématique positive* (P.M.P.), représente un producteur maximisant son profit pour un ensemble de spéculations dans une région donnée avec des contraintes sur la disponibilité des terres et de l'eau. Ils utilisent des résultats d'autres études pour des projections à l'horizon 2050 sur les prix, la population…

Une autre application de modèles hydro-économiques (selon une approche modulaire) pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture est réalisée par BLANCO-GUTIÉRREZ *et al*. (2013). Ils analysent, en Europe, les effets de politiques d'eau aux niveaux national et Européen sous conditions climatiques normales et sèches en utilisant un modèle hydro-économique fondé sur l'intégration d'un modèle d'optimisation économique à plusieurs échelles et d'un modèle de simulation hydrologique de gestion de l'eau construit sous Weap (*Water Evaluation and Planning modeling platform*).

Le modèle économique est un modèle d'optimisation non-linéaire développé en utilisant la programmation mathématique. Il permet de simuler le comportement des producteurs et de prédire leurs réponses aux politiques et changements environnementaux. Le modèle hydrologique est utilisé pour représenter le comportement hydrologique de la ressource en eau qu'ils considèrent. Ce modèle permet de déterminer l'allocation optimale de l'eau selon les priorités de la demande (agriculture, municipalités…), les préférences de l'offre, les contraintes physiques et de régulation… La FIG. 13 illustre les interactions entre les composantes de leur approche modulaire.

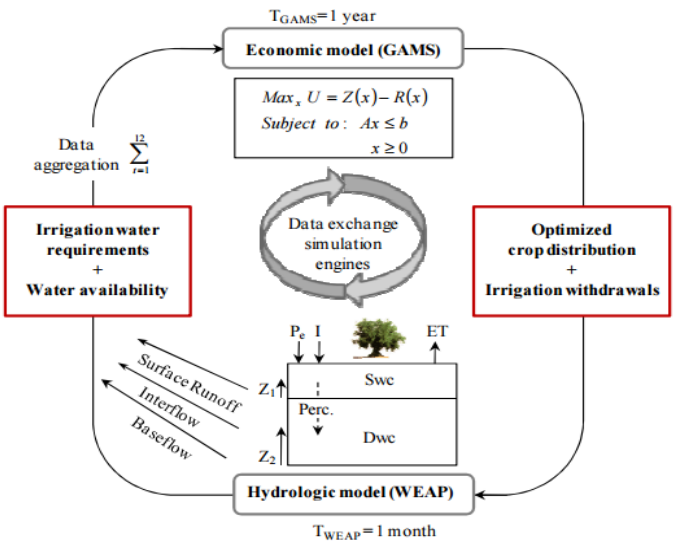

FIG. 13. — Relation entre les modèles hydrologique et économique et échange de données entre les modèles. Source : BLANCO-GUTIÉRREZ *et al.*, 2013.

ESTEVE *et al*. (2015) utilisent une approche similaire à BLANCO-GUTIÉRREZ *et al*. (2013) pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture irriguée en Espagne. Cette approche est également utilisée par VARELA-ORTEGA *et al*., (2016). D'autres applications des modèles hydro-économiques pour analyser l'effet de changements liés au climat sur l'agriculture irriguée peuvent être trouvés dans (HOWITT *et al*., 2012).

À l'instar des autres approches, l'approche intégrée a plusieurs limites. En effet, les modèles qui composent l'ensemble prédisent les situations futures avec beaucoup d'incertitude.

Conclusion partielle

À travers ce chapitre, nous remarquons que les phénomènes environnementaux ont attisé la curiosité des scientifiques dès le XVIIIe siècle. Plusieurs études ont été menées sur l'effet de serre dans les années 1770 et 1890 par des scientifiques tels que DE SAUSSURE et FOURRIER ; sur la concentration du CO_2 dans l'atmosphère, ses origines naturelles ou anthropiques. D'autres comme ARRHENIUS & CALLENDAR (1938) ont travaillé sur les implications de l'accumulation du CO_2 sur les températures à la surface du globe. Ces recherches ont permis de reconnaître le phénomène "changement climatique" dans le monde scientifique. Elles montrent principalement que la concentration du CO_2 dans l'atmosphère a augmenté et qu'elle est en partie d'origine anthropique. Cela entraîne une hausse des températures de la terre qui n'est pas sans conséquences sur le développement durable.

Dès lors, les chercheurs de différentes disciplines dont les économistes se sont penchés sur les solutions possibles pour atténuer le changement climatique. Les économistes (NORDHAUS, 1999 ; GRASSO, 2004 ; HARRIS & CODUR, 2004 ; NORDHAUS, 2005 ; MENDELSOHN, 2012) soutiennent que le climat est un bien public global pour lequel on doit trouver une bonne méthode de gestion afin de fournir un climat de qualité. La qualité du

climat est altérée par les émissions des différents pays provenant de leurs activités, créant ainsi des externalités. La théorie économique suggère principalement deux solutions pour la réduction des émissions :

— internaliser les externalités par l'introduction de taxes sur les émissions (taxe pigouvienne), c'est le principe du pollueur payeur ;
— de mettre en place un marché d'échanges de permis d'émissions.

Par ailleurs, NORDHAUS soutient que la coopération entre États est primordiale. En effet, le changement climatique résulte de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère qui est une somme des émissions provenant des différents pays du globe. Ainsi, seule une action collective permettrait une réduction effective de ces émissions. Aussi l'action collective devrait-elle être efficace. Dans cette optique, les économistes ont proposé différents modes de coopérations en insistant sur leurs avantages et inconvénients. De manière concrète, des exemples de coopération sont la convention cadre des *des Nations unies sur les changements climatiques* (1992) sur les changements climatiques et le protocole de Kyoto (*et al*., 1998).

Les chercheurs se sont également intéressés à l'évaluation de l'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture en utilisant différentes méthodes. Elles diffèrent par le type d'agriculture (pluvial ou irrigué), leurs objectifs, leurs zones d'étude, l'horizon temporel, etc. Certaines études se focalisent sur l'impact sur des variables agronomiques alors que d'autres portent sur des variables économiques. Les études sur les aspects agronomiques évaluent principalement le lien entre le changement climatique et les rendements et adoptent l'approche "fonction de production" qui fait recours à des méthodes de différentes disciplines : des modèles agronomiques (les modèles de simulation de culture) ou des modèles économétriques (régressions). Le principal problème avec cette approche est qu'elle n'intègre pas toutes les catégories de stratégies d'adaptations, surtout celles liées aux possibilités de reconversion à d'autres activités agricoles.

Les études sur les variables économiques telles que les revenus nets ou la pauvreté utilisent différentes approches économétriques (l'approche ricardienne) ou des approches intégrées qui incluent des modèles pluridisciplinaires (modèles climatiques, modèles agronomiques, modèles économiques, modèle hydrologiques).

Les approches "fonction de production" et ricardienne, ont des limites :

— ce ne sont pas des modèles comportementaux et ne peuvent donc pas inclure les réponses des producteurs face au changement et à la variabilité climatique ;
— elles n'offrent pas forcément la possibilité de tester l'efficacité des stratégies d'adaptations (approche ricardienne).

L'évaluation intégrée quant à elle, peut inclure pratiquement toutes les variables (variables climatiques, rendements, profits) car permet de combiner différentes méthodes complémentaires qui ont chacune des limites. La composante économique peut être une regression ou un modèle de programmation mathématique. Lorsque cette dernière approche est utilisée, il est possible d'avoir un modèle comportemental qui permet de prendre en compte les réponses des producteurs dans l'évaluation d'impact.

La plupart de ces approches méthodologiques ont été appliquées pour évaluer l'impact du changement climatique et de la variabilité climatique sur la production agricole en Afrique de l'Ouest. Ces études montrent une évolution de la production opposée à la hausse des températures et une corrélation positive avec la pluviométrie (SÈNE, 2007 ; FOFANA, 2011 ;

OUÉDRAOGO, 2012), surtout en saison des pluies. Certaines études montrent cependant qu'en saison sèche une hausse des précipitations est négativement corrélée aux rendements (SÈNE, 2007).

Cependant, ces études concernent majoritairement l'agriculture pluviale. Pour le cas de l'agriculture irriguée, le peu d'études qui s'y sont penchées dans le contexte ouest africain (NELSON *et al*., 2009 ; SITTA, 2011) montrent que le changement climatique affecterait particulièrement les besoins en eau des cultures et leurs rendements. En effet, une hausse des températures augmenterait les besoins en eau d'irrigation alors qu'une baisse des précipitations pourrait entrainer une baisse des ressources en eau renouvelables et donc menacer la disponibilité de l'eau d'irrigation.

Les études qui se sont intéressées à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'agriculture irriguée utilisent majoritairement une approche intégrée avec un modèle hydro-économique intégré qui permet de considérer le comportement d'optimisation des producteurs agricoles (et des autres agents utilisateurs des ressources en eau) et de mesurer l'eau d'irrigation disponible (NELSON *et al*., 2009 ; MEDELLÍN-AZUARA *et al*., 2010 ; BLANCO-GUTIÉRREZ *et al*., 2013). Des approches telles que l'approche ricardienne ne semblent pas être très adaptées à l'agriculture irriguée (SCHLENKER *et al*., 2005). Les modèles agronomiques peuvent être utilisés mais nécessitent non seulement d'être couplés à une composante hydrologique mais aussi d'être calibrés pour les spéculations d'intérêt. SITTA (2011) a utilisé ces modèles pour les spéculations maraîchères mais s'est heurtée à des difficultés de calibrage. Par ailleurs, ces modèles nécessitent des compétences techniques en agronomie qu'un économiste ne possède pas forcément.

Ainsi, pour évaluer l'impact du changement et/ou de la variabilité climatique sur l'agriculture irriguée, l'approche intégrée avec M.H.E. intégré nous semble plus accessible.

Chapitre 3
Analyse économique de l'impact de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation dans la zone des *niayes*

Dans cette thèse qui aborde le changement climatique et la variabilité climatique sur le maraîchage dans la zone des *niayes*, la littérature et les visites de terrain ont orienté notre intérêt vers l'évaluation *ex ante* de l'impact de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation. Nous nous intéressons également aux possibles implications de cet impact sur les réponses des producteurs maraîchers et aux options de gestion des ressources en eau pour une meilleure disponibilité de l'eau d'irrigation dans cette zone.

Comme le montre la littérature, plusieurs méthodes d'évaluation d'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture existent et diffèrent selon le type d'agriculture (pluviale ou irriguée). Les méthodes d'évaluation de l'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture irriguée utilisent principalement une approche intégrée avec des modèles hydro-économiques combinés à des modèles de production développés en utilisant la programmation mathématique.

Dans le même sens, afin de répondre à notre question de recherche, nous utilisons principalement un modèle d'optimisation hydro-économique intégré. Notre approche méthodologique s'inscrit dans le cadre de la théorie des ressources communes d'OSTROM (1990, 2010) et de la théorie de la production et s'inspire des travaux de modélisation des ressources en eau souterraine de MSANGI (2008) et de MSANGI & CLINE (2016) que nous adaptons aux spécificités de notre zone et de notre questionnement.

Concrètement, notre modèle hydro-économique intégré est développé suivant une approche modulaire avec trois composantes :

— un modèle d'optimisation hydro-économique qui décrit les dynamiques de la nappe des sables du quaternaire et les choix d'extraction d'eau des producteurs maraîchers. Ces choix d'extraction d'eau dépendent des bénéfices tirés de l'usage de la ressource et des coûts liés à cet usage, qui dépendent de la disponibilité de la ressource en eau (profondeur de la nappe). Cette dernière dépend des précipitations et des extractions d'eau de l'ensemble des acteurs utilisant la ressource ;

— un modèle d'optimisation sur la production agricole pour dériver la fonction de demande en eau des producteurs qui sert à estimer la fonction de bénéfice du modèle hydro-économique. Ce modèle est calibré en utilisant la *programmation mathématique positive* de HOWITT (1995). Il nous permet également de quantifier les implications d'une modification de la disponibilité de l'eau d'irrigation sur les

producteurs, notamment leurs décisions d'allocation des superficies cultivées aux différentes spéculations et sur leurs revenus nets ;

— pour capter l'effet de la variabilité climatique, nous construisons, à l'aide d'un modèle de simulation stochastique des scénarios de pluviométrie (sèche et humide) que nous intégrons dans le modèle hydro-économique.

Ce chapitre est divisé en trois sections. Dans la première section, nous présentons notre approche méthodologique. Dans cette section, nous présentons, dans un premier temps, un modèle théorique simplifié d'usage de la nappe pour irrigation. Nous présentons ensuite le cadre empirique en détail en insistant sur les composantes de notre approche. Dans la deuxième section, nous présentons les données utilisées et leur méthode de collecte. Enfin, dans la troisième section, nous présentons les résultats que nous discutons par la suite.

Section 1 : Approche méthodologique

Dans cette section, nous présentons notre approche méthodologique qui s'insère dans :

— la théorie économique sur les ressources en eau ;

— la théorie de la production présentées dans le chapitre 2 et s'inspire des études sur la modélisaton des resources en eau et de la production agricole discutées dans le chapitre 2.

1.1. Modèle théorique d'usage de la nappe pour irrigation

Comme le montre la littérature économique sur les nappes souterraines (voir chapitre 2), les études se sont plus orientées vers les incertitudes internes telles que le comportement d'usage des nappes souterraines, la quantification des pertes en termes de bien être liées aux externalités et la proposition de modes de gestion des ressources en eau souterraines. De plus en plus d'études s'intéressent à l'effet d'incertitudes externes (le climat) sur la ressource et ses implications sur les usagers. Dans notre cas, nous souhaitons également aller dans ce sens en considérant en plus des incertitudes internes, l'effet de la variabilité climatique sur la disponibilité de la ressource pour l'irrigation (appréciée ici à travers le niveau de la nappe). Nous verrons ensuite, les implications que cela peut avoir sur le comportement des « appropriateurs » (apprécié ici à travers les niveaux d'extractions d'eau des producteurs) et leurs activités de production horticole. Dans cette thèse, la variabilité des précipitations sera considérée explicitement comme une incertitude externe à la ressource. La température sera prise en compte indirectement à travers le taux d'infiltration des eaux de pluies dont l'évaluation intègre l'évaporation.

Pour modéliser la nappe des sables du quaternaire, nous nous inspirons des travaux de modélisation MSANGI & CLINE (2016) qui considèrent que les utilisateurs (principalement les producteurs dans notre cas) ont un comportement myope et comparent ce cas au cas optimal (ces deux cas son discutés dans le chapitres 2). MSANGI & CLINE (2016) ne se sont pas directement intéressés à l'effet de changement de variables climatiques ; cependant, leur appoche de modélisation a été adapté à notre queston de recherche.

Pour mieux matérialiser la relation entre variabilité climatique et disponibilité de l'eau d'irrigation, nous considérons une nappe d'eau souterraine comme ressource commune. Elle est utilisée par un producteur pour satisfaire ses besoins en eau d'irrigation. OSTROM (1990 : p. 33, 2010 : p. 48) décrit les utilisateurs des ressources communes comme des individus rationnels qui prennent des décisions et entreprennent des actions par rapport à la ressource dans des situations complexes et incertaines. Elle défend que :

> *le choix par un individu du comportement qu'il adoptera dans une situation particulière dépendra de sa vision des avantages et coûts des actions* […].

Le producteur tire un profit de ses cultures. Il supporte également des coûts liés à l'usage de la nappe et un bénéfice. Ainsi, en s'inspirant des travaux sur l'économie des ressources en eau souterraine (NEGRI, 1989 ; OSTROM, 1990 ; GRIFFIN, 2006 ; OSTROM, 2010, cités *in* WANG & SEGARRA, 2011 et : GISSER & SANCHEZ, 1980 ; PROVENCHER & BURT, 1993 ; KNAPP & OLSON, 1995 ; MSANGI, 2008 ; MSANGI & CLINE, 2016), le producteur maximise le bénéfice net qu'il tire de l'usage de la ressource en eau. Son programme d'extraction d'eau s'écrit :

$$(1) \qquad Max_w[B(w) - C(w,x)]$$

Où w est la quantité d'eau extraite par le producteur pour irriguer ses cultures. B est la fonction de bénéfice en eau et C est la fonction de coût liée à l'extraction de l'eau. x est la profondeur de la nappe (la distance entre le sol et l'eau) qui dépend des extractions et de la recharge pluviométrique. C est croissant en w et en x. Le coût d'accès à l'eau augmente lorsque la nappe devient plus profonde. Il augmente également lorsque les prélèvements s'accroissent.

De manière simple, les dynamiques de la nappe qui dépendent de facteurs internes (extractions d'eau) et de facteurs externes (précipitations) peuvent être représentées par l'équation linéaire :

$$(2) \qquad x^+ = x + w - r$$

Où x^+ est la variable d'état qui représente la profondeur de la nappe dans la période suivante, r est la recharge de la nappe.

Dans la littérature (KNAPP & OLSON, 1995 ; MSANGI & CLINE, 2016), la variable d'état la plus considérée est le stock d'eau dans le réservoir. Cependant, nous considérons la profondeur qui nous est plus facile à obtenir dans notre contexte. La profondeur à la période ultérieure augmente lorsque l'on extrait de l'eau et diminue lorsque la nappe est rechargée. Dans ce modèle, nous considérons que la recharge provient des précipitations ($P = r$) qui peuvent provenir de scénarios climatiques tirés de la littérature ou de projections faites par le modélisateur. Cette recharge peut également provenir d'autres sources comme dans MSANGI & CLINE (2016).

La fonction de bénéfice est l'intégrale de la fonction de demande en eau qui s'obtient en utilisant la fonction de profit tirée de la production dont le programme de maximisation s'écrit :

$$(3) \qquad Max_{z_{ij}\alpha_j w_j}\pi(p,c) = \left\{\sum_j [p_j \propto_j y_j(z,w) - \sum_i c_i z_{ij}]\right\}$$

sous contraintes de disponibilité des ressources :

$\sum_j \alpha_j \leq A$: Terre $\quad \lambda_{terre}$

$\sum_j z_{ij} \leq X, pour\ tout\ intrant\ i$: Intrants $\quad \lambda_{intrants}$

$\sum_j w_j \leq w$: Eau $\quad \lambda_{eau}$

Les indices i et j représentent respectivement les intrants et les spéculations. p_j correspond aux prix des spéculations, $\propto_j$ correspond aux superficies allouées aux différentes spéculations, z_{ij} et w_j correspondent aux quantités d'intrants et d'eau appliquées aux différentes spéculations, $y_j(z, w)$ correspond aux rendements des spéculations. $A, Z\ et\ w$ correspondent aux ressources disponibles au producteur qu'il ne peut pas excéder. Pour les intrants qui s'acquièrent sur le marché, il n'existe pas de contraintes physiques car le producteur peut se les procurer tant que ses finances le lui permettent.

Etant donné le profit $\pi(\mathrm{p}, \mathrm{c})$, les fonctions d'offre et de demande s'obtiennent en utilisant le lemme de Hotelling. Ainsi, la demande en eau s'obtient comme suit :

$$(4) \qquad D(c_{eau}) = -\frac{\partial \pi(p,c)}{\partial c_{eau}}$$

Puisque l'eau n'est pas échangée sur le marché comme les autres intrants, son coût est implicite. Suivant l'approche expliquée dans BOOKER *et al*. (2012) et appliquée dans MEDELLIN-AZUARA (2009), pour obtenir la demande en eau, nous simulons différents niveaux de disponibilité des quantités d'eau (w) et relevons le multiplicateur de Lagrange λ_{eau} définit dans l'inéquation de contrainte de l'eau. λ_{eau} correspond à la disposition à payer du producteur pour une unité supplémentaire d'eau. Nous obtenons différentes dispositions à payer pour différents niveaux de quantités d'eau disponible. Cela nous permet d'obtenir la fonction de demande en eau D(λ_{eau}).

L'inverse de la demande s'écrit :

$$(5) \qquad c_{eau}(\boldsymbol{w}) = \lambda_{eau}(w)$$

Par conséquent, la fonction de bénéfice s'écrit :

$$(6) \qquad B(w) = \int \lambda_{eau}(w) dw$$

Dans une situation où la nappe est utilisée par un ensemble d'acteurs, comme c'est le cas dans la réalité, du fait des externalités, économiser les quantités d'eau à prélever ne garantit pas une disponibilité de l'eau dans le futur, sauf si tous les agents décident de faire la même chose (GISSER & SANCHEZ, 1980). Comme le soutient OLSON (1965, cité *in* OSTROM, 1990 : p. 6, 2010 : p. 18), « à moins que le nombre d'individus soit assez réduit » ou en l'absence « d'une forme de contrainte ou tout autre dispositif particulier » pouvant pousser les agents à agir en faveur de « l'objectif collectif, des individus rationnels intéressés n'agiront pas de manière à réaliser leurs intérêts communs ou collectifs » [39]. Ainsi, dans un contexte d'usage multiple de la ressource, nous considérons que, sans intervention, la solution observée du programme d'extraction d'eau est une solution « myope ».

La solution optimale au programme d'extraction d'eau des producteurs serait atteinte sous l'existence d'un mécanisme/cadre de gestion de l'usage de la ressource pour assurer sa durabilité. HARRIS, Roach et CODUR (2015) soutiennent que selon les principes écologiques, une des règles de gestion d'une ressource renouvelable est que la quantité utilisée de la ressource chaque année ne devrait pas dépasser la quantité régénérée par les processus naturels. Dans le cas des ressources en eau souterraines des *niayes*, la régénération se fait,

39. — Notons cependant que cette affirmation de OLSON n'est pas toujours vérifiée car il existe des *self-governed* C.P.R. (OSTROM, 2000).

principalement, à travers les précipitations qui sont incertaines du fait de la variabilité climatique.

En nous fondant sur la théorie qui sous-tend les ressources communes et particulièrement les ressources en eau souterraines, dans ce qui suit, nous présentons une application empirique plus complexe de ce modèle théorique pour évaluer *ex ante* l'impact de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation, ses implications sur les stratégies des producteurs de même que ses implications en termes de gestion de la ressource.

1.2. Cadre empirique

En nous basant sur ce modèle théorique, pour répondre à notre question de recherche, nous développons un modèle hydro-économique intégré constitué de trois composantes :

— un modèle hydro-économique qui représente les dynamiques (la profondeur) de la nappe et les choix d'extraction d'eau des producteurs au niveau régional (toute la zone des *niayes*) ;

— un modèle de production bioéconomique qui représente les décisions de production d'un producteur représentatif et permet d'obtenir la fonction de demande en eau à l'hectare à insérer dans le modèle hydro-économique ;

— une composante stochastique qui permet de générer des scénarios de précipitations pour représenter la recharge de la nappe.

Ces composantes communiquent selon une approche modulaire :

— le modèle production est tourné en premier pour obtenir la fonction de demande en eau à l'hectare que l'on introduit dans le modèle hydro-économique ;

— le modèle hydro-économique nous donne la disponibilité de l'eau d'irrigation sous chaque scénario pluviométrique obtenu avec le modèle stochastique. La quantité d'eau disponible est ensuite introduite dans le modèle de production qui nous donne les implications de différents niveaux de disponbilité d'eau sur la production et les revenus nets des producteurs.

Ces trois composantes ont été développées avec le logiciel Gams. La FIG. 14 représente les interactions entre les différentes composantes de notre approche méthodologique.

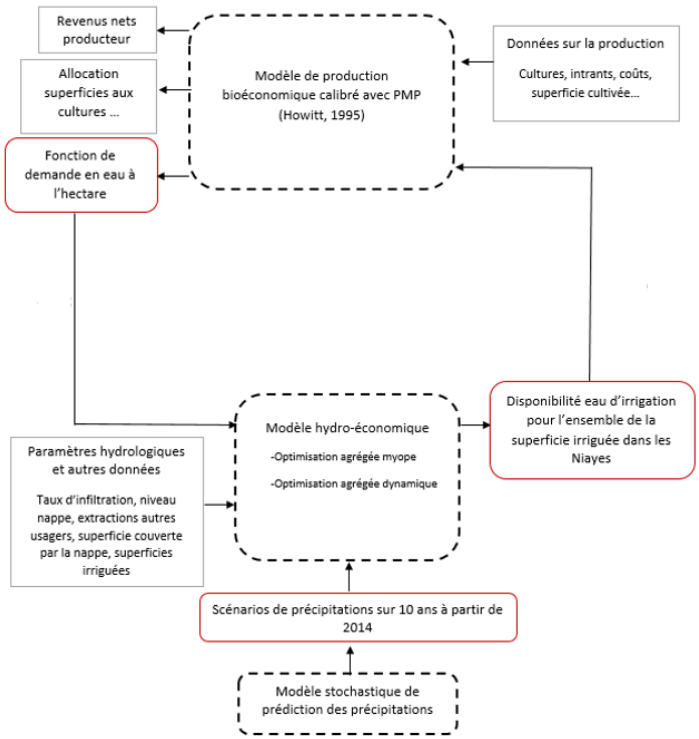

FIG. 14 — Interaction et échange de données entre composantes de notre approche. Source : FAYE (Amy), 2018.

1.2.1. Variabilité climatique et disponibilité de l'eau d'irrigation dans les *niayes*

Comme déjà stipulé dans le chapitre 1, dans la zone des *niayes*, les producteurs sont principalement orientés vers le maraîchage. Comme le suggère la théorie de la production, un producteur choisit les combinaisons de facteurs de production et de quantité produite qui maximisent son profit. Dans le contexte des *niayes*, de manière simple, un producteur maraîcher maximise sont profit tiré des activités agricoles (spéculations cultivées). Ce profit dépend des coûts des facteurs (intrants et eau) et des revenus tirés de la production. Ces revenus dépendent des rendements, des superficies cultivées et des prix des outputs. Le programme d'optimisation du profit est le même que celui du producteur dans la section 1.1. ci-dessus.

Dans ce profit, du côté des revenus, la fonction de rendement dépend des intrants (pesticides, semences et autres) et de la quantité d'eau appliquée aux spéculations (w_j). Les quantités d'eau appliquées dépendent de l'eau disponible pour l'irrigation (w) qui provient de la nappe. Dans un contexte d'agriculture purement pluviale, la fonction de rendement dépendrait directement des précipitations tombées.

Dans le contexte d'agriculture irriguée des *niayes*, la quantité d'eau d'irrigation (w) que le producteur peut extraire de la nappe est déterminée par :

— la disponibilité de l'eau de la nappe qui dépend à son tour de la recharge (précipitations) et de la décharge (évaporation et autres usages de la ressource) ;

— les coûts liés à l'extraction de l'eau. Nous faisons l'hypothèse que les producteurs extraient de l'eau d'abord puis la distribuent aux spéculations. Ainsi, nous considérons que les coûts liés à l'eau sont ceux liés à son extraction.

Pour déterminer la quantité d'eau (w) disponible pour un producteur, il faut donc considérer les caractéristiques hydrologiques de la nappe, de même que l'ensemble des usagers de la ressource. Trois grands types d'utilisateurs de la nappe sont pris en compte dans les *niayes* : les producteurs, les populations rurales à travers les forages ruraux, la compagnie d'eau qui exploite la ressource, la Sones. La Sones fournit prioritairement les populations urbaines en eau potable. La compagnie dispose d'un quota pour les producteurs maraîchers, principalement ceux situés dans la zone sud des *niayes*. Les forages ruraux sont destinés aux populations rurales pour l'usage domestique principalement.

Concernant les producteurs, ils sont situés tout au long de la zone des *Niayes* et accèdent à l'eau majoritairement grâce à des puits. Ces puits peuvent être plus ou moins profonds selon la localisation du champ dans la zone. Bien qu'une partie des producteurs soit alimentée en eau par la S.D.E., nous supposons ici que l'accès à l'eau d'irrigation se fait par le moyen le plus fréquent, c'est-à-dire, les puits. Ces derniers sont utilisés par 42,9 % des exploitations dans les *niayes* (PADEN, 2013 ; DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013) et 87,53 % des unités de production dans notre échantillon. Les coûts de l'eau ne sont donc que ceux liés à l'extraction.

Les producteurs étant localisés le long de la zone, l'idéal serait de considérer les disparités géographiques. Cependant, évaluer la quantité d'eau disponible pour tous les producteurs, pris de manière individuelle, pourrait se révéler fastidieux et gourmant en données. Pour simplifier cela, nous considérons l'ensemble des producteurs qui extraient une quantité totale d'eau w_{ag} de la nappe pour irriguer la superficie $\mathrm{A_{ag}}$. w_{ag} représente la somme des prélèvements individuels des producteurs dans les *niayes* et $\mathrm{A_{ag}}$ représente la superficie totale utilisée par l'ensemble des producteurs qui font de l'agriculture irriguée dans la zone. Pour choisir w_{ag}, une optimisation agrégée avec une seule fonction-objectif pour l'ensemble des producteurs est effectuée en maximisant le bénéfice net agrégé tiré de l'usage de l'eau comme expliqué dans le modèle dans la section 1.1.

1.2.2. Les dynamiques de la nappe

Avant de présenter notre modèle d'optimisation hydro-économique, nous jugeons nécessaire de présenter les dynamiques de la nappe des sables du quaternaire située dans la zone des *niayes* qui est notre nappe d'intérêt.

Dans la littérature, la nappe des sables est souvent considérée comme un unique réservoir (D.G.P.R.E., 2005, 2009 ; AGUIAR ET AL., 2010 ; FALL, 2012). D'autres études se sont intéressées à une section particulière de la nappe (GAYE, 1990 ; FAYE, 1995 ; EL FAID, 1999 ; TINE, 2004). Cependant, nous avons remarqué une grande disparité géographique pour certaines variables telles que l'infiltration, la profondeur de la nappe, les variables climatiques, notamment les précipitations. L'idéal serait de diviser la nappe en plusieurs réservoirs. Dans notre cas, la diviser en quatre sections permettrait de mieux prendre en compte l'hétérogénéité dans la zone. Les sections seraient : le Sud qui englobe les *niayes* de Dakar, le Centre Sud qui englobe les *niayes* de Thiès, le Centre Nord qui englobe les *Niayes* de Louga-sud et le Nord qui englobe les *niayes* de Louga-nord et Saint-Louis. Cependant, cette division nécessiterait de faire l'hypothèse qu'il existe une connexion

hydrologique entre les sections. Ce qu'il est possible de faire en termes de méthodologie mais nous ne disposons pas des données nécessaires à l'estimation des coefficients de connexion entre les sections. Pour cela, nous nous contentons de considérer la nappe comme un unique réservoir. La FIG. 15 permet de mieux comprendre les dynamiques de l'aquifère.

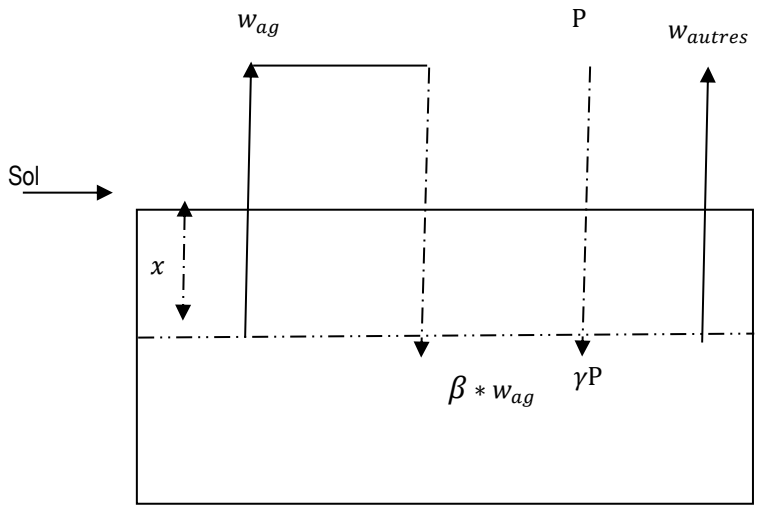

FIG. 15. — Dynamiques de l'aquifère ; cas d'un seul réservoir. Source : FAYE (Amy), 2018.

D'après la littérature (EL FAID, 1999 ; FAYE, 1995 ; GAYE, 1990 ; TINE, 2004 ; D.G.P.R.E., 2005 ; DA SYLVA & COSANDEY, 2005 ; AGUIAR, 2009 ; D.G.P.R.E., 2009 ; AGUIAR *et al.,* 2010), la principale source de recharge de la nappe provient des précipitations (P). Cependant, seule une partie des précipitations s'infiltre dans le sol du fait de facteurs tels que l'évaporation, les caractéristiques du sol, la végétation (TINE, 2004). Ainsi, la recharge correspond à un pourcentage des précipitations : $Recharge = \gamma P$ où γ est le taux d'infiltration.

En plus des flux d'entrée, il y a aussi des flux de sortie constitués des prélèvements pour les besoins d'irrigation des producteurs horticoles (w_{ag}), et d'autres usagers tels que la Sones pour l'alimentation en eau potable des populations urbaines, les populations rurales à travers les forages ruraux suivis par la *Direction de l'exploitation et de la maintenance* (D.E.M.) du ministère de l'Hydraulique rurale et du Réseau hydrographique national (w_{autres}). L'efficience d'irrigation suggère que lorsqu'une quantité w_{ag} est appliquée à la plante, seule une partie est utilisée par la plante (évapotranspiration), l'autre partie est partagée entre la percolation et le ruissellement (MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION, 1974). Ainsi, une extraction de w_{ag} pour l'irrigation impliquera un flux entrant de $\beta * w_{ag}$, où β est le pourcentage de l'eau retournant dans l'aquifère. Selon les estimations du MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION (1974) 40 % de l'eau appliquée à la plante est perdue par percolation, 15 % dans les canaux et 5 % par ruissellement lorsque le sol est sableux. Dans les *niayes*, nous considérons que le pourcentage de l'eau d'irrigation qui retourne dans la nappe est égal au taux d'infiltration des pluies, ainsi, $\gamma = \beta$.

Concernant les autres prélèvements, nous ne considérons pas de retour vers la nappe car l'eau est utilisée pour les besoins domestiques des populations urbaines et rurales.

L'équation suivante représente la dynamique de la nappe sur une période (1 an) [40]:

$$x^{+} = x + \frac{w_{ag} * 10^{-4}}{As_y} - \frac{\beta w_{ag} * 10^{-4}}{As_y} + \frac{1}{As_y} w_{autres} * 10^{-4} - \frac{\gamma \mathrm{P} * 10^{-3}}{s_y} \quad (1)$$

Cette équation traduit le niveau de la nappe qui dépend des flux d'entrée et de sortie d'eau.

Elle traduit que le niveau de la nappe à l'année t + 1 dépend du niveau de la nappe à l'année t et des prélèvements, de la recharge pluviométrique et des retours d'eau d'irrigation dans la nappe. La profondeur augmente lorsqu'il y a des prélèvements (d'où les signes « + » pour les prélèvements) et diminue lorsqu'il y a la recharge ou des retours d'eau (d'où les signes « - » pour la recharge pluviométriques et les retours d'eau).

$x\ et\ x^{+}$(en mètres) correspondent à la profondeur de l'aquifère dans le présent et le futur respectivement. A est la superficie couverte par la nappe et $\beta = \gamma$. Afin de s'assurer de la conformité des unités, il est nécessaire de convertir les valeurs volumétriques en valeurs métriques. Ainsi, w_{ag} et w_{autres} sont convertis selon la logique suivante : lorsque l'on applique 1 mm d'eau à une surface, cela couvre $10^{-3}m^3/m^2$ (MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION, 1974 ; BROUWER *et al.,* 1985).

1 mm →$10^{-3}m^3/m^2$
1 mm →$10^{-3}m^3/10^{-4}$ha
1 mm →$10m^3$/ha
10^{-4} m → m^3/ha

Cela signifie que chaque unité de m^3/ha prélevée de l'aquifère mène à une hausse de la profondeur de 10^{-4}m. Cela justifie la nécessité de diviser les unités prélevées en mètres cubes par la superficie couverte par l'aquifère et de multiplier par 10^{-4}. Nous multiplions aussi les précipitations par 10^{-3} pour les convertir en mètres.

s_y représente la porosité efficace que nous expliquons davantage dans la section 2 sur les données.

1.2.3. Les spécifications des modèles

1.2.3.1. LE MODÈLE D'OPTIMISATION HYDRO-ÉCONOMIQUE ADAPTÉ À LA ZONE DES *NIAYES* POUR MESURER LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU D'IRRIGATION FACE À LA VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS

Comme expliqué dans les sections 1.1. et 1.2.1, dans ce modèle, nous faisons une optimisation agrégée à l'échelon de la zone des *niayes* pour déterminer la quantité d'eau w_{ag} à extraire en maximisant les bénéfices nets tirés de l'usage de l'eau sur l'ensemble de la superficie irriguée de la zone. Dans cette application empirique, nous considérons une optimisation myope et une optimisation dynamique sur une période de dix ans à partir de 2014. Ce modèle considère les variations interannuelles de la nappe.

40. — Nous considérons qu'une période représente une année.

Partant de la définition du comportement myope discuté dans la section 3 du chapitre 2, pour le cas "myope", l'optimisation se fait chaque année sans tenir compte des gains de l'année suivante. Quant au cas dynamique, contrairement au cas "myope", dans cette situation, le futur devient important. Par conséquent, l'optimisation se fait en considérant la valeur actuelle des bénéfices nets courants et futurs.

LE MODÈLE D'OPTIMISATION DANS LE CAS MYOPE (CAS STATIQUE) [41]

Le programme ci-dessous représente notre problème d'optimisation dans le cas statique :

$$\max_{w_{agt}}\{\pi(x_t, w_{agt}) = S_{irr}B(w_{agt}) - C(w_{agt}, x_t)\} \tag{2}$$

Sous contraintes :

— équations de la dynamique de l'aquifère :

$$x_{t+1} = x_t + \frac{w_{agt} * 10^{-4}}{As_y} - \frac{\beta w_{agt} * 10^{-4}}{As_y} + \frac{1}{As_y} w_{autrest} * 10^{-4} - \frac{\gamma P_t * 10^{-3}}{s_y} \tag{3}$$

— contrainte de profondeur maximale :

$$w_{agt} * (x_{\max} - x_t) \geq 0 \tag{4}$$

Où t correspond à une période (1 an).

Comme expliqué dans le modèle théorique, le bénéfice associé au prélèvement de w_{agt} d'eau $B(w_{agt})$ est l'intégrale de la fonction de demande en eau (GISSER & SANCHEZ, 1980 ; KNAPP & OLSON, 1995 ; WANG & SEGARRA, 2011 ; GRIFFIN, , 2006, chap. 5) qui correspond donc au bénéfice marginal. La FIG. 16 illustre la façon dont la fonction de bénéfice est déduite de la fonction de demande.

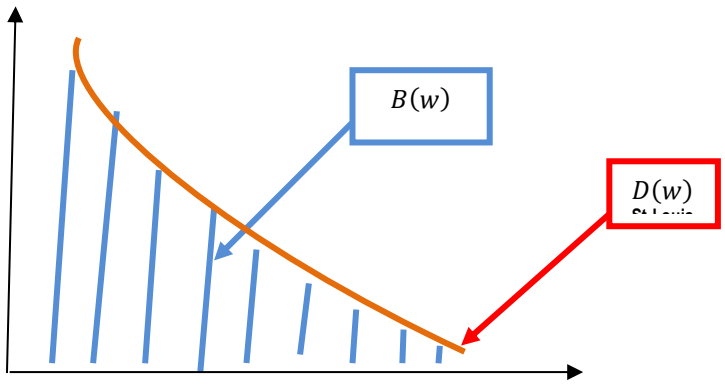

FIG. 16. — Représentation graphique du bénéfice tiré de l'usage de la nappe à partir de la fonction de demande en eau des producteurs. Source : FAYE (Amy), 2018.

$$B(w) = \int D(w)\, dw$$

Ici, nous considérons la fonction de bénéfice à l'hectare. Nous la multiplions par S_{irr} qui correspond à la superficie totale irriguée durant la saison sèche dans la zone pour obtenir la fonction de bénéfice totale. Le bénéfice à l'hectare s'écrit : $B(w) = \frac{\mu}{\theta+1} w^{\theta+1}$ (voir section 1.2.3.2 sur le modèle de production).

41. — Cette modélisation s'inspire principalement des travaux de MSANGI & CLINE (2016). BANQUE MONDIALE

$c(w_{agt}, x_t)$ est la fonction de coût associé au prélèvement de w_{agt} d'eau. Elle est une fonction croissante de la profondeur et de la quantité d'eau prélevée. Elle s'écrit :

$$c(w_{agt}, x_t) = \mathrm{x_t} * \mathrm{c} * w_{agt}$$

Où c représente le coût d'exhaure en francs C.F.A. par mètre cube par mètre de profondeur. Dans notre échantillon, les producteurs utilisent majoritairement des puits avec une exhaure principalement manuelle (voir section 2.1. sur les données primaires). Ainsi, il nous a été difficile voire impossible d'évaluer c. Nous l'avons donc considérée comme endogène et dérivée de la condition de premier ordre du programme de maximisation :

$$\frac{\partial \pi(x,w)}{\partial w} = \mathrm{Sirr} * \frac{\partial B(w)}{w} - \frac{\partial c(w,x)}{w} = 0$$

$$\mathrm{Sirr} * \mu w^{\theta} - x * \mathrm{c} = 0 \quad ==> \mathrm{c} = \mathrm{Sirr} * \frac{\mu w^{\theta}}{x}$$

Nous n'observons pas les prélèvements totaux des producteurs (w_{ag}). Pour les calculer, nous considérons les quantités d'eau à l'hectare utilisées (voir section sur les données pour plus d'informations) par le producteur représentatif dans le modèle de production ($\frac{\sum_j w_j}{\sum_j \propto_j}$) que nous multiplions par la superficie totale irriguée dans la zone (Sirr). Dans la section des données, nous reviendrons sur les valeurs trouvées et les comparerons aux valeurs d'autres études dans la zone. Ainsi :

$$w_{ag} = \frac{\sum_j w_j}{\sum_j \propto_j} * \mathrm{Sirr} ==> \mathrm{c} = \mathrm{Sirr} * \frac{\mu(\frac{\sum_j w_j}{\sum_j \propto_j} * \mathrm{Sirr})^{\theta}}{x}$$

LE MODÈLE D'OPTIMISATION DANS LE CAS DYNAMIQUE

Le programme ci-dessous représente notre problème d'optimisation dans le cas dynamique :

$$V(x) = \underset{w_{agt}}{\mathrm{Max}} \left\{ \begin{array}{c} \pi(x_t, w_{ag,t}) + \delta \mathrm{V}(x_{t+1}) \\ s.t. \\ x_{\mathrm{t+1}} = x_{\mathrm{t}} + 10^{-4} \frac{((1-\gamma) w_{ag,t} + w_{NonAg})}{A s_y} - \frac{\gamma \mathrm{P_t} * 10^{-3}}{s_y} \end{array} \right\} \quad (6)$$

δ : est le taux de discount (ou facteur d'actualisation) que nous supposons égal à $\frac{1}{(1+0{,}075)}$ avec un taux d'intérêt de 7,5 % [42].

Les autres termes conservent la même signification que dans le cas myope.

Pour la résolution du programme dynamique, nous utilisons les polynômes de Chebychev pour estimer la fonction valeur de l'équation de Bellman (HOWITT *et al.*, 2002 et 2014 ; HUBBARD & SAGLAM, *s. d.*) — (v. annexe 3 pour plus de détails sur la méthode de résolution numérique que nous avons empruntée de la littérature).

42. — Taux d'intérêt appliqué par le crédit agricole du Sénégal pour le financement de l'agriculture. Pour plus d'informations, voir : <**http://www.cncas.sn/index.php/men-agriculteurs/financement-agri/financement-production-agricole**>.

Le tableau 13 dans la section sur les résultats récapitule les paramètres utilisés dans ce modèle et leur source.

1.2.3.2. LE MODÈLE DE PRODUCTION POUR ESTIMER LA FONCTION DE BÉNÉFICE EN EAU

I. LES MÉTHODES POUR DÉRIVER LA FONCTION DE DEMANDE EN EAU

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour estimer la demande en eau d'irrigation: l'approche économétrique qui permet de faire une analyse ex-post du comportement des agents économiques et l'approche par la programmation mathématique qui reproduit le comportement du producteur (BONTEMPS & COUTURE, 1999, 2002 ; BONTEMPS *et al.,* 2003). BOOKER *et al*. (2012) font référence aux appellations « méthode inductive » et « méthode déductive » pour référer respectivement à l'approche économétrique et à la reproduction du comportement du producteur.

Selon BONTEMPS & COUTURE (1999), les méthodes économétriques consistent à…

> *établir une relation entre des données de consommations en eau observées et le coût perçu de la ressource.*

HUANG *et al*. (2006), par exemple, ont utilisé cette méthode. Dans notre cas, il s'est révélé difficile, voire impossible, d'observer la consommation en eau des producteurs à travers nos enquêtes. En effet, les producteurs ne sont pas en mesure de fournir les quantités d'eau qu'ils extraient de la nappe. Par conséquent, il nous est impossible d'appliquer l'approche économétrique.

Dans l'approche *programmation mathématique*, comme indiqué dans le chapitre 2, ce sont des modèles fermes qui sont utilisés pour représenter le comportement d'un producteur qui maximise son profit afin de prendre les décisions standards d'un producteur. Dans cette approche, la fonction-objectif peut être linéaire (v. BONTEMPS *et al.*, 2003 pour des exemples) ou non linéaire. La forme linéaire a été la plus utilisée dans la littérature (v. ex. *in* BONTEMPS & COUTURE, 1999, 2002). Dans le cas non linéaire, une forme quadratique est le plus souvent utilisée. Cette approche intègre une fonction de production en eau endogène dans la fonction de profit qui représente la relation entre l'eau et le rendement de la plante. Différentes fonctions de production sont utilisées pour mesurer la réponse des cultures à l'eau : les modèles de simulation agronomiques (ex. BONTEMPS & COUTURE, 1999 ; BONTEMPS *et al.*, 2003) ; les fonctions physiologiques (JENSEN, 1968 ; DOORENBOS & KASSAM, 1979 ; RAES *et al.,* 2011) ; les fonctions de production standards en économie de la production telles que la fonction à élasticité de substitution constante-C.E.S. (HOWITT *et al.*, 2012) et celles dérivées de travaux empiriques en économie agricole (GRIMM *et al.*, 1987 ; PARIS, 1992 ; CHAMBERS *et al.*, 1996 ; BERCK *et al.*, 2000).

Dans l'approche programmation mathématique (linéaire ou non linéaire), pour dériver la fonction de demande en eau, le modélisateur simule le comportement de maximisation de profit du producteur sous différentes valeurs de disponibilité de l'eau d'irrigation (BOOKER *et al.,* 2012). Cela permet d'obtenir la disposition à payer des producteurs pour ces différentes valeurs. La courbe de demande est par la suite tracée pour déterminer les paramètres de la fonction de demande.

Selon BONTEMPS & COUTURE (2002), l'approche programmation mathématique serait critiquable sur la spécification de la fonction de production en eau qui pourrait manquer de représenter le processus physiologique de développement de la plante. Cela motive certains économistes à avoir recours aux modèles biophysiques.

II. FONCTIONS DE PRODUCTION EN EAU DANS LA LITTÉRATURE

Fonction de production agronomiques et physiologiques

Dans la littérature, différentes formes fonctionnelles ont été mises en place pour représenter la relation entre l'eau et le rendement. JENSEN (1968) fut l'un des premiers avec une forme non linéaire entre le rendement relatif ($\frac{y_a}{y_m}$) et l'évapotranspiration relative à une étape donnée de la croissance de la plante ($\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}}$) :

$$\frac{y_a}{y_m} = \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}}\right)^{\lambda_i} \tag{7}$$

Où: y_a est le rendement observé, y_m est le rendement maximal de la plante. ET_{ai} et ET_{mi} sont respectivement l'évapotranspiration observée (c'est à dire la quantité d'eau que la plante consomme) et l'évapotranspiration maximale (la quantité d'eau maximale que la plante peut consommer) à l'étape de croissance i. λ_i représente la sensibilité relative de la plante au stress hydrique durant l'étape de développement i.

La relation développée par DOORENBOS & KASSAM (1979) :

$$\left(1 - \frac{y_a}{y_m}\right) = k_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right)$$

est aussi une fonction de réponse à l'eau. Où k_y est le coefficient de réponse des rendements.

La relation de DOORENBOS & KASSAM (1979) est modifié par RAES *et al.* (2011) pour mettre en place le modèle AquaCrop. Les principales évolutions sont :

— l'évapotranspiration réelle est explicitement exprimée en une somme de l'évapotranspiration du sol et de la transpiration des cultures ;

$ET = E + TR,$

E est l'évapotranspiration du sol et TR est la transpiration des cultures

— le rendement observé est divisé en biomasse et indice de récolte : $Y = HI(B)$ Y est le rendement, B la biomasse et HI est l'indice de récolte. $B = WP * \sum TR$, WP est le paramètre de productivité de l'eau.

AquaCrop nécessite cependant des données dont nous ne disposons pas.

Fonctions de production standards en économie de la production et travaux empiriques en économie agricole

D'autres études utilisent les fonctions de production standard. HOWITT *et al.* (2012) par exemple utilisent une fonction de production C.E.S. en combinaison avec l'approche *programmation mathématique positive* (P.M.P.).

De nombreux économistes ont effectué des travaux empiriques sur les fonctions de production représentant la réponse du rendement aux nutriments, notamment, l'eau, le nitrogène, etc. GRIMM *et al.* (1987) stipulent que les fonctions Cobb-Douglas, Mitscherlich et polynomiales ont été utilisées plus fréquemment, les formes polynomiales ayant été considérée comme les plus appropriées. La fonction Mitscherlich a été considérée comme complexe à estimer avec de multiples variables explicatives (HEXEM *et al*., 1976 cités *in* GRIMM *et al.*, 1987). Concernant les fonctions Cobb-Douglas, elles ne respectent pas le critère maximal des rendements (KOSTER & WHITTLESEY, 1971, cités *in* GRIMM *et al.,* 1987). Cependant, GRIMM *et al.* (1987) rapportent que HEXEM & HEADY (1978) ont supposé une possible substitution entre les nutriments alors qu'en agronomie, les principaux nutriments suivent la loi du minimum de Von Liebig et doivent, par conséquent, être considérés comme des compléments et non des substituts. Par ailleurs, FLICHMAN & JACQUET (2003) stipulent qu'en ce qui concerne l'économie agricole…

> *les travaux de PARIS (1992), CHAMBERS et al. (1996) et BERCK et al. (2000) ont démontré que les formes fonctionnelles polynomiales traditionnellement utilisées sont moins adaptées pour représenter les rapports entre les rendements et les inputs (essentiellement azote et eau) que les fonctions basés sur l'hypothèse de Von Liebig (non substituabilité des facteurs, loi du minimum, plateaux de rendements).*

D'après PARIS (1992), la loi du minimum de Von Liebig aurait deux principales caractéristiques : la non-substitution et le plateau. La loi stipule que les facteurs de production limités déterminent le rendement (WANG & SEGERRA, 2011). La non-substitution signifie que pour chaque intrant, il y a une quantité nécessaire à l'obtention d'un niveau de rendement. Prenons l'exemple d'un producteur d'oignon qui utilise de la fumure d'élevage et de l'eau. L'application d'importantes quantités de fumure n'apportera pas un rendement élevé si le producteur ne procure pas à la plante le minimum d'eau nécessaire à sa croissance. Le plateau signifie que peu importe les quantités d'intrants fournies, le rendement n'excédera pas le niveau maximal que la plante peut atteindre. L'usage de fonctions de production ayant les caractéristiques de la loi du minimum de Von Liebig semble donc plus approprié pour représenter la relation entre l'eau et le rendement.

Concernant la forme fonctionnelle de la fonction de production en eau, peut être linéaire ou non. Rappelons cependant que l'hypothèse de Liebig est souvent interprétée comme impliquant une relation linéaire qui, selon PARIS (1992), est une mauvaise interprétation de l'hypothèse. PARIS (1992) propose des formes fonctionnelles linéaires et non linéaires intégrant ces deux caractéristiques.

Aussi, avant les travaux de PARIS (1992), MITSCHERLICH a utilisé une forme non linéaire pour représenter la relation entre nutriments et rendements. Cette fonction respecte les propriétés de l'hypothèse de Von Liebig en termes de rendement maximal. PARIS (1992) représente la fonction de MITSCHERLICH comme suit :

$$y = m(1 - ke^{-\eta(z)})$$

ROSENZWEIG *et al.* (1999) utilisent la fonction de MITSCHERLICH-BAULE dans le cas de plusieurs intrants avec la forme suivante :

$$y = \eta_1(1 - e^{-\eta_2(\eta_3+N)})(1 - e^{-\eta_4(\eta_5+w)}).$$

III. ESTIMATION DE LA FONCTION DE DEMANDE EN EAU DES PRODUCTEURS

Dans les *niayes*, les spéculations maraîchères sont principalement cultivées durant la saison sèche. Bien qu'il y ait une production durant la saison des pluies, la saison sèche constitue la saison la plus importante dans la zone car elle correspond à la période de culture des

spéculations horticoles qui dominent largement les productions. Par conséquent, cette étude ne considère que la saison sèche, durant laquelle, l'eau d'irrigation provient presque exclusivement de la nappe d'eau. Elle est divisée en une saison sèche froide et une saison sèche chaude. Ici, le modèle d'estimation de la fonction de demande en eau représente un producteur représentatif pour une saison représentative (considérant les valeurs moyennes des deux sous-saisons). Cela signifie que nous supposons une seule fonction de demande en eau pour toute la saison sèche.

Cette hyptothèse s'explique, en partie, par le fait que dans le modèle hydro-économique, la plupart des données que nous avons obtenues sont annuelles. Ce qui nous a mené à ne considérer que les variations interannuelles de la disponibilité de l'eau. Ainsi, pour plus d'harmonie, ce modèle sur la production estime une fonction de demande pour toute la saison sèche.

Nous supposons par ailleurs que le producteur représentatif est preneur de prix aussi bien dans le marché des intrants que celui des produits. Cela signifie que les prix des facteurs de production et les prix des produits vendus sont des données qui se déterminent sur le marché et que le producteur ne peut les changer.

Pour estimer la fonction de demande, nous utilisons la programmation mathématique. Nous calibrons un modèle de production agricole aux données observées en utilisant la *programmation mathématique positive* de HOWITT (1995) [43] avec une fonction de rendement endogène qui représente la relation entre eau et rendement.

Pour le choix de cette dernière, nous avons tenté de calibrer notre modèle producteur avec les fonctions de DOORENBOS & KASSAM (1979) et de Mitscherlich-Baule (ROSENZWEIG *et al.*, 1999) qui respectent toutes les deux la loi du rendement maximal de l'hypothèse de Von Liebig (PARIS, 1992). Les résultats de calibration étant largement meilleurs avec la fonction de Mitscherlich-Baule (ROSENZWEIG *et al.,* 1999), nous la choisissons par conséquent. En effet elle nous permet d'avoir des données simulées qui reproduisent celles observées pour la majorité des spéculations (voir figures A1 et A2 dans l'annexe 1).

Dans notre cas, la fonction s'écrit :

$$\mathrm{y} = \mathrm{y_m}\left(1 - \mathrm{e}^{-\eta_1(\eta_2 + \mathrm{ET_a})}\right) \tag{8}$$

$\mathrm{où\ y\ et\ y_m}$ sont les rendements observé et maximal ; η_2 est la teneur résiduel en eau du sol. $\mathrm{ET_a}$ est l'évapotranspiration réelle dont le calcul est détaillé dans la section des données.

η_1 se calcul comme suit :

$$\eta_1 = -\frac{\ln(1 - \frac{y}{y_m})}{\eta_2 + ET_a} \tag{9}$$

La structure du modèle de production est :

$$\underset{z_{ij}, w_j, \propto_j}{\mathbf{Max}}\ \pi(p, c) = \sum_j \left[\propto_j \left(\boldsymbol{y_j}(\boldsymbol{w_j}) * \boldsymbol{p_j} \right) - \left(\sum_i \boldsymbol{z_{ij}} * \boldsymbol{c_i} \right) \right] \tag{10}$$

Sous les contraintes sur les ressources (les facteurs de production utilisés ne peuvent pas excéder les ressources disponibles) :

43. — Voir annexe 3 pour plus de détails sur cette méthode de calibration.

$\sum_j \propto_j \leq A, (\lambda_{terre})$ (11)

$\sum_j x_{mofamj} \leq mofam\ , (\lambda_{M.Ofam}\ )$ (12)

$\sum_j x_{moextj} \leq moext, \quad (\lambda_{M.Oext})$ (13)

$\sum_j z_i \leq intrant, i \neq (main - d'oeuvre,$ eau), $(\lambda_{intrants}\ )$ (14)

$$\sum_j w_j \ \leq w, \qquad (\lambda_{eau}) \tag{15}$$

Les équations (11 à 15) représentent les contraintes de disponibilité des terres, de main d'œuvre familiale et salariale. Notons que pour les autres intrants (engrais minéral et organique, pesticides, etc.), le producteur n'a pas de contrainte de disponibilité physique car il peut les acheter au marché tant que ses finances le lui permettent. Concernant la main-d'œuvre familiale, nous la modélisons comme une ressource disponible pour le producteur mais pour laquelle il ne supporte pas de coûts.

$\boldsymbol{\pi}$ est le profit d'un producteur représentatif; j représente les spéculations cultivées (oignons, carotte, chou, poivron, aubergine, aubergine amer et tomate); $\propto_j$ représente la superficie allouée aux spéculations j ; y_j est la fonction de production des spéculations j ; w_j est la quantité d'eau appliquée à la spéculation j ; p_j est le prix de la spéculation j; i est l'index des intrants (engrais minéral et organique, pesticides, main-d'œuvre, eau); z_{ij} représente le vecteur des intrants et leurs quantités respectives; c_{ij} est le vecteur des coûts unitaires des intrants excepté pour l'eau.

Le Lagrangien s'écrit :

$$L = \sum_{\boldsymbol{j}} \left[\propto_{\boldsymbol{j}} \left(\boldsymbol{y_j}(\boldsymbol{w_j}) * \boldsymbol{p_j} \right) - \left(\sum_{\boldsymbol{i}} \boldsymbol{z_{ij}} * \boldsymbol{c_{ij}} \right) \right] - \lambda_{terre} \left(\sum_j \propto_j - A \right)$$
$$-\lambda_{M.Ofam} \left(\sum_j z_{moextj} - moext \right) - \lambda_{M.Oext} \left(\sum_j z_{moextj} - moext \right) -$$
$$\boldsymbol{\lambda_{intrants}} \left(\sum_{\boldsymbol{j}} \boldsymbol{z_i} - \boldsymbol{intrant} \right) - \boldsymbol{\lambda_{eau}} \left(\sum_{\boldsymbol{j}} \boldsymbol{w_j} - \overline{w} \right) \tag{16}$$

De manière plus simple :

$$L = \sum_j \left[\propto_j \left(y_j(w_j) * p_j \right) - \left(\sum_i z_{ij} * c_{ij} \right) \right] - \lambda_{terre} \left(\sum_j \propto_j - A \right)$$
$$- \lambda_i \left(\sum_j z_{ij} - z_{ij}tot \right) - \lambda_{eau} \left(\sum_j w_j - \overline{w} \right) \tag{17}$$

Les conditions de premier ordre pour l'eau s'écrivent :

$$\frac{\partial L}{\partial w_j} = \propto_j * p_j \frac{\partial y_{zj}(w_j)}{\partial w_j} - \lambda_{eau} = 0 \tag{18}$$

Le multiplicateur de Lagrange de l'eau correspond à la disposition à payer du producteur pour une unité supplémentaire d'eau. Il représente la hausse marginale du profit qui résulterait de l'usage d'une unité additionnelle d'eau.

Comme expliqué dans le modèle théorique, pour obtenir la fonction de demande, nous simulons différents niveaux de disponibilité de l'eau ($\overline{w}$) dans l'équation 15 et relevons le multiplicateur de Lagrange λ_{eau} définit dans l'équation (18). Nous obtenons différentes dispositions à payer pour différents niveaux d'eau disponible. Cela nous permet d'obtenir la fonction de demande en eau D (λ_{eau}).

L'inverse de la demande en francs C.F.A.ha^{-1} par m^3 s'écrit :

$$\lambda_{eau}(w) = 8196{,}4\boldsymbol{w}^{-0{,}442} \tag{19}$$

Elle est de la forme :

$$\lambda_{eau}(w) = \mu w^{\theta} \text{ avec } \mu = 8196{,}4 \textbf{ et } \theta = -0{,}442$$

Par conséquent, la fonction de bénéfice s'écrit :

$$B(w) = \int \lambda_{eau}(w)dw = \int \mu w^{\theta} dw = \mu \int w^{\theta} dw = \frac{\mu}{\theta + 1} w^{\theta+1}$$

$$B(w) = \frac{\mu}{\theta + 1} w^{\theta+1} \tag{20}$$

1.2.4. Les scénarios climatiques

Lors de la réalisation de ce travail, nous ne disposions pas de projections de modèles climatiques sur les précipitations pour le cas spécifique de la zone des *niayes*. Comme discuté dans le chapitre 2, il existe d'autres approches qui permettent de générer des précipitations dans le temps en se basant sur les chaînes de Markov (SAFOUANE *et al*., 2016). Partant de cette approche, nous avons fait des simulations stochastiques (en nous basant sur les données historiques de la période 1970-2011) pour construire des scénarios pluviométriques.

L'approche méthodologique que nous utilisons se décline en trois étapes :

— la première étape consiste à classifier les années pluviométriques selon l'*indice de précipitation standardisé* (I.P.S.) sur douze mois [44] (MCKEE *et al*., 1993) et les données pluviométriques sur la période 1970-2011. L'avantage d'utiliser cet indice est sa simplicité et le fait qu'il ne nécessite que des données pluviométriques. Nous utilisons le programme S.P.I. développé par la *National Drought Mitigation Center* [45] pour le calcul de l'indice de précipitation standardisé. Selon cet indice, les années sont classées en année extrêmement humide, très humide, modérément humide, proche de la normale, modérément sec, très sec, extrêmement sec. ;

44. — W.M.O. (2012).

45 — Ce programme est disponible sur le site :
<**http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx**>, consulté en mars 2015.

— la deuxième étape consiste à calculer la matrice de transition de probabilité d'un type d'année pluviométrique à un autre (exemple année humide, sèche ou autre) en nous fondant sur les chaînes de Markov d'ordre 1 (ou simplement chaîne de Markov) ;

— la troisième étape consiste à faire les simulations stochastiques en utilisant la matrice de transition. Trois scénarios sont simulés sur quarante-deux ans :

- un scénario de base dont la matrice de transition découle des données historiques,
- un scénario sec obtenu en utilisant la matrice de transition du scénario de base avec une augmentation des probabilités de transition vers des années sèches,
- un scénario humide en utilisant la matrice de transition du scénario de base avec une augmentation des probabilités de transition vers des années humides.

Dans l'annexe 4, nous détaillons le processus de calcul de la matrice de transition de probabilité à partir d'une chaîne de Markov et faisons une comparons de la série simulée à celle observée.

La FIG. 17 résume notre approche.

Etape 1: Classification de la pluviométrie observée

- **Calcul IPS à partir du programme SPI développé par la *National Drought Mitigation Center***
- **Définition types d'années dans notre série pluviométrique à partir de l'IPS calculé**
  Pluviométrie historique classée en années: extrêmement humide, très humide, modérément humide, proche de la normale, modérément sec, très sec, Extrêmement sec

Etape 2 : Calcul de la matrice de transition de probabilité par chaîne de Markov d'ordre 1

- Pour chaque type d'année i, calcul du nombre total de transitions historiques de ce type d'année à un autre j : $\sum_j f(i,j)$, $f(i,j)$ est la fréquence à laquelle la transition ij est observée
- Calcul des fréquences d'observation des transitions : $f(i,j)$ →Matrice des occurrences de transition
- Calcul des probabilités de transition : $P(i,j) = P(X_1 = j | X_0 = i) = \frac{f(i,j)}{\sum_j f(i,j)}$ → Matrice de transition de probabilités

Etape 3: Simulations stochastiques basées sur les probabilités définies

- Générer des transitions pour les années de simulation
- Pour chaque combinaison de transition et de type d'année correspondant, nous générons de manière aléatoire une quantité de pluie correspondant à ce type d'année en nous basant sur les valeurs historiques correspondant à ce type d'année

Génération de la série de précipitations sur 42 ans à partir de 2012

FIG. 17. — Étapes pour le développement de scenarios de précipitation. Source : Auteurs en nous inspirant de SAFOUANE *et al*. (2016).

Section 2
Données utilisées

Pour alimenter nos outils d'analyse, nous utilisons des données de type primaire et secondaire. Dans ce qui suit, nous présentons d'abord les données primaires et leur méthode de collecte avant de présenter les données secondaires.

2.1. Données primaires
Processus de collecte et échantillonnage

La collecte des données s'est déroulée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, nous avons mené des entretiens exploratoires en effectuant des *focus groups* avec des groupements de producteurs dans huit villages répartis dans les trois régions de la zone (1 à Saint-Louis, 5 à Thiès et 2 à Louga). Nous avons ensuite effectué des enquêtes quantitatives pour collecter des données sur la production maraîchère dans la zone des *niayes*. Nous avons un échantillon de 369 unités de production situées dans vingt-sept villages, répartis dans les communautés rurales de la zone, avec des données sur: les intrants utilisés et les coûts de production, les superficies allouées aux spéculations, les superficies possédées et exploitées, les prix des spéculations et les revenus, les activités (agricoles et non agricoles) des producteurs, les sources d'eau d'irrigation, les méthodes d'exhaure, etc.

2.1.1. Des entretiens exploratoires pour mieux cadrer le sujet [46]

Les groupements sont choisis avec des méthodes d'échantillonnages non probabilistes. Nous avons d'abord contacté les organisations de producteurs (O.P.) dans la zone. Pour les organisations de producteurs que nous avons réussi à contacter et qui étaient disponibles, nous avons visité le village du responsable de l'organisation de producteur qui nous a mis en relation avec des producteurs membres de l'organisation provenant du village et/ou des villages environnants. Les groupes comprenaient entre cinq et dix producteurs.

Les organisations de producteurs rencontrées et les villages visités sont dans le TABLEAU II.

46. — Voir guide d'entretiens avec les groupements de producteurs en annexe 2.

TABLEAU II

Organisations de producteurs rencontrées lors des entretiens de prospection

ORGANISATIONS DE PRODUCTEURS	ZONES D'IMPLANTATION * COMMUNAUTÉS RURALES	RÉGION	VILLAGE
UF Sague	Léona, Arrond Sakal	Louga	Potou
Ugpar de Rao	Gandon, Arrdt Rao	Saint-Louis	Rao
Ugpl Lompoul	Darou Khoudoss, Diokoul Diawrine, Kab Gaye	Louga, Thiès	Lompoul sur Mer
UF Thieppe	Thieppe, Arrond Ndande	Louga	Thieppe
Ugpn	Darou Khoudoss, Taiba Ndiaye, Diender	Thiès, Louga	Diambalo
Cvd Kayar	Commune Kayar, Arrd Keur Moussa	Thiès	Kayar
UF Bayakh	Djender, Sangalkam, Notto, Keur Moussa	Thiès, Dakar	Djender
	Diender	Thiès	Santhiou Dara

* (SY, 2012)
Source : FAYE (Amy), 2018.

Ces entretiens ont servi à cerner de manière globale les systèmes de production dans les *niayes* et les perceptions du changement climatique des producteurs maraîchers. En résumé, ils nous ont permis d'avoir un aperçu global des conditions de production dans la zone des *niayes*, particulièrement les régions de Thiès, Louga et Saint-Louis et de jauger la pertinence de notre thème ainsi que l'orientation à prendre pour mieux le traiter.

Des entretiens, il ressort que, pour l'agriculture irriguée dans cette zone, les facteurs pertinents à prendre en compte pour l'étude d'impact du changement climatique sont, entre autres, la disponibilité de l'eau d'irrigation (nappe plus profonde) et la salinité (due à une baisse de la nappe) qui altère la qualité de l'eau. Ces entretiens, combinés aux résultats de la littérature sur le changement climatique et les cultures irriguées dans la zone et de manière générale (AGUIAR , 2009 ; NELSON *et al*., 2009 ; AGUIAR *et al*., 2010 ; BOGNINI, 2011 ; CAMARA, 2010 ; SARR, 2010 ; DASYLVA, 2012), nous ont permis, de faire un choix définitif sur les facteurs à considérer dans notre évaluation. Nous retenons principalement la disponibilité de l'eau d'irrigation face à la variabilité des précipitations. Pour ce qui est de la qualité de l'eau, avec les méthodes que nous utilisons, nous ne disposons pas suffisamment d'informations pour intégrer les aspects liés à la salinité.

Ces entretiens nous ont aussi permis d'élaborer notre questionnaire de collecte de données quantitatives et de raffiner notre méthode d'échantillonnage.

2.1.2. Échantillonnage

Unité d'observation

Les unités de production agricole des *niayes* sont majoritairement rattachées à une exploitation familiale. Pour justifier le choix de notre unité d'observation, considérons la définition d'une exploitation familiale comme indiqué dans l'encadré 1 (voir annexe 5).

Ces définitions montrent la complexité des exploitations agricoles familiales et la multiplicité des unités de production au sein d'une même exploitation. Choisir comme unité

d'observation l'exploitation familiale peut ainsi s'avérer complexe. Par ailleurs, nous nous intéressons davantage à la production et à l'impact du changement climatique sur la disponibilité de l'eau d'irrigation qui concerne plus ou moins toute unité de production dans la zone qu'elle soit la seule d'une exploitation familiale ou une sous-unité de production d'une exploitation familiale. Par conséquent, les unités de production agricole rattachées à une exploitation familiale constituent nos unités d'observation.

La taille de l'échantillon

Pour définir l'échantillon nous calculons d'abord sa taille puis définissons la méthode d'échantillonnage utilisée.

Pour calculer la taille de l'échantillon, nous utilisons la formule suivante :

$$n = \frac{p(1-p)t^2}{d^2} \quad (21)$$

Où p : est la proportion de la population qui présente le caractère observé

À ce stade, nous ne pouvons calculer cette proportion. Or, il est recommandé de considérer $p = 0{,}5$ lorsque cette proportion n'est pas disponible [47]. Par conséquent, nous supposons que la valeur de p s'élève à 0,5.

t : est égale à 1,96 (avec un seuil de confiance de 95 % et un risque de se tromper égal à 5 %) ;

d : est la marge d'erreur (en pourcentage). Plus cette marge est petite, plus le degré de précision est élevé. Il est plus optimal que la marge d'erreur soit inférieure ou égale à 5 %. Dans notre cas, nous supposons que la marge d'erreur est de 4,9 %. Ainsi, nos résultats pourront être extrapolés au reste de la population avec un risque de se tromper de 5 % qui varierait de + ou - 4,9 %.

En remplaçant chaque paramètre dans la formule (21), nous nous retrouvons avec un échantillon de 400 unités de production maraîchères dans la zone des *niayes*.

La méthode d'échantillonnage

Pour sélectionner les unités de production agricoles, nous n'avions pas, à notre disposition, une liste des unités de production maraîchères dans la zone. Cependant, nous disposions des informations sur les régions, les communautés rurales (C.R.) et leur population et les villages de la zone d'étude (A.N.S.D., 2012). Avec cette information, nous avons effectué un échantillonnage aléatoire stratifié à deux degrés avec deux unités d'échantillonnage :

— les villages ;
— les unités de production.

Dans un premier temps, nous avons divisé la zone des *niayes* en trois sous-zones (centre, nord et sud) qui constituent des strates à l'intérieur desquelles les villages sont tirés en premier, puis les unités de production. Pour chaque sous-zone nous avons calculé la part

47. — Voir <**http://icp.ge.ch/sem/cms-spip/IMG/pdf/taille-d_un-echantillon-aleatoire-et-marge-d_erreur-cms-spip.pdf**>
et <**https://www.ifad.org/topic/resource/tags/food_and_nutrition_security/2163141**>.

de la population de la sous-zone dans la population totale de toutes les communautés rurales :

$$Part\ zone\ i\ =\ population\ zone\ i/population\ totale$$

La taille de l'échantillon étant 400, nous avons divisé l'échantillon en trois sous-zones. Le nombre de producteurs dans chaque sous-zone est la part de la sous-zone dans la population totale calculée précédemment multipliée par la taille de l'échantillon :

$$Nombre\ producteurs\ zone\ i\ =\ Part\ zone\ i\ *\ 400$$

Ainsi, plus la sous zone est peuplée, plus on y tirera des producteurs. À partir de là, n'ayant pas les populations des villages, nous choisissons un nombre de producteurs par village égal à 15, puis selon la taille de la zone considérée, nous calculons le nombre de villages par zone à tirer. Par un tirage aléatoire, nous choisissons les villages dans chaque sous zone. Enfin, dans chaque village, nous avons recensé, auprès des chefs de village, les ménages horticoles parmi lesquels nous avons choisi les unités de production par tirage aléatoire.

Ainsi, les 400 producteurs sont répartis dans les zones selon le TABLEAU III.

TABLEAU III

Répartition échantillon selon les zones

ZONE	POPULATION PAR ZONE *	VILLAGES PAR ZONE	PRODUCTEURS PAR ZONE
Centre	47	13	195
Nord	31	8	120
Sud	21	6	90

* en pourcentage. Source : FAYE (Amy), 2018.

À travers cette méthode d'échantillonnage, nous trouvons un échantillon de 405 producteurs qui couvre les communautés rurales de la zone (voir annexe 1). Cependant, les réalités du terrain combinées aux erreurs de remplissage des questionnaires nous ramènent à une base de données de 369 producteurs dont les caractéristiques sont résumées dans la section suivante.

Les informations sur l'échantillon final se trouvent en annexe 1.

Les données portent sur la campagne de contre-saison (sèche et froide) de 2014.

2.1.3. Caractéristiques de notre échantillon et données utilisées

Les producteurs de notre échantillon sont répartis dans les régions de Dakar (département de Rufisque), Thiès (départements de Thiès et Tivaouane), Louga (départements de Kébémer et Louga) et Saint-Louis (département de Saint-Louis). Les villages et communauté rurales couverts sont dans l'annex 1. L'échantillon compte 2,71 % de femmes et 97,29 % d'hommes (359 hommes et 10 femmes).

La taille moyenne des unités de production est de 2,65 hectares avec un écart type de 2,73. Cela est principalement dû à la présence d'un petit nombre de producteurs ayant plus de dix hectares. Certains producteurs n'exploitent pas l'ensemble des terres possédées alors que d'autres exploitent plus que ce qu'ils possèdent grâce à la location de terres. Le TABLEAU IV montre la répartition de la taille des unités de production dans l'échantillon.

TABLEAU IV

Répartition de la taille des unités de production en termes de superficie

SUPERFICIE POSSÉDÉE OU EXPLOITÉE *	PRODUCTEURS PROPRIÉTAIRE **	PRODUCTEURS EXPLOITANT **
Inférieure à 1	32,5	38,0
Entre 1 et 5	57,2	37,0
Entre 5 et 10	7,6	4,0
Entre 10 et 20	2,2	0,5

* en hectares. ** en pourcentage.
Source : Données d'enquête de thèse, contre-saison 2014, zone des *niayes.*

Concernant les activités, 66,67 % des producteurs pratiquent le maraîchage comme activité principale. S'ensuivent des activités telles que l'agriculture sous pluie (23,59 %), l'élevage (1,63 %), l'arboriculture (1,36 %), et des activités non agricoles (chauffeur, commerçant, pêcheur, etc.). Comme activité secondaire, 23,43 % pratiquent de l'élevage et 17,44 % pratiquent le maraîchage. Le reste, des activités non agricoles ou de l'agriculture non maraîchère. Les cultures maraîchères pratiquées sont majoritairement l'oignon (78,32 %), le chou pomme (45,26 %), la tomate (41,19 %), le poivron (26 %), la carotte (24,12 %), l'aubergine amère (22 %), l'aubergine douce (22 %), le piment (9,49 %) et la pomme de terre (7,32) [48]. Dans le modèle production, nous avons retenu les spéculations qui sont pratiquées par plus de 10 % des producteurs. L'ensemble des spéculations retenues (l'oignon, le chou pommé, la tomate, le poivron, la carotte, l'aubergine amère, l'aubergine douce) sont cultivées aussi bien en saison sèche froide qu'en saison sèche chaude.

Les producteurs accèdent à l'eau majoritairement à travers la construction de puits (87,5 %) ou *céanes* [49] (5,96 %) comme l'indique le TABLEAU V.

TABLEAU V

Principales sources d'eau dans l'échantillon

PRINCIPALES SOURCES D'EAU	PROFONDEUR MOYENNE *	FRÉQUENCE	POURCENTAGE
Puits	7,05	323	87,53
Céanes	2,44	22	5,96

* en mètres.
Source : Données d'enquête de thèse, contre saison 2014, zone des *niayes.*

Les autres producteurs utilisent les cuvettes des *Industries chimiques du Sénégal* (I.C.S.), les eaux usées après lavage du phosphate ou des étangs pour l'irrigation. Il existe aussi des producteurs qui utilisent l'eau de la S.D.E. avec le tarif maraîcher, surtout dans le sud des

48. — En ne retenant que les producteurs avec au moins une de ces spéculations, nous nous retrouvons à travailler avec 365 producteurs pour calculer les paramètres du modèle producteur.

49. — Un *céane* est un puits traditionnel, souvent de faible profondeur, dans lequel le puisage peut se faire manuellement (CISSÉ *et al.*, 2001).

niayes (région de Thiès).L'exhaure de l'eau se fait de manière manuelle ou mécanique. Dans notre échantillon, l'exhaure manuelle est dominante. Pour l'exhaure mécanique, les producteurs utilisent des motopompes électriques ou à carburant (essence ou gasoil). Le TABLEAU VI représente les différents modes d'exhaure et d'irrigation ainsi que leur part dans l'échantillon.

TABLEAU VI

Mode d'exhaure de l'eau

EXHAURE EAU	POURCENTAGE
Manuelle	60,16
Manuelle et mécanique	6,78
Mécanique	33,06
TOTAL	100,00

Source : Données d'enquête de thèse, contre-saison 2014, zone des *niayes.*

Dans le cas de l'exhaure manuelle, l'arrosage manuelle se fait par du matériel tel que des sceaux, des arrosoirs. Dans le cas de l'exhaure mécanique, l'irrigation se fait principalement par des modes d'irrigation tels que l'irrigation par aspersion, l'irrigation par goutte à goutte…

Concernant la fréquence d'irrigation, elle diffère selon les spéculations. L'irrigation se fait principalement une fois tous les jours ou une fois tous les deux jours.

Dans la zone des *niayes*, les intrants sont très largement utilisés par les producteurs durant la saison sèche pour les cultures maraîchères. Les principaux intrants utilisés dans notre échantillon sont :

— les semences ;
— les engrais minéraux (tout l'échantillon), avec principalement l'urée, utilisée par 99,19 % des producteurs et le N.P.K. (avec les formules 10.10.20, 6.20.10 et 15.15.15 utilisées respectivement par 87,53 %, 2,98 % et 2,71 des producteurs) ;
— les engrais organiques avec 88,88 % de l'échantillon (majoritairement de la fumure d'origine animale avec 88,08 %, de la fumure de filao avec 3,25 % et de la coque d'arachide avec 1,36 %) ;
— les pesticides (96,47 %) qui sont de plusieurs types (herbicides, insecticides…).

L'urée et le 10.10.20 sont les principaux engrais minéraux utilisés dans l'échantillon pour toutes les spéculations. Par conséquent, nous ne considérons que ces deux types d'engrais minéraux dans notre modèle. L'usage de l'engrais organique d'origine animale (petits ruminants et bovins) dépasse largement la majorité pour toutes les spéculations. Elle est par conséquent prise en compte pour toutes les cultures.

Bien que presque tout l'échantillon utilise des pesticides, la fréquence d'usage par spéculation est de loin inférieure à 50 % dans l'échantillon. Par conséquent, pour chaque spéculation, nous ne retenons pas les intrants pour lesquels l'usage est inférieur ou égal à 40 % dans l'échantillon. Les pesticides ne sont donc comptabilisés dans les coûts que pour l'oignon.

En dehors des intrants de production, les producteurs utilisent de la main-d'œuvre qui est soit familiale ou externe. La main-d'œuvre familiale n'est pas payante. La main-d'œuvre externe est payante et très répandues dans les *niayes*. Elle comprend la main-d'œuvre

temporaire et la main-d'œuvre saisonnière. Cette dernière est constituée de sourgas embauchés pour toute la saison, ils sont payés soit par partage de profit ou par forfaits mensuels ou saisonniers. La main-d'œuvre temporaire est une main-d'œuvre salariale supplémentaire que les producteurs emploient pour des opérations culturales spécifiques. Ces opérations sont souvent le labour, la récolte et parfois le semis et le transport de la production [50] vers les points de distributions. Ils sont payés au forfait ou de manière journalière.

Dans le cadre de cette étude, nous ne considérons que la main-d'œuvre saisonnière du fait de données sur la main-d'œuvre temporaire erronées. 66,12 % de l'échantillon emploie des *sourgas*. Nous ne prenons en compte les *sourgas* que pour les spéculations pour lesquelles au moins 50 % des producteurs en embauchent. Le TABLEAU VII renseigne la part de l'échantillon qui utilise des *sourgas* pour les différentes spéculations.

TABLEAU VII

Main-d'œuvre saisonnière

SPÉCULATION	PRODUCTEURS EMPLOYEURS DE SOURGAS		*SOURGAS* À L'HECTARE
	NOMBRE	*POURCENTAGE*	
Oignon	197	68,17	3,65
Chou pomme	69	41,32	
Tomate	60	39,47	
Poivron	40	41,67	
Carotte	54	60,67	2,56
Aubergine amère	40	49,38	
Aubergine douce	34	42,00	

* par rapport aux producteurs de cette spéculation.
Source : Données d'enquête de thèse, contre saison 2014, zone des *niayes*

Les coûts de production sont principalement des coûts fixes et variables. Les coûts fixes sont liés à l'achat du matériel agricole (le matériel d'irrigation inclus), la construction de puits ou céanes, etc. Les coûts variables sont principalement les coûts d'achat des intrants (semences, engrais minéral et organique, pesticides), la main-d'œuvre, les coûts d'extraction de l'eau. Nous ne considérons pas les coûts liés à l'investissement.

Le Tableau VIII récapitule les données que nous avons utilisées dans le modèle production.

TABLEAU VIII

Quantités et coût des intrants pour le modèle production

		SPÉCULATION						
		Aubergine amère	*Aubergine Douce*	*Carotte*	*Poivron*	*Tomate*	*Chou Pomme*	*Oignon*
Superficies cultivées (ha)	Moyenne	0,41	0,4	0,58	0,27	0,46	0,46	0,73
	Médiane	0,25	0,25	0,36	0,25	0,25	0,25	0,5
	Moyenne	10 832,62	18 045,29	12 104,58	10 010,03	10 477,93	9 948,04	10 566

50. — Notons que les coûts de transport ne sont pas considérés comme des coûts de production mais plutôt comme des coûts de commercialisation.

		SPÉCULATION						
		Aubergine amère	*Aubergine Douce*	*Carotte*	*Poivron*	*Tomate*	*Chou Pomme*	*Oignon*
Rendements (kg/ha)	Médiane	7 040	16 000	9 933,33	6 100	6 560	7 177,5	9 333,33
Prix de vente (francs C.F.A./kg)	Moyenne	243,64	117	115,01	489,59	121	148,91	239,31
	Médiane	200	111,11	101,72	300	97,56	113,2	235
Semences (kg/ha)	Moyenne	0,22	0,26527	2,74 789	0,19836	0,25 559	0,56 213	2,21 061
	Médiane	0,250	0,300	3,460	0,200	0,300	0,650	2,614
Coût semences (francs C.F.A./kg)	Moyenne	108 000,78	119 000,66	23 000,32	252 000,66	230 000,78	158 000,48	55 000,50
	Médiane	100 000	100 000	24 000	209 000,37	160 000	145 000,64	58 000
Engrais minéral urée (kg /ha)	Moyenne	278,60	501,67	203,29	266,94	148,05	290,73	191,98
	Médiane	120,92	248,25	84,96	180,03	109,42	108,51	95,38
Coût urée (francs C.F.A./kg)	Moyenne							289,54
	Médiane							280
Engrais minéral 10.10.20 (kg /ha)	Moyenne	355,59	437,1 8	268,46	266,039	207,90	283,74	246,27
	Médiane	195,28	372,38	118,94	180,03	109,42	108,51	136,26
Coût 10.10.20 (francs C.F.A./kg)	Moyenne							273,16
	Médiane							250
Engrais organique Élevage (kg/ha)	Moyenne	3 267,06	4 002,619	4 398,52	2 044,26	2 775,77	1 744,29	2 394,086
	Médiane	1 292,40	1 241,28	1 639,10	1 215,64	1 055,49	1 046,76	1 362,64
Coût engrais org. (francs C.F.A./kg)	Moyenne							33,67
	Médiane							31,10
Herbicides (l/ha)	Moyenne							3,66
	Médiane							2,72
Coût herbicides (francs C.F.A./l)	Moyenne							8 002
	Médiane							8 000
Salaire saisonnier (*sourgas*)	Moyenne							138 349

Source : Données d'enquête de thèse, contre saison 2014, zone des *niayes.*

2.1.4. Données estimées à partir des données primaires : prélèvements des producteurs, coût d'extraction de l'eau

Au regard des réalités du terrain, nous nous sommes rendus compte qu'il était impossible d'accéder à certaines données auprès des producteurs. Nous avons ainsi procédé à des estimations concernant les quantités d'eau par spéculation, le coût d'extraction de l'eau et les prélèvements d'eau des producteurs.

Pour l'estimation des quantités, nous utilisons la relation entre l'eau et le rendement établit par DOORENBOS & KASSAM (1979) :

$$\left(\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{y_a}}{\boldsymbol{y_m}}\right)=\boldsymbol{k_y}\left(\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{ET_a}}{\boldsymbol{ET_m}}\right) \quad (22)$$

Ainsi, l'eau appliquée à chaque spéculation est estimée selon la relation :

$$ETa = Etm * (1-\frac{y_m - y_a}{y_m * k_y}) \quad (23)$$

Le TABLEAU IX contient les informations nécessaires pour estimer l'eau appliquée à chaque spéculation.

TABLEAU IX

Données de calcul de l'usage d'eau par les spéculations

SPÉCULATION	évapotranspiration maximale (ETm)	RENDEMENTS	k_y
Aubergine amère	1 125,8	50 000	1,37
Aubergine Douce	1 125,8	50 000	1,37
Carotte	1 650,0	35 000	0,82
Poivron	1 201,0	50 000	1,10
Tomate	451,5	50 000	1,05
Chou Pomme	607,2	40 000	0,95
Oignon	703,2	35 000	1,10

* (mm/ha) ; ** max, y_m (kg/ha).
Source données : PADEN, 2014-a, 2014-b, 2015 ; C.D.H., DOORENBOS & KASSAM (1979), LOVELLI *et al*. (2007) et CARVALHO *et al*. (2016) [51].

Concernant le coût de l'eau et les prélèvements d'eau des producteurs, nous avons expliqué leur méthode d'estimation dans la section 1.2.3.1.

Le coût total d'extraction d'un mètre cube d'eau pour irriguer un hectare s'élève à 0,53 francs C.F.A.m^{-3} d'eau extrait par mètre de profondeur.

Concernant les prélèvements des maraichers, ils s'élèvent à 31,397 millions de mètres cubes pour l'année de référence 2014. Les chiffres du PADEN (2013) montrent que l'aquifère superficielle des sables est exploitée à raison de 41 à 46 millions de m^3/an.

2.2. Données secondaires

En termes de données hydrologiques, notre modélisation nécessite des informations sur la recharge pluviale des nappes (l'infiltration), leur profondeur, les prélèvements des différents acteurs, les superficies irriguées dans les *niayes*. Dans cette étude, nous capitalisons les données sur les recherches antérieures effectuées dans les *niayes* sur les aspects hydrogéologiques (GAYE, 1990 ; FAYE, 1995 ; EL FAID, 1999 ; TINE, 2004 ; DIOUF *et al*., 2011) et les études et données de la D.G.P.R.E. (2005, 2009).

51. — Les données sur les besoins en eau ont été obtenues au *Centre pour le développement de l'horticulture* (C.D.H.). Les données sur le facteur k_y sont tirées de DOORENBOS & KASSAM (1979) pour toutes les spéculations sauf pour la carotte tirée de CARVALHO *et al*. (2016) et les aubergines (douce et amère) tirées de LOVELLI *et al*. (2007).
Concernant les rendements maximums, pour la carotte, le chou pomme et l'oignon, les données proviennent des fiches techniques établis dans le cadre du projet Paden dans la zone des *niayes*. Pour les autres spéculations, les fiches techniques n'étant pas encore actualisées pour les *niayes*, nous choisissons un seuil de 50 000 kg à l'hectare comme rendement maximal.

LA RECHARGE

En nous basant sur les études antérieures, nous faisons l'hypothèse que la recharge de la nappe provient essentiellement de la pluie. La nappe étant principalement rechargée par les précipitations, l'incertitude de la recharge provient du caractère aléatoire des précipitations.

Pour l'évaluation de la recharge pluviale, plusieurs études ont été effectuées, principalement par des hydrogéologues dans certaines parties des *niayes* avec des méthodes différentes. GAYE (1990), EIL FAID (1999) et TINE (2004) ont utilisé la méthode du bilan des chlorures pour déterminer la recharge dans le nord des *niayes*. DIOUF *et al*. (2011) ont aussi évalué la recharge dans le sud. Ces différentes études trouvent des résultats différents même dans la même zone. Cela montre la variabilité de la recharge dans les *niayes*.

Le TABLEAU X récapitule les recharges tirées de ces études avec les méthodes de calcul, l'infiltration, les années et les précipitations correspondantes:

TABLEAU X

Infiltration de l'eau de pluie dans la nappe des sables du quaternaire des *niayes*

RÉGION	PRÉCIPITATIONS (mm)	RECHARGE (mm/an)	MÉTHODE	SOURCE	TAUX INFILTRATION (%)
Louga Nord-Ouest	290,0	1,25	Bilan des Chlorures	TINE (2004)	0,4
Louga	402,7	80	Bilan des Chlorures	GAYE (1990)	20
Niayes-Sud	529,0	119,025	Bilan hydraulique	DASYLVA & COSANDEY (2005)	22,5
Niayes -Sud	712,0	217,16	Bilan hydraulique	DASYLVA & COSANDEY (2005)	30,5
Niayes-Sud	220,0	19,8	Bilan hydraulique	DASYLVA & COSANDEY (2005)	9
Louga	290,0	9, 8 à 78,3	Bilan des Chlorures	EIL FAID (1999)	3,3 à 27
Niayes-Sud-Dakar		8,74 à 84,68	Bilan des Chlorures	DIOUF *et al*. (2011)	2 à 20%

Source données : GAYE (1990), EIL FAID (1999), TINE (2004), DASYLVA & COSANDEY (2005), DIOUF *et al.* (2011).

Le TABLEAU X montre que la recharge des nappes est très variable sur le plan spatial et temporel et selon la pluviométrie. Cette variabilité s'explique par les différences sur les sols, les précipitations, l'évapotranspiration... (TINE, 2004 ; D.G.P.R.E., 2005, 2009).

Dans notre cas, nous considérons les valeurs de TINE (2004). Cette préférence s'explique par la pertinence de la méthode du bilan des chlorures dans la littérature (GAYE, 1990 ; EL FAID, 1999 ; DIOUF *et al*., 2011) et le caractère récent de l'étude comparée aux autres qui utilisent la même méthode. Néanmoins, DIOUF *et al*. (2011) utilisent aussi cette méthode et leur étude est plus récente. Par conséquent, nous avons mené une analyse de sensibilité afin de voir comment le modèle réagit aux différents taux d'infiltration.

DONNÉES CLIMATIQUES

Nous disposons d'une série temporelle de 1970 à 2011 sur les précipitations et les températures minimales et maximales. La zone des *niayes* se trouvant à cheval entre les régions administratives de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis, les stations de ces régions sont retenues. Ces données proviennent de l'*Agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie* (ANACIM, 2013).

LA PROFONDEUR DES PUITS

Nous utilisons la profondeur des puits des producteurs (distance entre le sol et le niveau où l'eau commence) recueillie lors de nos enquêtes auprès des producteurs. Cette profondeur est variable selon les localités. Nous considérons ici la valeur moyenne (7,05 m).

LES PRÉLÈVEMENTS DES USAGERS DE LA NAPPE (HORS PRODUCTEURS)

Dans cette section, nous présentons les extractions d'eau des différents acteurs que nous considérons comme usagers de la nappe.

SONES (PRÉLÈVEMENTS URBAINS) : NAPPE DE THIAROYE

Pour les besoins en eau potable des zones urbaines, la SONES effectue des prélèvements dans plusieurs nappes différentes (nappe Maastrichtienne, nappe des sables, la nappe des calcaires Lutétiens…). Elle fournit aussi une partie de l'eau potable aux maraîchers avec des quotas. Dans notre cas, nous nous intéressons aux prélèvements de la nappe superficielle de Thiaroye. La FIG. 18 montre l'évolution de l'exploitation de la nappe par la SONES de 2000 à 2014. Ainsi, l'exploitation de cette nappe pour les besoins en eau potable a décru au fil des années. Par ailleurs, il est prévu un arrêt de l'exploitation de la nappe de Thiaroye pour les besoins en eau potable (entretiens SONES, 2015). Nous considérons les prélèvements de l'année 2014.

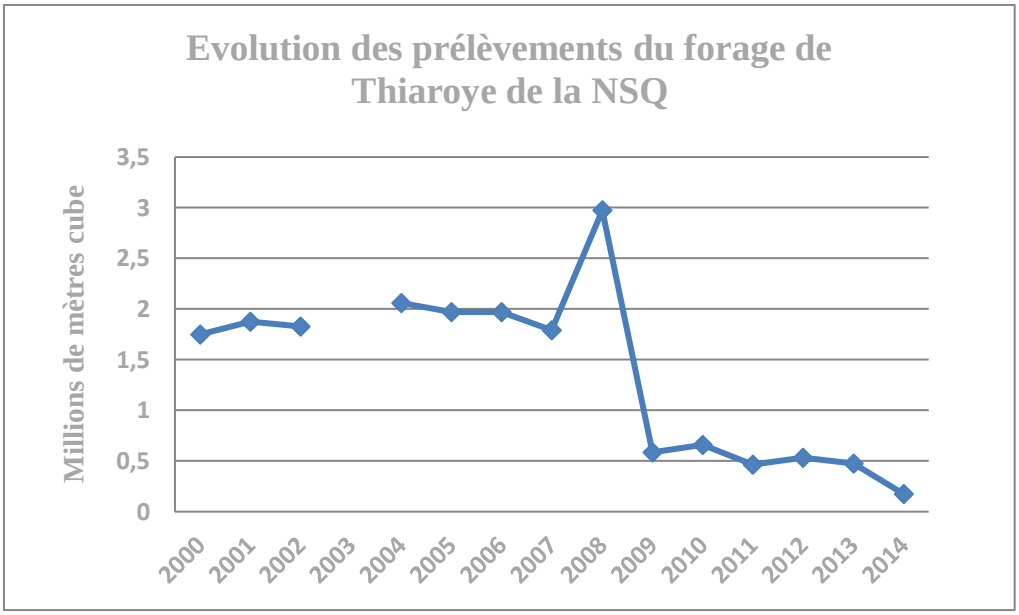

FIG. 18. — Évolution des prélèvements du forage de Thiaroye de la N.S.Q. Source données : SONES (2015).

PRÉLÈVEMENTS FORAGES RURAUX

Les forages ruraux sont principalement les forages de la *Direction de l'exploitation et de la maintenance* (D.E.M.). Nous considérons les forages de la nappe des sables du quaternaire pour les régions des *niayes* (Louga, Thiès, Saint-Louis), principalement la partie située dans les *niayes*. Le TABLEAU XI montre les niveaux de prélèvements annuels dans ces régions :

TABLEAU XI

Prélèvements annuels des forages ruraux dans les régions de Thiès, Louga, Saint-Louis

RÉGION	VOLUME (m3/an)
Thiès	6 263 934
Louga	27 626 724
Saint-Louis	6 877 502
Source données : DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE, 2015.	

Ces données concernent cependant les prélèvements de tous les forages se trouvant dans ces régions (*niayes* et hors *niayes*). Ainsi nous estimons les prélèvements des forages ruraux dans ces régions qui se situent dans les *niayes*.

Pour estimer ces données, nous considérons les données sur les populations des localités des différents forages qui proviennent du site du PEPAM [52] et les consommations d'eau par capita qui proviennent de la direction de l'hydraulique. Pour une localité donnée, les niveaux de prélèvements sont ainsi égaux à la consommation per capita multipliée par la taille de la population. Le TABLEAU XII résume les résultats des prélèvements annuels pour les trois régions.

52 — <**http://www.pepam.gouv.sn/index.php**>.

TABLEAU XII

Prélèvements annuels nappe des sables du quaternaire (N.S.Q.) dans les régions de Louga, Thiès, Saint-Louis (zone des *niayes*)

RÉGION	AQUIFÈRE	POPULATION DESSERVIE	PRÉLÈVEMENTS (m^3/an)
Louga	Quaternaire	11 675	1 027 400
Saint-Louis	Quaternaire	216	8 424
Thiès	Quaternaire	24 718	98 872
TOTAUX	Quaternaire	36 609	1 134 696

Source données : DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE (2015) et PEPAM (2015) (données obtenues en 2015).

LA POROSITÉ EFFICACE

D'après TINE (2004), la porosité est définit comme :

> *la capacité d'un milieu à contenir des vides (CASTANY, 1982) ménagés entre les particules solides non jointives constituant le réservoir. Elle est exprimée par le rapport du volume des vides (phase aqueuse (V_a) et phase gazeuse (V_w)) au volume total représentatif d'un échantillon (V_t).*

$$\eta = \frac{V_a + V_w}{V_t}$$

La porosité efficace [53] correspond à $\frac{V_a}{V_t}$ et nous renseigne sur la quantité d'éau utilisable (CASTANY, 1982) [54].

JOHNSON (1967) donne différentes valeurs de la porosité efficace pour différents types de sol.

Dans la littérature, les études de AGUIAR (2010), DASYLVA & COSANDEY (2005) et GAYE (1990) sur la nappe des sables du Quaternaire donnent des valeurs de la porosité efficace qui sont différentes : 25 % pour le premier, 15 % pour le second et 3,1 % pour le troisième. En croisant ces valeurs, nous choisissons celle de DASYLVA & COSANDEY (2005) qui semble plus cohérente avec les résultats de JOHNSON (1967).

53. — « Elle équivaut en pratique au coefficient d'emmagasinement d'un aquifère à nappe libre. Ce concept est dénommé aussi, suivant les auteurs : porosité effective (TISON, 1951), porosité de drainage (VACHAUD, 1968), porosité utile (MULLER-FEUGA, 1956), porosité dynamique (SCHOELLER, 1955), capacité d'écoulement (MULLER-FEUGA, 1960), capacité de libre écoulement (SCHOELLER, 1955), coefficient d'écoulement, coefficient de restitution, coefficient de stockage (RUBY, 1969). Absorption spécifique (FOURMARIER, 1939) ou capacité effective d'absorption (SCHOELLER, 1955) désignent le même concept, en considérant la quantité d'eau gravitaire à ajouter, au lieu de la quantité libérée par égouttage ». Voir : <**http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/FRDIC/DICPOROS.HTM**>.

54. — <**https://bnselim.wordpress.com/2011/08/01/aquifers-properties-specific-yield-and-specific-retention/**>.

Section 3 : Résultats et implications

Dans cette section, nous revenons d'abord sur l'effet de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation avant d'en analyser les implications possibles sur la production horticole.

Notre objectif premier étant de voir la disponibilité de l'eau d'irrigation par rapport à la variabilité des précipitations, nous utilisons les résultats du modèle hydro-économique pour cela. Selon SADOULET & DE JANVRY (1995), en termes d'analyses de politique, après la construction d'un modèle, il faut tout d'abord partir d'un scénario de référence qui pourra ensuite être comparé à des scenarios alternatifs. Ce principe s'applique à notre situation dans laquelle nous souhaitons voir l'effet de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation. Cela nous permettra de comparer la disponibilité de l'eau suivant les niveaux de précipitations dans les différents scénarios.

Dans la première sous-section, nous présentons tout d'abord le scénario de référence ou scénario de base. Ensuite, pour bien voir l'effet du climat sur la disponibilité de l'eau d'irrigation, nous comparerons les résultats de scénarios sec et humide aux résultats du scénario de base. D'un scénario à un autre, nous ne faisons varier que les niveaux de précipitations dans le modèle hydro-économique, les autres paramètres du modèle dans le TABLEAU XIII (présentés en détail dans la section sur les données) restent fixes.

TABLEAU XIII

Paramètres du modèle hydro-économique

PARAMÈTRES DU MODÈLE HYDRO-ÉCONOMIQUE	VALEUR	SOURCE
Taux d'infiltration	0,4 %	TINE (2004)
Élasticité fonction de demande	- 0,442	Notre modèle production
Constante fonction de demande	8 196,4	Notre modèle production
Taux d'intérêt	7,5 %	Taux C.N.C.A.S. (FAYE *et al.*, 2007)
Porosité efficace	0,15	DASYLVA & COSANDEY (2005)
Superficie totale irriguée dans la zone des *Niayes*	10 000 ha	FAYE *et al.* (2007)
Niveau nappe	7,05 m	Données d'enquête, 2014
Extraction d'eau des autres usagers	1 374 495 m^3	Direction de l'hydraulique (2015) Sones (2015)
Superficie couverte par la nappe des sables	2 300 km^2	AGUIAR *et al.* (2010)

Source : Auteur à partir de données primaires et secondaires

Dans la deuxième sous-section, nous utilisons les résultats du modèle hydro-économique dans le sous-modèle production pour analyser les implications de différents niveaux de disponibilité de l'eau d'irrigation sur les comportements des producteurs, notamment en termes d'allocation des superficies cultivées entre les différentes spéculations, des revenus nets des producteurs.

Ensuite, nous ferons une analyse de sensibilité pour voir la robustesse des résultats. Enfin cette section discutera d'instruments de gestion de la ressource en eau d'irrigation avant de discuter des limites de notre approche.

3.1. Résultats sur les scénarios pluviométriques

La FIG. 19 montre les résultats de simulation pour la pluviométrie de référence comparée à la série de pluviométrie observée.

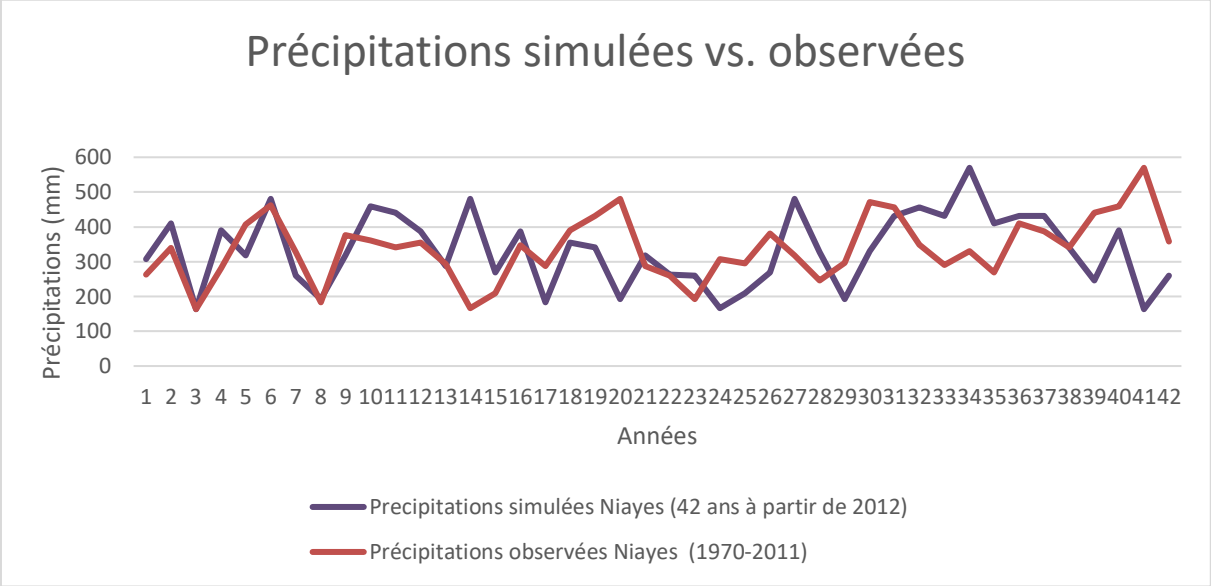

FIG. 19. — Scénario pluviométrique de référence simulé comparé à la série pluviométrique observée.

SAFOUANE *et al*. (2016) jugent la fiabilité de leur modèle de simulation stochastique en analysant sa capacité à reproduire des caractéristiques statistiques comparables à celles des séries historiques. Ces caractéristiques étant essentiellement la moyenne et le coefficient de variation (SAFOUANE *et al*., 2016), nous avons également comparé ces caractéristiques pour les deux séries, simulée et observée (TABLEAU XIV). Nous avons par ailleurs comparé la distribution des deux séries (voir figure en annexe 4).

TABLEAU XIV

Comparaison caractéristiques statistiques de la série de pluviométrie simulée et celle observée

SÉRIE PLUVIOMÉTRIQUE	MOYENNE	COEFFICIENT DE VARIATION
Pluviométrie simulée (42 ans à partir de 2012)	333,10	0,31
Pluviométrie observée (1970-2011)	337,55	0,27

Source : FAYE (Amy), 2018.

Nous avons simulé une série de précipitations sur une période de quarante-deux ans à partir de 2012. Cependant, considérer une si longue période aurait nécessité de faire des projections sur d'autres variables de nos modèles car beaucoup de paramètres sont susceptibles de changer sur de longues périodes. En effet, TANAKA *et al*. (2006) soulignent l'importance de considérer d'autres changements majeurs tels que l'évolution de la population pour des études sur le changement climatique sur le long terme. Ainsi, nous choisissons de limiter nos analyses sur une période de dix ans à partir de 2014, année de collecte des données primaires.

La FIG. 20 montre les résultats des scénarios de précipitations de base et des scénarios sec et humide sur la période de dix ans que nous considérons pour nos analyses.

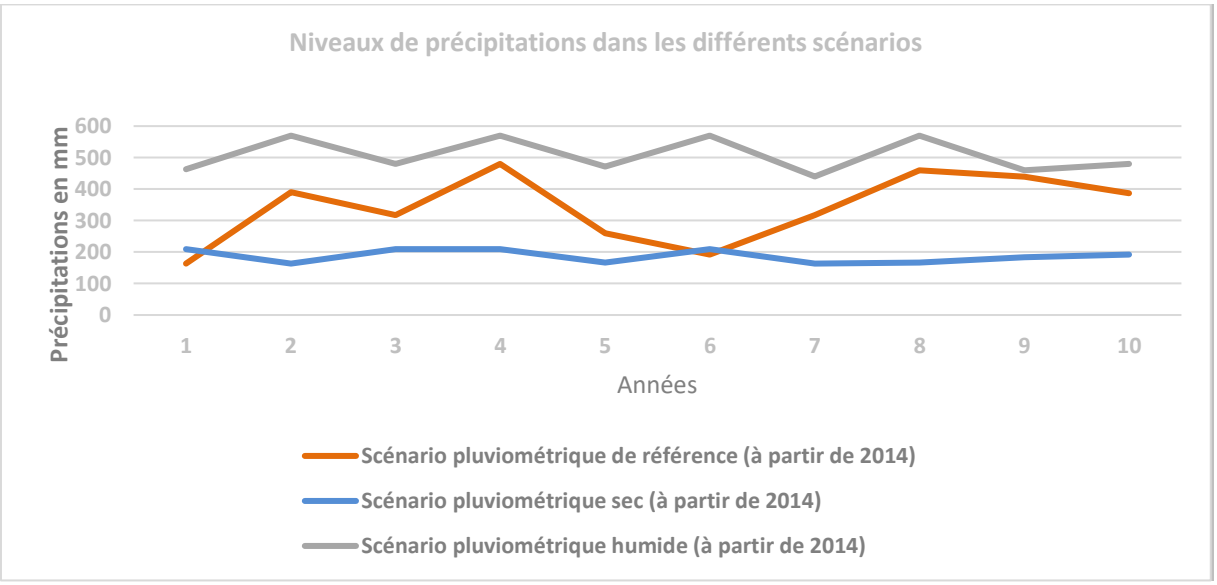

FIG. 20. — Résultats de scénarios de précipitations sur dix ans à partir de 2014. Source données : simulations auteur à partir de données ANACIM.

Les courbes bleue, orange et grise représentent respectivement les scénarios sec (en moyenne 187,1 mm par an), de base (en moyenne 340,6 mm par an) et humide (en moyenne 507,17 mm par an). Nous notons une baisse moyenne d'environ 37 % des précipitations en passant du scénario de base au scénario sec et une hausse d'environ 67 % en passant du scénario de base au scénario humide.

Ces scénarios sont intégrés au modèle hydro-économique pour simuler la disponibilité de l'eau d'irrigation sur une période de dix ans à partir de 2014.

3.2. Résultats sur la disponibilité de l'eau d'irrigation selon les scénarios pluviométriques considérés

3.2.1. Résultats de disponibilité de l'eau avec le scénario pluviométrique de référence : une recharge pluviométrique insuffisante pour couvrir les extractions d'eau des producteurs

Nous jugeons important de voir les résultats du scénario de référence avant de le comparer aux résultats des scénarios alternatifs. La FIG. 21 montre les résultats du niveau de la nappe dans le scénario de référence et pour le cas statique.

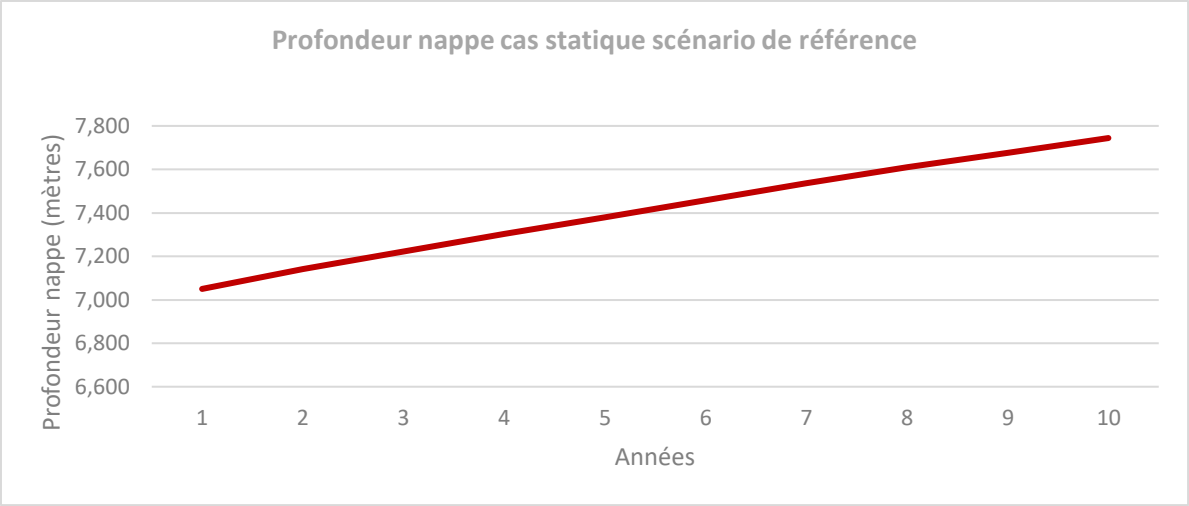

FIG. 21. — Profondeur nappe cas statique scénario de référence. Source: résultats auteur à partir de données d'enquête de thèse.

Cette figure montre que la ressource se raréfie dans le temps. Cela se constate par une nappe de plus en plus profonde. Ainsi, trouvons une hausse de 0,69 mètres de la profondeur de la nappe entre la première et la dernière année de la période de dix ans considérée.

Ce résultat suggère qu'avec des niveaux de précipitations d'environ 340,6 mm sur la période de dix ans, la recharge pluviométrique ne couvre pas entièrement les prélèvements.

L'équation de la dynamique de la nappe nous permet de mieux comprendre cela :

$$(7) \qquad (x_{t+1} = x_t + \frac{w_{agt}*10^{-4}}{As_y} - \frac{\beta w_{agt}*10^{-4}}{As_y} + \frac{1}{As_y} w_{autrest} * 10^{-4} - \frac{\propto P_t*10^{-3}}{s_y})$$

Les prélèvements des autres usagers étant considérés comme fixes, la variation de la profondeur de la nappe d'une année t à une année t + 1 dépend des prélèvements des producteurs et des niveaux de précipitation à l'année t. Des prélèvements élevés en année t signifient une nappe plus profonde en t + 1 sauf en cas de recharge pluviométrique suffisamment importante pour couvrir les extractions des producteurs.

La raréfaction de la ressource au fil des années se traduit par une baisse des prélèvements des producteurs d'année en année (FIG. 22) qui se traduit à son tour par une diminution des prélèvements d'environ 6,010 millions de mètres cubes d'eau. Ainsi, même une légère hausse de la profondeur de la nappe se traduit en une baisse relativement importante des prélèvements. Ce résultats suggèrent que si la tendance à la hausse de la profondeur de la nappe continue il deviendra difficile pour les producteurs d'accéder à l'eau, d'autant que pour plus de la majorité des producteurs de notre échantillon (60,16 %) l'exhaure est manuelle.

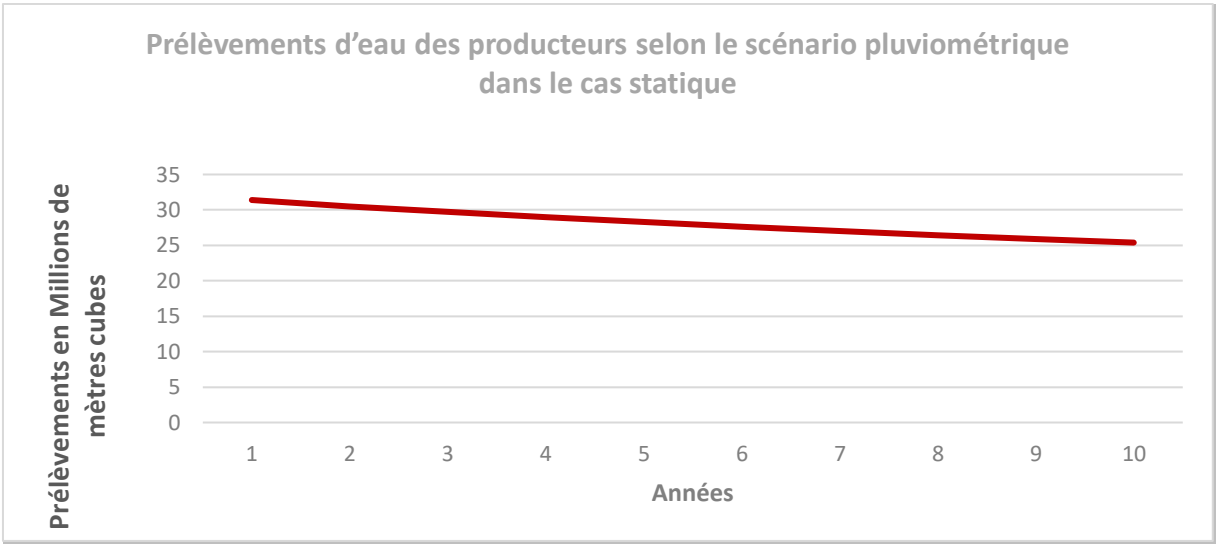

FIG. 22. — Prélèvements d'eau des producteurs cas statique scénario de référence. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse.

Les tableaux A1, A2 et A3 dans l'annexe 1 récapitulent les résultats présentés. La différence entre le cas statique et le cas dynamique n'est pas très importante comme le montre les tableaux A1 et A2 en annexe 1. Cette petite différence entre cas statique et cas dynamique s'apparente à celui de GISSER & SANCHEZ (1980), discuté dans le chapitre 2 qui trouvent une différence presque insignifiante entre le cas myope et le cas dynamique. Cependant comme l'a évoqué KOUNDOURI (2004), ce résultat dépend des paramètres du modèle tels que le taux d'infiltration, le taux d'intérêt. L'analyse de sensibilité que nous mènerons nous permettra de voir l'effet de ces paramètres sur les résultats. La différence entre ces deux cas n'étant pas très importante, la comparaison des résultats des différents scénarios se fera principalement dans le cas statique.

3.2.2. Comparaison entre scénario de référence et autres scénarios pluviométriques : une disponibilité de l'eau d'irrigation légèrement réduite selon les scénarios

La FIG. 23 montre les niveaux de la nappe dans les différents scénarios pluviométriques dans le cas statique.

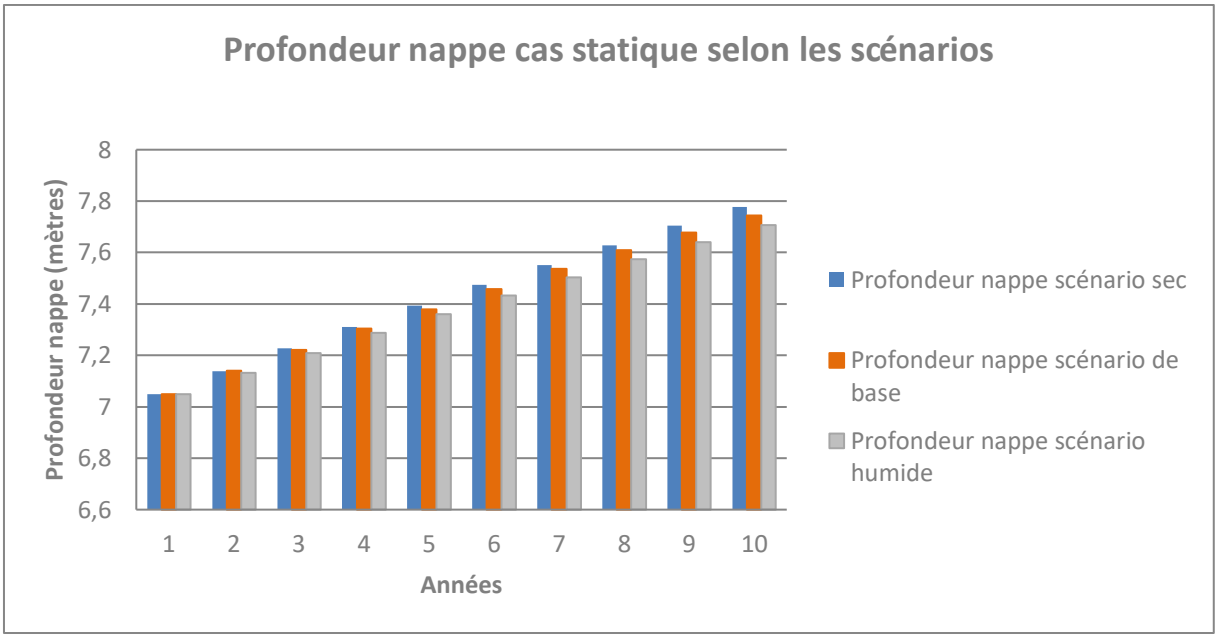

FIG. 23. — Profondeur de la nappe selon les scénarios pluviométriques. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse.

Cette figure montre que, comparé aux précipitations du scénario de référence (barre orange) :

— la nappe est légèrement plus profonde dans le scénario de précipitations sèches (barre bleue) ;

— elle est légèrement moins profonde dans le scénario de précipitations humides (barre grise).

Cette différence entre le scénario de base et les autres scénarios se creuse davantage au fil des années (en moyenne 0,02 % en première année du scénario de réfécence au scénario sec (0,1 % du scénario de réfécence au scénario humide) et à 0,5 % la dernière année pour les deux scénarios alternatifs). Cela suggère qu'en considérant une période plus longue l'on verrait plus l'effet du climat.

La FIG. 24 montre les prélèvements des producteurs dans les différents scénarios pluviométriques dans le cas statique.

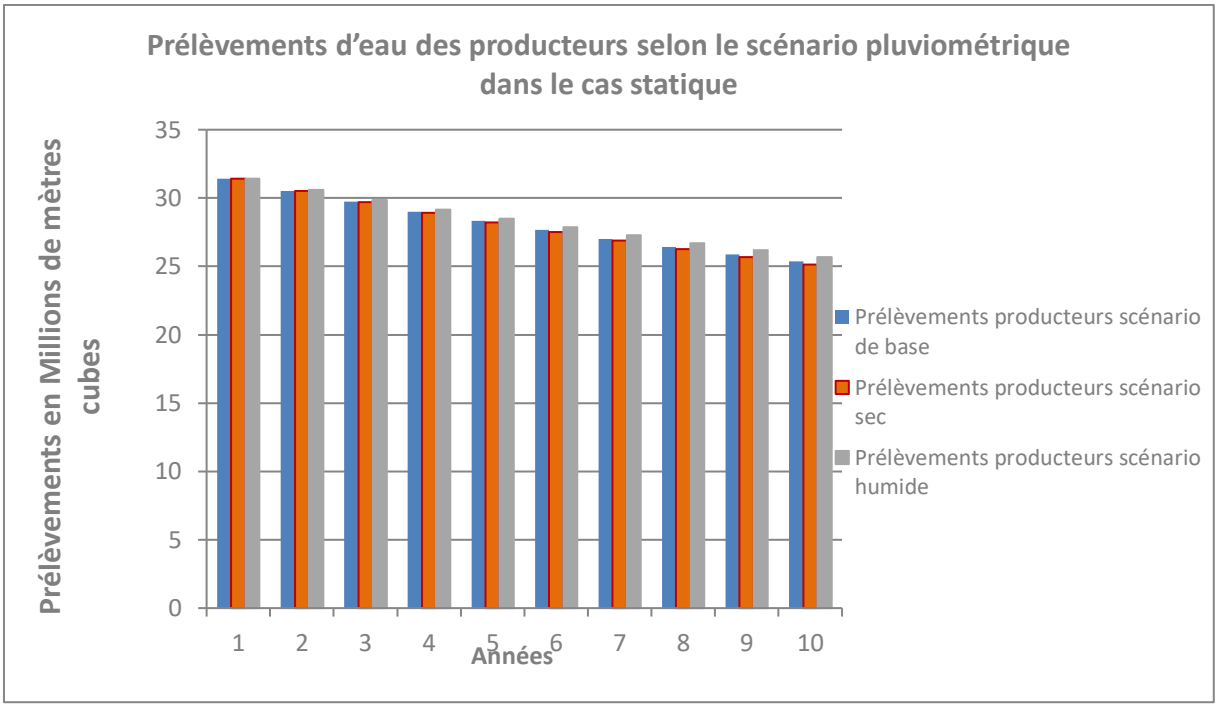

FIG. 24. — Prélèvements des producteurs selon les scénarios. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse.

Nous remarquons que comparé au scénario de référence :

— les prélèvements des producteurs sont légèrement moins importants dans le scénario sec ;

— et légèrement plus importants dans le scénario humide.

Comme pour la profondeur de la nappe, la différence entre le scénario de base et les autres scénarios augmente au fil des années (environ 0,000 % la première année du scénario de réfécence au scénario sec (0,001 % du scénario de réfécence au scénario humide) et 1 % la dernière année pour les deux scénarios en valeur absolue).

Les tableaux A1 et A2 en annexe 1 récapitulent les résultats.

Ces résultats suggèrent que des précipitations moins importantes se traduisent par une nappe plus profonde et donc une ressource moins disponible. Lorsque la ressource se raréfie, les prélèvements des producteurs deviennent moins importants. La disponibilité de l'eau d'irrigation est par conséquent réduite en période sèche et cette réduction augmente avec la sévérité de la sécheresse. Ce résultat est également observé dans le cas dynamique (voir tableaux A1 et A2 dans l'annexe 1). Cela était prévisible ; cependant, nous nous attendions à observer une différence plus importante entre le scénario de référence et les autres.

Par ailleurs, nous remarquons également une tendance à la hausse de la profondeur de la nappe sur la période de dix ans dans les scénarios alternatifs avec une hausse de la profondeur d'environ 0,73 m pour le scénario sec et 0,66 m pour le scénario humide (comparé au scénario de référence avec 0,69 m). Quant aux prélèvements ils baissent de 6,255 millions de mètres cubes pour le cas sec et 5,730 millions de mètres cubes pour le cas humide (comparé au scénario de référence avec 6,010 millions).

Ainsi, l'exploitation de la nappe semble dépasser la recharge pluviométrique même avec des niveaux de précipitation d'environ 500 mm en moyenne sur dix ans. Les résultats montrent cependant que comparé au scénario de base, la raréfaction de la ressource est exacerbée dans le scénario sec et atténuée dans le scénario humide.

3.2.3. Comparaison des résultats avec d'autres études antérieures dans la zone

Nous comparons les résultats des différents scénarios avec les résultats de recherches effectuées sur des périodes antérieures et ayant utilisé d'autres approches dans la zone des *niayes*.

L'effet de ressource plus ou moins disponible selon la pluviométrie est conforme aux résultats de AGUIAR *et al*. (2009, 2010) qui étudient l'évolution interannuelle de la nappe des sables du Quaternaire entre 1958 et 2002 et comparent l'évolution du niveau durant la période humide (1958-1970) et celui durant la période sèche (à partir de 1972) dans les localités de Touba Geune, Bendioug, Kab Gaye, Ndeune et Lac Mekhé. Ils trouvent que le niveau de la nappe est resté élevé durant la période humide (avant les années 1970) et observent les baisses du niveau de la nappe les plus importantes durant les sécheresses des années 1970 et 1980. Ces baisses sont plus prononcées dans le centre à Kab Gaye (0,84 m en juin) et dans le sud à Lac Mekhé (1,03 m). Durant la période sèche, les précipitations s'élevaient en moyenne à 342 mm alors qu'elles s'élevaient à 574 mm en moyenne avant la période de sécheresse (soit 40 % de baisse) (DASYLVA, 2012).

Concernant la recharge insuffisante, DASYLVA & COSANDNEY (2005) analysent le bilan hydrique de la nappe des sables, dans les *niayes* de Dakar, sous différents scénarios pluviométriques et montrent qu'avec une pluviométrie moyenne ou déficitaire, le bilan hydrique de la nappe est négatif et ne devient positif qu'à partir d'une pluviométrie excédentaire d'en moyenne 700 mm, ce qui est au-dessus de la moyenne des périodes avant la sécheresse (574 mm en moyenne d'après DASYLVA, 2012). Ainsi, ils constatent que « la recharge est insuffisante pour assurer une ré-alimentation efficace de la nappe lorsque les précipitations annuelles sont inférieures à la décennale humide » (avant 1970).

Dans notre cas, nous trouvons que même dans le scénario humide (environ 507 mm), la ressource se raréfie.

Concernant l'amplitude de la hausse de la profondeur, AGUIAR *et al*. (2010) montrent, sur la période 1958-1994, que la nappe se rabat de près de 0,51 m en moyenne tous les dix ans. Nos résultats montrent que la nappe continuera, en moyenne, à baisser de la même amplitude ou plus dépendant des niveaux de précipitations sur une période de dix ans donnée.

Nos résultats ne sont donc pas en contradiction avec ceux trouvés dans la zone des *niayes* dans le passé. Cependant, l'effet du climat est moins prononcé dans nos résultats.

Cette baisse du niveau de la nappe pourrait avoir des implications sur la qualité de l'eau. En effet, la zone des *niayes* est une zone côtière. Or, avec le changement climatique, il est prévu, sur le littoral sénégalais une élévation du niveau des mers « de 20 cm d'ici 2030 et de 80 cm d'ici 2080 » comparée à « une hausse de seulement 3 cm entre 1990 et 2010 » (BANQUE MONDIALE, 2014). Une baisse continue du niveau de la nappe d'en moyenne 0,60 m

sur dix ans augmente le risque d'intrusion saline qui serait préjudiciable à la production horticole.

Notre approche nous a permis de voir les effets de la disponibilité de la ressource sur les comportements de prélèvements d'eau des producteurs. Elle nous permet également de quantifier l'effet que cela peut avoir sur la production horticole et de tester quelques options de gestion possibles de la ressource. C'est l'objet de la section suivante.

3.3. Implications et discussion des résultats

3.3.1. Implications de la baisse de la disponibilité de l'eau sur la production horticole

Dans cette section, nous quantifions les implications possibles de nos résultats sur le comportement des producteurs par rapport à leurs activités de production. Pour cela, nous intégrons les prélèvements des producteurs sur la période de dix ans pour chaque scénario pluviométrique dans le modèle production afin de comparer les réponses possibles des producteurs sous différents niveaux de disponibilité de l'eau d'irrigation.

Notre modèle producteur étant calibré, lorsque nous introduisons les différents niveaux de disponibilité de l'eau d'irrigation dans le modèle, nous supposons que ce dernier reflète les stratégies d'adaptation des producteurs. Ce raisonnement est en cohérence avec les caractéristiques des modèles de programmation mathématique qui adoptent une approche positive comme nous l'avons expliqué dans la section 2 du chapitre 2.

Pour analyser les implications (ou les réactions des producteurs à une baisse de la disponibilité de l'eau), nous utilisons les résultats du cas dynamique car la différence entre les cas statique et dynamique n'est pas très grande (voir tableaux A1 et A2 dans l'annexe 1). En effet, les prélèvements des producteurs sont légèrement moins importants dans ce cas, ainsi nous préférons le considérer pour éviter de surestimer les implications.

Les résultats montrent, pour tous les scénarios, une légère baisse des superficies allouées aux spéculations avec des baisses moins importantes lorsque l'on passe du scénario de référence au scénario humide et des baisses plus importantes lorsque l'on passe du scénario de référence au scénario sec.

Le TABLEAU XV montre les pourcentages de baisse moyenne des superficies des différentes spéculations dans les différents scénarios pluviométriques sur la période de 10 ans.

TABLEAU XV

Différence d'allocation des superficies entre l'année de base (2014) et l'année finale (2023) sous différents scénarios climatiques

SPÉCULATIONS	SUPERFICIES INITIALES SIMULÉES (t=1[55])	BAISSE DES SUPERFICIES *		
		SCÉNARIO DE BASE (~340,6mm/an)	*SCÉNARIO SEC* (~187mm/an)	*SCÉNARIO HUMIDE* (~507) mm/an)
Oignon	0,73	-18,52	-19	-17,77
Carotte	0,51	-50,56	-51,298	-49,4
Chou pomme	0,46	-3,04	-3,11	-2,94
Poivron	0,27	-5,42	-5,547	-5,23
Aubergine *douce*	0,40	-17,69	-18,161	-16,977
Aubergine ***amère***	0,41	-10,38	-10,633	-9,98
Tomate	0,46	-2,25	-2,298	-2,17

***** % entre t = 1 (2014) et t = 10 (2023) dans le cas dynamique**.**
Source : Résultats FAYE (Amy), 2018, à partir de données d'enquête de thèse.

Cette diminution des superficies est la réponse des producteurs face à la baisse des prélèvements au fil des années observées sur les résultats de tous les scénarios. Ainsi, la disponibilité de l'eau affecterait les décisions relatives à l'allocation des terres aux différentes spéculations.

Une différence notable est aussi observée sur l'amplitude de la baisse des superficies d'une spéculation à une autre. Pour mieux comprendre les raisons de cette différence, nous intégrons les besoins en eau des spéculations ainsi que leurs revenus nets (TABLEAU XVI).

TABLEAU XVI

Comparaison des revenus nets des spéculations et de leurs besoins en eau

SPÉCULATIONS	REVENUS NETS À L'HECTARE *	BESOINS EN EAU D'IRRIGATION **
Carotte	804 731,6	1 650,0
Tomate	1 014 908,1	451,5
Chou pomme	1 195 946,1	607,2
Oignon	1 669 187,4	703,2
Aubergine *douce*	1 679 651,0	1 125,8
Aubergine ***amère***	2 327 635,3	1 125,8
Poivron	4 631 558,4	1 201,0

** en francs C.F.A. à l'hectare* (fcfa/ha) *; ** en millimètre par hectare* (mm/ha)*.*
Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse

Ce tableau suggère que de manière générale les spéculations les plus rémunératrices et/ou qui ont des besoins en eau pas très élevés ont une baisse de superficie moins importante. Les spéculations qui sont sujettes à une baisse plus importante de leur superficie sont la carotte, l'oignon, l'aubergine douce et l'aubergine amère. La carotte est la spéculation la plus demandant en eau et ses revenus nets sont les plus faibles. Les aubergines douce et amère

55. — Voir résultats de calibration dans l'annexe 1 pour comparer avec les superficies observées.

ont aussi des besoins en eau élevés. Des spéculations telles que le poivron sont plus rémunératrices que toutes les autres cultures. Par conséquent, même avec leurs besoins en eau élevés, leur baisse est largement inférieure à celle de la carotte et de l'aubergine douce par exemple.

Cette baisse de superficies se traduit par une baisse des revenus nets des producteurs avec de légères différences entre scénarios. Sur la période de dix ans, le profit du producteur passe de 5,515 193 millions de francs C.F.A. (revenu simulé par le modèle producteur la première année) à :

— 4,101 1 millions de francs C.F.A. (la dernière année) dans le scénario de base (soit une baisse de 25,6 %) ;
— 4,065 9 millions de francs C.F.A. dans le cas sec (soit une baisse de 26,3 %) ;
— 4,155 9 millions de francs C.F.A. dans le cas humide (soit une baisse de 24,6 %).

Si l'effet de rareté de la ressource observée persiste, cela pourrait avoir des répercussions sur la production horticole sur le long terme ; ce qui ne serait pas en faveur des producteurs et des ambitions politiques agricoles actuelles dans le sous-secteur de l'horticulture. Ces politiques devraient ainsi intégrer de meilleurs mécanismes de gouvernance des ressources en eau d'irrigation pour assurer leur disponibilité dans le long terme pour une production horticole durable dans les *niayes*. Elles devraient également investiguer les potentialités de développement de la production horticole dans les autres zones pour ménager la pression sur la ressource en eau dans les *niayes*.

3.3.2. Discussion sur ces implications et la non prise en compte de certaines stratégies d'adaptation

Ce type de résultat va dans le même sens que d'autres études sur l'adaptation à une baisse de la disponibilité de l'eau d'irrigation dans d'autres contextes. En Inde, SEKHRI (2011) analyse l'impact d'une baisse du niveau de la nappe et trouve qu'une baisse d'un mètre de la nappe sur une année entraîne une baisse de la production surtout pour les cultures demandant en eau. Dans le même sens, ESTEVE *et al*. (2015) utilisent un M.H.E. intégré et trouvent, en Espagne, que lorsque l'eau de surface disponible baisse face au changement climatique, les producteurs changent leur combinaison des spéculations et leurs revenus baissent. Par ailleurs, HEIDECKE (2009) montre, en analysant des données d'enquêtes, qu'au Maroc, en cas de pénurie d'eau (baisse de la nappe), la principale réaction des producteurs est de réduire les superficies cultivées.

Il convient cependant de noter que les seules stratégies permises dans notre modèle production sont la réduction des superficies cultivées et le changement de combinaison de spéculations (parmi les cultures prises en compte). Ces stratégies, ici incluses, supposent que lorsque la disponibilité de l'eau baisse, les producteurs se limitent aux quantités d'eau disponibles et s'adaptent en conséquence. Par exemple un producteur qui cultive un hectare d'oignon ne continuera pas à cultiver un hectare d'oignon lorsque l'eau disponible baisse ; mais il cultivera une superficie qu'il pourra irriguer avec l'eau disponible.

Or, d'après nos expériences de terrain et la littérature (HEIDECKE, 2009 ; SEKHRI, 2014), en plus des stratégies de baisse des superficies cultivées, le producteur peut également adopter d'autres stratégies qui lui permettent d'accéder à plus d'eau en augementant ses capacités d'exhaure et donc de continuer à cultiver les mêmes superficies (ou plus) qu'avant choc. En effet, HEIDECKE (2009) trouve qu'une autre réaction des producteurs est

d'augmenter l'usage de la nappe pour irrigation. Cela se reflète par l'augmentation du nombre de motopompes et la baisse des niveaux phréatiques dans les années de sécheresse. Dans le même sens, SEKHRI (2014) fait une étude comparative entre des villages avec différents niveaux de nappe en Inde et trouve que dans les villages qui font face à une baisse de la nappe, la première stratégie des producteurs est « d'intensifier le pompage en forant des puits plus profonds, en installant des pompes plus puissantes et en utilisant plus d'électricité » [56].

Notre modèle ne permet actuellement pas de prendre en compte ce type de stratégies d'adaptation qui nécessitent l'adoption de nouvelles technologies d'exhaure de l'eau. Le fait de ne pas les intégrer peut surestimer l'impact sur la production agricole. Cependant ces stratégies pourrait affecter négativement les revenus nets car elles ont des coûts. Il est donc difficile de se prononcer sur leur impact possible sur la production sans informations supplémentaires. Il faut également retenir que certaines stratégies qui permettent d'améliorer les possibilités d'accès à l'eau pourraient, en retour, affecter négativement la ressource. En effet :

> *l'investissement dans les technologies d'irrigation a des effets ambigus* [...]. *Les effets négatifs résultent du fait que les changements technologiques peuvent induire la culture nouvelles spéculations et augmenter la consommation totale d'eau.*
>
> BERBEL *et al*. (2007) [57]

Ainsi, la prise en compte d'autres stratégies d'adaptation que celles incluses nécessite des actions préalables. En termes de données, il faudrait des enquêtes complémentaires pour avoir des informations sur les stratégies, les types d'association de stratégies et leur coût. En termes de méthodologie, cela nécessiterait d'adopter une approche holistique qui permettrait d'endogéneiser l'eau disponible dans le modèle producteur. En effet, comme indiqué dans la section 3 du chapitre 2, dans l'approche modulaire (utilisée ici), les modèles communiquent par échange de variables. Chaque variable échangée est endogène dans le modèle de provenance mais exogène dans le modèle de destination. Ainsi, la disponibilité de l'eau est exogène dans le modèle sur la production. Par conséquent, le producteur n'a pas de contrôle sur l'eau disponible et n'a que l'option de consommer ce qui est disponible. Cette eau disponible ne pourrait être controlée que dans le modèle hydro-économique qui simule le comportement d'extraction mais n'intègre pas directement les pratiques agricoles.

Ceci constitue une limite supplémentaire aux approches modulaires en plus de celle discutée dans le chapitre 2 sur la revue de littérature. ESTEVE *et al*. (2015) font également face à ce type de problème. Ils utilisent une approche modulaire avec un modèle hydrologique combiné à un modèle économique représentant la production agricole ; ce qui les contraint à ne considérer que les stratégies liées à la combinaison des cultures [58] comme nous le faisons ici.

Toujours en termes de méthodologie, une fois l'approche holistique adoptée, il faudrait inclure dans le modèle le progrès technique en permettant la possibilité d'adopter de manière endogène une technologie d'exhaure avant de choisir la quantité d'eau à extraire (étant donnée la technologie choisie).

56 — Traduit de l'anglais par l'auteur (FAYE, 2018).

57. — Traduit de l'anglais par l'auteur (FAYE, 2018).

58. — ESTEVE *et al*. (2015) utilisent le terme *cropping pattern*.

3.4. Analyse de sensibilité

Dans cette section, nous menons une analyse de sensibilité pour voir comment nos résultats sur la disponibilité de l'eau changeraient suite à une modification de la valeur de certains paramètres. Comme l'a suggéré KOUNDOURI (2004), le taux d'infiltration, le facteur d'actualisation et la fonction de demande affectent les réusltats des modèles hydro-économiques. Ainsi, dans cette section, nous faisons une analyse de sensibilité sur le taux d'infiltration, le facteur d'actualisation, la fonction de demande.

Pour mieux voir l'effet de certains paramètres, nous considérons :

— une situation de base : pluviométrie de base ; taux d'infiltration ($\propto$=0,4%) ; taux d'intérêt (i =7,5%) ; demande en eau des producteurs initiale ($D(w) = 8196{,}4w^{-0{,}442}$) et les autres données du modèle présentées dans la section 2 et résumées dans le TABLEAU XIII de la section 3 ;

— des situations alternatives dans lesquelles nous modifions quelques paramètres ;

— analyse de sensibilité sur le taux d'infiltration des eaux de pluies: comment les résultats changent-ils ?

Pour cette analyse de sensibilité, nous nous proposons d'accroître graduellement la valeur du taux d'infiltration ($\propto$) afin de voir comment cela affecte les résultats. En nous basant sur le scénario de base, nous remarquons que le taux d'infiltration affecte la différence entre le début et la fin de la période. Plus il est important, plus les prélèvements en début et en fin de période se rapprochent. Il en est de même pour le niveau de la nappe. Cela signifie que la ressource se raréfie moins avec un taux d'infiltration des pluies plus élevé.

Un taux d'infiltration plus élevé affecte également la différence de disponibilité de l'eau entre les scénarios de base et sec. Cette dernière est plus importante avec un taux plus élevé.

Ces résultats sont prévisibles car la recharge croit avec le taux d'infiltration ($Recharge = \propto P$). Ainsi, plus il est élevé plus la recharge est importante. Dans le cas du scénario de base, les niveaux de précipitation sont plus élevés que dans le scénario sec. Ainsi, lorsque le taux d'infiltration augmente, l'écart entre les deux cas augmente davantage.

Le facteur d'actualisation affecte-t-il les résultats ?

Dans les problèmes d'optimisation dynamique, le facteur d'actualisation joue un rôle important (GRIFFIN, 2006 : chap. 3). GRIFFIN (2006 : chap. 3) stipule que de petits changements sur ce paramètre peuvent altérer les décisions des agents. Ainsi, il paraît important de voir quels effets son changement peut avoir. Afin de voir son effet sur les résultats, nous tournons le modèle avec un taux d'intérêt plus bas ($i = 2\,\%$) ; par conséquent, un facteur d'actualisation ($\frac{1}{(1+i)}$) plus élevé. Nous trouvons que les prélèvements des producteurs dans le cas dynamique diminuent à toutes les périodes. Ainsi, la différence entre les cas statique (myope) et dynamique devient plus importante. Cette baisse s'explique par le fait que plus le facteur d'actualisation est important, plus la valeur actuelle des revenus nets futurs est importante. Par conséquent, les producteurs veillent à la disponibilité de l'eau dans le futur qui devient de plus en plus valorisé avec ce facteur élevé. Cela réduit l'externalité de stock temporel. Les prélèvements étant moins important dans le cas dynamique, la disponibilité de l'eau est améliorée.

Nous remarquons aussi que le changement du taux d'intérêt n'a pas d'impact significatif sur les différences entre les scénarios de base et sec.

Élasticité de la fonction de demande en eau des producteurs

Nous essayons également de voir comment l'élasticité de la fonction de demande affecte les résultats en imposant une élasticité de - 0,15 et une élasticité de - 0,80. Nous remarquons que plus la demande est inélastique (l'élasticité tend vers 0 en valeur absolue) plus la différence entre les prélèvements de la première année et de la dernière année est grande (la tendance à la baisse reste inchangée).

Les analyses de sensibilité montrent que le choix du taux d'infiltration des eaux de pluies est un élément important pour analyser l'effet de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation provenant des ressources en eau souterraines dans les *niayes*. En effet, plus il est important, plus la différence entre les scénarios pluviométriques est importante.

Les autres éléments (facteur d'actualisation et demande en eau) impactent davantage le comportement de prélèvement d'eau des producteurs et par là un peu la profondeur de la nappe mais n'affectent pas vraiment les différences de disponibilité d'eau entre scénarios pluviométriques ni les tendances des résultats. Ces résultats confirment l'obervation de KOUNDOURI (2004).

3.5. De la nécessité de gérer la ressource en eau : est et discussion de quelques instruments de gestion de la ressource en eau proposés par la théorie économique

Comme nos résultats le montrent, dans les *niayes*, la ressource en eau se raréfie dans le temps à cause d'une recharge qui, du fait de sa dépendance aux précipitations insuffisantes, ne suffit pas pour couvrir les prélèvements. Ainsi, le renforcement des mécanismes de gestion semble nécessaire pour une meilleure disponibilité de l'eau d'irrigation dans le long terme dans un contexte où la vision agricole est d'assurer l'autosuffisance en productions horticoles et la conquête des marchés à l'international. Nous sommes, par ailleurs dans un contexte de hausse de la population et donc des autres usages de la ressource. Cela suggère qu'il faut réfléchir à des options de gestion de la ressource afin de la rendre disponible durablement pour l'irrigation des produits horticoles et les autres usagers.

Notons que l'obectif de cette thèse était surtout de faire une analyse ex ante de l'impact de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation et d'en analyser les implications possibles sur la production horticole mais également les implications possibles en termes de gestion de la ressource en eau. L'analyse de la gestion des ressources en eau requiert cependant plus d'espace que ne lui procure cette thèse et constitue un objet d'étude en soi car nécessite une analyse multidimensionnelle et la mobilisation d'autres outils en complément de ceux utilisés dans cette thèse (voir discussions ci-dessous).

Ainsi, en raison des limites que nous imposent notre approche méthodologique, dans cette section, nous amorçons la réflexion sur la gestion de la ressource en eau pour l'irrigation, la nappe des sables du quaternaire. Pour cela, nous testons et discutons quelques mesures de gestion des ressources en eau souterraines utilisées pour l'agriculture.

Suivant le même raisonnement que dans la section 3.1.3., nous utilisons les résultats du cas dynamique pour analyser les instruments de gestion et le scenario de référence.

Options politiques pour une amélioration de la disponibilité de l'eau d'irrigation

En économie, la littérature sur la gestion des ressources en eau (OSTROM, 1990, 2010 ; GRIFFIN, 2012 ; O.E.C.D., 2015 ; MSANGI & CLINE, 2016) préconise différentes options pour améliorer la disponibilité de la ressource dans le temps pour les différents usagers. Ces options peuvent concerner la partie demande (extractions) ou la partie offre (recharge) ou les deux. Du côté de la demande, les instruments de politiques de gestion de l'eau pour un usage rationnel sont : une politique de tarification de l'eau (*e. g.* taxes sur les prélèvements [*water pricing policies*]), sur les quantités (quotas), un système de gestion collectif, la mise en place d'un marché d'échange d'eau, etc. (BROWN & DEACON, 1972, cités *in* GISSER & SANCHEZ, 1980 ; OSTROM, 1990 ; GRIFFIN, 2006 ; HUANG *et al.*, 2006 ; MSANGI, 2008 ; OSTROM, 2010). Ces mesures, si elles sont bien faites et bien implémentées peuvent inciter à un usage raisonnable de la ressource. Du côté de l'offre les instruments consistent principalement à supplémenter la recharge.

Notre méthodologie s'incrit dans le cadre de l'économie néoclassique et n'intègre pas les aspects institutionnels. Elle ne nous permet pas de tester l'ensemble de ces options de gestion, leur faisabilité et leurs effets possibles sur la ressource, les producteurs et la production horticole dans les *niayes*. Cependant, nous discutons les options que nous ne testons pas.

Notre approche méthodologique nous permet de tester principalement une politique sur les prix en imposant une taxe volumétrique aux producteurs qui sont les principaux utilisateurs de la ressource. Nous pourrions également tester une politique de quotas mais cela mènerait aux mêmes résultats, qu'une taxe en termes de baisse des quantités prélevées. Nous ne la testons donc pas. Il convient cependant de noter que le quota peut avoir moins d'effets négatifs sur les revenus des producteurs. Par ailleurs, des études empiriques montrent qu'une taxe pourrait provoquer plus de réticence de la part des producteurs qu'un quotas (MONTGINOUL & RINAUDO, 2009). Aussi, ces deux options pourraient être difficile à implémenter.

Concernant les marchés d'eau, ils ne sont possibles que lorsque les utilisateurs sont dotés de droits de propriété sur la ressource (GRIFFIN, 2006 : chap. 4) qu'ils peuvent ensuite échanger. Ce type de solution pourrait s'avérer difficile à appliquer dans le cadre des *niayes*.

Pour ce qui est du système de gestion collectif, nous ne pouvons pas le tester ici car nécessite la prise en compte de l'ensemble des parties prenantes, leurs interactions et les aspects liés au cadre institutionnel qui ne sont pas pris en compte dans notre approche. L'action collective, qui a beaucoup été analysé en nouvelle économie institutionnelle, constitue cependant, une option qui mérite d'être explorée. OSTROM a effectué des travaux remarquables sur ce mode de gestion dans son ouvrage de référence sur la gouvernance des ressources communes intitulé *Governing the commons, The Evolution of Institutions for*

Collective Action et publié en 1990. Dans cet ouvrage, elle propose huit principes pour une réussite d'une gestion collective des biens communs (*Common Property Resources* [CPR]) ; d'autres chercheurs tels que MEINZEN-DICK *et al*. (2017) utilisent des jeux expérimentaux pour évaluer, entre autres, la disposition des parties prenantes à participer à l'action collective pour une meilleure gestion des ressources en eau souterraines.

Il est important de souligner que toute intervention pour gérer la ressource à des coûts. TIETENBERG & LEWIS (2012 : chap. 2) soutiennent que tout mécanisme de correction inclus des coûts de transactions et que si ces coûts sont élevés alors que les bénéfices sont faibles, cette intervention ne doit pas être entreprise. Ainsi, toute intervention (aussi bien du côté de l'offre que du côté de la demande) pour la gestion de la ressource doit être guidée par une analyse coût-bénéfice rigoureuse.

INSTUMENTS DE POLITIQUES TESTÉS

Du côté de la demande, les extractions d'eau peuvent être contrôlées en imposant une taxe aux utilisateurs afin de les pousser à adopter un comportement qui préserve la ressource dans le temps. Dans notre cas, nous imposons aux producteurs, de manière progressive, une taxe ad valorem proportionnelle à la quantité d'eau qu'ils extraient. Les niveaux de taxe imposés varient entre 0,1 franc C.F.A. et 0,2 franc C.F.A. par mètre cube extrait.

La mise en place d'une taxe aura un impact sur la ressource et un impact sur la production agricole. Dans ce qui suit, nous verrons les deux types d'implications d'une taxe.

L'équation suivante montre la fonction de profit avec la taxe :

$$\pi(x_t, w_{ag,t}) = S_{irr}B(w_{ag,t}) - C(w_{ag,t}, x_t) - \tau w_{ag,t}$$

L'IMPACT DE LA TAXE SUR LA RESSOURCE

La FIG. 25 et la FIG. 26 montrent les résultats du niveau de la nappe et des prélèvements selon différents niveaux de taxe. Nos résultats montrent que plus la taxe imposée est élevée, moins sont importants les prélèvements et la profondeur de la nappe se stabilise voire diminue.

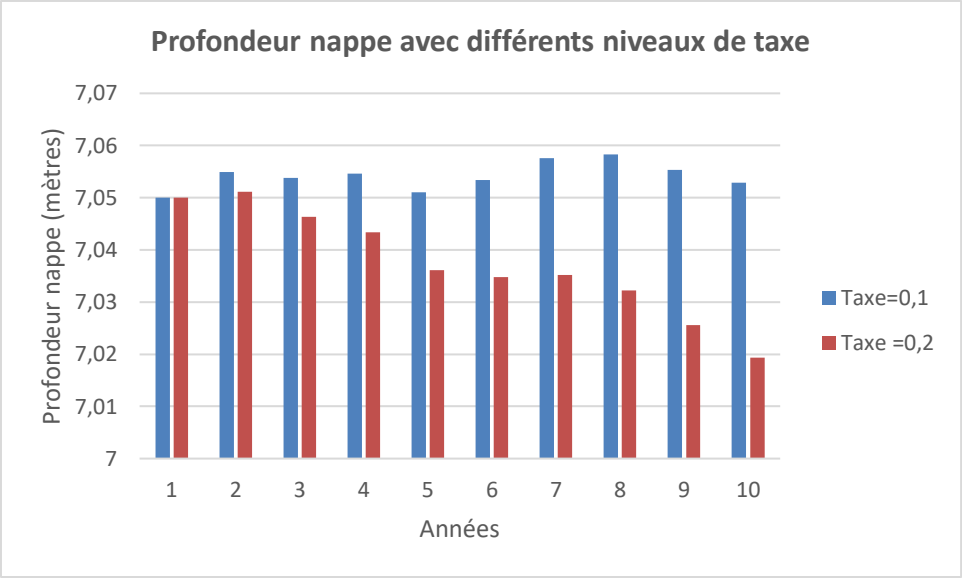

FIG. 25. — Niveau nappe avec différentes taxes. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse.

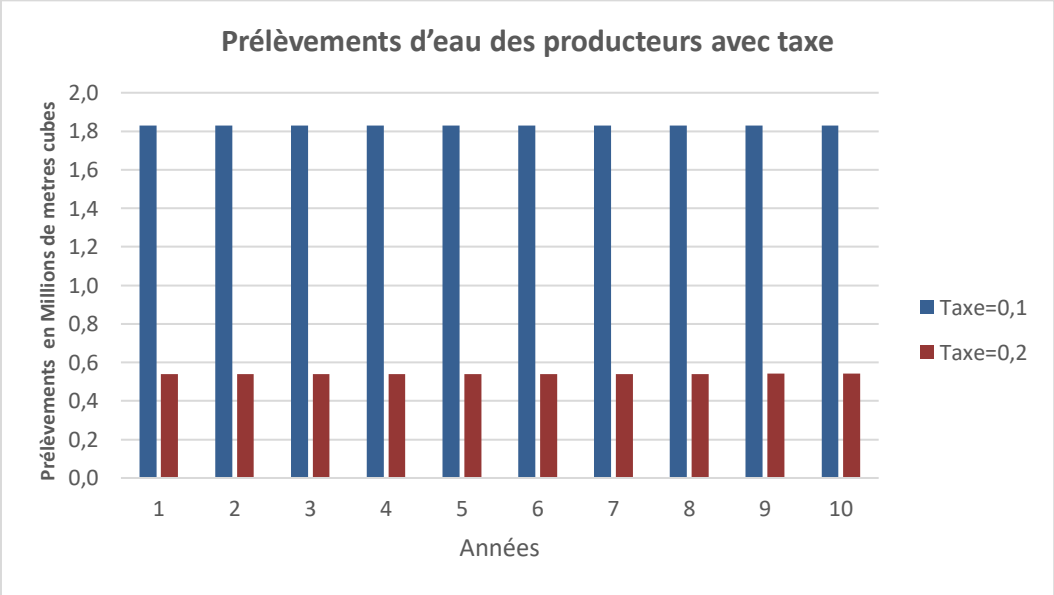

FIG. 26. — Prélèvements d'eau des producteurs avec différentes taxes. Source données : Simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse.

Le niveau de taxe qui pousserait à un meilleur usage de la ressource est relativement faible (à partir de 0,1 franc C.F.A./m^3). En dessous de ce niveau, la taxe n'a pas d'effet considérable sur la demande en eau. Cependant, ce niveau se traduit par une baisse importante des prélèvements annuels des producteurs comparé à la situation sans taxe comme le montre la FIG. 26.

Imposer une telle taxe (de même qu'imposer un quota sur les extractions) nécessiterait d'avoir des données exactes sur les prélèvements des producteurs, ce qui n'est pas encore bien documenté dans la zone des *niayes*. Ainsi, la première étape vers une meilleure gestion de la ressource en eau doit intégrer la mesure des extractions d'eau des producteurs.

IMPACT DE LA TAXE SUR LES PRODUCTEURS

La taxe a pour effet une réduction non négligeable des superficies allouées aux différentes spéculations avec des baisses plus importantes pour les spéculations à faible revenu telles que la carotte qui pourrait être abandonnée (FIG. 27). Ces baisses peuvent aller jusqu'à plus de la moitié de la superficie initialement utilisée pour certaines spéculations (FIG. 27).

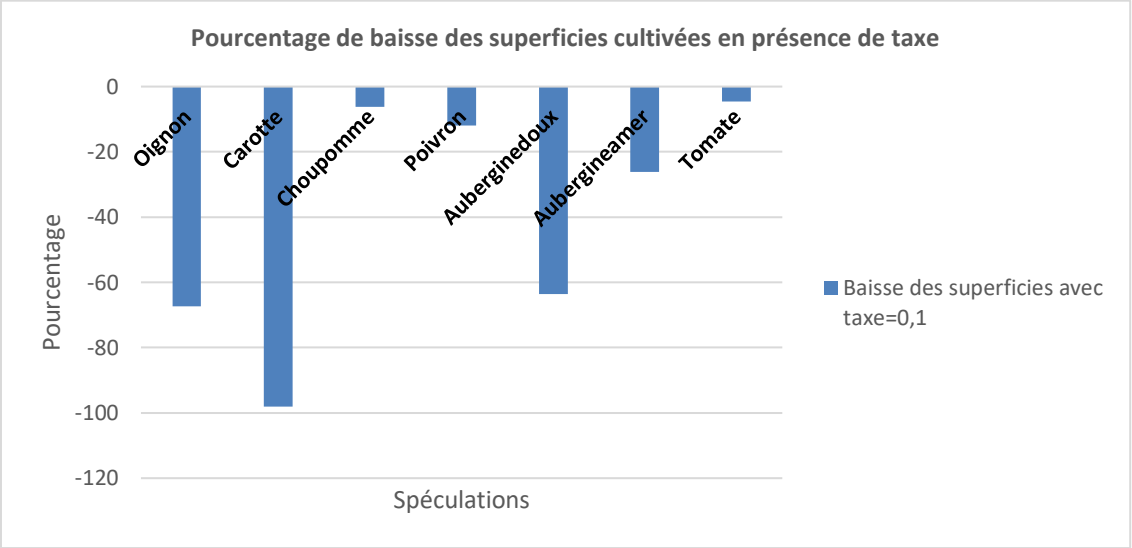

FIG. 27. — Baisse des superficies avec différents niveaux de taxe. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse.

Ces résultats suggèrent qu'assurer la disponibilité de la ressource en eau dans le temps en imposant une taxe aux producteurs implique une baisse des superficies allouées à la production horticole. Cela réduirait la production de certaines spéculations. Cela entraîne une baisse des revenus des producteurs comme indiqué dans la section 3.1.3.1.

Ces résultats vont dans le même sens que ce qui a été trouvé dans la littérature dans d'autres contextes. En effet, AIDAM (2015) en faisant une analyse de l'impact de mécanismes de prix sur la demande en eau des agriculteurs au Ghana montre, en utilisant l'exemple de grands producteurs, que la mise en place de prix (volumétrique) de l'eau entraîne une baisse de la consommation d'eau des producteurs qui réduisent la production de spéculations demandant en eau pour cultiver des spéculations à faible consommation d'eau. Cela affecte négativement les revenus des producteurs.

Dans le même sens, BERBEL & GOMEZ-LIMON (2000), analysent l'impact de la mise en place de prix pour l'eau dans trois zones irriguées en Espagne. Ils trouvent que la mise en place de prix de l'eau comme unique instrument pour controler l'usage d'eau n'est pas un moyen valide pour réduire la demande en eau agricole de manière considérable. En effet, la consommation d'eau ne diminue pas avant que les prix n'atteignent un niveau qui réduit considérablement le revenu des producteurs et la main-d'œuvre. Ils trouvent que, pour les zones considérées, lorsque des mécannismes de prix sont utilisés pour réduire la consommation d'eau, il faut une diminution de 40 % des revenus des producteurs avant que la demande en eau ne diminue considérablement. Par ailleurs, ils trouvent que cela entraine une réduction du nombre de spéculations disponibles pour l'agriculture. Enfin, lorsque la consommation d'eau diminue suite à une substitution des spéculations ayant une demande en eau élevée il y aura une baisse de la main-d'œuvre au niveau des agriculteurs et au niveau des industries de transformation.

Ainsi, bien qu'étant une solution possible pour la préservation de la resssource, les implications d'une telle taxe dans le contexte des *niayes* dans le long terme ne sont pas en faveur de la politique d'autosuffisance ou la tendance vers l'exportation des produits horticoles qui vise une hausse de la production horticole. Elle ne serait pas non plus en faveur des producteurs. Par ailleurs, les *niayes* offrent plus de 40 % du marché en produits horticoles (PADEN, 2013). Par conséquent, même si la préservation de la ressource est une priorité, une telle mesure ne serait pertinente que si elle permet la durabilité de la production. Ainsi, il serait préférable de considérer des mesures permettant de maintenir la durabilité la ressource et d'assurer la demande en produits horticoles dans le long terme, étant donné que cela ne se fera pas uniquement en misant sur la production horticole dans les *niayes*. Pour amorcer la réflexion sur les mesures alternatives, nous nous tournons vers les possibilités de gestion du côté de l'offre pour stabiliser la ressource sans pour autant léser les producteur ou diminuer les superficies allouées à l'horticulture dans le temps.

Ainsi, *du côté de l'offre*, nous avons essayé de voir quel est le niveau de recharge qui pourrait stabiliser la ressource. En reprenant l'équation de la dynamique de la nappe :

$$x_{\mathrm{t+1}} = x_{\mathrm{t}} + 10^{-4}\frac{((1-\gamma)w_{ag,t} + w_{autres})}{As_y} - \frac{\gamma \mathrm{P_t} * 10^{-3}}{s_y} + Recharge_t$$

La ressource se stabilise lorsque le niveau de la nappe en période t+1 est égal au niveau de la nappe en période t :

$$x_{\mathrm{t+1}} = x_{\mathrm{t}}, \quad pour\ tout\ t ==> Recharge_t = \frac{\gamma \mathrm{P_t} * 10^{-3}}{s_y} - 10^{-4}\frac{((1-\gamma)w_{ag,t} + w_{autres})}{As_y}$$

Les résultats montrent qu'en moyenne douze millions mètres cubes de recharge annuelle (en complément de la recharge pluviométrique) sont nécessaires pour stabiliser la ressource sur la période de dix ans avec les niveaux de précipitations considérés dans le scénario de référence. La préoccupation ici est de se demander la stratégie de renforcement de la recharge qu'il faut adopter. Dans la littérature et dans les expériences notées dans d'autres pays (KNAPP & OLSON, 1995), la recharge peut être renforcée par la récolte des eaux de pluie.

DASYLVA & COSANDNEY (2005) soutiennent que :

> *la recharge des nappes (pour préserver les ressources en eau et les écosystèmes aquatiques) est un enjeu majeur à prendre en considération dans toute perspective de gestion durable des écoulements par temps de pluie.*

Ils proposent comme moyen de renforcer la recharge par des infiltrations forcées (avec les eaux de pluies récoltées).

Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la méthodologie utilisée pour répondre à notre question de recherche, le processus de collecte de données ainsi que la présentation et la discussion des résultats obtenus et leurs implications.

Nos résultats montrent que plus le climat est sec plus la disponibilité de l'eau d'irrigation est réduite. Cependant, la différence entre le scénario de base et les scénarios sec et humide

est peu élevée. Par ailleurs, nous trouvons que la disponibilité de l'eau d'irrigation est en baisse au fil des années même en situation de précipitations humides.

Une analyse de sensibilité nous a permis de montrer l'importance de paramètres tels que le taux d'infiltration, le facteur d'actualisation et l'élasticité de la fonction de demande en eau. Nous trouvons que ces paramètres peuvent plus ou moins avoir un effet sur les résultats sans pour autant changer les tendances, sauf si les valeurs considérées sont très éloignées des valeurs initialement choisies pour le modèle. L'analyse de sensibilité montre cependant que des paramètres tels que l'élasticité de la demande suggèrent qu'il est important de considérer l'hétérogénéité spatiale dans la modélisation car les demandes en eau peuvent différer selon le type de producteur représentatif. Par ailleurs, le coût unitaire d'extraction et le taux d'infiltration peuvent être hétérogènes étant donné que la profondeur de la nappe et les types de sol sont spatialement variables.

Les résultats montrent également que les producteurs face à une baisse continue de la disponibilité de l'eau d'irrigation diminuent les superficies allouées aux différentes spéculations avec une baisse plus importante dans le scénario sec. Les spéculations sujettes à une baisse plus importante sont souvent très demandant en eau et/ou rapportent peu en termes de revenus nets.

Enfin, en nous fondant sur les expériences d'autres contextes et la littérature économique sur les ressources en eau, nous simulons des options de gestion de la ressource en eau du côté de la demande (décharge) et du côté de l'offre (recharge). Pour la partie demande, en imposant une taxe proportionnelle à la quantité d'eau extraite, nous trouvons que la taxe encourage un comportement favorisant la stabilité de la ressource. Cependant, la taxe impacte négativement la production. D'autres modes de gestion sont également discutées dans ce chapitre.

Du côté de l'offre, nous avons essayé de voir quel niveau de recharge annuel permet de stabiliser la ressource dans le temps. Nous trouvons qu'une recharge (additionnelle) annuelle moyenne d'environ douze millions de mètres cubes est nécessaire pour stabiliser la ressource sur une période de dix ans partant de 2014 dans le scénario de référence.

Conclusion générale

Dans un contexte de climat changeant, le secteur agricole sénégalais, très vulnérable face à la variabilité et au changement climatique, a fait l'objet d'études pour évaluer l'impact de l'incertitude climatique sur ce secteur, particulièrement sur l'agriculture pluviale. Ce secteur est cependant resté non entièrement exploré car l'agriculture irriguée n'a pas reçu beaucoup d'attention en termes d'études d'impact du changement climatique, surtout pour les spéculations horticoles majoritairement cultivées dans les *niayes* au Sénégal. En guise de contribution à la réduction de ce gap, cette thèse s'est interrogée sur les effets possibles de la variabilité future des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation dans les *niayes* et ses implications sur la production horticole. Pour répondre à cette question, nous nous étions fixés comme objectifs de :

— faire une analyse d'impact *ex ante* de la variabilité des précipitations sur la profondeur de la nappe et les comportements de prélèvements d'eau des producteurs ;
— faire une analyse prospective des implications de différents niveaux de disponibilité de l'eau d'irrigation sur la production horticole, notamment les décisions des producteurs en termes d'allocations de superficie et leurs revenus nets ;
— tester et discuter des options de gestion de la ressource en eau pour l'irrigation.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons développé un modèle hydro-économique intégré qui s'inspire de :

— la théorie économique sur les ressources communes ;
— la théorie de la production ;
— des études d'impact du changement et de la variabilité climatique sur la production agricole ;
— des travaux de modélisation des ressources communes et des producteurs agricoles.

Notre approche est composée d'un modèle hydro-économique, d'un modèle sur la production agricole et d'un modèle de simulation stochastique pour générer des scénarios climatiques.

Résultats et implications

Au terme de cette recherche, les résultats obtenus nous permettent de faire le point sur la question de recherche posée, les objectifs et de confirmer ou d'infirmer nos hypothèses.

Concernant la disponibilité de l'eau d'irrigation, les résultats montrent que plus le scénario de précipitations considéré est sec, plus la disponibilité de l'eau d'irrigation est réduite avec une nappe légèrement plus profonde. Cela se traduit par une réduction des prélèvements des producteurs. Cependant, la différence entre le scénario de référence (en moyenne 340,6 mm par an) et le scénario considéré comme sec (environ 187,1 mm par an) est peu élevée. Il en est de même pour la différence entre le scénario humide (environ 507,17 mm par an) et le scénario de référence. Cette différence est cependant plus importante au fil des années. Elle s'élève (en valeur absolue) à environ 0,02 % la première année, du scénario de

réfécence au scénario sec (0,1 % du scénario de réfécence au scénario humide) et à 0,5 % la dernière année pour la profondeur de la nappe mais ne dépasse pas 0,5 % dans les deux scénarios alternatifs sur la période considérée. Pour les prélèvements, elle s'élève (toujours en valeur absolue) à environ 0,0002 % la première année du scénario de référence au scénario sec (0,001 % du scénario de réfécence au scénario humide) et 1 % la dernière année pour les deux scénarios. Cela montre que considérer une période plus longue montrerait plus l'effet du climat. À partir de ces résultats, même si l'effet simulé du climat est faible, il existe et croît dans le temps. Par conséquent, nous confirmons notre première hypothèse :

> *la variabilité des précipitations entrainera une baisse de la profondeur de la nappe et des prélèvements d'eau des producteurs horticoles dans les* niayes.

Par ailleurs, nous trouvons qu'avec les niveaux de précipitations considérés dans les différents scénarios de précipitations, la nappe devient également de plus en plus profonde au fil des années avec une baisse d'en moyene 0,70 m sur les dix ans (tous scénarios confondus) et les prélèvements d'eau des producteurs sont en décroissance avec une baisse d'environ six millions de mètres cubes d'eau sur la période de dix ans considérée (tous scénarios confondus). Cela suggère que, pour des précipitations inférieures ou égales à celles du scénario humide sur la période considérée, la recharge pluviométrique ne couvre pas les prélèvements des usagers.

Nos résultats sur la disponibilité de l'eau sous différents scénarios climatiques, ne sont pas en contradiction avec les principales recherches menées dans la zone par des chercheurs d'autres disciplines (DASYLVA & COSANDEY, 2005 ; AGUIAR *et al*., 2009, 2010). AGUIAR *et al*. (2010) trouvent que sur la période 1958-1994, la nappe a baissé d'en moyenne 0,5 m tous les dix ans et DASYLVA & COSANDEY (2005) trouvent que la recharge pluviométrique ne couvre pas les prélèvements dans les *niayes* de Dakar.

Face à cette réduction de la disponibilité de l'eau, le comportement optimal des producteurs serait de réduire les superficies allouées aux spéculations ; ce qui mènerait à une baisse d'en moyenne 25 % de leurs revenus nets (tous scénarios confondus) entre la première année et la dernière année de la période considérée. Cette baisse augmente lorsque l'on tend vers un scénario plus sec. Cela confirme l'hypothèse 2 de notre introduction :

> *une baisse de la disponibilité de l'eau d'irrigation entrainera une baisse de la production horticole et des revenus nets des producteurs.*

Nous remarquons que les spéculations sujettes à une baisse plus importante sont souvent très demandant en eau et/ou rapportent peu en termes de revenus nets. Ainsi, le poivron qui a des revenus nets plus élevés est sujet à moins de baisse de superficie comparé à la carotte qui a une demande en eau élevée et fait partie des spéculations avec les plus faibles revenus.

Ces résultats montrent qu'une baisse de la disponibilité de l'eau peut avoir des effets non négligeables sur les superficies allouées aux spéculations horticoles dans la zone des *niayes*. Dès lors, dans un contexte où l'objectif est d'atteindre l'autosuffisance en certains produits horticoles et de conquérir les marchés mondiaux, il est important de prendre en compte les aspects liés à la gestion de la ressource en eau dans la zone des *niayes* pour assurer une croissance durable de la production horticole.

Cette gestion peut se faire soit du côté de la demande (la décharge) en régulant les extractions d'eau ou du côté de l'offre en renforçant la recharge de la nappe. En nous basant sur la littérature économique sur la théorie des ressources communes, particulièrement les

ressources en eau, nous avons testé une régulation de l'usage de la ressource par imposition d'une taxe volumétrique aux producteurs (payée par mètre cube d'eau extrait). Nos simulations montrent que le niveau de taxe nécessaire pour encourager un comportement favorisant la stabilité de la ressource est relativement faible (à partir de 0,1 franc C.F.A. par mètre cube). Cependant, ce niveau de taxe faible entraine une réduction importante des extractions d'eau des producteurs qui se traduit par une baisse des superficies cultivées pouvant aller jusqu'à plus de la moitié de la superficie initiale pour des spéculations telles que la carotte. Cette solution permettrait une préservation de la ressource mais réduirait la disponibilité de l'eau d'irrigation et impliquerait une baisse de la production horticole dans le long terme (sauf si des efforts sont faits pour augmenter la productivité, nous entendons par là les rendements).

Cela nous permet de confirmer la troisième hypothèse de notre introduction :

> *la mise en place d'une taxe sur les prélèvements des producteurs entrainera un usage raisonnable de la ressource mais impactera négativement la production.*

Ainsi, une telle taxe ne serait pas en cohérence avec la politique en vigueur affiché à travers le Pracas qui vise une hausse de la production horticole pour atteindre l'autosuffisance en certains produits horticoles et la conquête des marchés mondiaux. Dans ce contexte, même si la gestion de la ressource est une priorité pour une production horticole durable et les autres usages, une telle option ne serait favorable que si elle n'entre pas en contradiction avec cette durabilité de la production. Par ailleurs, l'on pourrait questionner la faisabilité de la mise en place d'une taxe qui pourrait être administrativement difficile et coûteuse car il faudrait, entre autres, avoir une mesure des prélèvements des producteurs et également avoir un système de collecte de la taxe. En outre, un tel instrument pourrait faire face à une réticence de la part des producteurs. Cela nous mène à considérer des options de gestion du côté de l'offre.

Du côté de la recharge, nous nous sommes limités à estimer la quantité d'eau de pluie additionnelle par an nécessaire pour stabiliser la ressource lorsque les niveaux de précipitations sont celles du scénariode référence. Nos résultats montrent qu'il faut une recharge additionnelle par an d'environ douze millions de mètres cubes pour stabiliser la ressource sur la période de dix ans (à partir de 2014) considérée. Le renforcement de la recharge constitue une option de gestion qui peut s'avérer coûteuse. Ainsi, il est nécessaire de considérer les options possibles et de faire une analyse coût-bénéfice permettant de juger de leur faisabilité.

Les deux instruments analysés ici montrent qu'un bon mode de gestion de la ressource en eau devrait permettre d'assurer la durabilité de la ressource sans léser la production horticole dans les *niayes* mais également devrait être financièrement et administrativement faisable. Il existe également d'autres modes de gestion expérimentées en économie des ressources communes et également dans le cadre de la nouvelle économie institutionnelle par OSTROM (1990, 2010), notamment, la gestion collective qui inclut les parties prenantes que sont les « appropriateurs » de la ressource et l'ensemble de ses fournisseurs (qui peuvent être les « appropriateurs » eux-mêmes et également les institutions). Ce mode de gestion, non testé ici du fait de la multitude d'acteurs qu'il requiert et que notre approche méthodologique n'intègre pas, serait une option à explorer davantage afin de voir sa faisabilité dans le contexte des *niayes*.

Comparée aux autres études de cet ordre dans la zone (DASYLVA & COSANDNEY, 2005 ; AGUIAR *et al*., 2009, 2010 ; DASYLVA, 2010, 2012), la nouveauté (en termes de méthodologie) dans cette thèse est qu'elle intègre les comportements des agents qui ne sont pas pris en

compte dans des modèles purement hydrologiques ou des calculs de bilan hydrique, alors que les acteurs ajustent leurs comportements (selon les bénéfices et coûts perçus) lorsqu'ils sont sujets à des changements. Les résultats sur l'analyse de sensibilité montrent la pertinence d'internaliser le comportement de ces agents. Par ailleurs, cette analyse de sensibilité témoigne de la nécessité de considérer l'hétérogénéité spatiale dans la zone des *niayes* pour faire ce type d'analyse. Cela permet d'avoir des résultats selon les types de producteurs et d'intégrer la variabilité spatiale des paramètres physiques, notamment la profondeur de la nappe, le taux d'infiltration. Cela montre qu'il serait intéressant de renforcer la collaboration entre économistes et hydrologues pour une meilleure considération des ajustements possibles de la part des différents acteurs au lieu de les considérer comme exogènes dans les modèles. Notre approche permet d'aller jusqu'à la quantification des implications de différents niveaux de disponibilité de la ressource sur la production horticole. Ainsi, une telle collaboration permettrait de proposer de meilleures solutions de gestion qui incluraient les gains et pertes possibles de chaque option.

Nous avons par ailleurs noté que les prélèvements d'eau des producteurs dans cette zone sont assez mal connus. Or, cette information s'avère indispensable pour assurer une gestion efficace de la ressource en eau. Il est donc plus que jamais nécessaire, pour une meilleure gestion des ressources en eau dans la zone des *niayes* de mener dans un premier temps des études sur les prélèvements effectifs des producteurs ainsi que tous les acteurs utilisant la ressource.

Contributions de la thèse

Cette thèse permet certains avancements en matière de modélisation du comportement des producteurs horticoles et de modélisation économique des ressources en eau dans la zone des *niayes*, même si les approches utilisées peuvent être améliorées. Par ailleurs, avec les efforts d'adaptation nécessaires, ces modèles sont adaptables à l'agriculture pluviale (pour le cas du modèle producteur) et aux autres types de ressources communes (pour le cas du modèle hydro-économique). Cette thèse participe aussi aux efforts faits pour la maîtrise de l'eau dans l'agriculture et l'évaluation de la disponibilité de l'eau dans les *niayes* dans un contexte de climat incertain et d'usage de la ressource par de multiples acteurs.

D'autres contributions, sur lesquelles nous ne revenons pas ici par soucis de répétition, sont également discutées dans l'introduction.

Limites et perspectives

Cette thèse présente cependant des limites :

— liées à la modélisation qui sont liées aux composantes de notre approche (FIG. 14), notamment le modèle hydro-économique, la modélisation de la production agricole ou à l'approche intégrée globalement ;

— aux hypothèses de la théorie néoclassique qui coiffent nos modèles.

Concernant l'approche de modélisation globale, dans cette thèse, nous ne prenons en compte que les précipitations pour analyser la disponibilité de l'eau d'irrigation. Or des scénarios de températures pourraient également être intégrés dans les différentes composantes. Dans le modèle hydro-économique, les températures sont, ici, indirectement prises en compte à travers le taux d'infiltration des eaux qui inclut l'évaporation dans son calcul. Les températures ont également un effet sur les besoins en eau des plantes (NELSON *et al*., 2009 ; SITTA, 2011. Or, ici, nous supposons les besoins en eau des plantes fixes. Ainsi, les changements dans la demande en eau des producteurs suite à un changement de température ne sont pas pris en compte dans le modèle de la production.

Concernant le modèle hydro-économique, l'une des premières limites de ce modèle est qu'il n'intègre pas l'hétérogénéité spatiale de la zone qui suggère que, le long de la zone des *niayes*, la ressource, les facteurs externes (ex. le climat) et le comportement des utilisateurs sont spatialement variables. La prise en compte de l'hétérogénéité spatiale n'a pas été possible car nécessite d'avoir des données le long de la zone des *niayes* sur les paramètres hydrologiques qui ne sont pas disponibles. L'analyse de sensibilité nous permet cependant d'atténuer cette limite. Une autre limite du modèle hydro-économique est liée au comportement d'usage de la ressource en eau des acteurs non agricoles que nous considérons comme exogènes alors qu'il y a aussi une logique (d'ordre économique ou autre) qui sous-tend leurs décisions d'extraction d'eau. Nous nous sommes principalement concentrés sur les producteurs horticoles car ce sont les plus gros utilisateurs de la nappe des sables du quaternaire.

Par ailleurs, les aspects liés à la qualité de l'eau ne sont pas pris en compte dans la modélisation. Or la qualité de l'eau est importante dans l'analyse de la disponibilité de l'eau d'irrigation. Ainsi, SARR (2010) fait le constat qu'une baisse continue du niveau de la nappe pourrait accentuer l'avancée du biseau salé. Cela pourrait également impacter la disponibilité de l'eau ou du moins la quantité d'eau disponible et utilisable. Il serait donc plus judicieux d'intégrer les aspects liés à la qualité de l'eau pour lesquels nous ne disposions pas d'informations.

Partant des outils développés ici, il serait intéressant d'approfondir le travail de modéliation :

— en intégrant l'hétérogénéité spatiale et intra-annuelle (selon les saisons de culture); Cela permettrait de voir comment différents types de producteurs situés le long de la zone des *niayes* seraient affectés par le changement et/ou la variabilité climatique et également comment cela changerait selon les saisons de culture ;

— en intégrant des scénarios de températures pour voir les changements des besoins en eau des spéculations selon les saisons et les répercussions sur la demande en eau des producteurs et la disponibilité de l'eau d'irrigation ;

— en intégrant une analyse plus exhaustive des stratégies d'adaptation des producteurs à la baisse de la disponibilité de l'eau d'irrigation. Cela se ferait plus aisément en adoptant une approche holistique dans lequel l'on fusionnerait les deux modèles (hydro-économique et le modèle sur la production) en s'assurant que le calibrage est maintenu. Ces stratégies concerneraient particulièrement la prise en compte du progrès technique, particulièrement les stratégies d'augmentation des capacités d'exhaure de l'eau en permettant la possibilité d'adopter de manière endogène de nouvelles technologies d'exhaure de l'eau (telles que l'acquisition de pompe avec des capacités plus ou moins importantes) et de nouvelles technologies d'irrigation. Aussi serait-il intéressant d'intégrer la possibilité de choisir de nouvelles cultures autres que celles initialement cultivées par le producteur représentatif.

Enfin, l'approche de modélisation utilisée ici se base principalement sur les hypothèses de la théorie néoclassique. Ainsi, nous supposons une maximisation du profit des producteurs (pour le modèle sur la production) et une maximisation du bénéfice net (pour le modèle hydro-économique) sous contraintes de disponibilité des ressources sans nécessairement tenir compte des barrières institutionnelles ou des actions qui peuvent aussi aider (ou rendre difficile) la mise en place de certaines options de gestion de la ressource en eau. Cela limite nos possibilités d'explorer certaines implications en termes de politique de gestion de la ressource en eau pour l'irrigation comme l'action collective. Cette limite est plus due à une notre approche méthodologique qui contraint l'analyse approfondie de certains instruments de gestion des ressources en eau.

Cela ouvre une deuxième perspective de recherche, amorcée dans cette thèse, qui est de mener une analyse la plus approfondie possible de la gestion des ressources en eau d'irrigation dans les *niayes*. En effet, la raréfaction de la ressource en eau face à un climat incertain et à l'usage des « appropriateurs » exige de plus amples réflexions sur la gouvernance des ressources en eau dans la zone des *niayes*, en se basant sur les options de gestion qu'offrent la théorie, les résultats de recherche sur ces questions et les pratiques de gestion qui existent. Cette recherche prendrait en compte la multi-dimensionnalité des ressources en eau et mobiliserait l'ensemble des outils possibles pour une analyse exhaustive qui inclurait l'analyse des aspects institutionnels. Dans ce cadre, les outils développés dans cette thèse peuvent constituer une partie des éléments d'analyse en veillant à considérer les limites soulevées. Il serait par ailleurs, important d'inclure une analyse du cadre socio-institutionnel afin d'intégrer les barrières institutionnels et sociales à la mise en place des instruments de gestion de la ressource mais également qui pourraient entraver l'adoption de certaines stratégies d'adaptation des producteurs face à une baisse de la disponibilité de l'eau d'irrigation. Ce type d'analyse mobiliserait des outils de la nouvelle économie institutionnelle et nécessiterait des outils de collecte de données qualitatifs en complément d'outils quantitatifs.

Pour contribuer à ces réflexions, nous avons effectué [59], dans le cadre du projet dans lequel s'insère cette thèse :

— des représentations de théâtre-forum sur nos travaux et résultats dans la zone des *niayes* en présence des producteurs, d'autres usagers de la ressource et d'acteurs institutionnels (Sones, D.G.P.R.E.) ;
— des entretiens individuels avec les producteurs. Ces données, en cours de traitement, montrent des résultats préliminaires qui :
  – confirment nos résultats sur l'effet du climat sur la ressource avec l'existence d'une variabilité intersaisonnière,
  – montrent que les producteurs adoptent des stratégies pour faire face à la baisse de la nappe, parmi lesquelles, celles considérées dans ce travail et d'autres sur l'augmentation des capacités d'extraction d'eau avec l'acquisition de pompes et le forage de puits plus profonds qui ne sont pas encore inclus dans le modèle et que nous comptons inclure dans un futur proche,
  – montrent la réticence des producteurs à la mise en place d'une taxe.

Du côté des institutions, la D.G.P.R.E. planifie actuellement de mettre en place une taxe pour les producteurs qui extraient plus de cinq mètres cubes d'eau par heure. Ces données collectées nous permettrons de mettre en débat nos résultats et de mieux discuter les

59. — Ces travaux ont été effectués durant les mois d'octobre et novembre 2017.

options de politiques testées ici et également d'en simuler d'autres pour voir leurs effets sur la ressource et sur la production.

L'agriculture irriguée apparaît ainsi comme un secteur qui mérite aussi l'attention en termes d'études relatives au changement et à la variabilité climatique car la disponibilité de l'eau d'irrigation qui est incontournable dans la production horticole dans les *niayes* dépend des précipitations en sus de l'usage des acteurs. Il peut également exister d'autres aspects non pris en compte dans cette thèse tels que les attaques, les maladies…

Bibliographie des sources citées

A.N.S.D., 2012. — Base de données sur la population des villages du Sénégal.

A.N.S.D., 2013. — Deuxième enquête de suivi de la pauvreté au Sénégal (ESPS-II 2011). Rapport définitif.

A.N.S.D., 2014. — Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage (RGPHAE 2013). Rapport définitif.

AGUIAR (L. A. A.), 2009. — Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des niayes du Sénégal entre 1950 et 2004, th. doct. sc. de l'environnement, univers. du Québec à Montréal.

AGUIAR (L. A. A.), M. GARNEAU, A. M. LÉZINE & P. MAUGIS, 2010. — « Évolution de la nappe des sables quaternaires dans la région des niayes du Sénégal (1958-1994) : relation avec le climat et les impacts anthropiques », *Sécheresse,* vol. XXI, nº 2 : pp. 97-104, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi: 10.1684/sec.2010.0237**>.

Aidam, P. W. (2015). The impact of water-pricing policy on the demand for water resources by farmers in Ghana. *Agricultural Water Management*, *158*, 10–16, adresse U.R.L. : <**https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.007**>.

ANACIM (*National Agency for Civil Aviation and Meteorology of Senegal*), *WFP's Office for Climate Change, Environment and Disaster Risk Reduction*, Service, *WFP's Food Security Analysis*, (Iri), *Columbia University's International Research Institute for Climate and Society*, & Senegal, *WFP Country Office*, 2013. — *Climate risk and food security in Senegal: Analysis of climate impacts on food security and livelihoods*, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://www.uncclearn.org/sites/default/files/inventory/wfp10.pdf**>.

ANACIM, 2013. — *Base de données sur la pluviométrie mensuelle et les températures maximales et minimales mensuelles dans les stations météorologiques de Dakar, Thiès, Louga et St-Louis de 1990 à 2011*.

ANCEY, 1975. — cité *in* GAFSI *et al*., 2007.

ANTLE (J. M.), 2011. — Parsimonious Multi-Dimensional Impact Assessment. *American Journal of Agricultural Economics. 93*(5), pp. 1292–1311, [en ligne], adresse U.R.L. :. <**https://doi.org/10.1093/ajae/aar052**>.

ANTLE (John M.) & R. VALDIVIA, 2011. — Methods for assessing economic, environmental and social impacts of aquaculture technologies: adoption of integrated agriculture-aquaculture-aquaculture in Malawi.

ARFINI & PARIS, 1995. — cité *in* HECKELEI & BRITZ, 2005.

ARFINI, 1996. — cité *in* HECKELEI & BRITZ, 2005.

BA (B. A.) & B. BARBIER, 2015. — Economic and Environmental Performances of Organic Farming System Compared to Conventional Farming System: A Case Farm Model to Simulate the Horticultural Sector of the *Niayes* Region in Senegal. *Journal of Horticulture*. 02(04), [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.4172/2376-0354.1000152**>.

BANQUE MONDIALE, 2014. — *Situation économique du Sénégal : Apprendre du passé pour un avenir meilleur*, 1re éd.

BATES (B. C.), Z. W. KUNDZEWICZ, S. WU, & J. P. PALUTIKOF (éd.), 2008. — Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 p.

BARRETT, 1990. — cité *in* TIETENBERG & LEWIS, 2012 : chap. 16.

BATTISTI (D. S.), & R. L. NAYLOR, 2009. — Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science.* 323(5911), pp. 240-244, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1126/science.1164363**>.

BAUMOL (W. J.) & W. E. OATES, 1988. — *The Theory of Environmental Policy*, 2e éd., United States of America. Cambridge University Press.

BEAR & LEVIN, 1970. — cités *in* HAROU *et al*, 2009.

BEKCHANOV (M.), A. SOOD & M. JEULAND, 2015. — Review of hydro-economic models to address river basin management problems: structure, applications and research gaps. Colombo, Sri Lanka: International

Water Management Institute (IWMI), 60 p. (IWMI Working Paper 167), [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.5337/2015.218**>.

BELLMAN (R.), 1954. — The Theory of Dynamic Programming. *Bulletin of the American Mathematical Society.* 60(6), pp. 503-515, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1090/S0002-9904-1954-09848-8**>.

BENIEST (J.), L. BOURDOUXHE, M. DEFRANCQ-D'HONDT, S. NAVEZ, & D. DEFRAEYE, 1987. — *Guide pratique du maraîchage au Sénégal.* Isra-C.D.H. et F.A.O., [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://www.cra-segou.org/IMG/pdf/B00_0667.pdf**>.

BERBEL (J.) & J. A. GÓMEZ-LIMÓN, 2000. — The impact of water-pricing policy in Spain: An analysis of three irrigated areas. *Agricultural Water Management*. 43, pp. 219-238, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1016/S0378-3774(99)00056-6**>.

BERBEL (J.), J. CALATRAVA & A. GARRIDO, 2007. — Water Pricing and Irrigation : A Review of the European Experience, 295–327.

BEYE (A.), 2016. — *Performance productive des exploitations agricoles du Sénégal : Une analyse d'impact des stratégies d'adaptation face au changement climatique*, th. doct. sc. économiques, univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

BIASUTTI (M.) & A. H. SOBEL, 2009. — Delayed Sahel rainfall and global seasonal cycle in a warmer climate. *Geophysical Research Letters.* 36 (23), 5, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1029/2009GL041303**>..

BLANCO-GUTIÉRREZ (I.), C. VARELA-ORTEGA & D. R. PURKEY, 2013. — Integrated assessment of policy interventions for promoting sustainable irrigation in semi-arid environments: A hydro-economic modeling approach. *Journal of Environmental Management.* 128, pp. 144-160, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1016/j.jenvman.2013.04.037**>.

BOGNINI (S.), 2011. — *Impacts des changements climatiques sur les cultures maraîchères au Nord du Burkina Faso : cas d'Ouahigouya*, Rapport final du *Réseau national de agro-sylvo-pasteurs du Faso* (Renaf), Burkina-Faso.

BONTEMPS (C.) & S. COUTURE, 1999. — *Une méthode d'évaluation de la fonction de demande en eau d'irrigation*.

BONTEMPS (C.) & S. COUTURE, 2002. — Irrigation water demand for the decision maker. *Environment and Development Economics*. 7(4), pp. 643-657, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi: 10.1017/S1355770X02000396**>.

BONTEMPS (C.), S. COUTURE & P. FAVARD, 2003. — Estimation de la demande en eau d'irrigation sous incertitude. *Économie rurale*. 276, pp. 17-24, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi : 10.3406/ecoru.2003.5421**>.

BOOKER (J. F.), 1995. — Hydrologic and economic impacts of drought under alternative policy responses. *Journal of the American Water Resources Association*. 31, pp. 889-906, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1111/j.1752-1688.1995.tb03409.x** >.

BOOKER (J. F.), R. E. HOWITT, A. M. MICHELSEN & R. A. YOUNG, 2012. — Economics and the modeling of water resources and policies. *Natural Resource Modeling.* 25, pp. 168-218, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1111/j.1939-7445.2011.00105.x**>.

BOUSSARD, 1987. — Cité *in* DIARRA (2009).

BRAUN (M.), 2010. — *Mise en œuvre d'une stratégie nationale d'adaptation aux changements climatiques au sénégal : l'Exemple d'une communauté rurale en zone côtière*, maîtrise en environnement, univers. de Sherbrooke, master en ingénierie et management de l'environnement et du développement durable, univers. de technologie de Troyes.

BROUWER (C.), A. GOFFEAU & M. HEIBLOEM, 1985. — « Irrigation Water Management: Training Manual N° 1, Introduction to Irrigation », *Irrigation Water Management*, 152.

BROWN & DEACON, 1972. — cités *in* GISSER & SANCHEZ, 1980.

BROWN (D. R.), 2000. — *A Review of Bio-Economic Models*, adresse U.R.L. : <**https://pdfs.semanticscholar.org/02b7/a49c0fe95f45910d55d6bb0daa7a4a8f45ad.pdf**>.

BROZOVIC (N.), D. L. SUNDING & D. ZILBERMAN, 2010. — « On the spatial nature of the groundwater pumping externality », *Resource and Energy Economics*, vol. XXXII, n° 2, pp. 154-164.

CAI *et al*., 2003. — *in* HAROU *et al*., 2009.

CALLENDAR (G. S.), 1938. — The Artificial Production of Carbon Dioxide. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 64(275), pp. 223–240, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1002/qj.49706427503**>.

CAMARA (M.), 2010. — Approche participative dans la gestion intégrée des ressources en eau de la zone des *Niayes* (de Dakar à Saint- Louis). Mémoire de maîtrise en géographie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://www.memoireonline.com/02/13/6920/Approche-participative-dans-la-gestion-integree-des-ressources-en-eau-de-la-zone-des-*Niayes* -de-Da.html**>.

CARVALHO, D.F., NETO, D.H.O., FELIX, L.F., GUERRA, J.G.M., & SALVADOR, C. A. (2016. — « Yield, water use efficiency, and yield response factor in carrot crop under different irrigation depths », *Ciência Rural*, vol. XLVI, nº 7 : pp. 1145-1150, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20150363**>.

CISSÉ (I.), A. S. FALL & S. T. FALL, 2001. — Caractéristiques de la zone des *Niayes* . In : CRDI (ed.) *Cités horticoles en sursis ? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal*. Ottawa (Ontario), Canada. Centre de recherches pour le développement international : pp. 1-11, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/31426/IDL-31426.pdf**>.

Claessens, L. *et al.* (2012) 'A method for evaluating climate change adaptation strategies for small-scale farmers using survey, experimental and modeled data', *Agricultural Systems*, 111, pp. 85–95, adresse U.R.L. : <10.1016/j.agsy.2012.05.003>.

COLLINS (J. M.), 2011. — « Temperature Variability over Africa », *Journal of Climate*, 24, pp. 3649-3666, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI3753.1**>.

CYPRIS, 2000. — cité *in* HECKELEI & BRITZ, 2005.

D.E.E.C., 2010. — *Deuxième communication nationale à la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques*, ministère de l'Environnement et de la Protection de la nature, Direction de l'environnement et des 2tablissements classés (D.E.E.C.). Rapport D.E.E.C.

D.G.P.R.E., 2005. — *Étude des aquifères de Dakar et du littoral nord pour le renforcement en eau potable de la ville de Dakar et environs, synthèse bibliographique*, Direction de la gestion et de la planification des ressources en eau (D.G.P.R.E.), Association internationale de développement (Aid). Rapport GKW Consult : vol. I.

D.G.P.R.E., 2009. — *Étude des aquifères de Dakar et du littoral nord pour le renforcement en eau potable de la ville de Dakar et environs, phase V, rapport final Dakar et littoral nord*, Direction de la gestion et de la planification des ressources en eau (D.G.P.R.E.), Association internationale de développement (Aid). Rapport GKW Consult.

DASYLVA (S.) & C. COSANDEY, 2010. — *Éléments d'évaluation et d'action de gouvernance durable de l'eau de pluie en milieu urbanisé au Sahel pour la biodiversité et la sécurité alimentaire. Retour d'expérience d'une étude dans les "niayes " de la région de Dakar*, colloque. biodiversité et évaluation environnementale, Secrétariat international francophone à l'évaluation environnementale, 20-23 sept. 2010, Secrétariat international francophone à l'évaluation environnementale (Sifee), Paris, Unesco, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://www.sifee.org/static/uploaded/Files/ressources/actes-des-colloques/paris//session-4-2/4_DASYLVA_TXT.pdf**>.

DASYLVA (S.), & C. COSANDEY, 2005. — L'exploitation de la Nappe des Sables Quaternaires pour l'alimentation en eau potable de Dakar : une offre compromise par l'insuffisance de la recharge pluviométrique. *Géocarrrefour,* vol. LXXX, nº 4 : pp. 349-358, [en ligne], adresse U.R.L. : <**DOI : 10.4000/geocarrefour.1385**>.

DASYLVA (S.), 2012. — « Implementing a Rainwater Sustainable Control in Sahel-Feedback from "*Niayes* " Zone of Dakar », *Journal of Environmental Science and Engineering*, B 1, pp 25-33.

De Salvo, M., Begalli, D. and Signorello, G. (2014) 'The Ricardian analysis twenty years after the original model: Evolution, unresolved issues and empirical problems', *Journal of Development and Agricultural Economics* , 6(3), pp. 124–131, doi: <10.5897/JDAE2013.0534>.

DESCHÊNES (O.) & M. GREENSTONE, 2006. — « The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Profits and Random Fluctuations of Weather », *FEEM Working Paper*, nº 6, 2006, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.2139/ssrn.876929**>.

DESCHÊNES (O.), & M. GREENSTONE, 2007. — « The Economic Impacts of Climate Change : Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather », *The American Economic Review*, 97, pp. 354-385, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi: 10.1257/aer.97.1.354**>.

DIAGNE (T. O.), 2013. — *Analyse de la perception de la vulnérabilité et des stratégies locales d'adaptation aux variations et changements climatiques : Cas des exploitations agricoles de la CR de Keur Moussa*, mém., diplôme d'ingénieur des travaux d'aménagement du territoire et de la gestion urbaine, École supérieure d'économie appliquée (Esea ex-Enea).

DIARRA (A.), 2009. — *Échanges internationaux et developpement de l'élevage laitier sénégalais*, th. doct. sc. économiques, univers. Paris-Sud-XI.

DICKO (A. H.), 2016. — *Économie du contrôle des trypanosomoses africaines animales sous les changements climatiques*, th. doct. sc. économiques, univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

DIENG (A.) & A. GUÈYE, 2005. — *Revue des politiques agricoles au sénégal : bilan critique de quarante années de politique céréalière*, Rapport Isra-Bame.

DINSE (K.), 2011. — *Climate variability and climate change what is the difference ?*, [en ligne], consulté le 21 oct. 2015, adresse U.R.L. : <**http://www.miseagrant.umich.edu/downloads/climate/11-703-Climate-Variability-and-Climate-Change.pdf**>.

DIOUF (B.), H. M. LO, B. DIEYE, O. SANE & O. F. SARR, 2014. — *Pour une agriculture intelligente face au changement climatique au Sénégal : Recueil de bonnes pratiques d'adaptation et d'atténuation*, doc. de travail, nº 85, Copenhague (Danemark), Programme de recherche du C.Giar sur le changement climatique, l'agriculture et la sécurité alimentaire (C.C.A.F.S.).

DIOUF (O. C.), S. FAYE & S. WOHNLICH, 2011. — *Estimation de la recharge de la nappe des sables quaternaires de Thiaroye (Dakar Sénégal) par les méthodes chimiques (CMB), isotopiques et et de la modélisation hydrogéologique*, atelier Ripiecsa, laboratoire d'hydrologie et hydrochimie, départ. géologie, faculté des sciences et techniques, Ucad.

DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013. — *Recensement de l'horticulture et mise en place d'un système permanent de statistiques horticoles dans la zone des Niayes* , *Résultats du recensement*. Rapport Groupe Syscom, financement Paden.

DIRECTION DE L'HORTICULTURE, *s. d.* — *Statistiques des productions horticoles pour la période de 2010/2011 à 2014/2015*, consulté en 2015.

DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE, 2015. — *Base de données sur les prélèvements annuels dans les forages ruraux des régions de Thiès, Louga et St-Louis*.

DIXON, 1988. — cité *in* WANG & SEGARRA, 2011.

DLAMINI (N. S.), M. K. ROWSHON, U. SAHAB, A. FIKRI, S. H. LAI & F. S. MOHD, 2015. — « Developing and calibrating a stochastic rainfall generator model for simulating daily rainfall by markov chain approach », *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, vol. LXXVI, nº 15, pp. 13-19.

DOORENBOS (J.) & A. H. KASSAM, 1979. — *Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage, Paper 33.* Rome.

DUFRESNE (J. L.), 2006. — Jean-Baptiste Joseph FOURIER et la découverte de l'effet de serre. *La Météorologie.53*, pp. 42-46, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/publi/2006/Dufresne-lamet-2006.pdf**>.

EL-FAID (S.), 1999. — *Étude géochimiques et isotopique des transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée de la nappe des sables quaternaires de Louga (nord Sénégal), recharge et paléorecharge*, th. doct. géologie appliquée, mention : hydrogéologie, univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

ELLERMAN (A. D.), 2000. — « Tradable Permits for Greenhouse Gas Emissions: A primer with particular reference to Europe », Boston, *Mit Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, Report nº 69.

ESTEBAN (E.) & J. ALBIAC, 2011. — Groundwater and ecosystems damages: Questioning the Gisser-Sánchez effect. *Ecological Economics*, vol. LXX, nº 11, pp. 2062–2069, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1016/j.ecolecon.2011.06.004**>.

ESTEVE (P.), C. VARELA-ORTEGA, I. BLANCO-GUTIÉRREZ & T. E. DOWNING, 2015. — « A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture », *Ecological Economics*, 120 : pp. 49-58, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.017**>.

F.A.O. & C.S.E., 2007. — *CARACTERISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLE AU SENEGAL Document de synthèse*. Available at: <**http://ntiposoft.com/domaine_200/pdf/caractspasenegal.pdf**>.

F.A.O., 2003. — *Programme national d'appui à la sécurité alimentaire (programme de relance des productions vivrières)*, rapport F.A.O.

FALL (A. A.), 2006. — *Impact du credit sur le revenu des riziculteurs de la vallee du fleuve Sénégal*, th. doct. économie et gestion du développement agricole, agro-alimentaire et rurale, univers. Montpellier-I.

(M. D.)Modélisation hydrogéologique conceptuelle de la nappe des sables quaternaires du littoral nord du Sénégal entre Dakar et Saint-Louis. International Institute for Water and Environmental Engineering.

FAYE (A.), 2014. — *Étude de la filière oignon au Sénégal*, Bureau d'analyses macro-économiques de l'Institut sénégalais de recherches agricoles.

FAYE (Amy), 2018. — Climat et agriculture au Senegal: Analyse économique de la disponibilité de l'eau d'irrigation dans un contexte de variabilité des précipitations, doct. en sc. économ., université Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

FAYE (J.), C. O. BA, P. N. DIEYE, M. DANSOKO, D. K. DIAGNE & M. NIANG, 2007. — *Dimensions structurelles de la libéralisation pour l'agriculture et le développent rural. Programme RuralStruc*, *Phase I*, Asprodeb & Ipar, Rapport *RuralStruct* phase 1.

FAYE (S.), 1995. — *Modélisation hydrodynamique des nappes du littoral Nord entre Cayar et St. Louis : Impact des futurs prélèvements envisagés dans le cadre de l'approvisionnement en eau de Dakar et de ses environs*, th. doct. géologie appliquée, mention hydrogéologie, univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

FELLMAN (T.), 2012. — « The assessment of climate change-related vulnerability in the agricultural sector: reviewing conceptual frameworks », *in* MEYBECK (A.), J. LANKOSKI, S. REDFERN, N. AZZU & V. GITZ (éd.), *Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector*, *Proceedings of a Joint FAO/OECD*, atelier de travail, 23-24 avr. 2012, Rome, F.A.O.-O.E.C.D., pp. 37-61.

FLICHMAN (G.) & T. ALLEN, *s. d.* — *Bio-economic modeling: State-of-the-art and key priorities*. URL: http://www.pim.cgiar.org/files/2013/12/FlichmanThomas_BioEconModeling_Final.pdf.

FLICHMAN (G.) & F. JACQUET, 2003. — « Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêt pour l'analyse des politiques », *Cahiers d'économie et de sociologie rurales*, 67 : pp. 51-69, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01201042/document**>.

FOFANA (I.), 2011. — « Simulating the impact of climate change and adaptation strategies on farm productivity and income: a bioeconomic analysis », Ifpri-Discussion Papers, vi-28 p.

FOURRIER, 1890. — cité *in* DUFRESNE, 2006.

G.E.P. Box, 1978. — Box, George E. P.; Norman R. Draper (1987). Empirical Model-Building and Response Surfaces, Wiley. ISBN 0471810339.

GAFSI (M.), P. DUGUÉ, J.-Y. JAMIN & J. BROSSIER, 2007. — *Exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre*, Versailles (France), Éditions Quae.

GAYE (C. B.), 1990. — *Étude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et par décharge évaporatoire des aquifères libres sous climat semi-aride au nord du Sénégal*, th. doct. géologie, univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

GIEC, 2001. — *Changements climatiques 2001 : rapport de synthèse.Annexe B, Glossaire*, consulté en 2017, adresse U.R.L. : <**https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-fr.pdf**>.

GIEC, 2007. — *Bilan 2007 des changements climatiques*, contribution des groupes de travail I, II et III au IVe rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, PACHAURI (R. K.) & A. REISINGER (dir. équipe de rédaction principale), Genève (Suisse), Giec, 103 p.

GIEC, 2014. — *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse*, contribution des groupes de travail , II et III au Ve rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, PACHAURI (R. K.) & L. A. MEYER (dir., équipe de rédaction principale), Genève (Suisse), Giec, 161 p.

GISSER (M.) & D. A. SANCHEZ, 1980. — « Competition versus optimal control in groundwater pumping », *Water Resources Research*, vol. XVI, nº 4 : pp. 638-642.

GISSER (M.), & A. MERCADO, 1973. — « Economic aspects of ground water resources and replacement flows in semiarid agricultural areas », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. LV, nº 3 : pp. 461-466, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://www.jstor.org/stable/1239126**>.

GOHIN & CHANTREUIL, 1999. — cité *in* HECKELEI & BRITZ, 2005, cités *in* Henry DE FRAHAN, 2005.

GORDON, 1954. — cité *in* OSTROM, 1990 : p. 3, 2010 : p. 15

GRASSO (M.), 2004. — « Climate change: the global public good », *Working Papers*, 75, univers. de Milan-Bicocca, départ. économie.

GRAVELINE (N.), 2013. — *Agricultures' adaptation to water management policies and global change: the interest of economic programming models*, th. doct. économie, AgroParisTech.

GRIFFIN (R. C.), 2006. — *Water resource economics : the analysis of scarcity, policies, and projects*. MIT Press. Available at: https://mitpress.mit.edu/books/water-resource-economics.

GRIMM (S. S.), Q. PARIS, & W. A. WILLIAMS, 1987. — « A von Liebig Model for Water and Nitrogen Crop Response », *Western Journal of Agricultural Economics*, vol. XII, nº 2 : pp. 182-192.

GUILLERMO (F.) & J. FLORENCE, 2003. — « Le couplage des modèles agronomiques et économiques: intérêt pour l'analyse des politiques », *Cahiers d'économie et sociologie rurales.* 67 :pp. 51-69.

HARDIN (G.), 1968. — « The Tragedy of the Commons », *Science*, 162 (3859) : pp. 1243-1248, [en ligne], adresse U.R.L. : <**DOI: 10.1126/science.162.3859.1243**>.

HAROU (J. L.), M. PULIDO-VELAZQUEZ, D. E. ROSENBERG, J. MEDELLIN-AZUARA, J. R. LUND & R. E. HOWITT, 2009. — « Hydro-economic models: Concepts, Design, Applications and Future Prospects », *Journal of Hydrology*. 375 : pp. 627-643.

HARRIS (J. M.) & A.-M. CODUR, 2004. — *Macroeconomics and the Environment A GDAE Teaching Module on Social and Environmental Issues in Economics*, Tufts University: Global Development and Environment Institute, Medford, MA (É.-U.A.), [en ligne], avr. 2015, adresse U.R.L. <**http://ase.tufts.edu/gdae** >.

HARRIS (J.M.), B. ROACH & A. M. CODUR, 2015. — The economics of global climate change. Global Development and Environmental Institute, Tufts University, Medford.

HATHIE (I.), I. WADE, S. BA, M. NIANG, A. NIANG, M. K. SOW, Y. C. NDIONE & C.O. BA., 2015 — *Emploi des jeunes et migration en Afrique de l'Ouest (EJMAO)*, Ipar, Rapport final pour le Sénégal.

HAZELL (P. B. R.) & R. D. NORTON, 1986. — Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture. MacMillan Publishing Company, New York 1986, XIV + 400 pp., DM 95,90

HECKELEI & BRITZ, 2005. — Models Based on Positive Mathematical Programming: State of the Art and Further Extensions. Retrieved from http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/234607/2/Heckelei et al 2005 Models Based on Positive Mathematical Programming- State of the Art and Further Extensions.pdf

HECKELEI (T.) & W. BRITZ, 2005. — Models Based on Positive Mathematical Programming: State of the Art and Further Extensions. Retrieved from http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/234607/2/Heckelei et al 2005 Models Based on Positive Mathematical Programming- State of the Art and Further Extensions.pdf

HEIDECKE (C.), 2009. — *Economic analysis of water use and management in the Middle Drâa valley in Morocco*, th. doct. sc. agriculture, univers. de Bonn (Allemagne).

HEXEM & HEADY, 1978. — cités *in* GRIMM *et al.*, 1987.

HEXEM *et al.*, 1976. — cités *in* GRIMM *et al.*, 1987.

HOUSE, 1987. — cité *in* HECKELEI & BRITZ, 2005.

HOWITT & GARDNER, 1986. — cités *in* HECKELEI & BRITZ, 2005.

HOWITT (R. E.), 1995. — « Positive Mathematical Programming », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. LXXVII, nº 2 : pp. 329-342, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.2307/1243543**>.

HOWITT (R. E.), J. MEDELLÍN-AZUARA, D. MACEWAN & J. R. LUND, 2012. — « Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management », *Environmental Modelling & Software*, 38 : pp. 244-258, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1016/j.envsoft.2012.06.013**>.

HOWITT (R. E.), S. MSANGI & D. MACEWAN, 2014. — *Quantitative Methods for Policy Analysis*, Course notes for a GAMS training, held at the World Agroforestry Center Campus, 28 avr.-2 mai 2014, Nairobi (Kenya).

HOWITT (R. E.), S. MSANGI, A. REYNAUD & K. KNAPP, 2002. — *Using Polynomial Approximations to Solve Stochastic Dynamic Programming Problems: or A "Betty Crocker" Approach to SDP*. Technical report, Department of Agricultural and Resource Economics, University of California at Davis, Davis.

HUANG (Q.), S. ROZELLE, R. E. HOWITT, J. WANG & J. HUANG, 2006. "**Irrigation Water Pricing Policy in China," 2006 Annual meeting, July 23-26, Long Beach, CA** », 21241, American Agricultural Economics Association (New Name 2008: Agricultural and Applied Economics Association).

HUBBARD (T.) & Y. SAGLAM, *s. d.* — Solution to Numerical Dynamic Programming Problems. University of Chicago, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://home.uchicago.edu/hickmanbr/uploads/chapter5_2.pdf**>.

HULME (M.), R. DOHERTY, T. NGARA, M. NEW & D. LISTER, 2001. — « African Climate Change : 1900-2100 », *Climate Research*, vol. XVII, nº 2 : pp. 145-168, , [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.3354/cr017145**>.

I.P.C.C., 2000. — *I.P.C.C. special report emissions scenarios, summary for policymakers*, A Special Report of I.P.C..C. Working Group III, 27.

JALLOH (A.), M. D. FAYE, H. ROY-MACAULEY, P. SÉRÉMÉ, R. ZOUGMORÉ, T. S. THOMAS & G. C. NELSON, 2013. — « Overview », *in* JALLOH, A., NELSON, G.C., THOMAS, T. S., ZOUGMORÉ, R. & ROY-MACAULEY, H. (éd.), *West African Agriculture and Climate Change: A comprehensive Analysis*, Ifpri Research Monograph, Washington D.C., International Food Policy Research Institute, pp. 1-37.

JANSSEN & VAN ITTERSUM, 2007. — cités *in* KRAGT, 2012.

JENSEN (M. E.), 1968. — « Water consumption by agricultural plants », *in* KOZLOWSKI (T. T. éd.), *Water Deficits and Plant Growth*, vol. II., New York, Academic Press, pp. 1-22.

JOHNSON (A. I.), 1967. — *Specific yield: Compilation of specific yields for various materials*, US Department of the Interior, Geological Survey water-supply paper 1662-D.

JUDD (K. L.), 1998. — *Numerical Methods in Economics*: Mit Press.

KHOUMA (M.), A. JALLOH, T. S. THOMAS & G. C. NELSON, 2013. — « Senegal », *in* JALLOH (A.), G. C. NELSON, T. S. THOMAS, R. ZOUGMORÉ & H. ROY-MACAULEY (éd.), *West African Agriculture and Climate Change: A comprehensive Analysis*, Ifpri Research Monograph, Washington D.C., International Food Policy Research Institute : pp. 291-323.

KHOUMA (M.), 2011. — *Étude sur la vulnérabilité de l'agriculture irriguée et de l'élevage dans la Vallée du Fleuve Sénégal*. Disponible sur : <**http://docplayer.fr/10008927-Etude-sur-la-vulnerabilite-de-l-agriculture-irriguee-et-de-l-elevage-dans-la-vallee-du-fleuve-senegal.html**>.

KIM (C. S.), F. KEITH, S. WALLANDER & S. WECHSLER, 2015. — *Endogenous Technical Change and Groundwater Management: Revisiting the Gisser-Sanchez Paradox*, Prepared for Presentation at the Agricultural & Applied Economic Association's 2015, AAEA & WAEA Joint Meeting, San Francisco, CA, 26-29 juill. 2015.

KLEENE *et al.*, 1989. — cité *in* GAFSI *et al.*, 2007.

KNAPP (K. C.) & L. J. OLSON, 1995. — « The economics of conjunctive groundwater management with stochastic surface supplies », *Journal of Environmental Economics and Management.*, vol. XXVIII, nº 3 : pp. 340-356, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1006/jeem.1995.1022**>.

KOSTER & WHITTLESEY, 1971. — cités *in* GRIMM *et al.,* 1987.

KOUNDOURI (P.), 2004. — « Potential for groundwater management : Gisser-Sanchez effect reconsidered », *Water Resources Research*, 40 : pp. 1-13, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1029/2003WR002164**>.

KRAGT (M. E.), 2012. — 'Bioeconomic modelling: Integrating economic and environmental systems?', in R. Seppelt, A.A. Voinov, S. Lange, D. B. (ed.). Leipzig, Germany, p. 9. Available at: <**http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings**.

KUMAR (C.), 2012. — « Climate Change and Its Impact on Groundwater Resources », *International Journal of Engineering and Science*, vol. I, no 5 : pp. 43-60, [en ligne], consulté le 8 avr. 2017, adresse U.R.L. : <**http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.707.5346&rep=rep1&type=pdf**>.

L'HÔTE (Y.), G. MAHÉ, B. SOMÉ & J. P. TRIBOULET, 2002. — « Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues », *Hydrological Sciences Journal.*, vol. XLVII, nº 4 : pp. 563-572, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1080/02626660209492960**>.

LE BARBÉ (L.) & T. LEBEL, 1997. — « Rainfall climatology of the Hapex-Sahel region during the years 1950–1990 », *Journal of Hydrology*, 188-189, 43-73, [en ligne], adresse U.R.L. : <doi:10.1016/s0022-1694(96)03154-x>.

LEARY (N. A.), 1999. — « A framework for benefit-cost analysis of adaptation to climate change and climate variability », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. IV, nos 3–4 : pp. 307-318, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://doi.org/10.1023/A:1009667706027**>.

LEBEL (T.), & A. ALI, 2009. — « Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007) », *Journal of Hydrology*, vol. CCCLXXV, nos 1-2 : pp. 52-64, , [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.030**>.

LEFKOFFE & GORELICK, 1990. — cités *in* HAROU *et al.*, 2009.

LLAMAS (M. R.) & E. CUSTODIO, 2002. — *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*, Netherlands, A.A. Balkema Publishers.

LOVELLI (S.), M. PERNIOLA, A. FERRARA, & T. DI TOMMASO, 2007. — « Yield response factor to water (Ky) and water use efficiency of Carthamus tinctorius L. and Solanum melongena L. », *Agricultural Water Management*, vol. XCII, nos 1-2 : pp. 73-80, [en ligne], adresse U.R.L. : <**DOI : 10.1016/j.agwat.2007.05.005**>.

LY (A.), 2014. — *L'Impact du changement climatique sur la securite alimentaire au senegal*. Available at : <**https://www.sfer.asso.fr/source/jrss2014/jrss-2014-ly.pdf**>.

MACCRAKEN *et al.*, 1999. — cités *in* NORDHAUS, 2007.

MALOU (R.), 2004. — *Impact du climat sur les ressources en eau souterraines en zone soudano-sahélienne*, th. doct. sc. naturelles géologie appliquée, mention hydrogéologie. univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

MAMOUDA (M. N. A.) & M. BARRY, 2013. — *Initiatives savoir, culture et développement durable*, Ire édition, "Agriculture, changement climatique et responsibilité des organisations", Rapport foire de partage de connaissances du réseau Africaadapt.

MANNE & RICHELS, 1992. — cités *in* HARRIS & CODUR, 2004.

MANNE & RICHELS, 1999. — cités *in* NORDHAUS, 2007.

MANNE & RICHELS, 2001. — cités *in* NORDHAUS, 2007.

MARTIN (E.) & J. VAITKEVICIUTE, 2016. — Mesure de l'impact du changement climatique sur l'agriculture de Côte-d'Or. *Économie rurale*, 355,(5), 21-48, <>.

MCKEE (T. B.), N. J. DOESKEN & J. KLEIST, 1993. — The relationship of drought frequency and duration to time scales, in: 8th Conference on Applied Climatology, Am. Meteorol. Soc. Boston, 179–184, URL : <**http://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf**>.

MCSWEENEY (C.), M. NEW & G. LIZCANO, 2010. — UNDP Climate Change Country Profiles: Senegal, [en ligne], consulté le 23 oct. 2015, adresse U.R.L. : <**http://country-profiles.geog.ox.ac.uk.**>.

MEDELLÍN-AZUARA (J.), R. E. HOWITT & J. R. LUND, 2010. — *Hydro-economic modeling to assess climate impact and adaptation for agriculture in California*, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://www.adaptation-undp.org/resources/document/hydro-economic-modeling-assess-climate-impact-and-adaptation-agriculture-0**>.

MEDELLIN-AZUARA (J.), R. E. HOWITT, C. WALLER-BARRERA, L. MENDOZA-ESPINOSA, J. R. LUND & J. E. TAYLOR, 2009. — « A Calibrated Agricultural Water Demand Model for Three Regions in Northern Baja California », *Agrosciencia*, vol. XLIII, nº 2 : pp. 83-96, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000200001&nrm=iso**.>

MEDELLÍN-AZUARA (J.), R. E. HOWITT, D. J. MACEWAN & J. R. LUND, 2011. — « Economic impacts of climate-related changes to California agriculture », *Climatic Change*, 109, suppl. 1 : pp. 387-405, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://doi.org/10.1007/s10584-011-0314-3**>.

MEINZEN-DICK (R.), M. A. JANSSEN, S. KANDIKUPPA, R. CHATURVED, R. K. RAO & S.THEIS, 2015. — « Playing games to save water : Collective action games for groundwater management in India », *CBIE working paper*, nº 2017-001, Center for Behavior, Institutions and the Environment, Arizona State University, Tempe, Arizona, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://cbie.asu.edu/sites/default/files/papers/cbie_wp_2017-001_0.pdf**>.

MEINZEN-DICK (R.), M. A. JANSSEN, S. KANDIKUPPA, R. CHATURVED, R. K. RAO, S. THEIS, 2017. — Playing games to save water : Collective action games for groundwater management in India. CBIE working paper no. 2017-001, Center for Behavior, Institutions and the Environment, Arizona State University, Tempe, Arizona. Paper available at : <**https://cbie.asu.edu/sites/default/files/papers/cbie_wp_2017-001_0.pdf**>.

MENDELSOHN (R.), 2012. — « The Economics of Adaptation To Climate Change in Developing Countries », *Climate Change Economics*, vol. III, nº 2, 1250006, 21 p., [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1142/S2010007812500066**>.

MENDELSOHN (R.), W. D. NORDHAUS & D. SHAW, 1994. — « The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis ». *Am. Econ. Rev*. 84, 753–771.

MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION, 1974. — *Mémento de l'agronome*.

MONTGINOUL (M.) & J.-D. RINAUDO, 2009. — « Quels instruments pour gérer les prélèvements individuels en eau souterraine ? Le cas du Roussillon », *Économie rurale*, 310 : pp. 40-56.

MSANGI (S.) & S. CLINE, 2016. — « Improving groundwater management for Indian agriculture: Assessing tradeoffs across policy instruments », *Water Economics and Policy*, vol. II, nº 3, 33 p., [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://dx.doi.org/10.1142/S2382624X16500272**>.

MSANGI (S.), 2008. — *Economic Modeling of Groundwater Usage Behavior in Rural India*, A final report written in support of the World Bank Analytical Advisory Activity on Community Based Groundwater Management: International Food Policy Research Institute, Washington DC.

NATIONS UNIES, 1992. — *Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques*, document F.C.C.C./Informal, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf**>.

NATIONS UNIES, 1998. — *Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques*, consultable sur : <**https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf**>.

NDAO (M.), 2012. — *Dynamiques et gestion environnementales de 1970 à 2010 des zones humides au Sénégal : étude de l'occupation du sol par télédétection des Niayes avec Djiddah Thiaroye Kao (à Dakar), Mboro (à Thiès et Saint-Louis)*, th. doct. géographie, univers. Toulouse le Mirail-Toulouse-II.

NDIAYE (S.), 2014. — *Nationaux sur les changements climatiques, le commerce agricole et la sécurité alimentaire dans l'Uemoa : Cas du sénégal*, Rapport final, Ensa, univers. Thiès.

NDONG (J. B.), 1995. — « L'Évolution de la pluviométrie au Sénégal et les incidences de la sécheresse récente sur l'environnement », [The evolution of rainfall in Senegal and the consequences of the recent drought on the environment], *Revue de géographie de Lyon*, vol. LXX, nºs 3-4 : pp. 193-198, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi : 10.3406/geoca.1995.4212**>.

NEGRI (D.), 1989. — « The common property aquifer as a differential game », *Water Resources Research*., vol. XXV, nº 1 : pp. 9-15, [en ligne], adresse U.R.L. : <**DOI : 10.1029/WR025i001p00009**>.

NELSON (G. C.), M. W. ROSEGRANT, J. KOO, R. ROBERTSON, T. SULSER, T. ZHU, C. RINGLER, S. MSANGI, A. PALAZZO, M. BATKA, M. MAGALHAES, R. VALMONTE-SANTOS, M. EWING & D. LEE, 2009. — *Changement climatique, impact sur l'agriculture et coûts de l'adaptation*, International Food Policy Research Institute (Ifpri).

NELSON (Gerald C.), Amanda PALAZZO, Daniel MASON-D'CROZ, Richard ROBERTSON & Timothy S. THOMAS, 2013. — « Methodology », *in* JALLOH (A.), G. C. NELSON, T. S. THOMAS, R. ZOUGMORÉ & H. ROY-MACAULEY (éd.), *West African Agriculture and Climate Change: A comprehensive Analysis*, Ifpri Research Monograph, Washington D.C., International Food Policy Research Institute, pp. 37-53.

NEW (M.), *et al*., 2006. — « Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa », *Journal of geophysical research*, 111, D14102, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1029/2005JD006289**>.

NOEL (J. E.), B. D. GARDNER & C. V. MOORE, 1980. — "Optimal regional conjunctive water management », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. LXII, nº 3 : pp. 489-498, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://doi.org/10.2307/1240203**>.

NORDHAUS & BOYER, 2000. — cités *in* NORDHAUS, 2007.

NORDHAUS (W. D.), 1999. — « Biens publics globaux et changement climatique », *Revue française d'économie*, vol. XIV, nº 3 : pp. 11-32, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://www.persee.fr/doc/rfeco_0769-0479_1999_num_14_3_1085**>.

NORDHAUS (W. D.), 2005. — « Paul Samuelson and Global Public Goods, A commemorative essay for Paul Samuelson », [en ligne], adresse U.R.L. : <**DOI:10.1093/acprof:oso/9780199298839.003.0006**>.

NORDHAUS (W. D.), 2007. — « To Tax or Not to Tax: Alternative Approaches to Slowing Global Warming », *Review of Environmental Economics and Policy*, Oxford University Press, vol. I, nº 1 : pp. 26-44, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi: 10.1093/reep/rem008**>.

NORDHAUS, 2001. — cités *in* NORDHAUS, 2007.

OECD, 2015. — Drying Wells, Rising Stakes: Towards Sustainable Agricultural Groundwater Use, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, <**http://dx.doi.org/10.1787/9789264238701-en**>.

OLSON, 1965. — cité *in* OSTROM, 1990.

ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE, 2012. — *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé*, OMM, Report number : 1090.

OSTROM (E.), 1990. — *Governing the Commons: the evolutions of institutions for collective action, Political economy of institutions and decisions*, Cambridge [United Kingdom]. Cambridge University Press.

OSTROM (E.), 2010. — *Gouvernance des biens communs : Pour une nouvelle approche des ressources naturelles*, Laurent BAECHLER (trad.), De Boec, (coll. "Planète en jeu"), ISBN 978-2-8041-6141-5.

OSTROM (V.) & E. OSTROM, 1977. — « Public Goods and Public Choices: The Emergence of Public Economies and Industry Structures », *in* EDWARD (S. S., dir.), *Alternatives for delivering public services: toward improved performance*, Boulder, Colorado (É.-U.A.) Westview Press, pp. 7-49.

OUÉDRAOGO (M.), 2012. — Impact des changements climatiques dur les revenus agricoles au Burkina Faso. Journal of Agricultural and Environment for International Development -JAEID-2012, 106 (1): 3-21. URL : <**https://www.researchgate.net/publication/261004312_Impact_des_changements_climatiques_sur_les_revenus_agricoles_au_Burkina_Faso**>.

PADEN, 2013. — *Études de filières horticoles*, rapport définitif, 54 p., ministère de l'Agriculture et de l'Équipement rural, Programme d'aménagement et de développement économique des *Niayes* , Rapport Soned-Afrique.

PADEN, 2014-a. — *Fiche technique de bonnes pratiques de production du chou dans la zone des niayes au Sénégal*, adresse, consulté le 6 août 2015, adresse U.R.L. : <**http://www.paden-senegal.org/IMG/pdf/fiche_technique_bp_chou.pdf**>.

PADEN, 2014-b. — *Fiche technique de production intensive de la carotte*, consulté le 21 mai 2015, adresse U.R.L. : <**http://www.paden-senegal.org/IMG/pdf/fiche_technique_bp_carotte.pdf**>.

PADEN, 2015. — *Fiche technique de bonnes pratiques de production d'oignons dans la zone des Niayes au Sénégal*, consulté en 2015, adresse U.R.L. : <**http://www.paden-senegal.org/IMG/pdf/fiche_technique_bp_oignons.pdf**>.

PANA,. 2006. — *Plan d'actions national pour l'adaptation aux changements climatiques.* Rapport du ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature.

PARIS (Q.), 1992. — « The von Liebig Hypothesis », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. LXXIV, nº 4 : pp. 1019–1028, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.2307/1243200**>.

PEPAM, 2015. — *Accès à l'eau potable et à l'assainissement*, adresse U.R.L. : <**http://www.pepam.gouv.sn/acces.php?rubr=serv**>.

PFISTER (L.), C. WAGNER, E. VANSUYPEENE, G. DROGUE & L. HOFFMANN. 2005. — *Atlas climatique du grand-duché de Luxembourg*, Musée national d'histoire naturelle, Société des naturalistes luxembourgeois, Centre de recherche public-Gabriel Lippmann, Administration des services techniques de l'agriculture, Luxembourg, 80 p.

POTERBA (J. M.), 1991. — « Tax Policy to Combat Global Warming: On Designing a Carbon Tax », NBER, *Working Paper*, nº 3649, also Reprint, no r1678, [en ligne], adresse U.R.L. : <**Doi : 10.3386/w3649**>.

PROVENCHER (B.) & O. BURT, 1993. — « The externalities associated with the common property exploitation of groundwater », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. XXIV, nº 2 : pp. 139-158, [en ligne], adresse U.R.L. : <**DOI : 10.1006/jeem.1993.1010**>.

R.N.D.H., 2010. — *Changement climatique, Sécurité alimentaire et Développement humain*. Available at: <**http://www.refworld.org/pdfid/4e7b5bd42.pdf**.>.

RAES (D.), P. STEDUTO, T. C. HSIAO & E. FERERES, 2011. — *Aquacrop reference manual*. Rome. Available at: <**http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html**>.

RAES (D.), P. STEDUTO, T. C. HSIAO, E. FERERES, 2009. — « Aquacrop, the Fao Crop Model To Simulate Yield Response To Water, II, Main Algorithms And Software Description », *Agronomy Journal*, vol. CIII, nº 3 : pp. 438-447, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.2134/agronj2008.0140s.**>.

RASMUSSEN, 2001. — cité *in* KHOUMA, 2011.

GAUTIER (C.) & A. MAZOUNIE, 2015. — *Comprendre la conférence de Paris sur le climat*. Available at: <**http://macop21.fr/wp-content/uploads/2015/09/COP21-livret-RAC-France.pdf**>.

ROBERTSON (T. S.), 1971. — *Innovative behavior and communication*. New York, Holt, Rinehart and Winston.

ROSENZWEIG (C.), A. IGLESIAS, G. FISCHER, Y. LIU, W. BAETHGEN & J. W. JONES, 1999. — « Wheat yield functions for analysis of land-use change in China », *Environmental Modeling and Assessment*, 4 : pp. 115-132, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://pure.iiasa.ac.at/5939/1/RR-00-15.pdf**>.

ROUDIER (P.), 2012. — *Climat et agriculture en Afrique de l'Ouest : Quantification de l'impact du changement climatique sur les rendements et évaluation de l'utilité des prévisions saisonnières*, th. doct. économie de l'environnement et ressources naturelles, École des hautes études en sciences sociales (Ehess).

ROUDIER (P.), B. SULTAN, P. QUIRION & A. BERG, 2011. — « The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? », *Global Environmental Change*, vol. XXI, nº 3 : pp. 1073-1083, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007**>.

ROUMASSET & WADA, 2011. — cités *in* BOOKER *et al.*, 2012.

ROUSSEAU (S.), *s. d.* — *Capabilités, risque et vulnérabilité*, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://ged.u-bordeaux4.fr/SAROUSSEAU.pdf**>.

SADOULET (E.), & A. DE JANVRY, 1995. — *Quantitative Development Policy Analysis*, Baltimore, The Johns Hopkins University Press.

SAED, 2010. — cité *in* KHOUMA, 2011.

SAFOUANE (M.), N. SAIDA, J. SIHEM & S. MOHAMED, 2016. — « Using the Markov Chain for the Generation of Monthly Rainfall Series in a Semi-Arid Zone », *Open Journal of Modern Hydrology*, 6 : pp. 51-65, [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2016.62006**>.

SALL (M.), 2015. — *Les exploitations agricoles familiales face aux risques agricoles et climatiques : stratégies développées et assurances agricoles*, th. doct. études rurales en sciences du développement, univers. Toulouse-II.

SAMUELSON (A.), 1997. — *Les Grands courants de la pensée économique : Concepts de base et questions essentielles*, 5e éd., Grenoble, Presses universitaires de Grenoble.

SAMUELSON (P. A.), 1954. — «The Pure Theory of Public Expenditure ». *The Review of Economics and Statistics*, vol: 36 (4) pp: 387-389. Adresse U.R.L. : <**https://www.ses.unam.mx/docencia/2007II/Lecturas/Mod3_Samuelson.pdf**>.

SARR (K.), 2016. — *An equilibrium analysis of the impact of climate change on food crop production and prices in Sénégal*, th. doct. sciences économ., univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

SARR (M. N.), 2010. — *La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau souterraine dans la région des Niayes au Sénégal : Perspectives pour la micro-irrigation*, mém. master. univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

SCHLENKER (W.) & M. J. ROBERTS, 2008. — « Estimating the Impact of Climate Change on Crop Yields: The Importance of Nonlinear Temperature Effects », *National Bureau of Economic Research*, *Working Paper*, Series, no 13799.

SCHLENKER (W.) & M. J. ROBERTS, 2008. — *Estimating the impact of climate change on crop yields: the importance of nonlinear temperature effects*. nber working paper No. 13799. Available at: <**https://www.nber.org/papers/w13799.pdf**>.

SCHLENKER (W.), M. HANNEMANN & A. FISCHER, 2005. — « Will US agriculture really benefit from global warming ? Accounting for irrigation in the hedonic approach », *American Economic Review*, vol. XCV, nº 1 : pp. 395-406.

SEKHRI (S.), 2011. — « Missing Water: Agricultural Stress and Adaptation Strategies in Response to Groundwater Depletion among Farmers in India », *IGC Working Paper*, International Growth Centre (IGC), Londres (U.K.), 27 p.

SEKHRI (S.), 2014. — « Wells, water, and welfare: The impact of access to groundwater on rural poverty and conflict », *American Economic Journal: Applied Economics*. , vol. VI, nº 3 : pp. 76-102, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1257/app.6.3.76**>.

SÈNE (I. M.), 2007. — *Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Sénégal : dynamiques climatiques, économiques, adaptations, modélisation du bilan hydrique de l'arachide et du mil*, th. doct. géographie, univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

SEO (S. N.) & R. MENDELSOHN, 2007. — « A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on Latin American Farms », World Bank Policy Research Series Working Paper 4163, Washington DC, USA.

SEO (S. N.) *et al.*, 2008. — « A ricardian analysis of the distribution of climate change impacts on agriculture across agro-ecological zones in Africa », pp. 1-30, consultable sur : <**http://documents.worldbank.org/curated/en/486041468211448436/A-ricardian-analysis-of-the-distribution-of-climate-change-impacts-on-agriculture-across-agro-ecological-zones-in-Africa**>.

SITTA (A.), 2011. — *Optimizing irrigated horticulture and prediction of climate change impacts by crop modeling for Niger*, Master of Science, Oklahoma State University.

SMIT (B.), O. PILIFOSOVA, I. BURTON, B. CHALLENGER, S. HUQ, R. J. T., KLEIN, G. YOHE, N. ADGER, T. DOWNING, E. HARVEY, S. KANE, M. PARRY, M. SKINNER & J. SMITH, 2001. — « Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity », *in* MCCARTHY (J. J.), O. F. CANZIANI, N. A. LEARY, D. J. DOKKEN & K. S. WHITE (éd.). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp. 877-912, 2001.

SONES, 2015. — *Base de données sur les prélèvements annuels dans les nappes de la zone des Niayes sur la période 2000-2014*.

SONKO (M. M.), 2012. — *Chaîne de valeurs oignon au Sénégal : Analyse de la Compétitivité et Stratégies d'intervention pour la Croissance du secteur*, mém. fin d'études, départ. économie et sociologie rurales, École nationale supérieure d'agriculture (Ensa), Thiès.

STERN (N. H.), 2007. — *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge (U.K.), Cambridge University Press.

SY (A.), 2012. — *Étude diagnostique et plan d'actions de l'association des unions maraîchères des Niayes (Aumn)*, Rapport final, programme d'aménagement et de développement économique des *niayes* (Paden).

TANAKA (S. K.), T. J. ZHU, J. R. LUND, R. E. HOWITT, M. W. JENKINS, M. A. PULIDO, M. TAUBER, R. S. RITZEMA & I. C. FERREIRA, 2006. — Climate warming and water management adaptation for California. *Climatic Change*. 76 (3–4), pp. 361-387, [en ligne], adresse U.R.L. : <**DOI https://doi.org/10.1007/s10584-006-9079-5**>.

TIETENBERG (T. H.) & L. LEWIS, 2009. — *Environmental & natural resource economics,* 8e éd., États-Unis d'Amérique, Pearson Addison Wesley.

TIETENBERG (T.) & L. LEWIS, 2012. — *Environmental & Natural Resource Economics,* 9e éd., États-Unis d'Amérique, Pearson Education Inc., [en ligne], adresse U.R.L. : <**http://s1.downloadmienphi.net/file/downloadfile7/200/1375238.pdf**>.

TINE (A. K.), 2004. — *Étude des transferts d'eau et problématique des nitrates dans la zone non saturée en région sahélienne. Exemples: nord et centre du Sénégal*, th. doct. géologie appliquée, mention hydrogéologie, univers. Cheikh-Anta-Diop, Dakar.

TOL (R. S. J.), 2009. — « The Economic Effects of Climate Change », *Journal of Economic Perspectives*., vol. XXIII, no 2 : pp. 29-51, [en ligne], adresse U.R.L. : <**DOI: 10.1257/jep.23.2.29**>.

TOMINI (A.), 2014. — « Is the Gisser and Sánchez model too simple to discuss the economic relevance of groundwater management? », *Water Resources and Economics*, 6 : pp. 18-29, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi:10.1016/j.wre.2014.05.004**>.

TOURÉ (O) & S. M. SECK, 2005. — *Exploitations familiales et entreprises agricoles dans la zone des Niayes au Sénégal*, International Institute for Environment and Development, dossier no 133.

U.N.F.C.C.C., 2006. — *United Nations Framework Convention on Climate Change : Handbook*, Intergovernmental and Legal Affairs, Climate Change Secretariat.

VARELA-ORTEGA (C.), I. BLANCO-GUTIÉRREZ, P. ESTEVE, S. BHARWANI, S. FRONZEK, T. E. DOWNING, 2016. — « How can irrigated agriculture adapt to climate change? Insights from the Guadiana Basin in Spain », *Regional Environmental Change*, vol. XVI, no 1 : pp. 59-70, [en ligne], adresse U.R.L. : <**doi: 10.1007/s10113-014-0720-y**>.

W.F.P., 2011. — Sénégal: Cartographie des zones agro-écologiques, [en ligne], consulté déc. 2017, adresse U.R.L. : <**https://reliefweb.int/map/senegal/senegal-cartographie-des-zones-agro-cologiques-2011**>.

W.M.O. (*World Meteorological Organization*), 2017. — *Commission for Climatology: frequently asked questions*, consulté en 2017, adresse U.R.L. : <**http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faqs.php**>.

WANG (C.) & E. SEGARRA, 2011. — « The economics of commonly owned groundwater when user demand is perfectly inelastic », *Journal of Agricultural and Resource Economics*, vol. XXXVI, no 1 : pp. 95-120, [en ligne], adresse U.R.L. : <**https://ageconsearch.umn.edu/record/105533/files/JARE_Apr2011__07_pp95-120_Wang.pdf?version=1**>.

WEERSINK *et al*. 2002. — cités *in* KRAGT, 2012.

YOU GENE, JIING-YUN, & C. RINGLER, 2010. — Hydro-Economic Modeling of Climate Change Impacts in Ethiopia. Retrieved from.

Listes

Noms vernaculaires

CÉANE

(du wolof) Puits traditionnel, souvent de faible profondeur, dans lequel le puisage peut se faire manuellement (CISSÉ *et al.*, 2001).

NIAYES

(du wolof) Au sens large, paysages constitués de dunes et de dépressions inter dunaires qui s'échelonnent le long de la Grande Côte du Sénégal. Au sens strict, dépressions inter dunaires accentuées avec une végétation spécifique et pouvant être inondées en permanence ou temporairement (NDAO, 2012).

COXER

(du wolof) Intermédiaire entre les producteurs et les commerçants qui facilite l'écoulement de la production. Il reçoit une commission pour chaque sac vendu.

Liste des tableaux

TABLEAU I
Communautés rurales de la zone des *niayes* 36
TABLEAU II
Organisations de producteurs rencontrées lors des entretiens de prospection 119
TABLEAU III
Répartition échantillon selon les zones 121
TABLEAU IV
Répartition de la taille des unités de production en termes de superficie 122
TABLEAU V
Principales sources d'eau dans l'échantillon 122
TABLEAU VI
Mode d'exhaure de l'eau 123
TABLEAU VII
Main-d'œuvre saisonnière 124
TABLEAU VIII
Quantités et coût des intrants pour le modèle production 124
TABLEAU IX
Données de calcul de l'usage d'eau par les spéculations 126
TABLEAU X
Infiltration de l'eau de pluie dans la nappe des sables du quaternaire des *niayes* 127

TABLEAU XI
Prélèvements annuels des forages ruraux dans les régions de Thiès, Louga, Saint-Louis 129
TABLEAU XII
Prélèvements annuels nappe des sables du quaternaire (N.S.Q.) dans les régions de Louga, Thiès, Saint-Louis (zone des *niayes*) 130
TABLEAU XIII
Paramètres du modèle hydro-économique 131
TABLEAU XIV
Comparaison caractéristiques statistiques de la série de pluviométrie simulée et celle observée 132
TABLEAU XV
Différence d'allocation des superficies entre l'année de base (2014) et l'année finale (2023) sous différents scénarios climatiques 140
TABLEAU XVI
Comparaison des revenus nets des spéculations et de leurs besoins en eau 140

En annexe :
TABLEAU XVII
Résultats sur la profondeur de la nappe selon les scénarios et le mode d'optimisation 178
TABLEAU XVIII
Prélèvements des producteurs selon les scénarios et le mode d'optimisation 178
TABLEAU XIX
Pluviométrie simulée 179
TABLEAU XX
Échantillon 179
TABLEAU XXI 202
TABLEAU XXII
Production nationale de légumes de 2010-2011 à 2013-2014 211
TABLEAU XXIII
Production nationale de fruits de 2010-2011 à 2013-2014 211
TABLEAU XXIV
Production nationale de 2010-2011 à 2013-2014 212

Liste des figures

FIG. 1. — Zones agro-écologiques du Sénégal. Source : W.F.P. (2011). 18
FIG. 2. — Localisation de la zone des *niayes*. Source : Site Paden . La zone couvre les communautés rurales répertoriées dans le TABLEAU I. 35
FIG. 3. — Les couches d'aquifères dans les *niayes*. Source : FAYE (Amy), adapté de D.G.P.R.E. (2009). 38
FIG. 4. — Évolution mensuelle des précipitations sur la période 1970-2011 entre les mois de janvier et décembre dans les stations météorologiques des *niayes*. Source : Calculs de l'auteur auteurs à partir des données de l'ANACIM (2013). 39
FIG. 5. — Évolution mensuelle des températures minimales sur la période 1970-2011 entre les mois de janvier et décembre dans les stations météorologiques des *niayes*. Source des données : Calculs de l'auteur à partir des données de l'ANACIM (2013). 40

FIG. 6. — Évolution mensuelle des températures maximales sur la période 1970-2011 entre les mois de janvier et décembre dans les stations météorologiques des *niayes*. Source des données: Calculs de l'auteur à partir des données de l'ANACIM (2013). 41
FIG. 7. — Répartition de l'accès au crédit dans la zone des *niayes*. Source : Calcul de l'auteur à partir des données du recensement de l'horticulture dans les *niayes* (DIRECTION DE L'HORTICULTURE, 2013). 44
FIG. 8. — Indice de précipitation standardisé des *niayes* sur la période 1970-2011. Source : Calcul de l'auteur à partir des données de l'ANACIM (2013). 47
FIG. 9. — Évolution des isohyètes sur la période 1931-1990 au Sénégal. Source : NDONG (1995). 48
FIG. 10. — Interactions des acteurs dans l'adaptation au changement climatique. Source : FAYE (2018). 59
FIG. 11. — Biais de l'approche fonction de production. Source : Auteur, adapté de DESCHÊNES & GREENSTONE (2006 et 2007) et de MENDELSOHN *et al*. (1994). 79
FIG. 12. — Exemples d'approches intégrées. Source : FAYE (Amy), 2018. 83
FIG. 13. — Relation entre les modèles hydrologique et économique et échange de données entre les modèles. Source : BLANCO-GUTIÉRREZ *et al*., 2013. 96
FIG. 14 — Interaction et échange de données entre composantes de notre approche. Source : FAYE (Amy), 2018. 104
FIG. 15. — Dynamiques de l'aquifère ; cas d'un seul réservoir. Source : FAYE (Amy), 2018. 106
FIG. 16. — Représentation graphique du bénéfice tiré de l'usage de la nappe à partir de la fonction de demande en eau des producteurs. Source : FAYE (Amy), 2018. 108
FIG. 17. — Étapes pour le développement de scenarios de précipitation. Source : Auteurs en nous inspirant de SAFOUANE *et al*. (2016). 117
FIG. 18. — Évolution des prélèvements du forage de Thiaroye de la N.S.Q. Source données : SONES (2015). 129
FIG. 19. — Scénario pluviométrique de référence simulé comparé à la série pluviométrique observée. 132
FIG. 20. — Résultats de scénarios de précipitations sur dix ans à partir de 2014. Source données : simulations auteur à partir de données ANACIM.FIG. 22. — Prélèvements d'eau des producteurs cas statique scénario de référence. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse. 133
FIG. 21. — Profondeur nappe cas statique scénario de référence. Source: résultats auteur à partir de données d'enquête de thèse. 134
FIG. 22. — Prélèvements d'eau des producteurs cas statique scénario de référence. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse. 135
FIG. 23. — Profondeur de la nappe selon les scénarios pluviométriques. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse. 136
FIG. 24. — Prélèvements des producteurs selon les scénarios. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse. 137
FIG. 25. — Niveau nappe avec différentes taxes. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse. 147
FIG. 26. — Prélèvements d'eau des producteurs avec différentes taxes. Source données : Simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse. 147
FIG. 27. — Baisse des superficies avec différents niveaux de taxe. Source données : simulations auteur à partir de données d'enquête de thèse. 148

En annexe :

FIG. 28. — Résultats de calibration "superficies" du modèle producteur. Source : FAYE (Amy), 2018. 180

FIG. 29. — Résultats de calibration “rendements”. Source : FAYE (Amy), 2018. 180
FIG. 30. — Distribution de probabilité séries pluviométriques de base et simulée. 204
FIG. 31. — Moyennes annuelles températures minimales Dakar de 1970 à 2011. Source données : ANACIM. 207
FIG. 32. — Moyennes annuelles précipitations Dakar et Thiès de 1970 à 2011. Source données : Anacim.FIG. 32. — Moyennes annuelles précipitations Dakar et Thiès de 1970 à 2011. Source données : Anacim. 207
FIG. 33. — Moyennes annuelles températures minimales Louga de 1970 à 2011. Source : Anacim. 208
FIG. 34. — Moyennes annuelles précipitations Saint-Louis et Louga, 1970 à 2011. Source : Anacim. 208
FIG. 35. — Moyennes annuelles températures minimales Thiès de 1970 à 2011. Source : Anacim. 208
FIG. 36. — Moyennes annuelles températures maximales Dakar de 1970 à 2011. Source : Anacim. 209
FIG. 37. — Moyennes annuelles températures maximales Saint-Louis, 1970-2011. Source : Anacim. 209
FIG. 38. — Moyennes annuelles températures maximales Thiès de 1970 à 2011. Source : Anacim. 209
FIG. 39. — Moyennes annuelles températures maximales Louga de 1970 à 2011. Source : Anacim. 210
FIG. 40. — Moyennes annuelles températures minimales Saint-Louis de 1970 à 2011. Source : Anacim. 210

Liste des réductions graphiques

Les réductions graphiques comprennent :

— les sigles, qui se prononcent lettre à lettre ;
— les acronymes qui se prononcent comme un mot ordinaire ;
— les abréviations pour lesquelles on prononce le mot source ;
— les symboles (d’unité de mesure, par exemple), les formules chimiques, qui fonctionnent comme les abréviations.

Sigles ou acronyme peuvent aussi bien être des noms communs que des noms propres ; en ce dernier cas, les acronymes prennent la capitale initiale ; ils peuvent être des réductions graphiques du français ou de l’anglais.

AgMip	*Agricultural Model Intercomparison Project*
Anacim	Agence nationale de l’aviation civile et de la météorologie
A.N.S.D.	Agence nationale de statistique et de la démographie
B.P.G.	Bien public global
C.C.A.F.S.	*Climate Change, Agriculture and Food Security*
C.C.D.	Convention cadre de lutte contre la désertification
C.C.N.U.C.C.	Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques
C.Giar	*Consultative Group on International Agricultural Research*
CH_4	Méthane
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CO_2	Gaz carbonique
Comnacc	Comité national changements climatiques

C.R.	Communauté/Commune rurale
Cropwat	*Computer program for the calculation of crop water requirements and irrigation requirements based on soil, climate and crop data*
Cropsyst	*Cropping Systems Simulation Model*
C.S.E.	Centre de suivi écologique
C.T.	*Continental Terminal*
Deec	Direction de l'environnement et des établissements classés
Dem	Direction de l'exploitation et de la maintenance
D.G.P.R.E.	Direction de la gestion et de la planification des ressources en eau
D.S.S.A.T.	*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*
Echam5	*Fifth European Centre Hamburg Model*
F.A.O.	*Food and Agriculture Organization of the United Nations*
Fem	Fonds pour l'Environnement Mondial
F.M.I.	Fonds monétaire international
Gams	*General Algebraic Modeling System*
G.E.S.	Gaz à effet de serre
Giec	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
H.F.C.	Hydrofluorocarbures
I.C.S.	Industries chimiques du Sénégal
Ifpri	*International Food Policy Research Institute*
I.P.C.C.	*Intergovernmental Panel on Climate Change*
I.P.S.	Indice de précipitation standardisé
Isra	Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
L.P.A.	Laboratoire de la Physique de l'Atmosphère de l'UCAD
M.C.G.	Modèles de Circulation Générale
M.D.P.	Mécanisme de Développement Propre
M.H.E.	Modèle hydro-économique
M.S.C.	Modèles de Simulation de Culture
N_2O	Protoxyde d'Azote
Nerica	New Rice for Africa
N.S.Q.	Nappe libre des Sables du Quaternaire
O.E.C.D.	Organization for Economic Co-operation and Development
O.M.M.	Organisation Météorologique Mondiale
O.N.G.	Organisations Non Gouvernementales
Onu *ou* O.N.U.	Organisation des Nations Unies
O.P.	Organisations de Producteurs
Paden	Programme d'Amenagement et de Développement Economique des *Niayes*
Pana	Plan d'action pour l'adaptation aux changements climatiques
Pepam	Programme d'eau potable et d'assainissement du Millénaire
P.F.C.	Perfluorocarbures ou hydrocarbures perfluorés
Pib *ou* P.I.B.	Produit intérieur brut
P.M.P.	Programmation mathématique positive
Pracas	Programme d'Accélération de la Cadence de l'Agriculture Sénégalaise
Reva	Retour vers l'agriculture
R.N.D.H.	Rapport national sur le développement humain
Sarra-H	Système d'analyse régional des risques agroclimatiques-habillé
S.D.E.	Société des eaux du Sénégal
SF_6	Hexafluorure de soufre
S.F.D.	Systèmes financiers décentralisés
Snacc	Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique

S.N.D.D.	Stratégie nationale pour le développement durable
Sones	Société nationale des eaux du Sénégal
Soygro	*Soybean Crop Growth Simulation Model*
Sres	*Special Report on Emissions Scenarios*
S.R.P.	Stratégie de réduction de la pauvreté
Swap	*Statewide Agricultural Production Model*
Toa-M.D. 5	*Tradeoff Analysis Multi-Dimensional impact assessment model*
Ucad	Université Cheikh-Anta-Diop de Dakar
U.N.F.C.C.C.	*United Nations Framework Convention on Climate Change*
Wascal	*West African Science Service Center on Climate Change and Adapted Land Use*
Weap	*Water Evaluation and Planning modeling platform*
W.F.P.	*World Food Program*

Annexes

Sommaire des annexes

Annexe I Tableaux de résultats et échantillon 178
A. Résultats sur la disponibilité de l'eau 178
B. Résultats sur la pluviométrie simulée 179
C. Répartition de l'échantillon 179
D. Résultats de calibration du modèle ferme 180
Annexe II Outils de collecte de données 181
Phase pré-enquête 181
Guide d'entretiens des *focus groups* menés avec les organisations de producteurs des *niayes* 181
Phase enquête 184
Questionnaire sur le changement climatique dans les *niayes* 184
ANNEXE III Méthode de résolution de la programmation dynamique, approche P.M.P. 193
A Méthode de résolution numérique du programme dynamique dans la littérature 193
B. L'approche P.M.P 196
Annexe IV Informations additionnelles sur les scénarios pluviométriques 202
ANNEXE V 205
ANNEXE VI
Exemples de stratégies d'adaptation endogènes dans la zone des Niayes : cas de la commune rurale de Keur Moussa
ANNEXE VII
Figures sur l'évolution des précipitations et des températures sur la période 1970-2011 dans les niayes
ANNEXE VIII
Production horticoles nationales de 2010-2011 à 2013-2014* 211
ANNEXE IX
Code des modèles sur GAMS 212

ANNEXE I
Tableaux de résultats et échantillon

A. Résultats sur la disponibilité de l'eau

TABLEAU XVII

Résultats sur la profondeur de la nappe selon les scénarios et le mode d'optimisation

ANS	SCÉNARIO DE BASE			SCÉNARIO SEC			SCÉNARIO HUMIDE		
	STATIQUE	*DYNAMIQUE*	*DIFFÉRENCE*	*STATIQUE*	*DYNAMIQUE*	*DIFFÉRENCE*	*STATIQUE*	*DYNAMIQUE*	*DIFFÉRENCE*
1	7,050	7,050	0,000	7,05	7,05	0,000	7,050	7,050	0,000
2	7,140	7,139	- 0,002	7,139	7,137	- 0,002	7,132	7,131	- 0,002
3	7,222	7,219	- 0,003	7,227	7,224	- 0,003	7,209	7,206	- 0,003
4	7,303	7,299	- 0,004	7,311	7,307	- 0,004	7,287	7,282	- 0,004
5	7,378	7,373	- 0,006	7,393	7,387	- 0,006	7,360	7,354	- 0,006
6	7,457	7,450	- 0,007	7,474	7,467	- 0,007	7,433	7,426	- 0,007
7	7,536	7,528	- 0,008	7,552	7,544	- 0,008	7,502	7,494	- ,008
8	7,609	7,600	- 0,009	7,629	7,620	- 0,009	7,573	7,564	- 0,009
9	7,677	7,667	- 0,010	7,704	7,694	- 0,010	7,639	7,629	- 0,010
10	7,744	7,733	- 0,011	7,777	7,766	- 0,011	7,707	7,696	- 0,011

L'unité est le mètre linéaire.
Source : FAYE (Amy), 2018.

TABLEAU XVIII

Prélèvements des producteurs selon les scénarios et le mode d'optimisation

ANS	SCÉNARIO DE BASE			SCÉNARIO SEC			SCÉNARIO HUMIDE		
	STATIQUE	*DYNAMIQUE*	*DIFFÉRENCE*	*STATIQUE*	*DYNAMIQUE*	*DIFFÉRENCE*	*STATIQUE*	*DYNAMIQUE*	*DIFFÉRENCE*
1	31,40	30,857	- 0,539	31,397	30,857	- 0,540	31,397	30,857	- 0,540
2	30,506	30,003	- 0,503	30,518	30,015	- 0,503	30,583	30,078	- 0,505
3	29,731	29,260	- 0,471	29,686	29,216	- 0,470	29,849	29,375	- 0,474
4	28,987	28,545	- 0,442	28,919	28,479	- 0,440	29,136	28,691	- 0,445
5	28,326	27,910	- 0,416	28,199	27,786	- 0,414	28,487	28,067	- 0,420
6	27,653	27,261	- 0,392	27,513	27,124	- 0,389	27,853	27,457	- 0,396
7	27,004	26,634	- 0,370	26,876	26,508	- 0,367	27,275	26,900	- 0,375
8	26,418	26,068	- 0,350	26,264	25,917	- 0,347	26,700	26,345	- 0,355
9	25,891	25,559	- ,332	25,686	25,358	- 0,329	26,182	25,845	- 0,337
10	25,387	25,072	- 0,316	25,142	24,831	- 0,312	25,667	25,347	- 0,320

Les résultats sont exprimés en ($x10^6$ m^3).
Source : FAYE (Amy), 2018.

B. Résultats sur la pluviométrie simulée

TABLEAU XIX

Pluviométrie simulée

ANS	PRÉCIPITATIONS		
	SCÉNARIO DE BASE	SCÉNARIO PLUVIOMÉTRIQUE SEC	SCÉNARIO PLUVIOMÉTRIQUE HUMIDE
1	163,3	209,225	462,35
2	389,325	163,3	569,725
3	318,05	209,225	479,925
4	479,925	209,225	569,725
5	259,85	166,225	471,65
6	192,325	209,225	569,725
7	318,05	163,3	439,975
8	458,95	166,225	569,725
9	439,975	182,725	458,95
10	386,275	192,325	479,925
Moyenne	340,6	187,1	507,17
Coefficient de variation	0,32	0,11	0,11

Les résultas sont exprimés en millimètres.
Source : FAYE (Amy), 2018.

C. Répartition de l'échantillon

TABLEAU XX

Échantillon

RÉGIONS	DÉPARTEMENTS	COMMUNAUTÉS RURALES	VILLAGES	PRODUCTEURS
Dakar	Rufisque	Bambilor	Kounoune	11
		Bambilor	Keur Daouda Sarr	5
Louga	Louga	Léona	Sague Sathiel	15
		Léona	Gnayam	15
		Léona	Potou1	15
	Kébémer	Diokoul Diawrign	Bègne Penda	15
		Thieppe	Yodi Sayoro	13
		Diokoul Diawrign	Ndiawrigne amari	15
		Diokoul Diawrign	Saly	14
		Kab Gaye	Ndiobène	12
		Thieppe	Gouy Seg	15
St-Louis	St-Louis	Fass Ngom	Semelle	15
		Gandon	Ndiaoussir Lebou	15
			Rao Peulh	15
		Ndiebene Gandiole	Ricotte	15

			Pelour 2	14
Thiès	Thiès	Keur Moussa	Ndeuye	15
			Niakhip	15
		Djender Guedj	Ndieuguene	14
			Ndiar Tidiane	14
	Tivaouane	Mboro	Ndeune	12
			Mboro Mbaye Mbaye	15
			Mboro Ouolof	13
		Notto Gouye Diama	Notto Gouye Diama	14
		Darou Khoudoss	Darou Fall	12
		Méouane	Ngakham 2	13
		Taiba Ndiaye	Bal Samb	13

Source : FAYE (Amy), 2018.

D. Résultats de calibration du modèle ferme

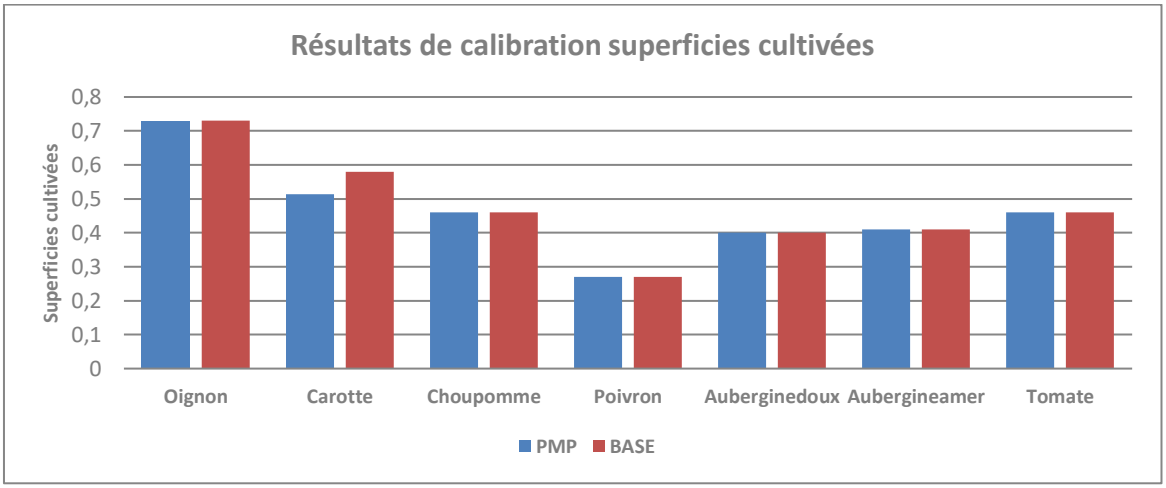

FIG. 28. — Résultats de calibration “superficies” du modèle producteur. Source : FAYE (Amy), 2018.

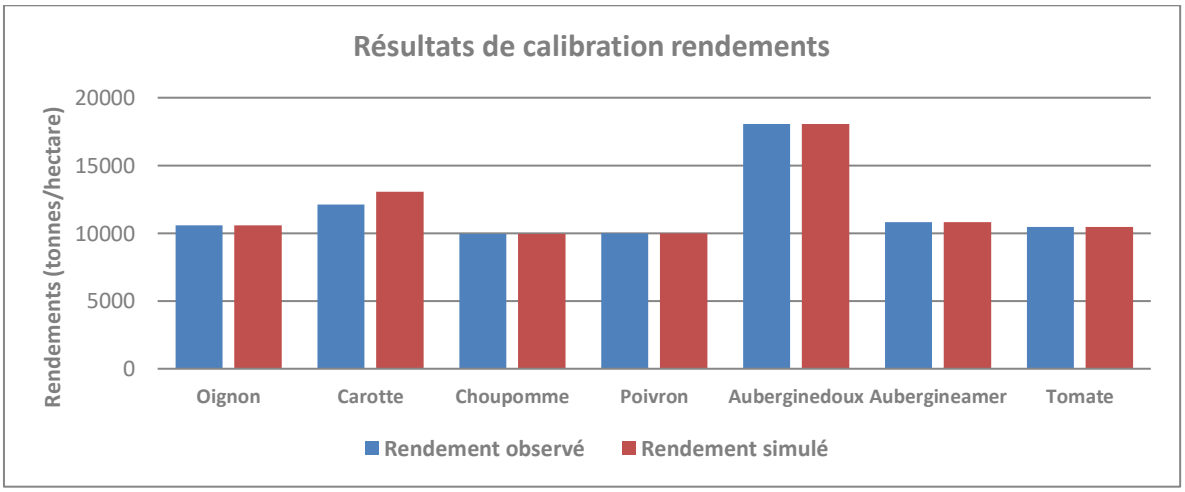

FIG. 29. — Résultats de calibration “rendements”. Source : FAYE (Amy), 2018.

ANNEXE II
Outils de collecte de données

Phase pré-enquête

Guide d'entretiens des *focus groups* menés avec les organisations de producteurs des *niayes*

TYPE D'EXPLOITATIONS, ACTIVITÉS, REVENUS

Quelle est la taille des exploitations (petites, moyennes, grandes) présentes dans votre village ?
Quelle est la taille des exploitations (petites, moyennes, grandes) qui domine dans cette zone ?
Quelles sont vos principales activités agricoles ?
Quelles sont vos principales activités non agricoles ?
Quelle est la contribution des activités agricoles et non agricoles dans vos revenus ? (%)
Comment varient les rendements des différentes spéculations d'une saison à une autre ? D'une année à une autre ?
Pratiquez-vous la rotation ? Durant quelle saison ?

IRRIGATION ET DISPONIBILITÉ EAU

Quel système d'irrigation utilisez-vous ?
- — S.D.E.
- — Goutte à goutte
- — Irrigation à la raie
- — Forages collectifs
- — Puits

Quelle est la source de l'eau pour le système d'irrigation ?
- — Nappes souterraines, laquelle ?
- — Lacs

Si puits ou forages quelle en est la profondeur ?
Quelle est la fréquence de l'arrosage en saison sèche ? En saison des pluies ?
Si c'est un forage, un puit, ...quelle est la durée de la disponibilité de l'eau ?
Y a t-il d'autres usagers de l'eau souterraine ?
Y-a-t-il des limitations dans l'usage des eaux souterraines ?

PÉDOLOGIE

Quel sont les types de sol ?
Qu'en est-il de l'humidité du sol en saison sèche ? En saison des pluies ?
Utilisez-vous du fertilisant ? Si oui lesquels ?

— Compost
— Fumier (vache, mouton, chèvre)
— Fiente de poulet
— Fiente de poisson

Des produits phytosanitaires ? Lesquels ?

PERCEPTIONS SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Connaissez-vous le changement climatique ?
Comment le définissez-vous ?
Avez-vous remarqué un changement du climat les trente dernières années (périodes de sécheresse ces dernières années, périodes d'humidité ?). Comment ont varié les températures et les précipitations dans le passé ?
Que pensez-vous de l'alimentation de la nappe ces dernières années ?
Que pensez-vous de l'alimentation de la nappe en période de saison sèche ?
Comment est affectée la disponibilité de l'eau lors des périodes de sécheresse (durée eau des forages, puits pour la saison sèche) ? Pour la saison des pluies ?
Quelles sont vos perceptions du changement climatique ?
Pensez-vous que les variations des rendements soient liées aux aléas climatiques ? Si oui, comment et en quoi ?

— Forte/faible pluviométrie ?
— Hausse températures
— Dégradation des sols ?
— Disponibilité nappe ?
— Humidité de l'air ?
— Salinisation des eaux ?
— Vents
— Autres ?

Comment les facteurs climatiques (e.g. une hausse des températures, humidité…) affectent-t-ils la périssabilité des produits stockés ?
Selon vous quelles spéculations seront plus impactées par le changement climatique (les plus sensibles au climat) ?
Selon vous, quels sont les types d'exploitations les plus menacées par le cc (en termes de taille) ?
Pensez-vous que les effets ressentis vont empirer d'ici une trentaine d'années voire plus ?

STRATÉGIES D'ADAPTATION

Jusque-là, comment vous vous êtes organisés pour faire face au cc ? (*i. e.* stratégies d'adaptations)

— Pratiques culturales qui ont été délaissées ? Si oui depuis quand les avez-vous délaissées ? Pourquoi ?
— Augmenter vos activités non agricoles ces dernières années ?
— Migrations de certains membres de votre famille vers d'autres villes ou à l'extérieurs ?
— etc.

Les trente dernières années y-a-t-il eu de nouvelles techniques culturales (nouveau type de machine, nouvelle variété, …) qui ont eu un impact sur les rendements ? Si oui y en a-t-il parmi vous certains qui les ont adoptées ?
Êtes-vous informés des prévisions météorologiques ?
Quelle en est la fréquence ?
Selon vous quelles sont les contraintes de l'horticulture ?

ACCÈS AU FINANCEMENT

Avez-vous accès au crédit ?

PROJETS DANS LA ZONE

Y a-t-il eu des projets sur le cc dans la zone ?
Qui sont les gestionnaires ?
Si oui, quels sont les activités des projets ? En quoi vous aident-elles à mieux comprendre le cc et y faire face au cc ?

BESOINS

De quoi avez-vous besoin pour mieux développer votre productivité ?

Annexe I (Phase pré-enquête ex-B.)

Guide d'entretien D.G.P.R.E.

— Dans les *Niayes* , quelles sont les nappes présentes ?
— Carte des nappes phréatiques dans la zone ?
— Comment évoluent leur niveau par rapport au climat (précipitations, température, vent...)
— Quelle est la source de leur recharge ?
— Quelle est leur niveau de salinité ?
— Quelle nappe est plus vulnérable à la salinité ?
— Comment le niveau de la nappe est affecté par la salinité ? (plus bas niveau--synonyme de plus de salinité ?)
— Disposez-vous de données sur les niveaux des nappes (séries ?) ? Sur les débits ? Sur la recharge annuelle ? Niveaux piézométriques ?
— Faites vous des prévisions sur les niveaux des nappes ?
— Disposez-vous de données sur les niveaux de salinité ? Faites-vous des prévision ?

— Quelles sont les études qui ont été menées sur les nappes (leur niveau, leur qualité, i.e. la salinité) ?
— Y a t-il des logiciels qui permettent de mesurer l'impact du niveau de la nappe sur la salinité ? ou des études qui l'on montré ? Qui permettent de faire une projection du niveau de la nappe ? Du niveau de salinité ?
— Humidité du sol ?

Phase enquête

A Questionnaire

QUESTIONNAIRE SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES *NIAYES*

CAMPAGNE SAISON SÈCHE (FROIDE ET CHAUDE) 2013-2014

Ce questionnaire a pour objectif de connaître les activités des producteurs (agricoles et non agricoles), les systèmes de production (agriculture, maraichage, systèmes mixtes--agriculture-élevage), d'établir les comptes d'exploitation des producteurs pour les saisons sèche froide et chaude de la campagne maraîchère 2013-2014.

Date de collecte :
Nom enquêteur :
Date de saisie :
par :

Identification du site :
Région
Département
C.R.
Village

I. Caractéristiques de l'enquêté

Nom et prénom du chef d'exploitation : sexe :
M = Masculin
F = Féminin

Age ou année de naissance :

Numéro tel :

Type et niveau d'instruction :

	FRANÇAIS	ARABE/CORAN	LANGUE MATERNELLE : ALPHABÉTISATION
Lecture			
Écriture			
Calcul			
Aucun niveau			

(Cocher la partie concernée)

Quelles sont vos activités ?

Quelle est votre activité principale ?

Quelle est votre activité secondaire ?

II. Caractérisation de l'exploitation

II.1. POPULATION DE L'EXPLOITATION

Remplir le tableau suivant :

	HOMMES	FEMMES
Population totale		
Nombre personnes (plus de 15 ans)		
Nombre enfants de moins de 15 ans		
Nombre de sourga		
Nombre d'ouvriers agricoles		
Nombre de ménagères		
Nombre de pêcheurs		
Nombre de commerçants		
Nombre d'artisans		
Nombre de bergers		
Nombre de chauffeurs		
Nombre de tailleurs		
Nombre de migrants		
Nombre de menuisiers		
Nombre de mécaniciens		

II.2. CAPITAL DE L'EXPLOITATION

Foncier

Quelle superficie possédez-vous ? (ha) :

Équipement agricole

Matériel Agricole	Quantité	Prix Unitaire	Année d'acquisition ou durée dans l'exploitation	Fréquence d'entretien	Coût d'entretien

Note: pour les cordes préciser la longueur en mètres et le prix unitaire (prix du mètre)

Système d'irrigation et matériel

Source eau d'irrigation	Système d'irrigation	Coûts du système d'irrigation					
Nappe	Goutte à goutte						
	S.D.E.	Fréquence paiement	Tarif				
	Puits/forage personnels (entourez la bonne réponse)	Nombre de puits/forages possédés	Profondeur puits/forage 1	Coût de construction puits/forage 1	Année de construction	Fréquence entretien puits/forage 1	Coût d'entretien puits/forage 1	Durée de vie puits/forage 1
			Profondeur puits/forage 2	Coût de construction puits/forage 2	Année de construction	Fréquence entretien puits/forage 2	Coût entretien puits/forage 2	Durée de vie puits/forage 2
	Puits collectifs	Nombre de puits	Profondeur puits	Contribution à la construction d'un puits (Fcfa)	Année de construction	Fréquence entretien puits	Coût entretien puits	Durée de vie puits
	Forage collectif	Nombre de forages	Profondeur forage	Contribution à la construction du forage (Fcfa)	Année de construction	Paiements durant la campagne maraîchère		
	Autre/ préciser le type	Nombre	coût d'installation	Fréquence entretien		Coût d'entretien		

Autres source d'eau, précisez/

Dans le cas d'un système d'irrigation par puits/forage, comment se fait l'exhaure de l'eau ?

1. Manuelle
2. Mécanique

Si mécanique, quel est le coût annuel du gasoil ?

Quel est le coût annuel des lubrifiants ?

Observations/

II.3. FONCTIONNEMENT DE L'EXPLOITATION

Quelles spéculations cultivez-vous ? Renseignez le tableau pour chaque spéculation.

Spéculation	Saison	Irrigation	Combien de mois d'irrigation	Fréquence irrigation par semaine
		Oui/Non		
		Oui/Non		
		Oui/Non		
		Oui/Non		
		Oui/Non		
		Oui/Non		
		Oui/Non		
		Oui/Non		
		Oui/Non		
		Oui/Non		

Code saison: SSF= Saison sèche froide; SSC= saison sèche chaude ;
Code fréquence irrigation/ 1 = deux fois par jour. 2 = une fois tous les jours. 3 = Une fois tous les deux jours. 4 = autre (préciser) ;

Possédez-vous des animaux ?

1. Oui
2. Non

Si oui, quels types d'animaux possédez-vous (indiquez entre parenthèses le nombre par type)?

Type d'animaux	Nombre		Période de production de lait (mois)	Quantité produite en moyenne durant cette période	Quantité moyenne produite par jour	Prix de vente moyen du litre de lait
Bovins	Mâles	Femelles				
Ovins	Mâles	Femelles				
Caprins	Mâles	Femelles				
Volaille						
Asins						
Équins						
Autre (préciser)						

Quel type d'élevage faites-vous ? 1. Extensif 2.Intensif

Comment vos animaux se nourrissent-ils ?

1. Pâturages
2. Suppléments (précisez le type)
3. Autre: préciser

III. Comptes d'exploitation

Type de champ	Superficie totale du champ	Si mise en location, quel est le coût de	Si loué à d'autres, quel est le coût de	Spéculations cultivées	Saison (pour chaque spéculation)	Superficie exploitée pour chaque	Type de sol	Nombre de sourgas qui travaillent dans ce	Observations

Code type de champ : Collectif = C ; individuel = I
Code saison : Hivernage = H ;saison sèche froide = SSF ; saison sèche chaude = SSC
Code type de sol : 1 = Dek ; 2 = Dior ; 3 = Dek Dior ; 4 = Dior Dunaire ; 5 = Khour ; 6 = Autre (préciser)

Coûts semences, engrais, pesticides

	SPÉCULATIONS					
Comment vous approvisionnez-vous en semences? (entourez la bonne réponse)	Achat Réserve Don	Achat Réserve Don	Achat Réserve Don	Achat Réserve Don	Achat Réserve Don	Achat Réserve Don
Si acheté, quelle quantité de semence avez-vous acheté ? (indiquez l'unité)						
Quelle variété de semence ?						
Lieu d'achat						
Quel est le coût unitaire ?						
Si réservé, quelle quantité de semence avez-vous réservé ?						
Si don, quelle quantité avez-vous reçue ?						
Utilisez-vous de l'engrais minéral	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non
Si oui quel type d'engrais utilisez-vous ?	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
Quelle quantité d'engrais avez-vous acheté pour chaque type ? (précisez l'unité)	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
Quel est le coût unitaire ?	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
Lieu d'achat	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4

Utilisez-vous de l'engrais organique ?	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non
Si oui quel type d'engrais organique utilisez-vous ? (précisez l'unité)	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4

Quelle quantité d'engrais organique avez-vous utilisé ?	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
Quel est le coût unitaire ?	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
Lieu d'achat si acheté	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
Utilisez-vous des pesticides ?	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non
Si oui quel type de pesticides utilisez-vous ?	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
Quelle quantité de pesticide avez-vous acheté pour chaque type ? (précisez l'unité)	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
Quel est le coût unitaire pour chaque type ?	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
Lieu d'achat	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4

Coût de la main-d'œuvre

Pour quelles activités embauchez-vous de la main d'œuvre ? (cochez)	Qui fait cette opération ? (Mettre une croix dans la case correspondante)					Quel salaire journalier auvez-vous payé pour ces opérations ?		
	Homme	Femme	Enfants (moins de 15 ans)	Tous	Mécanique	Homme	Femme	Enfants (moins de 15 ans)
Nettoyage du sol								
Labour								
Épandage de fumure organique								
Semis								
Arrosage								
Épandage d'engrais minéraux ou organique								
Binage/sarclage								
Épandage produits phytosanitaires								
Récolte								
Stockage								

Autres activités

Renseigner le tableau suivant pour chaque activité :

	Spéculations						
Main-d'œuvre externe							
Dans le cas où ils ont des *sourga*, combien de mois sont-ils embauchés ?							
Combien de jours travaillent-ils par semaine?							
Comment sont-ils payés ? (entourer la bonne réponse)	nature espèce	nature espèce	nature espèce	nature espèce	nature espèce	nature espèce	nature espèce
Quel est le salaire selon le type de paiement ?							
Espèce							
Nature							
Sont-ils nourris par l'EF ? (entourer la bonne réponse)	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non
Sont-ils logés par l'EF ?	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non
S'ils sont nourris, pour quels repas?							
Embauchez-vous des personnes supplémentaires pour la récolte ?	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non
Combien de personnes ? (précisez pour chaque culture)							
NB femmes							
NB hommes							
Utilisez-vous de la main-d'œuvre familiale? (entourez la bonne réponse)	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non
Combien d'hommes ?							
Pour quelles spéculations les hommes travaillent-ils ?							
Pendant combien de mois ?							
Combien de jours travaillent-ils par semaine ?							
Combien de femmes ?							
Pour quelles spéculations les femmes travaillent-elles ?							
Pendant combien de mois ?							
Combien de jours travaillent-elles par semaine ?							

Revenus provenant des activités agricoles

		Saison sèche froide				Saison sèche chaude			
Spéculation	Superficie exploitée	Quantité produite	Quantité vendue	Quantité autoconsommée	Prix unitaire	Quantité produite	Quantité vendue	Quantité autoconsommée	Prix unitaire

III.2. COÛTS ACTIVITÉS D'ÉLEVAGE

Coûts Entretien animaux

		Type d'animaux (bovins, petits ruminants)	Période	Paiement	Hébergement	Repas fournis
Employez-vous un berger	Oui/Non					
Vaccinez vous vos animaux	Oui/Non					

Coût alimentation animaux

Coût alimentation par complémentation							
Types d'animaux	Alimentation 1		Prix unitaire alimentation 1	Alimentation 2		Prix unitaire alimentation 2	Coût global d'accès à l'eau
	Type	Quantité		Type	Quantité		
Bovins							
Ovins							
Caprins							
Volaille							

Autres revenus tirés des animaux
Vente autres produits
Vendez-vous des produits dérivés du lait (exemple fromage) ?

1. Oui
2. Non

Si oui quels produits,
Si oui, indiquez la quantité produite, la quantité vendue et le prix unitaire

Quantité produite :
Quantité vendue :
Prix unitaire :

Vente animaux durant la campagne maraichère

Types d'animaux	Période vente	Quantité vendue	Raison vente	Quantité autoconsommée (animaux tués pour consommation)	Prix unitaire	Revenu de la vente
Bovins						
Ovins						
Caprins						
Asins						
Équins						
Volailles						

IV. Revenus non agricoles

Autres revenus
Revenu C.F.A.

Code autres revenus : 1 = Commerce, 2 = Tailleur, 3 = Transfert, 4 = Pêche, 5 = Maçonnerie, 6 = Menuiserie, 7 = Mécanique.

ANNEXE III
Méthode de résolution de la programmation dynamique, approche P.M.P.

A Méthode de résolution numérique du programme dynamique dans la littérature

La programmation dynamique: le problème de base [60]

Introduite par BELLMAN (vers les années 1950), la programmation dynamique est utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation. DUHARCOURT (1969) définit la programmation dynamique comme « une méthode d'optimisation des processus de décisions séquentielles ». De manière particulière, dans un problème d'optimisation, la programmation dynamique permet d'identifier une décision optimale à chaque étape pour chaque état possible [61]. Ci-dessous, le problème de base :

$$(8) \qquad max\ f(x_t, c_t)$$

sous la contrainte $x_{t+1} = g(x_t, c_t)$: "equation of motion"
où,
x_t représente l'état de la situation à toute période t
c_t est la variable de contrôle à la période t. Elle représente la décision que nous prenons face à la situation à la période t.
L'idée derrière ce problème est de trouver, à la période t, la décision optimale en tenant compte de l'"état du monde".

60. — Cette partie s'est essentiellement inspirée des écrits de JUDD (1998), HOWITT *et al*. (2002), 2014), HUBBARD & SAGLAM (2011).

61 . — <**http://www.iro.umontreal.ca/~gendron/IFT1575/Cours/IFT1575_ProgrammationDynamique%284%29.pdf**>.

Résolution du problème : l'approche lisse avec usage des polynômes de Chebychev et itération de la *value function*

L'ÉQUATION DE BELLMAN

BELLMAN (1954) définit le « principe d'optimalité » selon lequel, une séquence d'action optimales est telle que : quels que soient l'état et les décisions initiales, les décisions futures sont une séquence d'actions optimales étant donnée la décision initiale (HOWITT *et al.,* 2014).

Ce principe permet de résoudre des problèmes d'optimisation dynamique. Plusieurs méthodes sont utilisées pour cela : la récursion, l'itération de la fonction valeur et la *policy function iteration*.

L'équation de Bellman du programme d'optimisation s'écrit :

$V(x_t) = \max \{ f(x_t, c_t) + ß\, V(x_t + 1) / x_{t+1} = g(x_t, c_t) \}$ dans le cas d'un programme avec une variable d'état non stochastique.

où $V(x_t)$ est la fonction valeur

ß est un le taux d'escompte

Pour résoudre ce programme, il est plus pratique d'utiliser des solutions numériques telles que l'itération de la fonction valeur ou la *policy function iteration*.

COMMENT APPROXIMER LA FONCTION VALEUR

Deux approches existent pour représenter $V(x_t)$[62:]

- l'approche discrète qui consiste à approximer la fonction de manière discrète. Dans ce cas, la fonction est évaluée sur un nombre limité de valeurs de la variable d'état ;
- l'approximation lisse qui consiste à approximer la fonction par un polynôme de Chebychev de degré n. Il est possible d'utiliser d'autres fonctions que le polynôme de Chebychev.

Dans cette approche, la fonction est aussi évaluée sur un nombre limité de valeurs de la variable « d'état » (le nombre de valeurs est inférieur à celui de l'approche discrète). Ces points auxquels la fonction est évaluée sont appelés les nœuds de Chebychev. Une interpolation est ensuite faite pour évaluer la fonction entre les différents nœuds. Cette méthode détermine les coefficients du polynôme de Chebychev qui permettent d'approximer au mieux la fonction valeur.

62. — HUBBARD & SAGLAM (*s. d.*).

Les nœuds de Chebychev

Pour m nœuds, le kième nœud de Chebychev s'écrit : $z_k = -\cos(\pi(2k - 1)/2\,m)$, k = 1, ..., m, $m \geq n + 1$.

z_k appartient à l'intervalle [-1, 1].

Notons que les valeurs de la variable d'état n'appartiennent pas forcément à cet intervalle. x appartient plutôt à l'intervalle [- a, b] où a et b représentent respectivement les valeurs minimales et maximales de la variable d'état.

Les nœuds de Chebychev sur l'intervalle [- a, b] sont données par la relation :

$$z_k = \frac{2(x_k - a)}{b - a} - 1$$

LES POLYNÔMES DE CHEBYCHEV

Après définition des « nœuds » de Chebychev, il reste à approximer la fonction valeur à ces nœuds par un polynôme de Chebychev. La fonction est telle que: $V(x) = \sum_i a_i \Phi_i(x)$
où
a_i est le coefficient du iième polynôme de Chebychev
Les termes du polynôme peuvent s'écrire: $\Phi_n(x) = \cos(n * \cos^{-1}(x))$
Par l'approche récursive, les termes s'écrivent:

$$\Phi_0(x) = 1$$

$$\Phi_1(x) = x$$

$$\Phi_3(x) = 2 * x\,\Phi_2(x) - \Phi_1(x)$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \Phi_n(x) = 2 * x\,\Phi_{n-1}(x) - \Phi_{n-2}(x) \text{ pour n termes}$$

Sur l'intervalle $[-a, b]$, $a_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} V(x_k)\Phi_i(z_k)}{\sum_{k=1}^{n} \Phi_i(z_k)\Phi_i(z_k)}$

$$V(x) = \sum_i a_i \Phi_i\left(2\frac{x-a}{b-a} - 1\right)$$

ITÉRATION DE LA FONCTION VALEUR

À travers cette approche, pour trouver la solution à l'équation de Bellman, les étapes suivantes sont faites :

— donner une estimation initiale V à la fonction ;

— calculer $TV(x_k) = f(x_k, c_k) + ß \sum_j V(x_k)$ en considérant l'estimation initiale comme la valeur future de V (x). Cela donnera une nouvelle valeur de la fonction V=TV qui sera utilisée dans la prochaine itération si la condition dans iii) n'est pas vérifiée ;

— Vérifier si $|TV - V| < \varepsilon$, ε infiniment petit

Si oui, alors la solution est trouvée.

Si non, on reprend l'étape 2 et la répète jusqu'à ce que la condition 3 soit vérifiée.

Dans cette approche, la *contraction mapping theorem* garantie la convergence pour toute valeur initiale.

Méthode de résolution numérique de notre programme dynamique

Pour la résolution du programme, nous utilisons l'équation de Bellman et approximons la *value function* en utilisant les polynômes de Chebychev (HOWITT *et al.*, 2002, 2014 ; HUBBARD & SAGLAM, *s. d.*).

L'équation de Bellman s'écrit :

$$V(x_t) = max\ \{\ \pi(x_t, w_{agt})\ +\ \delta E(V(x_{t+1}))\ /x_{t+1} =\ g(x_t, w_{agt})\}$$

B. L'approche P.M.P.

De la programmation linéaire (P.L.) à la programmation mathématique positive (P.M.P.)

Avant l'introduction officielle de la P.M.P. par HOWITT (1995), en programmation mathématique, la programmation linéaire était la plus utilisée dans le domaine de l'économie agricole (HECKELEI & BRITZ, 2005). D'après HECKELEI & BRITZ (2005), le problème majeur des modèles de programmation mathématique était la difficulté de les calibrer [63] aux données observées. Dans le cas de la programmation linéaire par exemple, le problème majeur était l'obtention de solution en coin. Le problème de solution en coin s'explique par un nombre de contraintes saturées inférieur au nombre d'activités (HECKELEI, 2005 ; HOWITT & MEREL, 2014).

LA P.M.P. COMME SOLUTION AUX PROBLÈMES DE CALIBRATION DE LA P.L.

Henry DE FRAHAN (2005), définit la P.M.P. comme une méthode qui permet de calibrer les modèles de programmation mathématiques aux données observées sur une période de référence en utilisant l'information contenue dans les variables duelles des contraintes de calibration.

La P.M.P. est une approche qui a été utilisée bien avant la publication de HOWITT (1995) qui l'a formalisée. En effet, HECKELEI & BRITZ (2005), supportent qu'avant la publication de HOWITT (1995), l'approche fut auparavant utilisée dans d'autres efforts de modélisation de politiques tels que HOWITT & GARDNER (1986), HOUSE (1987), etc. (cités *in* HECKELEI & BRITZ,

63. — De manière simple, un modèle est calibré lorsqu'il permet de reproduire les données observées.

2005). Dans le domaine agricole, son utilisation s'est largement répandue après sa formalisation par HOWITT (1995) [64].

L'approche est constituée de trois étapes :

— dans la première étape, le programme de maximisation linéaire standard est résolu avec l'ajout de contraintes de calibration pour les valeurs observées des variables endogènes. Dans cette première étape sont obtenues les valeurs duelles des contraintes de calibration ;

— dans la deuxième étape, ces valeurs duelles sont utilisées pour spécifier une fonction non linéaire dans la fonction objectif ;

— dans la troisième étape, un programme de maximisation non linéaire intégrant la fonction non linéaire précédemment spécifiée est résolu sans ajout de contraintes supplémentaires.

Ces trois étapes permettent de calibrer le modèle aux données observées. D'après HOWITT (0 1995), la fonction non linéaire permet de capturer les spécifications non représentées dans le modèle.

HECKELEI & BRITZ (2005) et Henry DE FRAHAN (2005) proposent une explication intelligible du processus de calibration de la P.M.P. Ainsi, pour des raisons de simplicité, nous adaptons leurs spécifications.

Techniquement, les trois étapes de la P.M.P. s'écrivent :

— étape 1 : programme de maximisation linéaire avec ajout de contraintes de calibration qui permettent de reproduire les quantités observées ;

— étape 2 : spécification d'une fonction de coût non-linéaire avec les valeurs duelles des contraintes de calibration ;

— étape 3 : résoudre le problème d'optimisation avec la fonction objectif non linéaire et sans contraintes de calibration

ÉTAPE 1 : PROGRAMME DE MAXIMISATION LINÉAIRE AVEC AJOUT DE CONTRAINTES DE CALIBRATION QUI PERMETTENT DE REPRODUIRE LES QUANTITÉS OBSERVÉES

$$\underset{x}{\text{Max}}(\pi = p'x - c'x)$$

Sous contraintes :

$Ax \leq b \quad [\lambda]$ Contraintes sur les ressources

$x \leq (x^0 + \varepsilon) \ [\rho]$ Contraintes de calibration

$$x \geq 0$$

Avec :

$$\pi, p, x, A, c, b, ayant\ la\ même\ signification\ que\ dans\ le\ programme\ linéaire$$
$$x^0\ vecteur\ des\ niveaux\ d'output/d'input\ observées$$
$$\varepsilon: vecteur\ de\ nombre\ infiniment\ petits$$

$$\rho: valeurs\ duelles\ associées\ aux\ contraintes\ de\ calibration$$[65]

64. — Pour plus d'exemples d'application de la P.M.P., v. ARFINI, 1996 ; CYPRIS, 1996, 2000 ; GOHIN & CHANTREUIL, 1999 ; ARFINI & PARIS, 1995, cités *in* HECKELEI & BRITZ, 2005).

65. — Les valeurs duelles sont encore appelées multiplicateur de Lagrange.

La présence des contraintes de calibration obligera la solution optimale du programme linéaire à reproduire les niveaux d'output/input observés (x^0).

Lors de cette première étape, les variables duelles sont spécifiées. L'idée générale pour trouver les valeurs duelles des différentes contraintes est la suivante: le vecteur des activités est divisé en deux vecteurs d'activités (les activités préférables qui ne sont contraintes que par les contraintes de calibration, l'idée étant que pour ces activités qui rapportent plus, le producteur utilise autant que possible les ressources; les activités marginales qui ne sont contraintes que par les ressources).

HECKELEI &BRITZ (2005) subdivisent le vecteur x en deux:

— un vecteur de dimension $(N - M)$ x 1 des activités préférables x^p qui ne sont contraintes que par les contraintes de calibration ;

— un vecteur de dimension $(M\text{x}1)$ des activités marginales x^m qui sont uniquement contraintes par les ressources.

Ils font l'hypothèse que les contraintes de contraintes de ressources sont saturées et que les x^0 sont différents de zéro.

Le Lagrangien s'écrit :

$$L = p'x - c'x - \lambda(Ax - b) - \rho(x - (x^0 + \varepsilon))$$

Les conditions de premier ordre s'écrivent :

$$\frac{\partial L}{\partial x} = p - c - \lambda A - \rho = 0$$

Ainsi,

— les valeurs duelles des contraintes de calibration pour les deux types d'activités s'écrivent :

$\rho^p = p^p - c^p - \lambda A^{p'}$: valeurs duelles des activités préférables

$\rho^m = 0$:

valeurs duelles des activités marginales — zéro car ces activités ne sont contraintes que par les ressources ;

— suivant la même logique, les valeurs duelles des contraintes de ressource ne s'écrivent que pour les activités marginales, les autres n'étant pas contraintes par les ressources:

$\lambda = (p^m - c^m - \rho^m)(A^{m\prime})^{-1}$, avec $\rho^m = 0$, donc $\lambda = (p^m - c^m)(A^{m\prime})^{-1}$

ÉTAPE 2 : SPÉCIFICATION D'UNE FONCTION DE COÛT NON-LINÉAIRE AVEC LES VALEURS DUELLES DES CONTRAINTES DE CALIBRATION

Dans cette étape, les valeurs duelles des contraintes de calibration sont utilisées pour spécifier une fonction objectif non linéaire qui est telle que les coûts marginaux des activités préférables sont égaux à leurs prix respectifs (*i. e.* condition de maximisation de profit) pour les niveaux d'output observés.

D'après HOWITT (1995) et HOWITT & PARIS (1998), les valeurs duelles associées aux contraintes de calibration capturent les spécifications du modèle omises, les erreurs de données, etc. (HECKELEI & BRITZ, 2005).

La forme de la fonction non linéaire peut être multiple: quadratique, exponentielle (voir PARIS & HOWITT, 1998 et 2000). Pour des raisons de simplicité, la forme la plus utilisée est la forme quadratique. Par ailleurs, la fonction non linéaire peut avoir deux positions possibles. Dans

l'article initial de HOWITT (1995), la non linéarité était au niveau de la partie production (rendements marginaux décroissants). Dans HECKELEI & BRITZ (2005) et Henry DE FRAHAN (2005), la non-linéarité se situe au niveau de la fonction de coût. HOWITT & MEREL (2014) proposent une discussion sur la place de la non linéarité dans la fonction objectif. Les deux spécifications se justifient d'un point de vue agronomique.

La fonction de coût quadratique utilisée par HECKELEI & BRITZ. (2005) et Henry DE FRAHAN (2005) s'écrit :

$$(9) \qquad C = d'x + \frac{1}{2}x'Qx$$

Avec :

$$d: vecteur\ de\ taille\ Nx1\ des\ paramètres\ associés\ au\ terme\ linéaire$$

$$Q: Matrice\ des\ paramètres\ (q_{ii})\ associés\ au\ terme\ quadratique, symétrique, semi\ definie\ positif\ de\ taille\ (NxN)$$

Les paramètres de la fonction de coût sont tels que :

$$\cancel{(10)} \qquad \frac{\partial C(x^0)}{\partial x} = d + x^0 Q = \rho + c$$

Pour déterminer les paramètres de la fonction de coût, cette condition est combinée à la formule de la valeur duelle lambda dans la phase 1 et à des spécifications supplémentaires sur la matrice Q et le coût unitaire c. Dans les premières applications de la P.M.P., la matrice Q était considérée comme une matrice diagonale et le coût unitaire c était tel que d=c (*e. g.* HOWITT & MEAN, 1983; BAUER & KASNAKOGLU, 1990; SCHMITZ, 1995; ARFINI & PARIS, 1995; cités dans HECKELEI & BRITZ, 2005). Dans ce contexte, les éléments de la diagonale de Q s'écrivent :

$$(11) \qquad q_{ii} = \frac{\rho_i}{x_i^0}\ for\ all\ i = 1, \dots, N$$

Sous cette condition, lorsque l'on augmente le prix d'une activité préférable, cela impact les activités marginales mais les autres activités préférables ne changement pas. D'après HECKELEI & BRITZ (2005), cette spécification ne se justifie que lorsque l'on ne s'intéresse qu'aux propriétés de calibration avec l'espoir qu'une bonne spécification du modèle en termes de contraintes nous permette d'avoir des réponses réalistes aux simulations.

PARIS (1988) suppose qu'il n'ya pas de linéarité dans la fonction de coût, par conséquent, d = 0 et la matrice Q reste diagonale:

$$(12) \qquad q_{ii} = \frac{c_i + \rho_i}{x_i^0} for\ all\ i = 1, \dots, N$$

Une autre spécification est appelée "approche coût moyen". Dans cette approche, la principale hypothèse est que le vecteur de coûts observé, c'est à dire c, est égal au coût moyen de la fonction de coût variable de chaque culture. Cette condition associée au coût marginal de la fonction de coût variable (sa dérivée) permet de déterminer les paramètres. Ainsi:

$$(13) \qquad q_{ii}\frac{2\rho_i}{x_i^0}\ et\ d_i = c_i - \rho_i pour\ tout\ i = 1, \dots, N$$

Outre ces hypothèses, une autre approche consiste à utiliser des élasticités prix exogènes. Dans cette spécification,

$$(14) \qquad q_{ii} = \frac{1}{\varepsilon_{ii}}\frac{p_i^0}{x_i^0}\ pour\ tout\ i = 1, \dots, N\ avec$$

$$(15) \quad d = c_i + \rho_i - q_{ii}x_i^0 \; pour\; satisfaire\; les\; conditions\; de\; calibration\; (équation\; cout\; marginal)$$

3: RÉSOUDRE LE PROBLÈME D'OPTIMISATION AVEC LA FONCTION OBJECTIF NON LINÉAIRE ET SANS CONTRAINTES DE CALIBRATION

La troisième étape de la P.M.P., consiste à résoudre le problème non linéaire est avec comme fonction de coût la fonction non linéaire précédemment spécifiée. Seules les contraintes sur les ressources sont incluses dans cette dernière étape. Le programme s'écrit comme suit :

$$Max\{\pi = p'x - (\alpha' x + 0{,}5\, x' Qx)\}$$

$s.t: AX \leq b \quad \lambda$ Contraintes sur les ressources

$$X \geq 0$$

Ce programme permet de reproduire les valeurs observées et subséquemment de faire des simulations.

La P.M.P. peut ainsi être interprétée comme une combinaison des contraintes de flexibilité de DAY (1963) à travers les contraintes de calibration et l'introduction d'un terme non linéaire dans la fonction objectif. Ses principales avantages sont qu'elle permet de reproduire les données observées sans ajout de contraintes supplémentaires, elle permet l'obtention de solutions intérieures et une meilleure réponse aux simulations (HECKELEI & BRITZ, 2005 ; HOWITT & MEREL, 2014). Selon Henry DE FRAHAN, l'un des points positifs du P.M.P. est la possibilité d'utiliser peu de données pour simuler des politiques agricoles et environnementales.

LIMITES PMP ET AMÉLIORATIONS POSSIBLES

La P.M.P. a cependant des limites**.** En effet selon HECKELEI & BRITZ (2005), le principal atout de la P.M.P. n'est pas de calibrer le modèle aux données observées car cela peut se faire avec des contraintes adéquates. Cependant, le plus intéressant est de savoir si le modèle calibré à partir du P.M.P. permet de capturer les réponses des producteurs aux changements des conditions économiques de sorte à pouvoir évaluer l'impact de politiques, de changements dans les marchés, de développement technologique dans le domaine de l'agriculture. Ils soutiennent, que la multiplicité des formes fonctionnelles possibles pour la fonction de coût mène à une infinité de paramètres possibles. Même si ces formes fonctionnelles permettent une bonne calibration du modèle, chaque ensemble de paramètres mène à des réponses aux chocs [66] différentes.

Cette critique sur les spécifications des paramètres de la fonction de coût dans la deuxième phase du P.M.P. est soutenue par Henry DE FRAHAN, selon lequel, cela mène à un traitement ambigus entre activités préférables et activités marginales. Dans l'approche coût marginal par exemple, le problème qui se pose est qu'un choc sur les niveaux des activités préférables qui sont les seules à être contraintes par les contraintes de calibration ne modifierait que les productions de ces activités et celles des activités marginales et non le celles des autres activités préférables (GOHIN & CHANTREUIL, 1999, cités par Henry DE FRAHAN, 2005).

66. — Pour plus d'informations, v. HECKELEI & BRITZ (2005 : pp. 55-56).

D'autres critiques de la P.M.P. sont faites sur les types de données utilisées. Des alternatives à la P.M.P. originale sont aussi proposées dans HECKELEI & BRITZ (2005).

Dans notre cas, avec les données dont nous disposons, nous nous limitons à l'usage de la P.M.P. avec la matrice Q diagonale. L'approche coût moyen est utilisée pour estimer les paramètres de la matrice. Cela nous permet d'obtenir une calibration acceptable du modèle production.

ANNEXE IV
Informations additionnelles sur les scénarios pluviométriques

Définition et calcul de l'indice de précipitation standardisée [67]

Développé en 1993 par MCKEE, DOESKEN & KLEIST 0, l'I.P.S. est un indice calculé sur la base de séries pluviométriques longues d'au moins vingt à trente ans voire cinquante à soixante plus idéalement (W.M.O., 2012). L'avantage d'utiliser cet indice est sa simplicité et le fait qu'il ne nécessite que des données pluviométriques. Cependant, il n'intègre pas l'évapotranspiration qui intervient dans le bilan hydrique. Il se base sur la probabilité cumulée d'un événement pluviométrique, un événement étant la réalisation d'un type d'année pluviométrique (exemple sec, humide).

Les données pluviométriques historiques sont utilisées pour trouver la distribution de probabilités correspondante. Pour l'I.P.S., une distribution Gamma est celle qui permet de mieux représenter la distribution des précipitations. Le maximum de vraisemblance est utilisé pour estimer les valeurs des paramètres de la loi gamma. Ainsi, il est possible de savoir quelle est la probabilité qu'une réalisation pluviométrique soit inferieure ou égale a un certain niveau de précipitations. Cela signifie qu'étant donnée une année pluviométrique normale avec une probabilité donnée, une probabilité largement en dessous de cette probabilité renvoie à l'occurrence d'une année sèche alors qu'une probabilité largement au dessus renvoie à l'occurrence d'une année humide. La distribution gamma aura une moyenne et une variance qui dépendront des données observées. Ainsi, elle permettra difficilement de comparer deux zones différentes car les valeurs d'une pluviométrie normale seront différentes. Pour pallier cela, la distribution gamma est transformée en une distribution normale de moyenne zéro et d'écart type 1. Selon les valeurs de l'indice, les précipitations sont classifiées sèches ou humides :

TABLEAU XXI

VALEURS DE L'INDICE	CLASSIFICATION
$\boldsymbol{Spi \geq 2}$	Extrêmement humide
$\boldsymbol{1,5 \leq Spi \leq 1,99}$	Très humide
$\boldsymbol{1 \leq Spi \leq 1,49}$	Modérément humide
$\boldsymbol{-0,99 \leq Spi \leq 0,99}$	Proche de la normale
$\boldsymbol{-1,49 \leq Spi \leq -1}$	Modérément sec
$\boldsymbol{-1,99 \leq Spi \leq -1,5}$	Très sec
$\boldsymbol{\mathrm{Spi} \leq -2}$	Extrêmement sec

Source : O.M.M., 2012.

67. — Cette section se fonde principalement sur :
<http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_fr_2012 http://drought.unl.edu/portals/0/docs/spi-program-alternative-method.pdf>.

L'indice peut se calculer sur des périodes d'un, trois, six, neuf, douze et vingt quatre mois. Un indice calculé sur un temps inférieur à un mois ou supérieur à vingt-quatre mois est considéré comme non fiable.

Selon O.M.M. (2012) :

> *la variation de l'humidité du sol en réponse aux anomalies de précipitations est relativement rapide, tandis que les eaux souterraines, le débit des cours d'eau et les volumes stockés dans les réservoirs sont sensibles aux anomalies de précipitations à plus long terme. La période sur laquelle porte l'indice variera donc en fonction du type de sécheresse faisant l'objet des analyses et applications envisagées: on prendra par exemple l'indice sur un à deux mois pour une sécheresse météorologique, un à six mois pour une sécheresse agricole et sur six à vingt quatre mois, voire plus pour une sécheresse hydrologique O.M.M. (2012). Ainsi, l'IPS sur douze mois fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance. Pour ces échelles de temps, l'indice est en général associé au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à relativement long terme.*
>
> O.M.M. (2012)

Dans notre cas, notre l'indice est utilisé pour mettre en place des scénarios de précipitation à inclure dans le modèle hydro-économique afin d'évaluer l'impact de la variabilité des précipitations sur les extractions annuelles des producteurs et leurs réactions aux changements de disponibilité de l'eau. Par conséquent, nous avons calculé l'indice sur une période de douze mois.

Nous utilisons le programme S.P.I. développé par la *National Drought Mitigation Center* [68]. Les résultats du S.P.I. sont analysés dans le chapitre 1.

Chaînes de Markov et matrice de transition de probabilité

Une chaîne $X_t, t = 0,1,2 \ldots$ est appelée chaîne de Markov discrète si [69] :
$P(X_{t+1} = j | X_0 = i_0, \ldots, X_{t-1} = i_{t-1}, X_t = i) = P(X_{t+1} = j | X_t = i) = P(i,j)$

pour tout i, j appartenant à l'espace d'états Squi contient un nombre fini d'éléments et $t \geq 0$.

$P(i,j)$ est la probabilité de transition de l'état i à l'état j.

$$P(i,j) \geq 0$$

La matrice de probabilité de transition s'écrit :

68. — Ce programme est disponible sur le site :
<**http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx**>.

69 Pour les références, voir :
<**http://www.stat.wmich.edu/wang/667/classnotes/mc/mc.pdf;Larsen et Pense (1981) ; http://galton.uchicago.edu/~lalley/Courses/312/MarkovChains.pdf;http://sites.stat.psu.edu/~jiali/course/stat416/notes/chap4.pdf**>.

$$P = \begin{pmatrix} P(0,0)P(0,1) \dots & P(0,j) \\ P(1,0)P(1,1) \dots & P(1,j) \\ \cdot \quad \cdot & \cdot \\ \cdot \quad \cdot & \cdot \\ \cdot \quad \cdot & \cdot \\ P(i,0)P(i,1) \dots & P(i,j) \end{pmatrix}$$

$\sum_{j \in S} P(i,j) = 1$. Pour tout $i,j \in S$, la somme des probabilités sur une ligne des coefficients est égale à 1.

$P(i,j) = \frac{f(i,j)}{\sum_j f(i,j)}$ pour tout $i,j \in S$. où $f(i,j)$ est la fréquence à laquelle la transition ij est observée

Notre espace d'états s'écrit :

$$(16) \qquad S = \left\{ \begin{matrix} Extrêmement\ humide, Très\ humide, \\ Modérément\ humide, \\ Proche\ de\ la\ normale, Modérément\ sec, Très\ sec, Extrêmement\ sec \end{matrix} \right\}$$

Comparaison distributions des série de précipitations simulée et observée

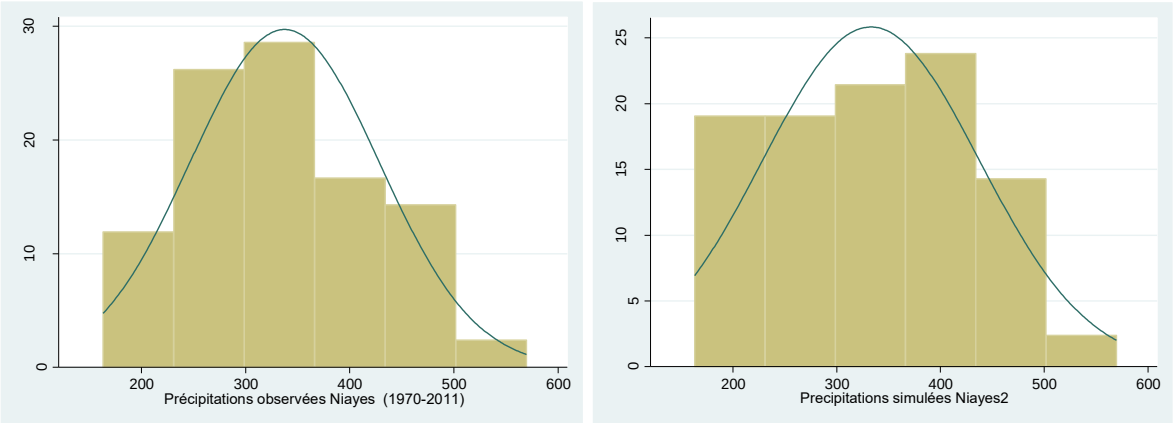

FIG. 30. — Distribution de probabilité séries pluviométriques de base et simulée.

ANNEXE V
Discussion sur la définition d'une exploitation familiale

ANCEY (1975 cité *in* GAFSI *et al*., 2007 : chap. 4, p. 86) définit une exploitation familiale comme…

> *la collectivité humaine réunissant ses efforts sur les grands champs à condition que le produit soit affecté à l'alimentation collective des membres participants au travail et des dépendants inactifs.*

KLEENE *et al*. (1989, cité *in* GAFSI *et al*., 2007 : p. 86) définissent l'exploitation agricole familiale africaine comme…

> *une équipe familiale de travailleurs cultivant, ensemble, au moins un champ principal commun auquel sont liés, ou non, un ou plusieurs champs secondaires, d'importance variable selon les cas et ayant leurs centres de décision respectifs.*

GAFSI *et al*. (2007 : chap. 4) rapportent que des chercheurs de l'Isra et du Cirad qui ont travaillé dans le bassin arachidier au Sénégal introduisent le terme « unité sociale de base », qui renvoie à un centre de décision et de mise en œuvre d'un ou de plusieurs systèmes de production :

> *Cette unité constitue un ensemble plus ou moins complexe, éventuellement décomposable en sous-ensembles repérables par l'existence de centres de décision secondaires.*
>
> (GAFSI *et al*., 2007 : p. 86)

BENOIT-CATTIN & FAYE (1982), définissent l'exploitation agricole familiale comme…

> *une unité de production constituée par l'ensemble des membres d'un groupement familial qui partagent la même cuisine et dont l'aîné assure la charge en y affectant une partie de sa production, en contrepartie du travail que lui allouent les autres membres du groupement.*

La définition d'ANCEY ne semble pas être la plus adaptée à toutes les zones agroécologiques du Sénégal. En effet, dans les *niayes* par exemple, le produit n'est pas nécessairement affecté à l'alimentation collective ou du moins il ne l'est pas directement. Il est plutôt vendu et les revenus sont utilisés pour assurer l'alimentation, bien que les exploitations familiales consomment une partie (largement inférieure à la moitié de la production). Celles de KLEENE *et al*. (1989) et BENOIT-CATTIN & FAYE (1982) semblent être les plus applicables aux *niayes*.

Source : FAYE (2018).

ANNEXE VI
Exemples de stratégies d'adaptation endogènes dans la zone des Niayes : cas de la commune rurale de Keur Moussa

Dans les différentes zones agroécologiques telles que les niayes, les producteurs ont développé des stratégies d'adaptation endogènes. Parmi ces stratégies, l'abandon de certaines « espèces ou variétés au profit d'autres plus adaptées » aux changements. Les spéculations qui subissent le plus d'abandon sont l'arachide et le mil « à cause des incertitudes de la pluie, des attaques des insectes, des mauvaises herbes …». D'autres stratégies sont aussi notées ; il s'agit, par exemple, de « l'utilisation de variétés à cycle court », le déplacement des récoltes dans d'autres champs pour faire face aux inondations des champs survenues après de fortes pluies.

Les producteurs s'adonnent également à des pratiques telles que (FAYE, 2018, à partir des travaux de DIAGNE, 2013) :

— la rotation des cultures qui améliore la fertilité du sol et participe à « la réduction de la pression des mauvaises herbes; la réduction de la pression parasitaire, les insectes et maladies spécifiques à une culture voient leur cycle se briser par la plantation d'une autre culture » ;

— la jachère, pratiquée sur deux à trois ans, qui permet également d'entretenir la fertilité du sol. Selon les producteurs, « après des saisons de mise en valeur il est bon de laisser le sol se reposer […]. Certaines spéculations nécessitent la jachère à cause des "maladies" qu'elles laissent dans les champs après les récoltes : c'est le cas du piment » ;

— la plantation du *kaad* dans les champs de culture qui participe à la régénération du sol ;

— la lutte contre l'érosion hydrique avec la mise en place d'ouvrages anti-érosifs tels que les ouvrages creusés (exemple les croissants lunaires ou demi-lune, les *zaïs* forestiers), des ouvrages empierrés (exemple des cordons pierreux, des couronnes en pierre)…

— lutte contre l'érosion éolienne, principalement utilisée pour les cultures maraîchères qui peuvent être détruites par les vents. Ils utilisent principalement les brises vents et haies vives. Les brises vents permettraient également « de protéger les champs contre la divagation des animaux ».

ANNEXE VII
Figures sur l'évolution des précipitations et des températures sur la période 1970-2011 dans les niayes

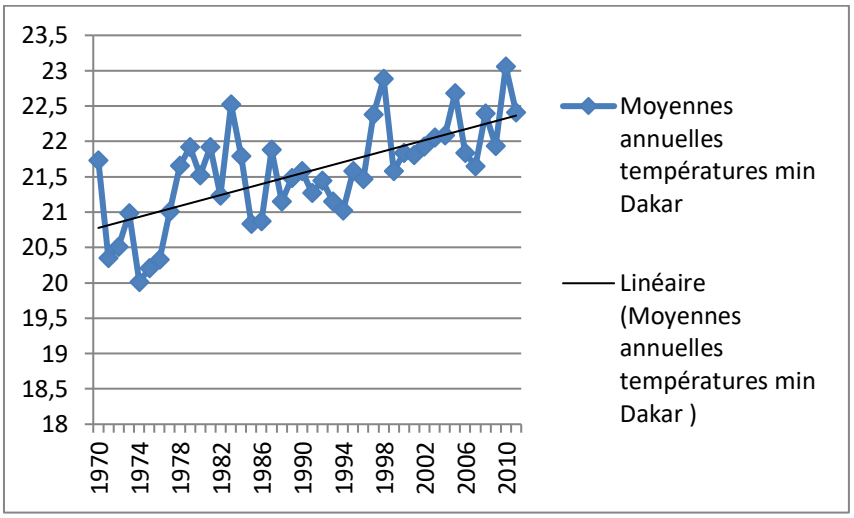

FIG. 31. — Moyennes annuelles températures minimales Dakar de 1970 à 2011. Source données : ANACIM.

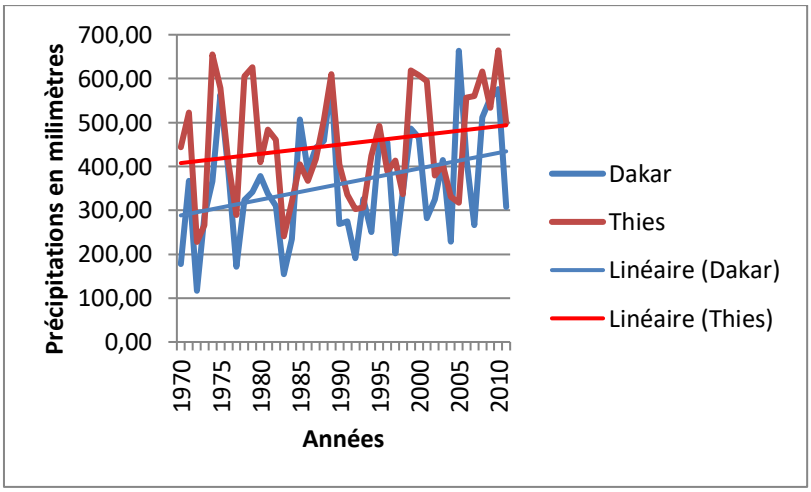

FIG. 32. — Moyennes annuelles précipitations Dakar et Thiès de 1970 à 2011. Source données : Anacim.

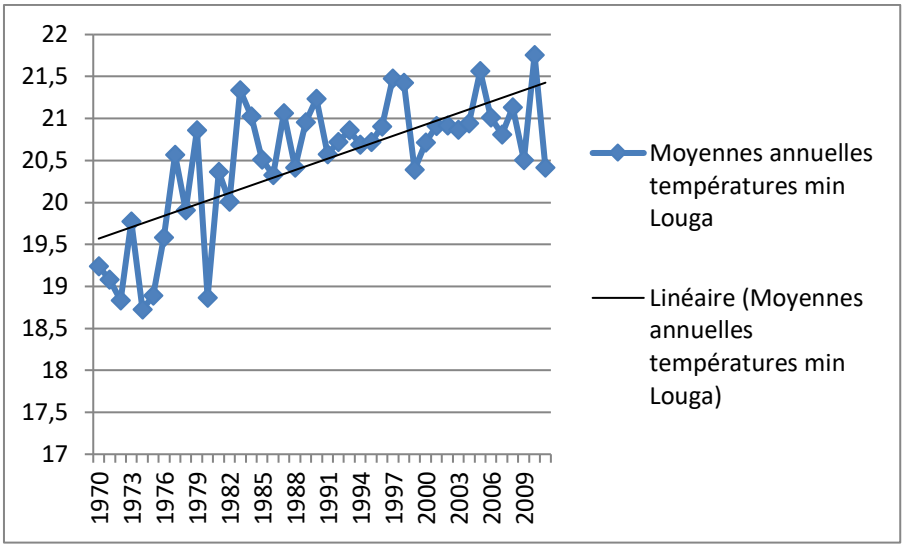

FIG. 33. — Moyennes annuelles températures minimales Louga de 1970 à 2011. Source : Anacim.

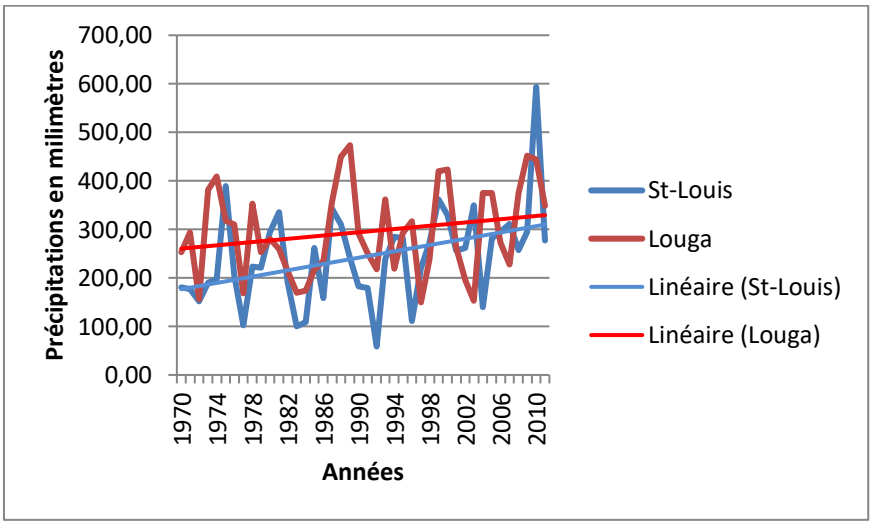

FIG. 34. — Moyennes annuelles précipitations Saint-Louis et Louga, 1970 à 2011. Source : Anacim.

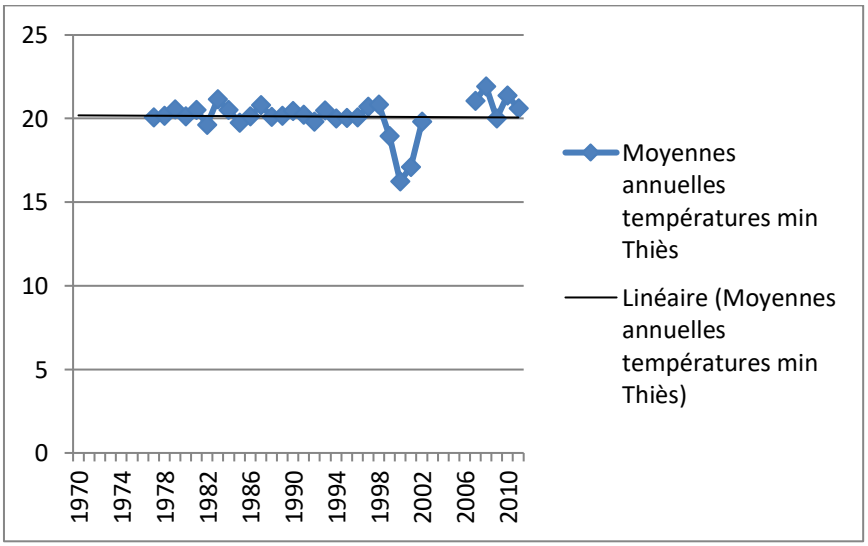

FIG. 35. — Moyennes annuelles températures minimales Thiès de 1970 à 2011. Source : Anacim.

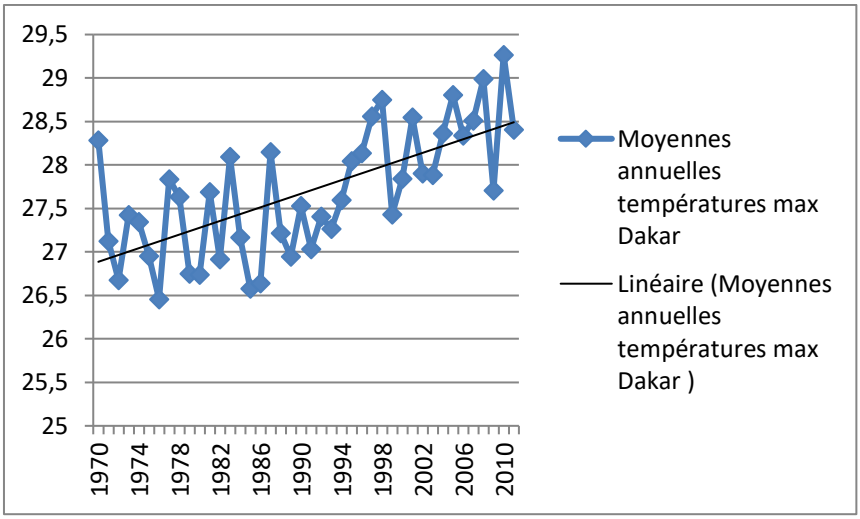

FIG. 36. — Moyennes annuelles températures maximales Dakar de 1970 à 2011. Source : Anacim.

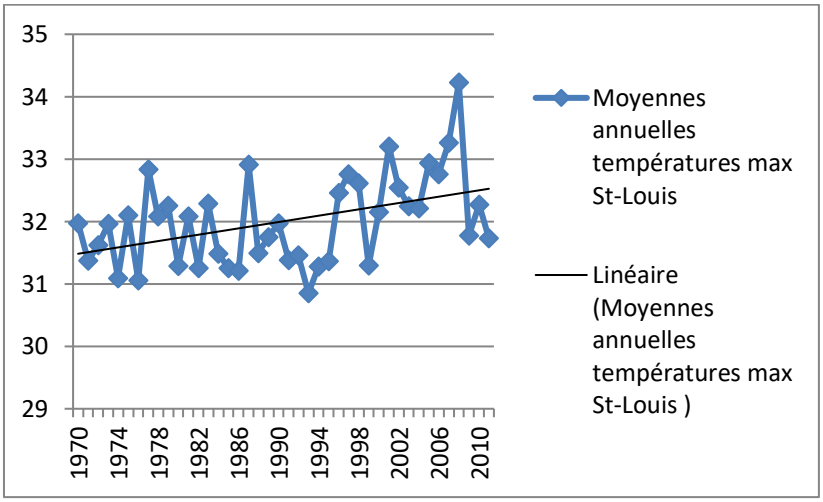

FIG. 37. — Moyennes annuelles températures maximales Saint-Louis, 1970-2011. Source : Anacim.

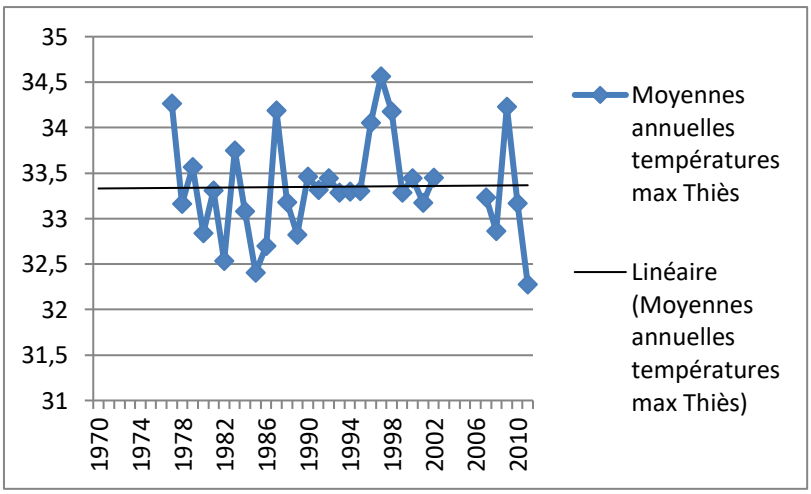

FIG. 38. — Moyennes annuelles températures maximales Thiès de 1970 à 2011. Source : Anacim.

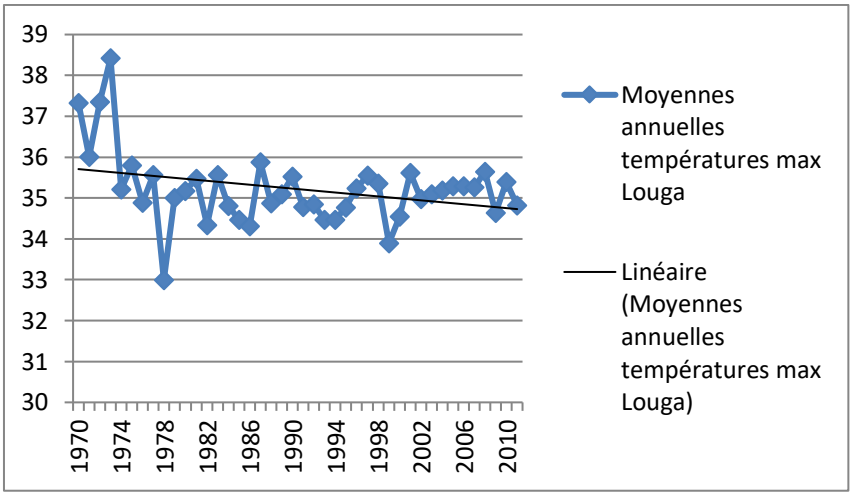

FIG. 39. — Moyennes annuelles températures maximales Louga de 1970 à 2011. Source : Anacim.

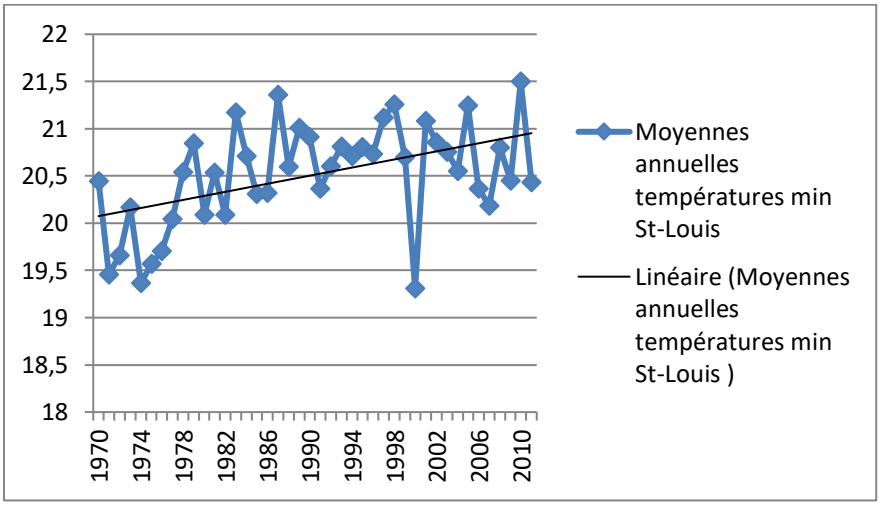

FIG. 40. — Moyennes annuelles températures minimales Saint-Louis de 1970 à 2011. Source : Anacim.

ANNEXE VIII
Production horticoles nationales de 2010-2011 à 2013-2014

TABLEAU XXII

Production nationale de légumes de 2010-2011 à 2013-2014

SPÉCULATIONS	2010-2011		2011-2012		2012-2013		2013-2014		T.C.A.M.	TOTAL PRODUCTION	PART DES SPÉCULATIONS DANS LA PRODUCTION TOTALE	MOYENNE ANNUELLE
	Quantités*	%*	Quantités*	%*	Quantités*	%*	Quantités*	%*				
Oignon	190	30	210	32	230	33	245	34	7	875	32	219
Pomme de terre	13	2	15	2	20	3	30	4	24	77	3	19
Tomate												
industrielle	110	18	80	12	50	7	98	14	-3	338	13	84
cerise	50	8	80	12	110	16	83	12	14	32	12	81
Haricot vert	11	2	10	2	14	2	11	1	0	45	2	11
Chou pommé	50	8	55	8	55	8	51	7	1	211	8	53
Gombo	13	2	15	2	15	2	15	2	4	58	2	15
Patate douce	35	6	30	5	30	4	28	4	-5	123	5	31
Bissap	~	~	~	~	~	~	1	0	~	1	0	1
Autres	154	25	160	24	168	24	161	22	1	643	24	161
Total	625	100	655	100	692	100	722	100				

* Les quantités sont exprimées en milliers de tonnes ; les nombres sont arrondis à l'unité supérieure.
Source : DIRECTION DE L'HORTICULTURE (*s. d.*) et calculs FAYE (Amy), 2018.

TABLEAU XXIII

Production nationale de fruits de 2010-2011 à 2013-2014

SPÉCULATIONS	2010-2011		2011-2012		2012-2013		2013-2014		T.C.A.M.	TOTAL PRODUCTION	PART DES SPÉCULATIONS DANS LA PRODUCTION TOTALE	MOYENNE ANNUELLE
	Quantités*	%*	Quantités**	% *	Quantités**	% *	Quantités	% *				
Mangue**	120	51	125	50	130	50	132	48	2	507	50	127
Banane	30	13	35	14	35	14	36	13	4	136	13	34
Melon	15	6	20	8	18	7	20	7	7	73	7	18
Agrumes	50	21	45	18	40	16	50	18	0	185	18	46
Autres	20	9	25	10	35	14	36	13	16	116	11	29
Total	235	100	250	100	258	100	273					

* Les quantités sont exprimées en milliers de tonnes. Les nombres sont arrondis à l'unité supérieure. ** Y compris mangue export.
Source : DIRECTION DE L'HORTICULTURE (***s. d.***) et calculs de l'auteur (**FAYE**, 2018).

TABLEAU XXIV

Production nationale de 2010-2011 à 2013-2014

SPÉCULATIONS	2011		2012		2013		2014		T.C.A.M.	TOTAL PÉRIODE	PART SUR TOTAL EXPORTATIONS 2011-2014	MOYENNE ANNUELLE
	Quantités*	%*	Quantités*	%*	Quantités*	%*	Quantités*	%*				
Melon	12	23	12	22	11	17	14	18	6	49	19	12
Pastèque	3	7	8	14	11	17	12	15	36	34	13	8
Tomate cerise	9	17	10	18	10	15	11	13	5	39	16	10
Mais doux	10	20	8	15	9	13	10	13	1	37	15	9
Haricot vert	6	13	6	11	8	12	9	11	9	29	12	7
Courge	2	3	3	5	3	4	2	3	7	9	4	2
Oignon	0	1	0	1	0	0	0	0	-14	1	0	0
Autres	1	1	1	1	3	5	7	8	74	11	4	3
Mangue	8	15	8	15	12	17	16	20	20	43	17	11
Total	50	100	56	100	66	100	80	100				
U.E.	43		47		55		63					
Sous-région							5					
Total							68					

* Les quantités sont exprimées en milliers de tonnes. Les nombres ont été arrondis à l'unité supérieure. ** Les pourcentages sont arrondis à l'unité supérieure. Source des données : Direction de l'horticulture.

ANNEXE IX
Code des modèles sur GAMS

Les codes des trois modèles ainsi que les versions de GAMS et solvers utilisés sont accessible chez l'auteur qui peut être contacté par mail : <**amy.faye1@gmail.com**>.

Table des matières

Remerciements 4
Sommaire 6
Résumé 7
Mots clés 7
Abstract 8
Key words 8
Introduction générale 9
I. Contexte et problématique 9
II. Objectifs de la thèse 13
III. Hypothèses 14
IV. Approche méthodologique 14
V. Contribution de la thèse à la connaissance 16
Chapitre Premier L'agriculture sénégalaise en proie au changement et à la variabilité climatique 18
Section 1 : Définition des concepts 22
1.1. Concepts climatiques 22
1.2. De l'adaptation à l'atténuation : nuance et synergie 23
1.3. Vulnérabilité au changement et à la variabilité climatique 25
1.4. Horticulture et maraîchage 26
Section 2 : Contexte climatique et implications sur l'agriculture au Sénégal 26
2.1. Contexte climatique en Afrique de l'Ouest : cas du Sénégal 26
2.1.1. Climat passé : un xxe siècle réchauffé avec des précipitations erratiques 26
2.1.2. Prévisions climatiques : réchauffement à l'horizon et précipitations toujours incertaines 27
2.1.3. Fréquence des événements climatiques extrêmes au Sénégal : des sécheresses et des inondations 28
2.2. L'agriculture sénégalaise et sa vulnérabilité au changement et à la variabilité climatique 29
2.2.1. Une agriculture pluviale vulnérable au changement et à la variabilité climatique 29
2.2.2. Qu'en est-il de l'agriculture irriguée : cas de la Vallée du Fleuve Sénégal 31
Section 3 : Climat et agriculture irriguée au Sénégal : cas particulier de la zone des niayes, principale zone de production horticole au Sénégal 32
3.1. Importance du secteur horticole au Sénégal et de la zone des *niayes* dans la production horticole 33
3.2. Délimitation géographique et aspects biophysiques de la zone des *niayes* 35
3.2.1. Délimitation géographique et aspects physiques de la zone des *niayes* 35
3.2.2. Aspects physiques 36
3.2.2.1. Contexte hydrogéologique 36
3.2.2.1.1. Le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien 36
3.2.2.1.2. Hydrogéologie dans la zone des niayes 36
La couche supérieure 37
Nappe des sables quaternaires 37
La Nappe des sables de la presqu'île du Cap-Vert 37
La Nappe des sables quaternaires sur le reste du littoral septentrional 37
Les Calcaires Éocènes 37
La couche intermédiaire 37
La couche inférieure 37
3.2.2.2. Les types de sol 38
3.3. Les systèmes de production dans les *niayes* 38
3.3.1. Des saisons de culture déterminées par le climat 38
La Saison sèche 39
La Saison des pluies 40
3.3.2. Les principales activités source de revenus dans la zone 41
3.3.3. Les exploitations dans la zone : répartition spatiale, types et modes de commercialisation 42
3.3.4. Des contraintes au développement de la filière horticole dans les *niayes* 43
Financement de l'agriculture dans la zone : faible accès au crédit 43

Le foncier ... 44
Autres types de contraintes ... 45
L'eau, les attaques parasitaires, les industries ... 45
3.4. Qu'en est-il de la contrainte climatique ? ... 46
3.4.1. Climat passé dans la zone des *niayes*, quelles implications sur la production horticole ? ... 46
Climat passé dans la zone ... 46
Évolution des températures sur la période 1970-2011 dans les niayes ... 46
Variabilité interannuelle des précipitations et comparaison des moyennes pluviométriques sur plusieurs décennies ... 46
Quelles implications sur l'activité horticole dans les *niayes* ... 49
3.4.2. Peu d'études sur le changement et la variabilité climatique et l'agriculture dans les *niayes* ... 50
Section 4 : Mesures d'atténuation et d'adaptation au changement et à la variabilité climatique au Sénégal ... 50
4.1. Politiques du gouvernement sur l'environnement et le changement climatique ... 51
4.2. Cas du secteur agricole et des ressources en eau pour l'irrigation ... 52
4.2.1. Le secteur agricole, grand émetteur de gaz à effet de serre, cible des mesures d'atténuation des émissions au Sénégal ... 52
4.2.2. Le Pana et la Snacc, documents phares dans la mise en œuvre de stratégies nationales d'adaptation ... 53
La Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique-Snacc ... 53
Plan d'action pour l'adaptation aux changements climatiques (Pana) ... 54
4.3. Faire face au changement et à la variabilité climatique dans le domaine de l'agriculture : place de la recherche, la société civile, les organismes nationaux et internationaux ... 55
Réponses de l'Isra au changement et à la variabilité climatique ... 56
Importance du « travailler ensemble » dans la mise en place de stratégies d'adaptation au changement et à la variabilité climatique ... 56
L'importance des connaissances endogènes ... 58
Conclusion partielle ... 59
Chapitre 2 : Du climat comme bien public global aux externalités sur la production agricole, analyse théorique et empirique ... 61
Section 1 : Théorie économique, changement et variabilité climatiques et implications sur la production agricole ... 64
1. La théorie économique dans le débat sur le changement climatique : dimension globale ... 64
1.1.1. Le climat : un bien public global altéré par les émissions de gaz à effet de serre ... 64
1.1.2. Contraintes liées à la fourniture d'un climat de qualité ... 65
Répartition spatiale et temporelle des responsabilités en termes d'émissions de gaz à effets de serre ... 65
Répartition des responsabilités en termes de coûts et bénéfices d'une réduction des émissions ... 66
1.1.3. Solutions pour la fourniture d'un climat de qualité ... 67
1.1.3.1. Que propose la théorie économique ? ... 67
La mise en place d'une taxe carbone ... 67
Concept ... 67
Avantages ... 67
Quelle institution pour l'implémenter ? ... 68
Exigences/Inconvénients ... 68
La mise en place de marchés d'échange d'émission de gaz à effet de serre ... 69
Concept ... 69
Exigences/Inconvénients ... 69
1.1.3.2. Solutions de mitigation empiriques : les accords mondiaux ... 69
La Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques ... 70
Le protocole de Kyoto ... 71
Quels mécanismes pour inciter les pays à intégrer les accords internationaux ? ... 72
1.2. La production agricole face au changement et à la variabilité climatique, quel ancrage théorique ... 73
Section 2 : Méthodes d'évaluation d'impact du changement et de la variabilité climatique sur l'agriculture et résultats de recherche ... 75

2.1. Impact du changement climatique sur des variables agronomiques : l'approche fonction de production ... 76
2.1.1. Les Modèles de Simulation de Culture (MSC) ... 76
2.1.2. Modèles économétriques ... 78
2.2. Impact du changement climatique sur des variables économiques : approche ricardienne et approches intégrées ... 80
2.2.1. Approche ricardienne ou hédonique ... 80
2.2.2. Approche intégrée ... 83
2.2.2.1. Les composantes climatiques ... 84
2.2.2.2. Les composantes agronomiques ... 85
2.2.2.3. Les composantes économiques ... 85
Les modèles purement économiques ... 85
Le modèle TOA-MD 5 ... 85
Les modèles économétriques ... 86
Les modèles bioéconomiques ... 86
Utiliser des modèles économiques avec des caractéristiques biophysiques : (Brown, 2000) approche agroéconomique ... 87
Utiliser des modèles économiques avec une composante mesurée grâce à un sous-modèle biophysique : approche agronomique/biophysique-économique ... 88
Section 3 : Les modèles hydro-économiques intégrés (*integrated hyro-economic models*) et leur usage pour l'évaluation d'impact du changement et de la variabilité climatique en agriculture irriguée ... 89
3.1. Théorie économique et ressources en eau d'irrigation : Les nappes souterraines comme ressources communes ... 89
3.2. Modélisation des ressources en eau souterraines en économie et applications empiriques ... 91
3.2.1. Les modèles hydro-économiques ... 91
De l'importance de la valeur économique de l'eau ... 91
L'approche holistique vs l'approche modulaire ... 92
Les approches positives vs normatives ... 92
3.2.2. Applications ... 92
3.2.3. Quelques limites des modèles hydro-économiques ... 94
3.2.4. Études empiriques qui utilisent les approches intégrées hydro-économique pour évaluer l'impact du changement climatique dans l'agriculture irriguée ... 94
Conclusion partielle ... 96
Chapitre 3 : Analyse économique de l'impact de la variabilité des précipitations sur la disponibilité de l'eau d'irrigation dans la zone des *niayes* ... 99
Section 1 : Approche méthodologique ... 100
1.1. Modèle théorique d'usage de la nappe pour irrigation ... 100
1.2. Cadre empirique ... 103
1.2.1. Variabilité climatique et disponibilité de l'eau d'irrigation dans les *niayes* ... 104
1.2.2. Les dynamiques de la nappe ... 105
1.2.3. Les spécifications des modèles ... 107
1.2.3.1. Le modèle d'optimisation hydro-économique adapté à la zone des *Niayes* pour mesurer la disponibilité de l'eau d'irrigation face à la variabilité des précipitations ... 107
Le modèle d'optimisation dans le cas myope (cas statique) ... 108
Le modèle d'optimisation dans le cas dynamique ... 109
1.2.3.2. Le modèle de production pour estimer la fonction de bénéfice en eau ... 110
i. Les méthodes pour dériver la fonction de demande en eau ... 110
ii. Fonctions de production en eau dans la littérature ... 111
Fonction de production agronomiques et physiologiques ... 111
Fonctions de production standards en économie de la production et travaux empiriques en économie agricole ... 111
iii. Estimation de la fonction de demande en eau des producteurs ... 112
1.2.4. Les scénarios climatiques ... 115
Section 2 Données utilisées ... 118
2.1. Données primaires Processus de collecte et échantillonnage ... 118

2.1.1. Des entretiens exploratoires pour mieux cadrer le sujet 118
2.1.2. Échantillonnage 119
Unité d'observation 119
La taille de l'échantillon 120
La méthode d'échantillonnage 120
2.1.3. Caractéristiques de notre échantillon et données utilisées 121
2.1.4. Données estimées à partir des données primaires : prélèvements des producteurs, coût d'extraction de l'eau 125
2.2. Données secondaires 126
La recharge 127
Données climatiques 128
La profondeur des puits 128
Les prélèvements des usagers de la nappe (hors producteurs) 128
Sones (prélèvements urbains) : nappe de Thiaroye 128
Prélèvements forages ruraux 129
La porosité efficace 130
Section 3 : Résultats et implications 131
3.1. Résultats sur les scénarios pluviométriques 132
3.2. Résultats sur la disponibilité de l'eau d'irrigation selon les scénarios pluviométriques considérés 133
3.2.1. Résultats de disponibilité de l'eau avec le scénario pluviométrique de référence : une recharge pluviométrique insuffisante pour couvrir les extractions d'eau des producteurs 133
3.2.2. Comparaison entre scénario de référence et autres scénarios pluviométriques : une disponibilité de l'eau d'irrigation légèrement réduite selon les scénarios 135
3.2.3. Comparaison des résultats avec d'autres études antérieures dans la zone 138
3.3. Implications et discussion des résultats 139
3.3.1. Implications de la baisse de la disponibilité de l'eau sur la production horticole 139
3.3.2. Discussion sur ces implications et la non prise en compte de certaines stratégies d'adaptation 141
3.4. Analyse de sensibilité 143
Le facteur d'actualisation affecte-t-il les résultats ? 143
Élasticité de la fonction de demande en eau des producteurs 144
3.5. De la nécessité de gérer la ressource en eau : est et discussion de quelques instruments de gestion de la ressource en eau proposés par la théorie économique 144
Options politiques pour une amélioration de la disponibilité de l'eau d'irrigation 145
Instuments de politiques testés 146
L'impact de la taxe sur la ressource 146
Impact de la taxe sur les producteurs 148
Conclusion partielle 149
Conclusion générale 151
Résultats et implications 151
Contributions de la thèse 154
Limites et perspectives 154
Bibliographie des sources citées 158
Listes 171
Noms vernaculaires 171
Liste des tableaux 171
Liste des figures 172
Liste des réductions graphiques 174
Annexes 177
Sommaire des annexes 177
ANNEXE I Tableaux de résultats et échantillon 178
A. Résultats sur la disponibilité de l'eau 178
B. Résultats sur la pluviométrie simulée 179
C. Répartition de l'échantillon 179
D. Résultats de calibration du modèle ferme 180
ANNEXE II Outils de collecte de données 181

Phase pré-enquête ... 181
Guide d'entretiens des *focus groups* menés avec les organisations de producteurs des *niayes* ... 181
Type d'exploitations, activités, revenus ... 181
Irrigation et disponibilité eau ... 181
Pédologie ... 182
Perceptions sur le changement climatique ... 182
Stratégies d'adaptation ... 182
Accès au financement ... 183
Projets dans la zone ... 183
Besoins ... 183
Phase enquête ... 184
A Questionnaire ... 184
Questionnaire sur le changement climatique dans les *niayes* ... 184
Campagne saison sèche (froide et chaude) 2013-2014 ... 184
I. Caractéristiques de l'enquêté ... 184
II. Caractérisation de l'exploitation ... 185
II.1. Population de l'exploitation ... 185
II.2. Capital de l'exploitation ... 185
II.3. Fonctionnement de l'exploitation ... 186
III. Comptes d'exploitation ... 188
III.2. Coûts activités d'élevage ... 191
IV. Revenus non agricoles ... 192
ANNEXE III Méthode de résolution de la programmation dynamique, approche P.M.P. ... 193
A Méthode de résolution numérique du programme dynamique dans la littérature ... 193
La programmation dynamique: le problème de base ... 193
Résolution du problème : l'approche lisse avec usage des polynômes de Chebychev et itération de la *value function* ... 194
L'équation de Bellman ... 194
Comment approximer la fonction valeur ... 194
Les polynômes de Chebychev ... 195
Itération de la fonction valeur ... 195
Méthode de résolution numérique de notre programme dynamique ... 196
B. L'approche P.M.P. ... 196
De la programmation linéaire (P.L.) à la programmation mathématique positive (P.M.P.) ... 196
La P.M.P. comme solution aux problèmes de calibration de la P.L. ... 196
Étape 1 : programme de maximisation linéaire avec ajout de contraintes de calibration qui permettent de reproduire les quantités observées ... 197
Étape 2 : Spécification d'une fonction de coût non-linéaire avec les valeurs duelles des contraintes de calibration ... 198
3: Résoudre le problème d'optimisation avec la fonction objectif non linéaire et sans contraintes de calibration ... 200
Limites PMP et améliorations possibles ... 200
ANNEXE IV Informations additionnelles sur les scénarios pluviométriques ... 202
Définition et calcul de l'indice de précipitation standardisée ... 202
Chaînes de Markov et matrice de transition de probabilité ... 203
Comparaison distributions des série de précipitations simulée et observée ... 204
ANNEXE V Discussion sur la définition d'une exploitation familiale ... 205
ANNEXE VI Exemples de stratégies d'adaptation endogènes dans la zone des Niayes : cas de la commune rurale de Keur Moussa ... 206
ANNEXE VII Figures sur l'évolution des précipitations et des températures sur la période 1970-2011 dans les niayes ... 207
ANNEXE VIII Production horticoles nationales de 2010-2011 à 2013-2014 ... 211
ANNEXE IX Code des modèles sur GAMS ... 212
Table des matières ... 213