



HAL
open science

A qui profite le retour des pluies ? Le cas des éleveurs du Ferlo

Catherine Araujo Bonjean, Alioune N'diaye, Olivier Santoni

► **To cite this version:**

Catherine Araujo Bonjean, Alioune N'diaye, Olivier Santoni. A qui profite le retour des pluies ? Le cas des éleveurs du Ferlo. 2019. halshs-02419601

HAL Id: halshs-02419601

<https://shs.hal.science/halshs-02419601v1>

Preprint submitted on 19 Dec 2019

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

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



CENTRE D'ÉTUDES
ET DE RECHERCHES
SUR LE DÉVELOPPEMENT
INTERNATIONAL

SÉRIE ÉTUDES ET DOCUMENTS

A qui profite le retour des pluies ? Le cas des éleveurs du Ferlo

Catherine Araujo Bonjean
Alioune N'Diaye
Olivier Santoni

Études et Documents n° 24
December 2019

To cite this document:

Araujo Bonjean C., N'Diaye A., Santoni O. (2019) "A qui profite le retour des pluies ? Le cas des éleveurs du Ferlo", *Études et Documents*, n° 24, CERDI.

CERDI
POLE TERTIAIRE
26 AVENUE LÉON BLUM
F- 63000 CLERMONT FERRAND
TEL. + 33 4 73 17 74 00
FAX + 33 4 73 17 74 28
<http://cerdi.uca.fr/>

The authors

Catherine Araujo Bonjean

CNRS Researcher - Université Clermont Auvergne, CNRS, CERDI, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

Email address: catherine.araujo-bonjean@uca.fr

Alioune N'Diaye

PhD Student - Université Clermont Auvergne, CNRS, CERDI, F-63000 Clermont-Ferrand, France, and UMR SELMET, CIRAD.

Email address: alioune.ndiaye@cirad.fr

Olivier Santoni

Geomatics Specialist, FERDI, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

Email address: olivier.santoni@ferdi.fr

Corresponding author: Catherine Araujo Bonjean



This work was supported by the LABEX IDGM+ (ANR-10-LABX-14-01) within the program “Investissements d’Avenir” operated by the French National Research Agency (ANR).

Études et Documents are available online at: <https://cerdi.uca.fr/etudes-et-documents/>

Director of Publication: Grégoire Rota-Graziosi

Editor: Catherine Araujo-Bonjean

Publisher: Mariannick Cornec

ISSN: 2114 - 7957

Disclaimer:

Études et Documents is a working papers series. Working Papers are not refereed, they constitute research in progress. Responsibility for the contents and opinions expressed in the working papers rests solely with the authors. Comments and suggestions are welcome and should be addressed to the authors.

Résumé

Le retour à un régime de précipitations plus abondantes au Sahel à partir des années 2000 conduit à s'interroger sur les conséquences de ce changement pour les éleveurs du Ferlo sénégalais. Une analyse fine des données de précipitations montre qu'avec le retour d'un régime pluviométrique plus humide, le risque climatique a changé de nature mais reste présent. L'augmentation des précipitations et l'allongement de la saison des pluies sont compensés par une augmentation de l'agressivité des pluies et du nombre d'épisodes secs. Au final, l'efficacité des pluies en termes de croissance de la végétation n'augmente pas, voire diminue. Les données collectées en 2015, pour un échantillon représentatif d'éleveurs, permettent d'évaluer l'impact de ces différents paramètres sur la production laitière et les ventes d'animaux. Les résultats, basés sur l'analyse du comportement des éleveurs en saison sèche et en saison humide, montrent la sensibilité de la production laitière aux pluies et à l'état de la végétation. Ils soulignent aussi que des conditions pluviométriques défavorables entraînent un déstockage d'animaux, conséquence des difficultés des éleveurs à entretenir leur cheptel plutôt que d'une stratégie de lissage de leur revenu.

Mots clés

Changement climatique, pastoralisme, Sénégal.

Codes JEL

O13, Q11, Q54, O55.

Remerciements

Les auteurs remercient les chercheurs du Cirad-PPZS, en particulier Abdrahmane Wane, Guillaume Duteurtre et Ibra Touré, pour la mise à disposition des données socio-économiques qui ont servi à la réalisation de ce travail et pour leur éclairage sur la problématique de l'élevage au Ferlo.

*

**

Abstract

Who benefits from the return of the rains? The case of the Ferlo breeders in Senegal

The return of more abundant rainfall in the Sahel region since the early 2000s raises questions about the consequences of this change for breeders in the Ferlo region of Senegal. A detailed analysis of precipitation data shows that with the return of a more humid rainfall regime, the climatic risk has changed in nature but remains present. The increase in annual precipitations

and in the lengthening of the rainy season is offset by an increase in rainfall aggressiveness and in the number of dry spells. In the end, the efficiency of precipitations in terms of vegetation growth does not increase or even decreases. The data collected in 2015 for a representative sample of farmers makes it possible to assess the impact of the monsoon characteristics on milk production and animal sales. The results, based on the analysis of livestock breeders' behavior in the dry and wet seasons, show the sensitivity of milk production to rainfall and vegetation conditions. They also show that adverse rainfall conditions lead farmers to increase livestock's sales, but they do not support the income-smoothing hypothesis.

Keywords

Climate change, Pastoralism, Senegal.

JEL Codes

O13, Q11, Q54, O55.

Acknowledgments

The authors thank the CIRAD-PPZS researchers, in particular Abdrahmane Wane, Guillaume Duteurtre and Ibra Touré, for making available the socio-economic data that were used to carry out this work, and for sharing their insight and experience on the livestock sector in the Ferlo.

1. Introduction

Selon la FAO, le secteur de l'élevage peut contribuer fortement au Programme de développement durable à l'horizon 2030 mais cela implique une transformation profonde de ce secteur pour à la fois s'adapter au changement climatique et contribuer à son atténuation.

Dans les pays Sahéliens, comme le Sénégal, l'élevage extensif, dit aussi élevage pastoral, est le système dominant. C'est un système complexe fondé sur la mobilité des troupeaux au sein de vastes zones et qui, aujourd'hui, associe de plus en plus souvent des activités agricoles. Les éleveurs tendent à se sédentariser et développent des activités extra-pastorales : agriculture principalement mais aussi commerce, travail salarié, artisanat etc. De leur côté, les agriculteurs des zones semi-arides tendent à intégrer des animaux dans leur système de production. Le point commun des pasteurs et des agropasteurs est de pratiquer la transhumance sur des distances plus ou moins longues et d'utiliser peu d'intrants modernes notamment pour l'alimentation du bétail.

Selon les experts, l'élevage pastoral sahélien ne peut être accusé de contribuer au réchauffement climatique dans la mesure où son bilan annuel en termes d'émission de gaz à effet de serre est équilibré (Assouma *et al.*, 2019). En revanche, ce mode d'élevage mobile qui repose sur l'exploitation des ressources naturelles en eau et en pâturages est très dépendant des conditions climatiques. Le principal défi pour l'élevage mobile est donc de s'adapter aux modifications du climat susceptibles d'affecter les animaux et les ressources naturelles.

La hausse des températures, le changement des régimes de pluie et les épisodes météorologiques extrêmes agissent directement ou indirectement sur la productivité du cheptel. D'un côté, les températures élevées affectent la santé et la production des animaux (Rojas-Downing *et al.*, 2017). De l'autre côté, les modifications du régime des pluies et les événements météorologiques extrêmes sont susceptibles d'accroître la dégradation des ressources pastorales et agricoles. Il en résulte un risque accru de baisse de la productivité et de décapitalisation des élevages.

Cependant, les modifications du climat que l'on peut observer dans le Sahel occidental depuis la fin des années 90 (Panthou *et al.* 2014, Ali *et al.* (2008), Ali et Lebel (2009), Descroix *et al.* 2015) semblent aller dans un sens plus favorable aux pasteurs et agropasteurs. C'est le cas des modifications constatées dans le régime des pluies. L'augmentation des précipitations annuelles, qui tendent à revenir à leur niveau antérieur à la grande sécheresse du début des années 70, amène de nombreux auteurs à parler d'un retour des pluies au Sahel. Ce retour à des pluies plus abondantes, phénomène encore peu étudié, conduit à s'interroger sur ses conséquences possibles pour les éleveurs.

Notre étude, centrée sur un échantillon représentatif de la diversité des conditions d'élevage dans le Ferlo, vise à mieux comprendre les défis auxquels est aujourd'hui confronté le secteur de l'élevage pastoral sénégalais. Elle poursuit, plus précisément, deux objectifs. Il s'agit, d'abord, de caractériser les modifications du régime des pluies dans les zones d'élevage et d'évaluer l'impact de ces changements en termes de ressources pastorales, avant de tester l'effet de ces perturbations sur la production des élevages. L'apport et l'originalité de ce travail est de reposer sur une analyse fine des précipitations dans les zones d'élevage et de distinguer deux sous-périodes, la saison sèche et la saison humide, dans l'analyse de la réponse des éleveurs aux perturbations de la mousson.

Ce travail se situe à la croisée des travaux portant sur l'impact du changement climatique sur l'élevage et des travaux portant sur la gestion du risque de revenu par les ménages ruraux. A la suite de Binswanger et McIntire (1987) et de Rosenzweig et Wolpin (1993), de nombreux auteurs se sont interrogés sur la capacité des ménages à lisser leur consommation et sur le rôle d'assurance joué par le bétail face à des chocs de revenu d'origine climatique. D'une façon générale, ces travaux ont montré que face à des conditions climatiques extrêmes les ventes de bétail sont relativement rigides et ne compensent pas les pertes de revenus encourues par les ménages. C'est le cas notamment, des travaux de Fafchamps *et al.* (1998) et Kazianga and Udry (2006) sur le Burkina Faso au moment de la grande sécheresse du début des années 80. Pour McPeak (2004), les chocs climatiques engendrent non seulement une perte de revenu lié à la chute de la production de lait, mais aussi un choc sur les actifs dû aux pertes de bétail. Ceci amène les éleveurs à conserver leur bétail afin de préserver leur revenu futur espéré.

Les travaux relevant de l'approche dite « ricardienne », initiés par Mendelsohn *et al.* (1994), s'intéressent à l'impact du changement climatique sur les revenus de l'élevage, la composition et la taille des troupeaux. Ce sont des études transversales conduites sur un ensemble de pays d'Afrique (Seo et Mendelsohn, 2008 ; Kurukulasuriya *et al.* 2006) ou d'Amérique Latine (Seo *et al.* 2010) qui mettent en évidence des effets non linéaires des précipitations et des températures sur le choix des espèces et/ou les revenus générés par les différents types d'élevage. Cette approche a été reprise notamment par Gebreegziabher *et al.* (2014) sur des données éthiopiennes et Kabubo-Mariara (2009) pour le Kenya. Ce sont des analyses transversales à partir desquelles les auteurs simulent des changements dans le niveau des précipitations et des températures.

Par rapport à ces auteurs, qui utilisent des indicateurs assez grossiers des conditions météorologiques, nous travaillons sur des indicateurs plus fins de la qualité des précipitations et prenons en compte l'impact des précipitations sur la dynamique de la végétation. Nous montrons que le retour à une période plus humide à la fin des années 90 s'accompagne d'une augmentation de l'agressivité des pluies, du nombre d'événements pluvieux extrêmes et du nombre d'épisodes secs pendant la mousson. Nous trouvons une relation non linéaire dans l'analyse de l'impact des pluies sur la végétation, positive pour les pluies modérées, négative pour les fortes pluies. Ce résultat est compatible avec ceux des modèles « ricardiens » qui montrent un effet négatif des forts cumuls sur les revenus des éleveurs.

Comme McPeak (2004) pour le Kenya, nous trouvons que la production de lait et les ventes de bétail dans le Ferdo, dépendent de l'abondance des ressources pastorales. Nous trouvons également une relation inverse entre les ventes de bétail et la production laitière. Cependant, une fois contrôlé pour l'endogénéité potentielle de cette variable nous rejetons, comme Fafchamps *et al.* (1998) l'hypothèse selon laquelle les ventes de bétail serviraient à compenser les chocs de revenu des éleveurs.

Le reste de l'article est ordonné comme suit. Après une présentation des bases de données et des sites d'étude dans la partie 2, la troisième partie est consacrée à l'analyse de la tendance et de la variabilité des précipitations sur l'ensemble du Sénégal. La quatrième partie présente les tests d'efficacité des pluies. La cinquième partie est consacrée à l'analyse de l'impact de la pluviométrie sur la production laitière et les ventes de bétail. La sixième partie conclut.

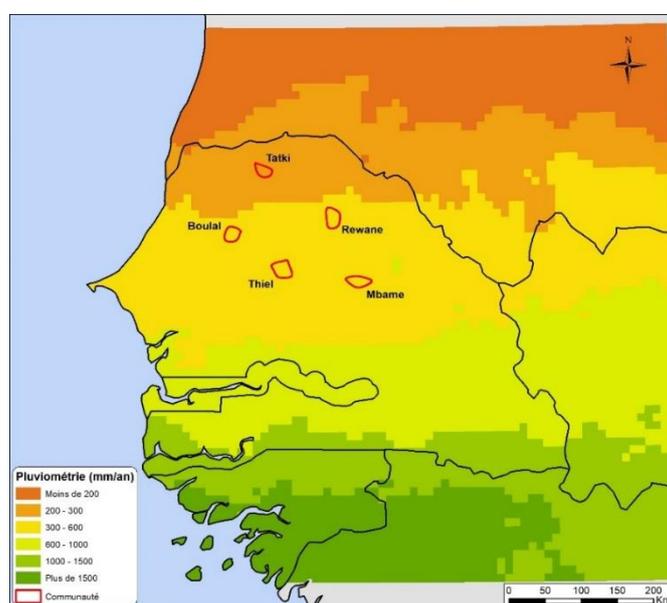
2. Données et sites d'étude

L'analyse est centrée sur 5 sites d'élevage situés dans la Zone Agro-Sylvo-Pastorale (ZASP) du Sénégal : Tatki, Boulal, Rewane, Mbame et Thiel (voir carte 1). Ces cinq sites ont été sélectionnés par des chercheurs du Pôle Pastoralisme et Zones Sèches (CIRAD-PPZS¹) sur la base de critères agro-écologiques (nature des sols et pluviométrie) et économiques (qualité des infrastructures publiques et distance au marché) de façon à saisir la diversité des conditions de l'élevage pastoral au Sénégal (Wane 2016 ; Wane et al., 2010).

Les données économiques proviennent d'une enquête sur les revenus des ménages pastoraux effectuée par le CIRAD-PPZS dans le cadre de la mise en œuvre du Projet Régional d'Appui au Pastoralisme au Sahel (PRAPS). Elles portent sur la campagne 2013/2014 et couvrent un échantillon de 235 campements, comprenant au total 797 ménages², répartis sur les cinq sites. L'appariement avec les données climatiques et les données de végétation a été réalisé sur la base des coordonnées géographiques des campements.

Les données de précipitations proviennent de la base CHIRPS élaborée par le Groupe Climate Hazards de l'Université de Californie à Santa Barbara (UCSB)³ Ce sont des données de pluviométrie journalière élaborées à partir d'observations au sol et de mesures satellitaires. Elles sont disponibles pour la période 1981 à 2017 avec une résolution spatiale de 0.05° (environ 10km²).

Carte 1. Cumul pluviométrique annuel moyen sur la période 1981 - 2010



Isohyètes : 200, 300, 600, 1000, 1500 mm
Calcul des auteurs d'après les données CHIRPS

¹ Le Pôle Pastoralisme et Zones Sèches (PPZS) est un groupement d'intérêt scientifique associant des chercheurs du CIRAD, de l'Institut Sénégalais de Recherche Agricole (ISRA), du Centre de Suivi Ecologique (CSE) et de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) autour de la thématique de l'élevage pastoral.

² Après avoir écarté les campements dont les coordonnées géographiques se sont avérées erronées, notre échantillon de travail comprend 783 ménages répartis dans 230 campements.

³ Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data: <http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>.

Les tableaux 1 et 2 donnent les principales caractéristiques économiques des campements enquêtés et de la pluviométrie dans les 5 sites.

Le site de Tatki, se situe dans la partie septentrionale du Sénégal (Sahel septentrional) où le climat est de type semi-désertique. Les précipitations annuelles sont, en moyenne, inférieures à 300 mm et concentrées sur 2 mois (août et septembre). C'est une région d'élevage où l'on trouve les plus grands troupeaux de bovins et d'ovins de notre échantillon (Tableau 1). Le site de Rewane, qui se situe à une latitude un peu moins élevée que Tatki et plus à l'est, reçoit des précipitations supérieures à 300 mm en moyenne. La saison des pluies démarre un peu plus tôt, et dure un peu plus longtemps, environ 70 jours en moyenne sur la période 1981-2017. La faible taille du cheptel, mesurée par le nombre d'unités de bétail tropical (UBT) par ménage, s'explique par un nombre de bovins relativement faible par rapport aux autres sites qui se traduit par une production laitière relativement faible.

Tableau 1. Caractéristiques des campements

Sites	Boulal	Tatki	Rewane	Mbame	Thiel
Nb de campements enquêtés	69	47	37	23	54
Nb de ménages/campement	2.38	4.81	3.38	3.26	3.57
Nb individus/campement	16.41	29.79	22.24	21.78	25.30
<i>Composition du troupeau</i>					
UBT par ménage	19.93	26.09	16.03	18.93	17.31
UBT par individu	2.96	4.13	2.36	2.81	2.68
Nb de bovins par ménage	18.56	23.75	11.76	19.59	13.94
Nb d'ovins par ménage	41.00	58.14	41.77	29.04	42.97
Nb de caprins par ménage	12.13	14.79	20.27	9.55	16.51
<i>Production équivalent lait en saison sèche (SS)</i>					
par ménage (litres)	617	639	451	552	1358
par ménage et par mois (litres)	88	91	65	79	194
en % du total (SS+SP)	30.9	30.2	32.3	28.9	35.7
<i>Production équivalent lait en saison pluvieuse (SP)</i>					
par ménage (litres)	1382	1479	946	1358	2440
par ménage et par mois (litres)	276	296	189	272	488
en % du total (SS+SP)	69.1	69.8	67.7	71.1	64.3
<i>Nb d'animaux vendus en saison sèche (SS)</i>					
par ménage	16.35	22.49	28.51	17.72	18.70
par ménage et par mois	2.34	3.21	4.07	2.53	2.67
en % du total des ventes (SS+SP)	63.4	69.3	58.8	62.8	65.9
<i>Nb d'animaux vendus en saison pluvieuse (SP)</i>					
par ménage	9.42	9.95	19.94	10.47	9.69
par ménage et par mois	1.88	1.99	3.99	2.09	1.94
en % du total des ventes (SS+SP)	36.6	30.7	41.2	37.2	34.1

Calculs des auteurs d'après les données de l'enquête. Les données se réfèrent à la campagne 2013/2014

UBT : unité de bétail tropical. Pondérations : bovin = 0.73 ; caprin = 0.12 ; ovin = 0.12

Pondérations pour le calcul de l'équivalent lait : lait frais = 1 ; lait caillé = 2 ; beurre = 22 (voir Meyer et Duteurtre, 1998).

SS : saison sèche (septembre année_t – juin année_{t+1}) SP : saison des pluies (juillet année_t – octobre année_t)

Le site de Boulal, se situe sur la bordure ouest du Ferlo. Les précipitations sont plus abondantes, de l'ordre de 370 mm par an, mais la saison des pluies reste concentrée sur août et septembre. On note que les campements sont de plus petite taille, en termes de nombre de ménages, que dans les autres sites. La taille du cheptel, en UBT, place ce site en deuxième position, derrière Tatki. Les sites de Thiel et de Mbame, sont situés dans la partie méridionale du Ferlo. Les précipitations sont plus abondantes, supérieures à 400 mm par an et la saison des pluies dure près de 3 mois, de mi-juillet aux premiers jours d'octobre. Le site de Thiel se trouve à proximité du bassin arachidier et se caractérise par une cohabitation entre pasteurs et agriculteurs. L'élevage est davantage tourné vers la production laitière que dans les autres sites.

Tableau 2. Principales caractéristiques de la mousson. Moyennes sur la période 1981-2017

	Tatki	Boulal	Rewane	Mbame	Thiel
Région	Saint Louis	Louga	Saint Louis	Matam	Louga
Département	Dagana	Lingère	Podor	Ranérou	Lingère
Surface du site (nb de cellules x km ²)	6x10km ²	6x10km ²	8x10km ²	5x10km ²	8x10km ²
Cumul pluviométrique annuel (mm)	244.42	370.80	348.72	432.52	435.73
Durée de la saison agronomique (jours)	58.40	68.32	69.70	85.11	85.29
Début de la saison agronomique	29-juil.	27-juil.	21-juil.	11-juil.	14-juil.
Fin de la saison agronomique	25-sept.	3-oct.	28-sept.	5-oct.	7-oct.
Nb jours pluvieux pdt saison agronomique	22.19	28.20	28.30	36.32	36.18

Source : calculs des auteurs (voir ci-après)

3. Le retour des pluies

La grave sécheresse qui frappe le Sahel à partir de la fin des années 60 marque le début d'une longue période sèche qui atteint son paroxysme en 1984 et se poursuit jusqu'à la fin des années 90. Il faut attendre les années 2000 pour retrouver des cumuls annuels de précipitations supérieurs à leur moyenne de long terme.⁴ Ce « retour des pluies » s'accompagne toutefois d'une plus grande dispersion intra-annuelle des précipitations comme le montre les tests présentés ci-dessous.

3.1. Tendances et rupture dans les précipitations

L'hypothèse d'un retour à des niveaux de précipitations structurellement plus élevés à partir des années 2000 est testée au niveau de l'espace géographique Sénégal - Gambie et des cinq sites étudiés. Les données de précipitations sont compilées pour former 6 panels permettant de tester l'hypothèse d'une tendance commune sur chaque échantillon. La tendance est déterminée à partir d'un modèle linéaire à effets fixes individuels⁵ estimé par les MCO :

$$y_{it} = \alpha_i + \beta t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

y_{it} : cumul pluviométrique annuel pour la cellule i à l'année t . α_i : effets fixes individuels ; ε_{it} : terme d'erreur aléatoire.

⁴ Moyenne calculée sur la période 1901 – 2014.

⁵ Le modèle à effets fixes individuels permet de prendre en compte les différences de niveaux dans les hauteurs d'eau moyennes de chaque site.

Les résultats montrent une tendance positive et significative pour l'ensemble de la zone et chacun des sites sur la période 1981 – 2017 (Tableau 3). L'augmentation de la pluviométrie est la plus forte sur le site de Boulal, le plus à l'ouest de la zone d'étude. Le site de Thiel, région méridionale la plus arrosée de notre échantillon, bénéficie également d'une forte augmentation des précipitations. En revanche, la hausse des précipitations est moins forte dans la région de Tatki, au nord du Sénégal. Au niveau de l'ensemble de l'espace Sénégal-Gambie, les estimations font apparaître un gradient SE-NO dans la hausse des précipitations : plus élevée au sud-est et plus faible au nord-ouest (résultats en Annexe 2).

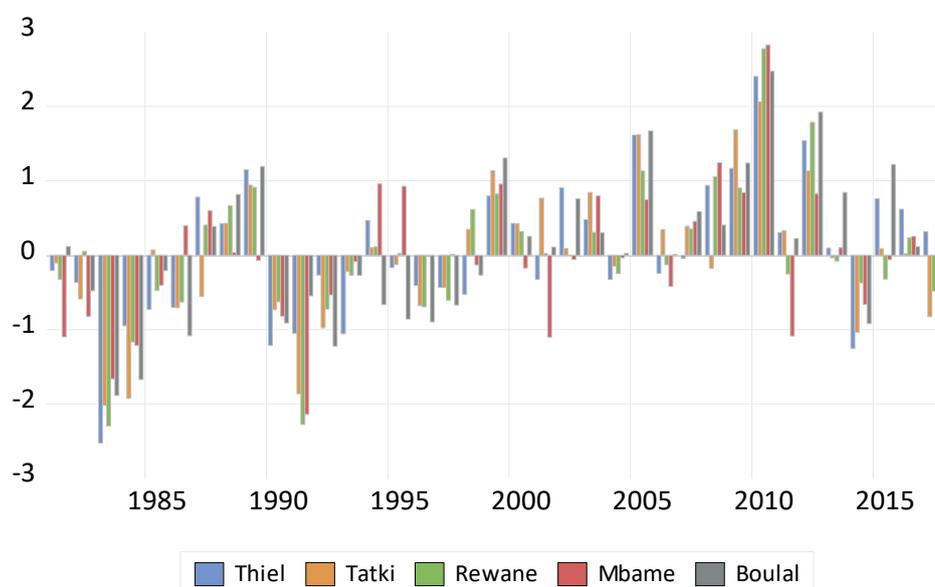
Tableau 3. Estimations de la tendance du cumul pluviométrique annuel
Données de panel, 1981 -2017

Sites	Boulal	Tatki	Rewane	Mbame	Thiel
Trend	4.147**	2.741*	2.828*	2.835**	3.029**
EF indiv	oui	oui	oui	oui	oui
Nb individus	6	6	8	5	8
Nb d'obs.	222	222	296	185	296

Effets fixes individuels ; écart-type White robustes ; ** : significatif à 1% ; * : significatif à 5%.

Une analyse plus fine montre, cependant, que cette tendance positive des précipitations annuelles sur la période 1981-2017 masque une rupture dans le régime des pluies à la fin des années 90. Cette rupture apparaît dans le graphique 1 qui met en évidence deux sous-périodes distinctes : une période sèche qui va de 1981 à la fin des années 90, suivie d'une période humide qui dure jusqu'à la fin de la période d'étude.

Graphique 1. Anomalies de précipitations sur la période 1981 – 2017. Moyennes par site



Le changement observé dans le régime des précipitations est confirmé par les résultats du test paramétrique de rupture de Bai et Perron (2003) et du test non paramétrique, de changement de distribution, de Pettitt (1979) (Tableau 4). Ces tests, conduits pour chaque cellule

géographique, concordent pour faire apparaître une rupture dans la tendance des précipitations qui se situe en 1997 ou 1998 dans la majorité des cas. Pour le site de Mbame, à l'est de la zone d'étude, la date de rupture est plus précoce et se situe en 1992 ou 1993.

Tableau 4. Tests de rupture et de segmentations multiples sur la période 1981-2017

	Rewane (8 cellules)	Boulal (6 cellules)	Tatki (6 cellules)	Mbame (5 cellules)	Thiel (8 cellules)
Test de rupture de Bai et Perron					
Date de rupture	1998 (7)	1999 (6)	1998 (6)	1992 (2)	1999 (6)
(nb de cellules)	0 (1)			1993 (3)	1994 (1) 0 (1)
Test de Pettitt de changement dans la distribution					
Date de rupture	1997 (7)	1998 (6)	1997 (6)	1992 (1)	1998 (7)
(nb de cellules)	0 (1)			1993 (2) 0 (2)	0 (1)
Test de segmentation multiple de Hubert et al.					
1 ^{er} segment	[1981; 1997]	[1981; 1998]	[1981 ; 1997]	[1981; 1992]	[1981 ; 1998]
2 ^{ème} segment	[1998; 2017]	[1999; 2017]	[1998 ; 2017]	[1993; 2017]	[1999 ; 2017]
(nb de cellules)	(8)	(6)	(6)	(3)	(6)
1 ^{er} segment				[1981; 2009]	[1981 ; 1986]
2 ^{ème} segment				[2010; 2017]	[1987 ; 2017]
(nb de cellules)				(1)	(2)
1 ^{er} segment				[1981;2007]	
2 ^{ème} segment				[2008; 2017]	
(nb de cellules)				(1)	

Entre parenthèses, le nombre de cellules géographiques correspondant à la date de rupture (ou au nombre de segments) indiquée. Par exemple, le test de Bai et Perron détecte une rupture en 1998 pour 7 des 8 cellules géographiques composant le site de Rewane ; il ne détecte pas de rupture pour la 8^{ème} cellule.

Sur les 5 sites, le test de Bai et Perron et le test de segmentation multiple de Hubert et al. (1989) ne détectent pas plus d'une rupture. Les résultats du test de Hubert et al. confirment ceux des tests de Pettitt et de Bai et Perron quant à la date de rupture, à deux exceptions près. Pour deux cellules à l'ouest du site de Mbame le test de Hubert et al. fait apparaître deux segments avec une rupture en 2007 dans un cas, 2009 dans l'autre. Toutefois, les tests d'égalité de moyennes ne faisant pas apparaître de différence significative avant et après 2007 (ou 2009), cette deuxième rupture n'est pas retenue dans les analyses qui suivent.

Le tableau 5 donne les résultats d'estimation de la tendance sur les sous-périodes mises en évidence par les tests de rupture. L'équation estimée sur les 5 panels est donnée par :

$$y_{it} = \beta_{0i} + Break_t + \beta_1(1 - Break_t).t + \beta_2 Break_t.t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

y_{it} : cumul pluviométrique annuel pour la cellule i à l'année t . β_{0i} : effets fixes individuels ; ε_{it} : terme d'erreur aléatoire ; $Break_t = 0$ si $t >$ date de rupture ; $= 1$ sinon. $t =$ trend

Les estimations ne montrent pas de tendance significative avant et après la rupture, excepté pour le site de Tatki, le plus au nord de l'échantillon, qui enregistre une tendance négative faiblement significative (Pvalue= 0.055) en fin de période. Dans cette zone, une dégradation tendancielle de la pluie sur la deuxième période (1998-2017) se dessine (Tableau 5 et graphique 2 ci-dessous).

Tableau 5. Tendence avant et après rupture

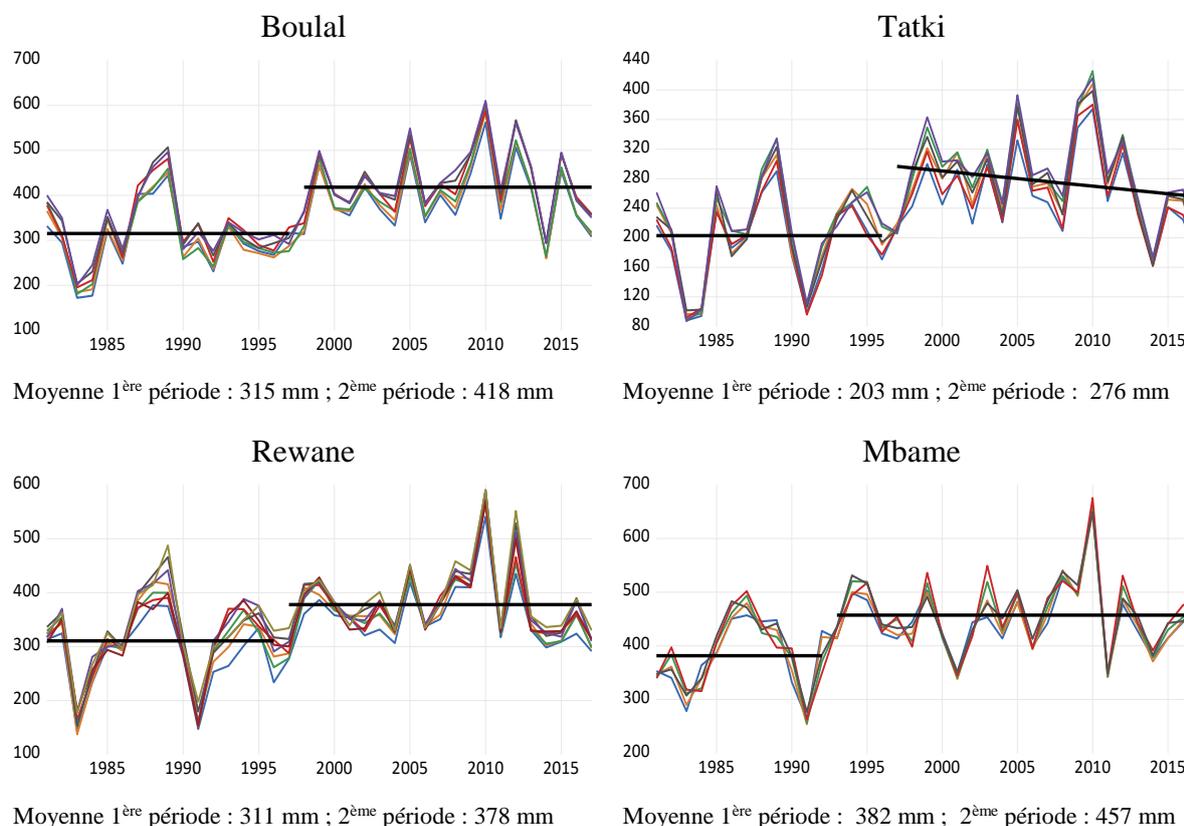
	Rewane	Boulal	Tatki	Mbame	Thiel
Constante (β_0)	296.386	316.749	182.728	376.305	383.503
Break (=1 après rupture)	120.711	134.805	189.857	77.789	87.311
trend avant rupture (β_1)	1.290	-0.034	2.304	1.074	1.691
trend après rupture (β_2)	-1.319	-1.044	-3.395*	0.323	0.0030
Nb de cellules	7	6	6	3	7
date de rupture	1997	1998	1997	1993	1998

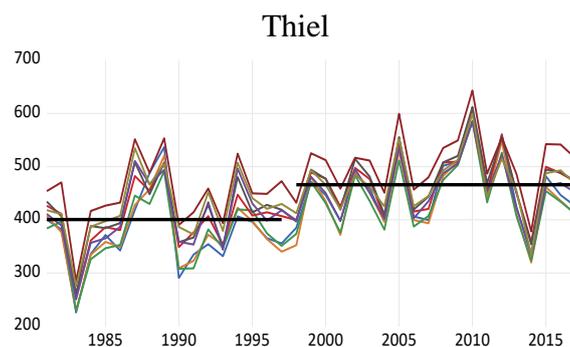
Estimation en panel à effet fixes individuels. * coefficient significatif à 10%

Au total, on distingue une période sèche qui dure en général jusqu'en 1997/98, suivie d'une période plus humide qui dans certains cas démarre plus tôt, dès 1987 ou 1993. Si la fin de période apparaît moins arrosée, il n'est pas possible de conclure à une nouvelle rupture dans le régime des pluies et à un retour à une période sèche excepté dans la région septentrionale de Tatki. Cette région qui était passée au-dessus de l'isohyète des 300 mm à la fin des 90, revient progressivement à des conditions pluviométriques moins favorables.

Ces résultats rejoignent ceux de Descroix et al. (2015) sur la Sénégambie et ceux de Bodian (2014). Ce dernier, travaillant sur une période plus longue, 1940 – 2013, et des données de stations réparties sur le territoire sénégalais, détecte une 1^{ère} rupture en 1968 et une 2^{ème} entre 1997 et 2007 dans les indices de précipitations standardisés.

Graphique 2. Cumuls pluviométriques annuels





Moyenne 1^{ère} période : 400 mm ; 2^{ème} période : 466 mm

Chaque graphique représente l'évolution du cumul annuel des précipitations pour les différentes cellules géographiques composant les sites étudiés. Les lignes droites donnent les tendances estimées avant et après la date de rupture pour la moyenne des cellules du site.

3.2. Distribution intra-annuelle des précipitations

Le tableau 6 présente différents indicateurs de la distribution intra-annuelle des précipitations pour les 5 sites de l'échantillon (voir en annexe 1 la méthode de calcul de ces indicateurs). Ces indicateurs sont calculés sur les deux sous-périodes, avant et après la rupture détectée dans les cumuls pluviométriques.

Les tests de comparaison de moyennes (test de Welch) montrent que parallèlement à l'augmentation du cumul pluviométrique annuel, la durée de la mousson agricole⁶ augmente de façon significative à Tatki (+13 jours), Rewane (+12 jours) et Boulal (+21 jours). La saison agricole tend à démarrer plus tôt en deuxième période et se termine plus tard dans tous les sites. On note que la durée de la mousson hydrologique⁷ est plus stable. Elle n'augmente significativement qu'à Tatki. La durée de la mousson s'allongeant, on ne constate pas d'augmentation de la concentration des pluies sur la période. De même, le nombre de jours de pluie dans l'année et durant la saison agricole étant en augmentation, l'intensité journalière des pluies (ISIP) n'augmente pas significativement. Le nombre de saisons agricoles « ratées⁸ » diminue fortement, voire disparaît, en deuxième période. Enfin, on ne recense pas, sur la deuxième période, d'années de grande sécheresse, correspondant à des anomalies pluviométriques inférieures à -2.

⁶ Mousson ou saison agricole : période pluvieuse correspondant à la période de croissance des plantes (Sivakumar 1988 ; Descroix et al ; 2015). Voir en Annexe 1 les critères d'identification de cette période.

⁷ Période de mousson (voir définition en Annexe 1).

⁸ La saison est dite ratée si la date d'installation des pluies n'a pu être identifiée (voir Annexe 1).

Tableau 6. Indicateurs de la qualité des pluies. Moyennes sur les sous-périodes

	Tatki			Boulal			Rewane			Mbame			Thiel		
	1981 1998	1999 2017	Welch P-Value	1981 1998	1999 2017	Welch P-Value	1981 1997	1998 2017	Welch P-Value	1981 1992	1993 2017	Welch P-Value	1981 1998	1999 2017	Welch P-Value
Cumul annuel (mm)	203.47	279.23	0.00	316.43	422.31	0.00	309.80	381.81	0.00	381.47	457.02	0.00	400.05	469.54	0.00
Cumul saison agro. (mm)	177.20	222.66	0.02	243.13	342.85	0.00	246.04	311.32	0.02	316.53	380.41	0.03	347.62	402.30	0.01
Concentration saison agro.	0.75	0.78	0.59	0.74	0.81	0.12	0.76	0.81	0.30	0.82	0.83	0.75	0.85	0.85	0.74
Début saison agronomique	4-août	26-juil.	0.07	1-août	22-juil.	0.06	25-juil.	17-juil.	0.16	12-juil.	11-juil.	0.94	14-juil.	13-juil.	0.86
Fin saison agronomique	22-sept.	28-sept.	0.05	27-sept.	8-oct.	0.00	26-sept.	30-sept.	0.15	2-oct.	6-oct.	0.18	3-oct.	10-oct.	0.01
Durée saison agro. (jours)	49.31	64.46	0.01	57.11	77.17	0.00	63.14	74.96	0.04	81.92	86.65	0.41	81.08	89.06	0.12
Durée saison hydro. (jours)	79.51	92.33	0.01	103.48	107.73	0.28	99.73	101.51	0.65	110.12	114.77	0.27	112.19	116.22	0.27
Durée présaison (jours)	31.86	25.42	0.24	39.51	30.09	0.16	37.53	26.55	0.10	28.13	29.58	0.81	25.91	25.27	0.90
Jours de pluie saison agro.	20.07	23.60	0.08	23.95	31.56	0.00	24.93	30.99	0.02	32.20	38.30	0.02	33.98	38.14	0.06
Jours de pluie saison hydro	36.78	40.46	0.05	44.25	50.60	0.01	44.38	48.81	0.04	50.18	57.20	0.01	53.01	57.36	0.10
ISIP saison agronomique	9.19	9.54	0.64	10.28	10.96	0.30	10.05	10.10	0.93	9.97	9.97	0.99	10.64	10.60	0.95
Nb de saison agro. ratées	0.46	0.13	0.01	0.22	0.04	0.08	0.18	0.00	0.02	0.07	0.00	0.15	0.08	0.00	0.19
Nb de pauses de pluie	2.53	3.48	0.09	2.68	3.19	0.35	2.96	3.16	0.68	3.35	3.24	0.86	3.11	3.32	0.68
Pause maximale (jours)	13.24	12.69	0.66	10.63	12.21	0.11	12.76	11.14	0.09	12.28	11.64	0.52	12.61	11.84	0.44
IFM	72.47	88.36	0.04	100.68	127.01	0.02	97.15	114.34	0.05	104.06	125.27	0.01	118.15	130.85	0.15
Nb IFM fort (*)	0.08	0.06	0.77	0.15	0.46	0.03	0.19	0.34	0.26	0.22	0.61	0.02	0.39	0.68	0.05
Nb IFM très fort (*)	0.00	0.00		0.09	0.11	0.89	0.01	0.08	0.33	0.00	0.07	0.29	0.07	0.09	0.78
G5DR	48.33	53.37	0.33	64.51	72.45	0.18	60.74	65.37	0.42	57.65	64.38	0.08	68.37	65.81	0.60
95 ^{ème} percentile (*)	5.93	8.96	0.00	6.25	9.31	0.00	7.05	8.71	0.10	7.20	8.48	0.19	6.92	9.26	0.00
99 ^{ème} percentile (*)	1.56	2.37	0.09	1.67	2.38	0.09	1.85	2.09	0.50	1.65	2.14	0.23	1.76	1.89	0.74
anomalies > 2 (*)	0.00	0.03	0.36	0.00	0.07	0.22	0.00	0.06	0.27	0.00	0.04	0.50	0.00	0.05	0.34
anomalies <-2 (*)	0.03	0.00	0.28	0.00	0.00	-	0.12	0.00	0.12	0.08	0.00	0.15	0.06	0.00	0.31

Welch : test d'égalité de moyennes qui tient compte des différences de variances.

sa : saison agronomique ; sh : saison hydrologique ; ISIP : intensité journalière des précipitations ; IFM : Indice d'agressivité de Fournier ; (*) : nombre d'épisodes correspondant au critère recensés sur la période et le site, rapporté au nombre total d'observations.

En contrepartie de ces évolutions favorables pour les cultures et l'élevage, la fréquence des épisodes secs pendant la saison agronomique tend à augmenter partout. La hausse est particulièrement importante à Tatki (mais significative à 10% seulement). Fait marquant sur la deuxième période, l'indice d'agressivité des pluies augmente dans tous les sites⁹. Surtout, les années de forte agressivité des pluies sont en augmentation significative à Mbame, Thiel et Boulal. Les épisodes pluviométriques extrêmes, dans le 95^{ème} percentile de la distribution, sont significativement plus fréquents dans la deuxième période. Ainsi, l'augmentation de la pluviométrie sur la période depuis la fin des années 90 s'accompagne d'une augmentation de la fréquence des pluies extrêmes des pluies classées comme fortement agressives.

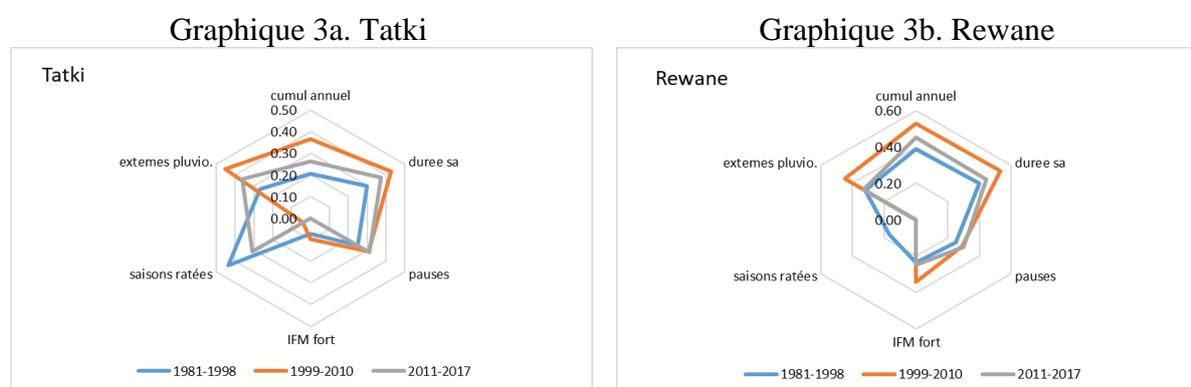
Les graphiques 3a à 3e offrent une autre perspective sur l'évolution de la pluviométrie dans les cinq sites. Construits à partir des indicateurs normalisés, ils permettent de comparer les sites entre eux du point de vue la qualité des pluies et de mettre en évidence les distorsions subies sur trois sous périodes communes : 1981-1998 ; 1999-2010 ; 2011-2017.

Il apparaît ainsi que le site de Tatki, le plus défavorisé du point de vue des hauteurs d'eau, avec des précipitations annuelles moyennes structurellement inférieures à 300 mm (limite septentrionale de la zone des cultures), a subi de fortes distorsions dans tous les indicateurs représentés. Néanmoins, en fin de période (2011-17) les conditions pluviométriques à Tatki apparaissent relativement équilibrées par rapport aux autres sites et plus favorables qu'en début de période avec une diminution de la fréquence des pluies agressives et des saisons ratées.

A l'opposé, les sites de Mbame et de Thiel qui sont les plus arrosés de l'échantillon, se caractérisent par une très forte augmentation de l'agressivité des pluies qui reste élevée en fin de période. Le site de Boulal, subit également une forte augmentation de l'agressivité des pluies, dont le niveau (0.50) reste assez largement inférieur à celui de Mbame (0.63) et de Thiel (0.73) sur la période 2011-2017.

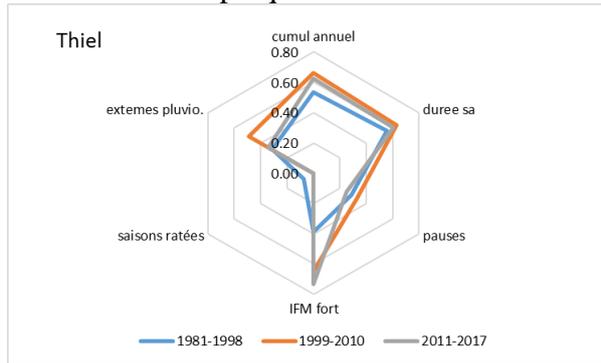
Par rapport aux autres sites, celui de Rewane apparaît comme celui qui a le plus profité du retour des pluies dans la mesure où le nombre de saisons ratées a nettement diminué tandis que l'agressivité des pluies reste à son niveau du début de période (0.25).

Graphique 3. Indicateurs de la qualité des pluies. Moyennes sur trois sous-périodes

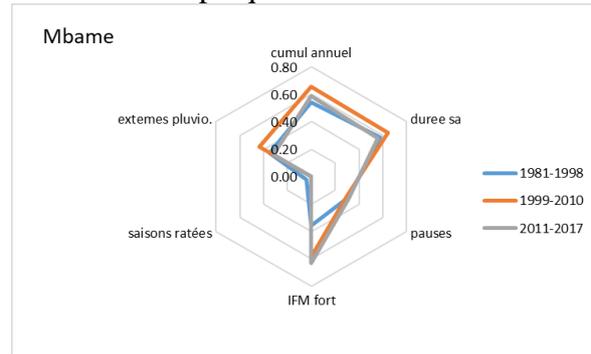


⁹ Hausse qui n'est pas significative pour Thiel.

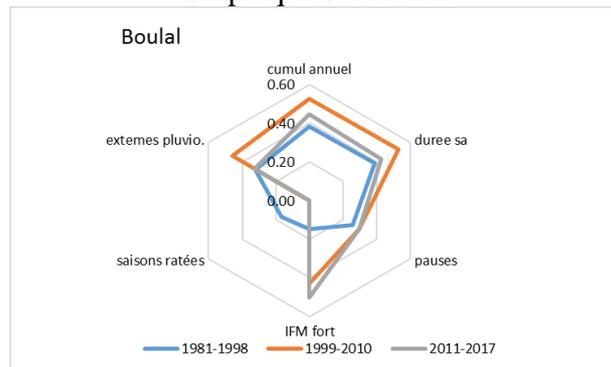
Graphique 3c. Thiel



Graphique 3d. Mbame



Graphique 3e. Boulal



Cumul annuel : cumul annuel des précipitations ; durée sa : durée de la saison agronomique ; nb pause : nombre d'épisodes secs au cours de la saison agronomique ; IFM : Indice de Fournier Modifié, indicateur d'agressivité des pluies ; saison ratée : début de la saison agronomique non détecté ; extrêmes pluviométriques : nombre de jours dans le 95ème percentile dans l'année (voir annexe 1 définition des indicateurs).

Sur l'ensemble de l'espace Sénégal - Gambie et de la période étudiée, l'analyse en données de panel¹⁰, confirme la tendance à la hausse des précipitations pendant la saison agronomique, particulièrement forte dans le sud du pays. Ce retour des pluies s'accompagne d'un allongement significatif de la mousson agronomique dans le nord du Sénégal. En revanche, l'agressivité des pluies augmente à travers tout le pays. La partie sud du Sénégal qui connaît une hausse significative des pluies classées comme très fortement agressives, est la plus affectée. Ces résultats confortent les observations de Descroix *et al.* (2015) sur la période 1950 – 2013 et des données de stations.

4. Efficacité des précipitations

La quantité et la qualité des ressources fourragères disponibles pour les éleveurs dépendent du cumul pluviométrique sur la saison, de la distribution infra-saisonnière des pluies, mais aussi de la nature et de l'anthropisation des sols. A défaut de disposer d'une mesure des ressources fourragères on utilise comme variable proxy l'indice de végétation normalisé (NDVI¹¹). Le NDVI est un indicateur de l'activité photosynthétique des plantes. Il est considéré comme un indicateur fiable de l'état de la végétation (voir Hountondji *et al.* 2005).

Pour évaluer l'efficacité des pluies en termes de ressources fourragères pour le bétail, on calcule le coefficient d'efficacité des pluies, généralement exprimé comme le ratio de l'indice

¹⁰ Voir tableau A1 en annexe 2.

¹¹ Normalized Difference Vegetation Index

de végétation normalisé au cumul pluviométrique.¹² On utilise ici une approche différente, utilisée par Hein et de Ridder (2006), qui consiste à estimer ce coefficient à partir d'un modèle de régression dynamique non linéaire dans la variable de précipitation.

L'équation estimée sur des données mensuelles est donnée par :

$$NDVI_t = \lambda NDVI_{t-1} + \alpha_1 \cdot CP_t + \alpha_2 \cdot CP_t^2 + \gamma Trend_t + \sum_{i=1}^{12} \beta_i D_{it} + \varepsilon_t \quad (3)$$

CP_t est le cumul pluviométrique calculé sur le mois courant (t) et le mois précédent ($t-1$), de façon à prendre en compte le temps de réponse de la végétation aux précipitations. Le cumul pluviométrique au carré permet d'estimer l'impact des fortes pluies sur la croissance de la végétation. D_{it} sont les variables muettes mensuelles. L'introduction de la variable endogène retardée à droite de l'équation permet de saisir un effet d'inertie dans la croissance de la végétation.

L'indice d'efficacité des pluies (IEP) est donné par l'effet marginal de la pluviométrie sur l'activité photosynthétique estimé à la moyenne des précipitations, soit :

$$IEP = \alpha_1 + 2\alpha_2 E(CP_t) \quad (4)$$

L'équation (3) et l'IEP sont estimés pour chaque cellule géographique et sur la période 2000 - 2017.¹³ Les résultats sont présentés sous forme de carte (carte 2) et, pour partie, dans le tableau 3A en annexe 2.

On retrouve un phénomène mis en évidence dans la littérature, à savoir, une forte sensibilité de la végétation aux précipitations dans la bande des 250 à 600 mm de hauteur d'eau (Carte 4). Au-delà de 1000 mm de cumul annuel de précipitations, l'indice de végétation ne répond pas, ou faiblement, aux variations des précipitations.

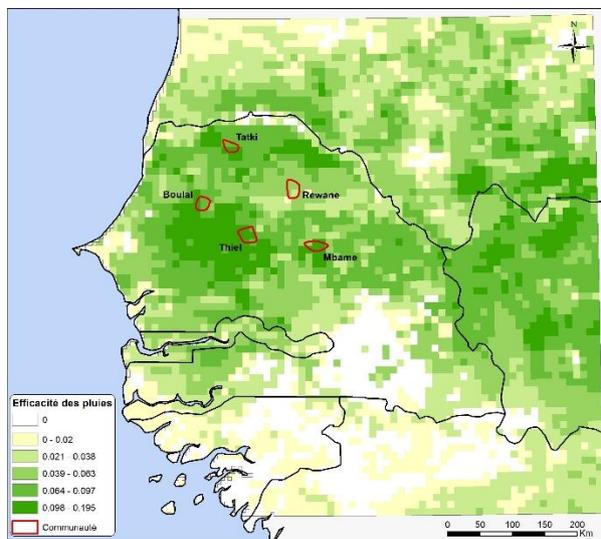
A l'intérieur de la bande des 250 – 600 mm on observe une grande hétérogénéité dans l'efficacité des pluies. Les pluies sont inefficaces, ou peu efficaces, dans les zones fluviales, sur pratiquement toute la longueur du fleuve Sénégal, mais aussi dans les zones de mangrove. L'IEP dépend aussi du type de végétation et de l'anthropisation des sols. Il est nul ou proche de zéro dans les zones urbanisées.

Les estimations montrent aussi que la relation pluie-NDVI est linéaire et positive dans la partie nord du Ferlo où les cumuls annuels de pluies sont en moyenne inférieurs à 400 mm. Ces résultats rejoignent ceux de Martiny et al. (2005) et de Malo et Nicholson (1990) pour l'Afrique du Sud, qui montrent que la relation pluie-NDVI est linéaire dans les régions semi-arides où les cumuls annuels de pluies sont compris entre 200 et 500 mm.

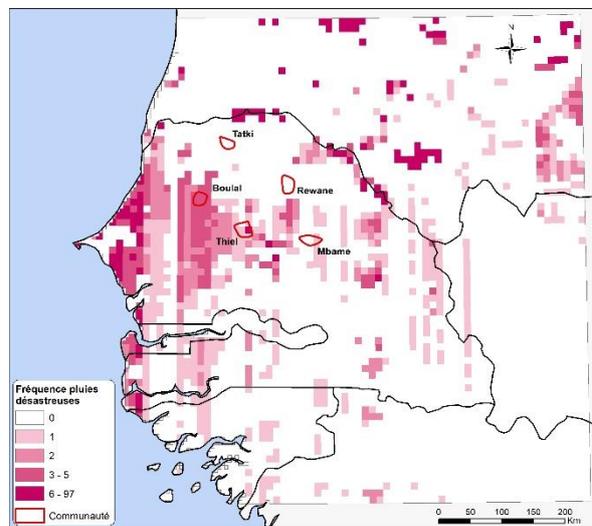
¹² De nombreuses études se sont attachées à mettre en évidence la relation entre les précipitations et le NDVI au Sahel, voir par exemple : Malo et Nicholson (1990).

¹³ Les données de NDVI proviennent de Didan, K. (2015). *MOD13A3 MODIS/Terra vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. doi: [10.5067/MODIS/MOD13A3.006](https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.006) Les données sont disponibles sur la période 2000-2017. Les séries sont extraites sur des pixels de 10 km x 10 km.

Carte 2. Indicateur d'efficacité des pluies



Carte 3. Fréquence des pluies désastreuses sur la période 2000-2017

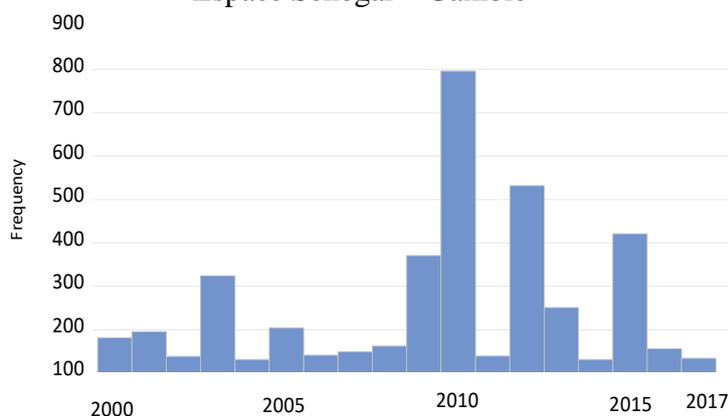


Toutefois, dans la majorité des cas, les estimations ne permettent pas de rejeter l'hypothèse d'une relation non linéaire, prenant la forme d'une courbe en cloche, entre l'activité photosynthétique et la pluviométrie. Sur la période d'étude, le seuil de retournement de la courbe est très souvent franchi notamment dans les aires géographiques situées sur la façade ouest du Sénégal. Dans ces zones, l'effet marginal des précipitations devient négatif au-delà du seuil. Ces pluies à fort cumul bimensuel, dépassant le seuil de retournement de la relation pluie-NDVI, sont qualifiées de « désastreuses ». La carte 3 donne pour chaque cellule géographique le nombre d'épisodes de pluies « désastreuses » enregistrées sur la période.

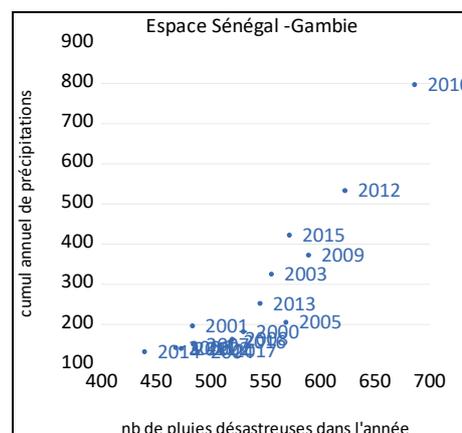
Au total, les zones où les précipitations sont les plus efficaces en termes d'impact sur la croissance de la végétation se situent dans la partie sud-ouest du Ferlo (vert foncé Carte 2). Ce sont aussi des zones vulnérables aux fortes pluies qui ont eu un effet négatif sur l'indice végétal à plusieurs reprises sur la période récente (carte 3). Pour les régions qui nous intéressent, on constate que l'efficacité moyenne des pluies est plus forte à Thiel et Mbame (IEP = 0.11) et plus faible à Rewane (0.06). Surtout, les sites de Thiel et Boulal apparaissent avoir été particulièrement exposés aux pluies « désastreuses » alors que les autres sites en ont été préservés sur la période 2000-2017. Le site de Tatki, avec un indice moyen d'efficacité des pluies de 0.09 et une absence de pluies désastreuses est celui où la végétation a le plus profité des changements dans le régime pluviométrique.

Le graphique 4 donne la distribution sur la période 2000-2017 des pluies dites désastreuses sur l'espace Sénégal-Gambie. Le maximum de pluies désastreuses est enregistré en 2010. Le deuxième pic se situe en 2012 et le troisième en 2015. Ces années sont également des années de fort cumul annuel (Graphique 5). Autrement dit, les années de précipitations élevées enregistrées dans les années 2000 correspondent à des pluies fortement concentrées sur des période courtes (deux mois ou moins) qui ne profitent pas à la croissance de la végétation.

Graphique 4. Distribution des pluies désastreuses sur la période 2000.01 – 2017.12
Espace Sénégal – Gambie



Graphique 5. Pluies désastreuses et cumuls pluviométriques



Pluies désastreuses : cumul bimensuels supérieures au seuil de retournement de la courbe de NDVI

5. Impact des précipitations sur les produits de l'élevage

L'enquête conduite fin 2014-début 2015, donne de l'information sur la production de lait et des produits dérivés ainsi que sur les ventes d'animaux durant la période sèche (novembre 2013 – juin 2014) et la saison des pluies (juillet 2014 – octobre 2014). Ces données sont utilisées pour estimer l'effet des conditions climatiques sur la production de lait et les ventes de bétail.

5.1. Les conditions pluviométriques au moment de l'enquête

2014 est une année de sécheresse au Sénégal, avec des pluies inférieures à la moyenne¹⁴ sur la quasi-totalité du territoire (carte 4b). Le déficit pluviométrique est plus marqué dans une large bande qui traverse le pays du sud-est au nord-ouest, l'épicentre de la sécheresse se situant dans le sud, entre la Gambie et la frontière sud du pays. Ce n'est toutefois pas une année de grande sécheresse dans le Ferlo dans la mesure où l'indice standardisé de précipitation reste dans la norme.¹⁵ Les sites d'élevage sont inégalement touchés par la baisse du niveau des pluies. Le déficit pluviométrique est le plus élevé à Thiel, avec un indice de précipitation standardisé moyen égal à -1.27. Cet indice est égal -1.02 à Tatki, -0.93 à Boulal, -0.65 à Mbame et -0.43 à Rewane.

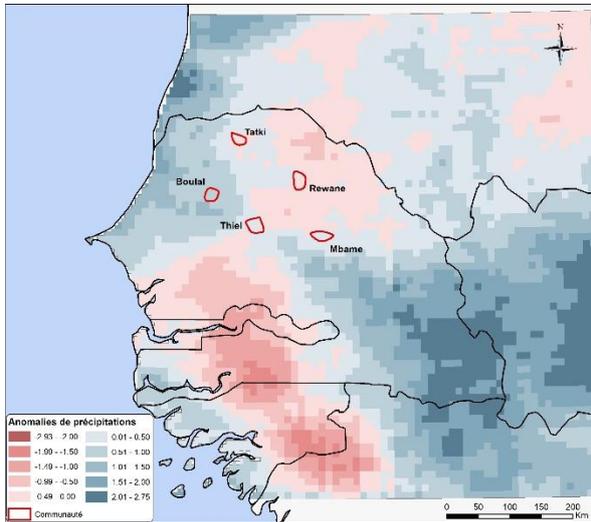
La statistique G_i^* de Getis et Ord (1992) permet d'identifier les zones d'agrégation spatiale de valeurs élevées (points chauds) ou faibles (points froids) des anomalies de précipitations. La carte 4d montre en rouge les zones d'agrégation des anomalies négatives (précipitations inférieures à la moyenne), et en bleu les zones d'agrégation des anomalies positives (précipitations supérieures à la moyenne) en 2014. Il ressort que pour les éleveurs, les possibilités de diversification du risque pluviométrique en dehors de la zone agro-pastorale sont limitées. La transhumance vers le sud n'est pas une solution dans la mesure où cette partie du pays souffre des mêmes conditions défavorables. La transhumance vers l'est offre

¹⁴ Calculée sur la période 1981-2010.

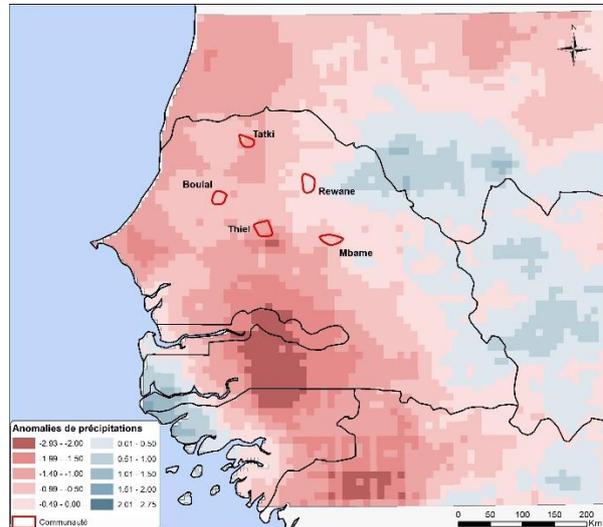
¹⁵ Il est supérieur à -2.

davantage de possibilités d'échapper à une pluviométrie défavorable. De ce point de vue, les éleveurs de Rewane et Mbame (les sites les plus à l'est de la zone d'étude) sont dans une situation plus favorable que ceux des autres sites. On note qu'en 2013 la situation était inverse (cartes 4a et 4c).

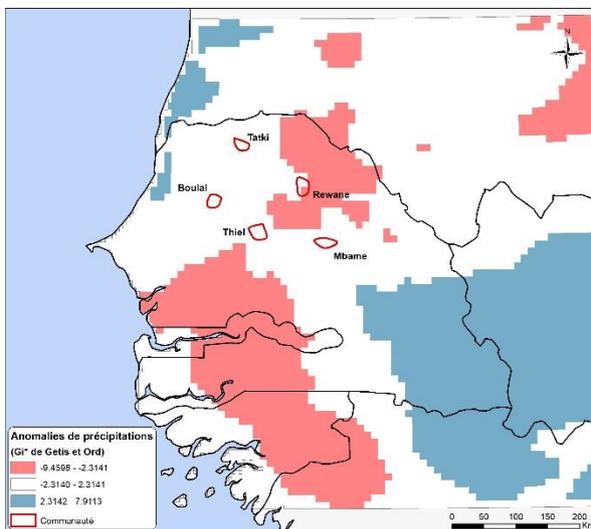
Carte 4a. Anomalies de précipitations en 2013



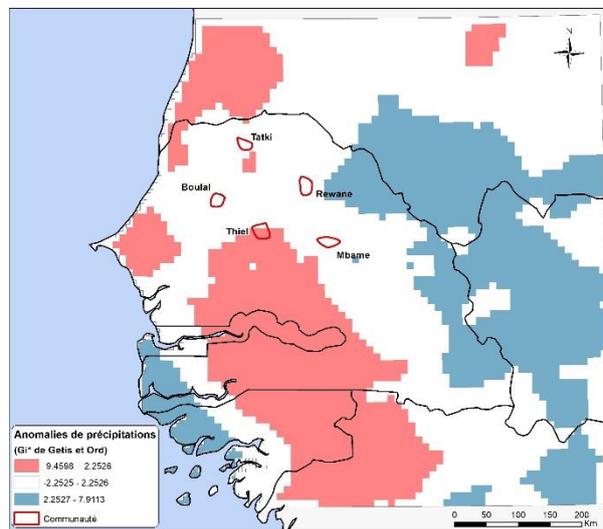
Carte 4b. Anomalies de précipitations en 2014



Carte 4c. Zones d'agrégation des anomalies de précipitations en 2013



Carte 4d. Zones d'agrégation des anomalies de précipitations en 2014



Statistique G_i^* de Getis et Ord (1992).

En bleu : point chaud (valeurs élevées) ; En rouge : point froids (valeurs faibles)

5.2. Production laitière

La production de lait est calculée comme la somme pondérée des quantités autoconsommées et des quantités vendues de lait et de produits laitiers (beurre et lait caillé). Les données permettent d'estimer une équation de saison sèche et une équation de saison humide.

L'équation estimée pour la saison sèche donne la production de lait du campement i (Y_i^0) en fonction de la taille du troupeau (T_i^0), d'indicateurs des ressources en eau et en fourrage (X_{ji}^0) et de variables exogènes (Z_{ki}^0) :

$$Y_i^0 = \alpha_0 + \beta_0 T_i^0 + \sum \gamma_{0j} X_{ji}^0 + \sum \lambda_{0k} Z_{ki}^0 + \varepsilon_i^0 \quad (3)$$

La structure des données permet d'estimer un modèle dynamique de la production laitière pour la saison des pluies (Y_i^1). Cette spécification présente l'avantage de prendre en compte, à travers la variable endogène retardée (Y_i^0), des caractéristiques inobservées des ménages qui influencent la production laitière. L'équation estimée pour la saison pluvieuse est :

$$Y_i^1 = \alpha_1 + \phi_1 Y_i^0 + \beta_1 T_i^1 + \sum \gamma_{1j} X_{ji}^1 + \sum \lambda_{1k} Z_{ki}^1 + \varepsilon_i^1 \quad (4)$$

L'enquête ne donnant pas la taille du troupeau en saison humide (T^1), l'hypothèse est faite que la taille du troupeau en seconde période varie en proportion constante de sa taille initiale (T^0). La taille du troupeau est mesurée ici en UBT de façon à donner une pondération plus faible aux petits ruminants (0.12 contre 0.73 pour les bovins) dont la production de lait est plus faible.

Tableau 7. Variable dépendante : logarithme de la production laitière

Dep. Var:	Saison sèche			Saison pluvieuse			
	Log(Qlait ⁰)	Log(Qlait ⁰)	Log(Qlait ⁰)	Log(Qlait ¹)	Log(Qlait ¹)	Log(Qlait ¹)	Log(Qlait ¹)
	MCO	Tobit	Tobit	MCO	Tobit	Tobit	Tobit
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Log(Qlait ⁰)				0.264 [6.431]**	0.273 [6.289]**	0.273 [6.306]**	0.201 [5.217]**
Log(UBT ⁰)	1.014 [1.862]*	1.991 [2.056]**	1.832 [8.715]**	1.772 [4.919]**	1.998 [4.204]**	2.001 [4.230]**	3.374 [3.894]**
Log(UBT ⁰) ²	0.055 [0.840]	-0.033 [-0.287]		-0.133 [-3.246]**	-0.160 [-2.957]**	-0.161 [-3.006]**	-0.311 [-3.149]**
iNDVI ⁰	16.886 [3.983]**	21.592 [3.771]**	21.369 [4.033]**				
Log(nb ménages)	0.225 [0.565]	0.219 [0.445]					
Log(Distance ville)	-0.081 [-0.138]	-0.135 [-0.177]		-0.573 [-2.104]**	-0.596 [2.438]**	-0.592 [-1.964]**	-0.765 [-1.796]*
Log(nb jours de pluie ¹)				1.092 [2.424]**	1.122 [-2.068]**	1.233 [1.797]*	1.257 [2.258]**
iNDVI ¹						-0.068 [-0.175]	
R ² adj	0.281			0.559			

$iNDVI_i^0$: NDVI intégré sur la période décembre 2013 – mai 2014, dans l'unité de surface où se situe le campement i . $iNDVI_i^1$: NDVI intégré sur la période juin 2014 – octobre 2014, dans l'unité de surface où se situe le campement i . Nombre d'observations dans les régressions : 230.

Constante dans toutes les régressions. t -ratio ou z -stat entre crochets. ** P -value $\leq 5\%$; * P -value $\leq 10\%$.

Écarts-types corrigés de la corrélation intra-cluster ; cluster = carré géographique (34 clusters).

(1) à (6) : Pondération utilisée pour le calcul de la production de lait : lait frais (1), lait caillé (2), beurre (22).

(7) : Pondération = prix moyens sur l'échantillon

En saison sèche, 23% des campements ne produisent pas de lait (Tableau 2). Cette proportion tombe à 6% en saison humide. Pour tenir compte de la censure des données de production en zéro, les équations sont estimées à l'aide d'un modèle Tobit. Pour les deux saisons, la spécification log – log est préférée. Les résultats sont donnés dans le tableau 7.

L'équation préférée pour la saison sèche donne la production de lait en fonction de la taille du troupeau et de l'indicateur d'activité de photosynthèse de la végétation ($iNDVI_i^0$) considéré comme une variable proxy de la ressource fourragère pendant la saison sèche (col. 1, 2 et 3 tableau 7). On note qu'en saison sèche une partie du cheptel est en transhumance. La production de lait, relativement faible, est principalement destinée à l'autoconsommation. La distance à la ville, marché de consommation, n'est pas significative ; la production de lait est principalement liée à l'état de la végétation peu abondante à cette saison.

En saison des pluies, principale période de production de lait, les troupeaux sont dans leur zone d'attache. La ressource fourragère, mesurée par le $iNDVI$ n'apparaît plus comme une variable significative de la production laitière. En revanche, la ressource en eau, mesurée par le nombre de jours de pluie, joue un rôle positif et significatif sur la production de lait. La distance à la ville, qui saisit le coût d'accès au marché, joue négativement sur la production de lait : l'éloignement du marché freine la production destinée à la commercialisation. On observe également un effet non linéaire de la taille du cheptel sur la production de lait qui traduit le fait que les grands troupeaux sont davantage tournés vers la production de viande que la production de lait.

5.3. Ventes d'animaux

A l'inverse de la production laitière, les ventes d'animaux sont plus importantes en saison sèche qu'en saison humide (Tableau 2). En saison sèche, les ventes de bétail sont la principale source de revenu des éleveurs. Ces ventes permettent de couvrir les dépenses de consommation courante de la famille mais aussi du troupeau : aliments pour le bétail, frais vétérinaires etc. (Thébaud, 2017). Un motif supplémentaire de vente en saison sèche est la difficulté à entretenir le troupeau lorsque la mousson a été mauvaise et la ressource herbagère est insuffisante.

L'équation de vente de bétail en saison sèche est similaire à l'équation (2). La variable dépendante (Y_i^0) est le nombre de têtes de bétail vendues par le campement i pendant la saison sèche. Les variables explicatives retenues sont : la taille du troupeau T_i^0 , mesurée par le nombre de têtes de bétail du campement i pendant la saison sèche ; le NDVI intégré sur la période décembre 2013 – mai 2014, dans l'unité de surface où se situe le campement i ($iNDVI_i^0$) ; l'indice d'agressivité des pluies (IFM) de 2013 ; la variable de précipitations standardisée ($Anomalies$) pour l'année 2013 ; le nombre de ménages dans le campement.

L'équation de saison humide inclut les mêmes variables, calculées sur la période correspondante, et la variable endogène retardée. La variable dépendante étant une variable discrète, on privilégie un modèle de Poisson pour estimer les équations de saison sèche et humide. Les résultats sont présentés dans les tableaux 8 et 9.

Tableau 8. Variable dépendante : Nombre de bêtes vendues en saison sèche

	MCO (1)	Poisson (2)	Poisson (3)	Poisson (5)	Poisson (6)
Têtes de bétail ⁰	0.152 [7.760]**	0.001 [5.015]**	0.001 [5.002]**	0.001 [4.908]**	0.001 [4.881]**
Têtes de bétail ^{0^2}	-1.37E-05 [-5.029]**	-1.09E-07 [-3.674]**	-1.09E-07 [-3.680]**	-1.12E-07 [-3.588]**	-1.11E-07 [-3.520]**
Nb de ménages	4.3 [2.355]**	0.064 [4.019]**	0.063 [4.039]**	0.055 [4.583]**	0.057 [4.876]**
Anomalies ⁰	-39.546 [-3.866]**	-0.803 [-4.850]**	-0.832 [-3.333]**	-0.631 [-5.102]**	-0.480 [-3.015]**
IFM ⁰	0.638 [1.725]*	0.008 [1.608]	0.009 [1.258]		
iNDVI ⁰	-384.555 [-5.002]**	-4.68 [-3.767]**	-4.950 [-2.634]**	-1.994 [-1.301]	
Max NDVI ⁰					-1.167 [-1.956]**
Distance à la ville			-0.001 [-0.167]		
Observations:	230	230	230	230	230
R ² adj	0.538	0.316	0.312	0.302	0.301

***P*-value ≤ 5% ; **P*-value ≤ 10%.

Ecarts-types corrigés de la corrélation intra-cluster ; cluster = carré géographique ; 34 clusters.

*iNDVI*⁰: NDVI intégré sur la période décembre 2013 – mai 2014 ; IFM⁰ : indice d'agressivité des pluies de la mousson 2013 ; Anomalies⁰ : anomalies de précipitations de la mousson 2013

Pour la saison sèche (Tableau 8), les résultats montrent un effet négatif et significatif de la variable saisissant les chocs de précipitations (*Anomalies*) sur les ventes de bétail qui peut traduire un effet revenu : une saison des pluies déficitaire entraîne une augmentation des ventes de bétail dans la période qui suit pour compenser la baisse du revenu que les éleveurs tirent des produits de l'élevage et/ou de l'agriculture. Le coefficient significatif et négatif de la variable *iNDVI* (ou alternativement *Max NDVI*¹⁶) tend à confirmer l'hypothèse d'une augmentation des ventes lorsque la ressource fourragère est insuffisante. Enfin, les estimations mettent en évidence une relation non linéaire entre les ventes de bétail et la taille du troupeau : le nombre de bêtes vendues augmente avec la taille du troupeau jusqu'à un certain seuil au-delà duquel les ventes diminuent. Cette différence de comportement des grands éleveurs par rapport aux éleveurs plus modestes, dans la gestion de leur troupeau tend à confirmer les observations de terrain. La fonction et la gestion du cheptel diffèrent selon la catégorie de l'éleveur. Pour les éleveurs de petite ou moyenne taille, les animaux sont une forme d'épargne liquide qui sert à compenser les chocs de revenu. Les grands troupeaux sont en revanche, une forme d'investissement en capital fixe productif.

On retrouve dans les facteurs explicatifs des ventes de bétail en saison des pluies (Tableau 9), un effet négatif de la variable proxy pour la qualité des pâturages (*iNDVI*). L'indice

¹⁶ Max NDVI 2013 : niveau maximum atteint par le NDVI en 2013.

d'agressivité des pluies (*IFM*) devient significativement positif dans le modèle dynamique. En revanche, l'effet des anomalies de précipitations devient non significatif. Ces résultats montrent à nouveau que les éleveurs déstockent lorsque les conditions climatiques sont difficiles (forte agressivité des pluies et dégradation du couvert végétal). Cet effet perdure lorsqu'on introduit le taux de variation de la valeur de la production laitière (*Y* lait) entre les deux saisons dans l'équation (col. 5 et 6). Ces résultats tendent à montrer que les conditions climatiques exercent un effet direct sur les ventes de bétail et un effet indirect qui passe à travers les fluctuations du revenu laitier. On note que la variable captant la distance du campement à la ville la plus proche, tend à entrer positivement dans les équations de vente de bétail (5) ce qui peut traduire le fait que les élevages extensifs, tournés vers la production de viande, sont généralement loin des zones d'habitation.

Tableau 9. Variable dépendante : ventes de bétail en saison des pluies

Estimateur	MCO (1)	Poisson (2)	Poisson (3)	Poisson (4)	MCO (5)	DMC (6)	MCO (7)
Vente bétail ⁰	0.462 [7.296]**	0.006 [8.586]**	0.006 [8.331]**	0.006 [8.228]**	0.440 [7.357]**	0.436 [6.256]**	
Têtes de bétail ⁰	0.025 [1.152]	0.001 [2.424]**	0.001 [2.508]**	0.001 [2.460]**	0.020 [0.979]	0.018 [0.606]	-0.001 [-4.155]**
Têtes de bétail ^{0^2}	-6.81E-06 [-2.747]**	-1.35E-07 [-2.925]**	-1.36E-07 [-3.077]**	-1.34E-07 [-2.737]**	-6.01E-06 [-2.448]**	-5.69E-06 [-1.447]	1.09E-07 [3.675]**
Anomalies ¹	6.924 [0.880]	-0.12 [-0.479]					
IFM ¹	0.515 [2.498]**	0.017 [2.467]**	0.015 [3.588]**	0.011 [2.144]**	0.569 [3.528]**	0.569 [3.463]**	-0.004 [-0.602]
iNDVI ¹	-19.437 [-3.035]**	-0.808 [-2.948]**	-0.703 [-4.441]**	-0.655 [-3.921]**	-27.857 [-4.994]**	-27.978 [-4.592]**	-0.042 [-0.218]
Distance à la ville				0.004 [1.389]	0.162 [1.832]**	0.158 [1.677]	0.003 [0.738]
$\Delta(Y \text{ lait})/Y \text{ lait}$					-5.722 [-2.057]**	-9.531 [-0.364]	
$\Delta (\text{Prix lait})/\text{Prix lait}$							0.814 [2.899]**
Observations:	230	230	230	230	215	215	215
R ² adj	0.665	0.514	0.511	0.512	0.669	0.666	0.083

***P*-value $\leq 5\%$. Ecarts-types corrigés de la corrélation intra-cluster ; cluster = carré géographique ; 34 clusters.

*IFM*¹ : indice d'agressivité des pluies de la mousson 2014 ; *Anomalies*¹ : anomalies de précipitations de la mousson 2014 ; *Y*lait : valeur de la production de lait

(6) : instrument : $\Delta (\text{Px lait})/\text{Px lait}$

(7) : équation de 1^{ère} étape. variable dépendante = $\Delta(Y \text{ lait})/Y \text{ lait}$

Q = production ; Y = valeur de la production

Pour corriger un possible biais d'endogénéité, le taux de croissance du revenu laitier est instrumenté par le taux de variation du prix du lait entre les deux périodes qui est supposé exogène. Cependant, après instrumentation, les résultats ne soutiennent plus l'hypothèse selon laquelle les éleveurs recourraient aux ventes d'animaux pour lisser leur consommation (tableau 9 col 7). Autrement dit, nos résultats vont dans le sens de ceux obtenus par Fafchamps *et al.* (1998) au Burkina Faso sur la période 1981-85 et ne permettent pas de conclure que le bétail joue un rôle d'assurance contre les fluctuations de revenu.

Les résultats tirés des estimations des équations de production de lait et ventes d'animaux doivent être interprétés avec prudence du fait de la taille limitée de l'échantillon, du manque d'informations sur les caractéristiques des ménages, du manque de profondeur temporelle des données et de leur faible hétérogénéité spatiale qui limitent les possibilités d'analyse plus fine des différents canaux par lesquels la pluviométrie impacte les éleveurs. Il n'a pas été possible, par exemple, de rechercher des impacts différenciés des variables climatiques selon le type d'éleveur et de bétail. Nous manquons également d'information sur les stratégies mises en œuvre par les éleveurs pour faire face aux aléas climatiques, et notamment sur les déplacements saisonniers des troupeaux.

Malgré cela, les résultats des équations dynamiques de saison humide nous semblent robustes. D'une part, la variable endogène retardée permet de contrôler pour les variables inobservées invariantes dans le temps. D'autre part, les variables d'environnement sont mieux mesurées en saison des pluies. En effet, faute d'informations sur les zones de transhumance des éleveurs, les conditions climatiques et de végétation ont été mesurées au niveau des zones d'attache des troupeaux. En saison des pluies, les troupeaux sont dans leur zone d'attache de sorte que la production de lait et les ventes d'animaux dépendent des ressources en eau et en fourrage dans ces zones.

En saison sèche, le déplacement des troupeaux peut permettre aux éleveurs de trouver des conditions naturelles plus favorables permettant de limiter les pertes de production et les ventes de bétail. Dans ce cas, les variables climatiques utilisées pour les estimations apparaissent mal mesurées. Toutefois, la significativité des variables saisissant les ressources en eau et en fourrage dans les zones d'attache dans les équations de saison sèche, tend à montrer que la transhumance, si elle est pratiquée, ne permet pas aux éleveurs de s'affranchir complètement des mauvaises conditions climatiques dans les zones d'attache. Deux explications peuvent être avancées. D'une part, une partie seulement du bétail est déplacée pendant la saison sèche de sorte que la productivité du cheptel reste dépendante des conditions climatiques de la zone d'attache. D'autre part, le coût de la transhumance (nombre de bêtes déplacées, distances parcourues) qui augmente avec l'intensité du déficit en eau et en ressources fourragères dans les zones de départ est susceptible d'entraîner un déstockage plus important lors des déplacements.

6. Conclusion

Notre étude, centrée sur un échantillon représentatif d'éleveurs du Ferlo, montre que l'élevage pastoral sénégalais reste fortement tributaire des ressources naturelles en eau et en pâturages. Cette dépendance apparaît dans les estimations économétriques qui montrent, d'une part, que la production de lait dépend de la qualité et de l'abondance des ressources fourragères elles-mêmes dépendantes de la pluviométrie et, d'autre part, qu'une dégradation des ressources pastorales entraîne une augmentation des ventes de bétail. Nos résultats ne confirment pas l'hypothèse de ventes de bétail contra-cycliques pour compenser les baisses de revenu liées à

des chocs climatiques. L'augmentation des ventes de bétail apparaît plutôt la conséquence des difficultés des éleveurs à entretenir leur cheptel en cas de réduction des ressources pastorales et de diminution du revenu de la production laitière.

Le secteur de l'élevage sénégalais apparaît donc très vulnérable à toute perturbation du climat entraînant une raréfaction des ressources naturelles. Sur ce plan, l'analyse des modifications récentes de la mousson montre que les éleveurs n'ont pas véritablement profité du retour à des niveaux de précipitations plus élevés à la fin des années 90 dans la mesure où il s'est accompagné d'une variabilité accrue des pluies à l'intérieur de l'année. Les pluies sont plus agressives, les épisodes secs pendant la saison des pluies sont plus nombreux ainsi que les épisodes pluvieux extrêmes. On observe également depuis les années 2000, un grand nombre d'épisodes de pluies « excessives », dont l'effet marginal sur la croissance de la végétation est négatif. Géographiquement, des inégalités spatiales apparaissent, la façade ouest du Sénégal et du Ferlo étant les plus impactées par ces pluies qualifiées de désastreuses. Économétriquement, l'augmentation de l'agressivité des pluies apparaît comme un facteur de dégradation des ressources pastorales et des revenus des éleveurs qui accroît la décapitalisation des élevages.

Nos résultats montrent donc l'intérêt d'utiliser des mesures plus fines des conditions climatiques que celles habituellement utilisées pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'élevage. Le changement climatique ne se manifeste pas seulement par des variations dans les cumuls de précipitations et une élévation des températures. Il s'accompagne aussi d'une plus grande variabilité intra-annuelle des précipitations qui, comme le montre nos résultats, impacte les élevages. De fait, nos estimations mettent en évidence la diversité des paramètres à prendre en compte. La production de lait et les ventes bétail sont sensibles à l'état de la végétation, au nombre de jours de pluie, à l'agressivité des pluies et/ou aux anomalies de précipitations. Nos estimations montrent aussi que les variables à prendre en compte et leur impact diffèrent selon la période de l'année : saison des pluies ou saison sèche. Autrement dit, nos estimations plaident en faveur d'une approche désagrégée du comportement des éleveurs.

Par ailleurs, ces résultats qui montrent la difficulté des éleveurs à s'affranchir des aléas climatiques devraient inciter les pouvoirs publics à investir davantage dans le secteur de l'élevage. Si comme nos résultats le suggèrent, le principal motif de vente des éleveurs en cas de choc climatique est l'insuffisance des ressources pastorales plutôt que la compensation des chutes de revenus, alors l'investissement public dans l'adduction d'eau et les filières d'alimentation animale sont essentiels.

Bibliographie

- Arnoldus HMJ, 1980. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In : De Boodt M, Gabriels D, Eds. *Assessment of Erosion*. Chichester (United Kingdom): Wiley.
- Assouma, M. H., P. Hiernaux, P. Lecomte, A. Ickowicz, M. Bernoux, and J. Vayssières, 2019. « Contrasted seasonal balances in a Sahelian pastoral ecosystem result in a neutral annual carbon balance » *Journal of Arid Environments*, 162, 62–73
- Bai J. and P. Perron, 2003. "Critical values for multiple structural change tests », *Econometrics Journal*, vol. 6, 72–78.
- Balme M., S. Galle et T. Lebel. 2005. « Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger », *Sécheresse*, 16(1), 15-22.
- Fafchamps, M., Udry, C., & Czukas, K., 1998. Drought and saving in West Africa: are livestock a buffer stock?. *Journal of Development economics*, 55(2), 273-305.
- Fournier F, 1960. Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Paris : Presses universitaires de France.
- Ghenim AN, Megnounif A, 2013. Analyse des précipitations dans le Nord-Ouest algérien. *Sécheresse* 24, 107-14
- Hountondji Y.-C., J. Nicolas, N. Sokpon et P. Ozer, 2005. « Mise en évidence de la résilience de la végétation sahélienne par télédétection basse résolution au Niger à la suite d'épisodes de sécheresse », *Belgeo* [En ligne], 4 | 2005, mis en ligne le 29 octobre 2013, consulté le 29 avril 2016. URL : <http://belgeo.revues.org/12245>
- Hubert P., Carbonnel J-P. et Chaouche A., 1989. « Segmentation des séries hydrométéorologiques – applications à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest », *Journal of Hydrology*, 110, 349-367.
- Oliver J.E., 1980. "Monthly precipitation distribution: a comparative index". *Professional Geographics*, 32: 300-9.
- Pettitt A.N., 1979. «A non-parametric approach to the change-point problem », *Applied Statistics*, (28), 2: 126-135.
- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., & Woznicki, S. A., 2017. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16: 145-163.
- Sivakumar M.V.K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric For Meteorol*, 42: 295-305.

Thébaud B., 2017. « Résiliences pastorales et agropastorales au Sahel : Portraits de la transhumance 2014-2015 et 2015-2016 (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina Faso, Niger) », Acting for Life - Nordic Consulting Group, version abrégée, juin.

Zhang W., M. Brandt, F. Guichard, Qingjiu Tian, Rasmus Fensholt . 2017. “Using long-term daily satellite based rainfall data (1983–2015) to analyze spatio-temporal changes in the sahelian rainfall regime”, *Journal of Hydrology*, 550, p. 427–440

Wane, A., 2016. Construction d’une méthode de collecte d’informations et d’analyse des revenus monétaires des pasteurs sahéliens (Rapport d’étude). CIRAD - PPZS, Dakar.

Wane, A., Ancey, V., Touré, I., 2010. Pastoralisme et recours aux marchés: Cas du Sahel sénégalais (Ferlo). *Agriculture*, pp. 14–20. <https://doi.org/10.1684/agr.2009.0329>

Annexe 1. Les indicateurs de qualité de la mousson

On se focalise sur une dizaine d'indicateurs permettant de saisir la qualité de la mousson pour l'agriculteur ou l'éleveur. Ce sont des indicateurs du niveau des précipitations et de leur distribution intra et interannuelle habituellement utilisés pour évaluer la qualité des précipitations (e.g. Zhang *et al.* 2017, Balme *et al.* 2005).

Le cumul annuel des pluies

Le cumul annuel des précipitations (en mm) sert à délimiter les zones climatiques et le type de végétation. Il constitue également, avec les températures, le principal marqueur du changement climatique. Les sites étudiés se situent dans le Sahel septentrional où les cumuls annuels sont inférieurs à 300 mm et le Sahel Central où les cumuls annuels sont compris entre 300 et 500 mm.

Les anomalies de précipitations ou Indice de Précipitation Standardisé (IPS)

Introduit par Lamb (1982), l'indice de précipitation standardisé, ou anomalies de précipitations, est un indicateur normalisé. Exprimé sous forme de z-score il permet de comparer des zones non homogènes du point de vue des hauteurs d'eau moyennes et de mesurer l'ampleur des chocs de précipitations.

$IPS = (x_i - E(x_i)) / \text{écart-type}(x_i)$ avec x_i : le cumul pluviométrique de l'année i

Si l'indicateur est compris entre 2 et -2, la pluviométrie est dans la norme avec une probabilité de 95%. Une valeur inférieure (supérieure) à -2 (2) indique une année anormalement sèche (pluvieuse). La période de référence utilisée ici est celle retenue par l'Organisation Météorologique Mondiale : 1981 – 2010.

Calendrier de la mousson

Suivant la littérature (e.g. Balme, Galle et Lebel, 2005) on distingue la mousson hydrologique et la mousson agronomique. On utilise les critères de Sivakumar (1988) pour identifier les dates de début et de fin de la mousson agronomique. Les traces de pluies, correspondant à un cumul journalier inférieur à 0,1 mm, sont considérées comme nulles.

Début de la saison agronomique : à partir du 1^{er} mai, lorsqu'on enregistre au moins 20 mm de pluie sur 3 jours consécutifs, sans épisode sec de plus de 7 jours dans les 30 jours suivant (Balme, Galle et Lebel, 2005).

Fin de la saison agronomique : à partir du 1^{er} septembre, date à partir de laquelle le cumul de précipitations sur 20 jours consécutifs est inférieur à 10 mm.

Saison ratée : si aucune date d'installation correspondant au critère ci-dessus n'a pu être identifiée, la saison agronomique est considérée comme ratée.

Début de la mousson hydrologique : premier jour de pluviométrie supérieure à 5 mm.

Fin de la mousson hydrologique : dernier jour de pluviométrie supérieure à 5 mm

Durée de la mousson : nombre de jours entre la date de début et de fin de la mousson.

Présaison : période courant du début de la mousson hydrologique au début de la mousson agronomique.

Distribution intra-annuelle des précipitations

Indice de concentration des précipitations (CPI) calculé sur l'année ou sur la période de mousson agronomique. Il est mesuré par le rapport entre le cumul des précipitations enregistré pendant la mousson et le cumul annuel (Oliver, 1980)¹⁷.

$$CPI = \frac{\sum_{i=1}^{12} Pm_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} Pm_i)^2}$$

avec : Pm_i : le cumul pluviométrique du mois

Pause de pluie (épisode sec) : épisode de 7 jours consécutifs sans pluie au cours de la période de mousson agronomique.

Pause la plus longue : durée en jours de l'épisode sec le plus long enregistré au cours de la mousson agronomique.

Intensité des pluies : l'indice d'intensité des pluies (ISIP) est donné par le cumul pluviométrique enregistré pendant la saison agronomique rapporté au nombre de jours pluvieux pendant la saison agronomique (Nastos et al. 2010 ; Vincent et al. 2011 in Faye 2018).

Agressivité des pluies : elle est mesurée par l'indice de Fournier modifié (IFM) proposé par Fournier (1960) et modifié par Arnoldus (1980) :

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{Pm_i^2}{Pa}$$

avec : Pm_i : le cumul pluviométrique du mois i et Pa le cumul pluviométrique de l'année considérée. Les valeurs seuils de l'indice correspondant à différents niveau d'agressivité des pluies sont données dans le tableau ci-dessous :

IFM	[0 – 60]	[60 – 90]	[90 - 120]	[120 – 160]	> 160
Agressivité	Très faible	Faible	Modérée	Forte	Très forte

Source : Nekkache et al (2013).

Evénements extrêmes

G5DR (*Greatest 5-day precipitation*) : quantité maximale de précipitations enregistrée sur un intervalle de 5 jours consécutifs (Vincent and Mekis, 2006).

¹⁷ Voir Ghenim AN, Megnounif A, 2013. Analyse des précipitations dans le Nord-Ouest algérien. Sécheresse 24 : 107-14.

Extrêmes pluviométriques : évènements pluvieux de fort cumul sur 24h. Deux indicateurs sont calculés : le nombre de jours avec un cumul pluviométrique supérieur ou égal au 95^{ème} ou au 99^{ème} percentile de la période de référence (1981-2010). Les percentiles sont calculés pour chaque cellule géographique en utilisant une fenêtre glissante de cinq jours centrée sur chaque jour de l'année et pour la période 1981 – 2010 (cf Vincent and Mekis, 2006).

Annexe2

Tableau A1. Données de panel, effets fixes individuels. 1750 individus, 1981-2017
Espace Sénégal Gambie

Var dep	Cumul pluvio annuel	Cumul pluvio SA	Nb jours pluie année	Nb jours pluie SA	Durée SA	Durée SH	Durée présaison	Nb pauses
TREND*NE	3.411 [3.129]**	3.543 [3.007]**	0.283 [2.933]**	0.319 [3.329]**	0.417 [2.322]*	0.171 [1.126]	-0.189 [-1.249]	-0.01 [-0.663]
TREND*NO	3.252 [3.042]**	2.87 [2.688]**	0.305 [2.992]**	0.268 [3.033]**	0.383 [1.989]*	0.196 [1.829]	-0.123 [-0.788]	-0.011 [-0.714]
TREND*SE	4.95 [3.810]**	5.05 [3.894]**	0.27 [2.438]*	0.345 [3.361]**	0.294 [1.951]	0.294 [2.391]*	-0.023 [-0.230]	-0.016 [-1.063]
TREND*SO	4.299 [2.864]**	3.852 [2.367]*	0.291 [2.386]*	0.246 [1.982]*	0.008 [0.048]	0.244 [1.872]	0.252 [1.678]	-0.031 [-2.231]*
Obs:	64750	61393	64750	61392	61393	64750	61393	61392
R-squared:	0.878	0.855	0.83	0.824	0.695	0.713	0.153	0.11

Var dep	Max pause	IFM	IFM fort	IFM très fort	ISIP SA	G5DR	NBJ PERC95	NBJ PERC99
TREND*NE	-0.017 [-0.530]	1.016 [2.503]*	0.01 [2.718]**	0.005 [1.523]	-0.001 [-0.048]	0.247 [1.119]	0.048 [1.351]	-0.003 [-0.237]
TREND*NO	-0.024 [-0.866]	0.867 [2.096]*	0.008 [2.270]*	0.003 [1.185]	-0.003 [-0.124]	0.124 [0.565]	0.062 [1.896]	0.008 [0.603]
TREND*SE	-0.009 [-0.358]	1.454 [3.346]**	0.003 [2.282]*	0.009 [2.987]**	0.015 [0.847]	0.251 [0.914]	0.044 [1.674]	-0.018 [-1.453]
TREND*SO	0.008 [0.373]	1.626 [3.364]**	0.003 [1.651]	0.007 [2.201]*	0.009 [0.351]	0.175 [0.721]	0.024 [0.741]	-0.009 [-0.824]
Obs	61392	64750	64750	64750	61392	64750	64750	64750
R-squared:	0.066	0.753	0.53	0.564	0.437	0.557	0.03	0.016

Effets fixes individuels inclus. White standard errors. *t* de Student entre crochets. ***P*-value < 1% ; **P*-value < 5%.

Tableau A2. Caractéristiques de la mousson en 2013 et 2014 (moyennes par site)

sites	Boulal		Tatki		Rewane		Mbame		Thiel	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
Cumul annuel (mm)	440.68	278.48	242.04	166.87	340.97	317.39	440.62	380.20	437.93	342.34
Cumul saison agro. (mm)	394.34	191.46	188.87		269.85	224.68	335.47	279.42	379.42	297.36
Concentration Sais agro.	0.89	0.65	0.78		0.79	0.71	0.76	0.73	0.87	0.87
IPS	0.84	-0.92	-0.04	-1.04	-0.08	-0.37	0.10	-0.66	0.10	-1.26
Début sais agronomique	18-juil.	14-août	26-juil.		19-juil.	2-août	23-juil.	28-juil.	18-juil.	14-juil.
Fin saison agronomique	20-oct.	6-oct.	25-sept.	22-sept.	6-oct.	24-sept.	11-oct.	11-oct.	11-oct.	11-oct.
Durée saison agro. (jours)	94	53	60.5		78.25	52.75	79.6	74.8	85.63	89.5
Durée saison hydro. (jours)	109	99.83	84	78.67	93.13	87.63	115.80	109.20	118	110
Durée présaison (jours)	22.50	47.00	22.17		20.63	35.88	48.60	42.20	39.00	20.75
Jours de pluie saison agro.	41.00	25.00	22		31.13	20.63	36.00	30.20	39.00	36.88
Jours de pluie saison hydro	57.33	44.00	38.00	34.67	55.38	42.50	63.60	53.40	61.88	52.38
Nb de pauses de pluie	2.67	3.00	4.17		5.50	1.88	3.60	3.20	2.00	3.88
Pause maximale (jours)	14.33	13	14.33		11	11.50	11.40	10.20	7.88	14.13
IFM	128.42	87.76	77.93	58.16	103.13	100.32	120.81	104.82	120.07	97.39
Nb IFM fort (*)	0.83	0.00	0	0	0	0	0.80	00.00	0.50	0.00
Nb IFM très fort (*)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ISIP saison agronomique	9.62	7.66	8.60		8.68	10.89	9.37	9.28	9.74	8.17
Nb de saison agro. ratées	0	0.83	0.00	1.00	0	0	0	0	0	0
G5DR	66.28	44.80	52.20	28.47	57.92	48.80	61.11	61.18	57.73	45.52
95 ^{ème} percentile (*)	8.50	3.33	6.83	4.83	5.00	7.75	6.40	6.20	6.62	3.38
99 ^{ème} percentile (*)	1.17	0	1.33	0.33	1.75	0.50	0	1.00	1.38	0.63
anomalies > 2 (*)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
anomalies <-2 (*)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

sa : saison agronomique ; sh : saison hydrologique ; ISIP : intensité journalière des précipitations ; IFM : Indice d'agressivité de Fournier ; (*) : nombre d'épisodes, correspondant au critère, recensés sur la période et le site, rapporté au nombre total d'observations.

Tableau A3. Efficacité des pluies sur les sites des campements (Equation 4)
Variable dépendante : NDVI, données mensuelles 2000-2017.

	Y(-1)	CP _t	CP _t ²	trend	Seuil (mm)	IEP
Thiel	0.346 **	0.148 **	-1.94E-04 **	0.025 **	380.65	0.1180
	0.402 **	0.143 **	-2.15E-04 **	0.014 **	333.96	0.1111
	0.399 **	0.107 **	-1.43E-04 **	-0.008	376.82	0.0863
	0.375 **	0.155 **	-2.24E-04 **	0.016 **	344.32	0.1188
	0.339 **	0.176 **	-2.72E-04 **	0.015 **	323.04	0.1319
	0.393 **	0.136 **	-2.08E-04 **	0.004	325.86	0.1038
	0.364 **	0.151 **	-1.96E-04 **	0.014 **	386.15	0.1176
	0.407 **	0.113 **	-1.42E-04 **	0.004	397.92	0.0905
Rewane	0.498 **	0.070 **	-5.70E-05	0.004		0.0699
	0.534 **	0.050 **	-2.38E-05	0.011 **		0.0501
	0.559 **	0.060 **	-4.82E-05	0.006		0.0602
	0.532 **	0.061 **	-3.51E-05	0.006		0.0615
	0.546 **	0.070 **	-6.36E-05	0.010 **		0.0701
	0.584 **	0.074 **	-8.58E-05	0.006		0.0741
	0.604 **	0.066 **	-6.15E-05	0.004		0.0662
	0.682 **	0.050 **	-7.01E-05	0.004		0.0502
Boulal	0.364 **	0.133 **	-2.34E-04 **	-0.005	284.97	0.1026
	0.199 **	0.122 **	-2.08E-04 **	-0.005	294.73	0.0943
	0.184 **	0.099 **	-1.67E-04 **	-0.001	296.78	0.0761
	0.299 **	0.159 **	-2.62E-04 **	0.008	304.36	0.1216
	0.197 **	0.121 **	-1.91E-04 **	-0.001	316.85	0.0928
	0.362 **	0.072 **	-1.17E-04 **	-0.001	308.42	0.0552
Tatki	0.396 **	0.103 **	-7.48E-05	-0.002		0.1034
	0.409 **	0.108 **	-1.11E-04	0.000		0.1077
	0.470 **	0.065 **	4.81E-06	-0.001		0.0655
	0.386 **	0.113 **	-2.13E-05	0.001		0.1132
	0.425 **	0.094 **	4.56E-05	-0.001		0.0942
	0.412 **	0.073 **	7.92E-05	0.003		0.0727
Mbame	0.403 **	0.110 **	-1.29E-04	-0.003		0.1103
	0.402 **	0.107 **	-1.27E-04	0.002		0.1072
	0.367 **	0.122 **	-1.64E-04 **	-0.002	372.48	0.0973
	0.352 **	0.132 **	-1.75E-04 **	-0.003	376.74	0.1044
	0.284 **	0.137 **	-1.88E-04 **	0.003	365.03	0.1083

***P*-value < 5%.

Seuil : seuil de retournement de la relation

IEP : indice d'efficacité des pluies = effet marginal des précipitations sur la végétation, estimé à la moyenne.

Paramètres estimés à partir de l'équation 4. Les coefficients alpha, beta et gamma ont été multipliés par 100 pour faciliter la lecture