

Analyse des politiques d'adaptation et modélisation de l'impact des facteurs agro- climatiques et géographiques sur le rendement du haricot dans la Province de l'Est du Rwanda

Présenté par

Crépin Houégnon AZONGNIBO ASSOGBA

pour l'obtention du Master en Développement de l'Université Senghor

Département Environnement

Spécialité Gestion de l'environnement

Directeur de mémoire : Dr Ghafi KONDI AKARA

Le 09 octobre 2025

Devant le jury composé de :

Dr Jérôme T. YAMEOGO Président

Maître de conférences (CAMES), Université Nazi Boni
Burkina Faso,

Prof Etotépé A. SOGBOHOSSOU Examineur

Professeur Titulaire, Université Senghor, Egypte

Dr Ghafi KONDI AKARA Examineur

Chercheure résidente en Sciences du Climat,
AIMS RIC, Rwanda

Université Senghor – Opérateur direct de la Francophonie

1 Place Ahmed Orabi, BP 21111, 415 El Manheya, Alexandrie, Egypte

www.usenghor-francophonie.org

Remerciements

Je remercie l'Université Senghor d'Alexandrie, et en particulier le Département Environnement, pour la qualité de la formation dispensée et pour le cadre académique mis à la disposition des étudiants.

Je tiens à remercier tout particulièrement :

- Prof. Etotépé A. SOGBOHOSSOU, Directrice du Département Environnement, pour son accompagnement, ses conseils et son engagement constant.
- African Institute for Mathematical Sciences Research and Innovation Centre (AIMS RIC) à Kigali au Rwanda, pour m'avoir accueilli durant mon stage et offert un environnement favorable à la recherche.
- Dr Ghafi KONDI AKARA, pour avoir accepté avec générosité et bienveillance d'encadrer ce travail ; ses conseils avisés, sa rigueur et sa disponibilité ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.
- Prof. Cecil Naphtaly Moro Ouma, Responsable Académique et Recherche à AIMS RIC, pour son appui et ses orientations.
- Les chercheurs, en particulier Dr Michel RWEMA de l'AIMS RIC et Dr Abdou Safari KAGABO de l'UR-CST, pour leurs observations et recommandations qui ont permis d'enrichir ce travail.
- M. Thadée TWAGIRIMANA, Directeur Général de l'Environnement et du changement climatique du Rwanda, pour son engagement dès les premières étapes de ce mémoire et pour son appui dans la mobilisation des données.
- M. Peacson ADAMADOU, pour son appui précieux dans la réalisation des analyses, dont la contribution a été déterminante pour ce mémoire.
- Mes camarades de promotion du Master 2 en Gestion de l'environnement de l'Université Senghor, pour les échanges académiques, la solidarité et l'amitié partagée.
- Mes compatriotes béninois, notamment Maïmouna, Erroce et Efrayim, pour leur fraternité, leur soutien et leurs encouragements constants.
- Mes frères et sœurs Prisca, Bérenger, Ingrid, Rostand, Annette, Dolwis et Schiphra pour leur affection, leur appui moral et leurs encouragements indéfectibles tout au long de mon parcours.

Je n'oublie pas toutes les autres personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire, et je leur adresse ici ma reconnaissance la plus sincère.

Dédicace

*À mon père, Cyprien ASSOGBA,
pour sa sagesse, sa force et ses sacrifices constants qui ont tracé le chemin de mon
engagement.*

*À ma mère, Françoise YEDEDJI,
pour son amour inconditionnel, son soutien indéfectible et ses prières qui m'accompagnent
chaque jour.*

*« Apprends à être vrai, à réfléchir, aime la bonne éducation et l'intelligence.
Et quand tu possèdes ces qualités, ne les gaspille pas. »*

Proverbes 23 :23

Résumé

Le secteur du haricot est au cœur de la sécurité alimentaire du Rwanda, en particulier dans la Province de l'Est, mais il demeure fortement exposé à la variabilité climatique, ce qui pèse sur les rendements et les moyens de subsistance ruraux. Cette étude poursuit trois objectifs : (i) évaluer l'apport des politiques d'adaptation à la performance du secteur, (ii) modéliser l'influence conjointe des pratiques agricoles ainsi que des facteurs climatiques et géographiques sur les rendements, et (iii) traduire ces résultats en un plan d'adaptation provincial doté d'un dispositif de suivi-évaluation. Les données de 2014 à 2024 ont été analysées avec trois familles de modèles (régression linéaire multiple, Random Forest et XGBoost) afin de concilier interprétabilité et performance. XGBoost ressort comme le plus performant ($R^2 = 0,795$; RMSE = 192,4 kg/ha ; MAE = 149,9 kg/ha) et fournit des prédictions exploitables pour l'action publique. Les analyses d'explicabilité (valeurs SHAP, courbes de dépendance partielle) révèlent que l'humidité relative et la température de l'air sont déterminantes, suivies par l'usage de pesticides, la température de surface diurne et les précipitations. Ces résultats ont conduit à proposer un plan provincial d'adaptation hiérarchisant les actions par district, renforçant la coordination institutionnelle, la diffusion des semences tolérantes à la sécheresse, la gouvernance participative et le suivi-évaluation fondé sur les données. Ce travail offre ainsi un cadre opérationnel reliant la modélisation scientifique à la décision publique pour accroître durablement la productivité du haricot et la résilience des ménages ruraux face au changement climatique.

Mots-clefs

Modélisation, Politiques publiques, Adaptation au changement climatique, Productivité, Haricot.

Abstract

The bean sector is key to Rwanda's food security, particularly in the Eastern Province, but remains highly exposed to climate variability, which constrains yields and rural livelihoods. This study pursues three objectives: (i) to assess the contribution of adaptation policies to the sector's performance, (ii) to model the combined influence of agricultural practices as well as climatic and geographical factors on yields, and (iii) to translate these findings into a provincial adaptation plan supported by a monitoring and evaluation framework. Data from 2014 to 2024 were analyzed using three families of models (multiple linear regression, Random Forest, and XGBoost) to reconcile interpretability and predictive performance. XGBoost proved the most accurate ($R^2 = 0.795$; RMSE = 192.4 kg/ha; MAE = 149.9 kg/ha) and provided reliable predictions for public policy planning. Explainability analyses (SHAP values and partial dependence plots) revealed that relative humidity and air temperature are decisive factors, followed by pesticide use, daytime land surface temperature, and rainfall. These results informed the design of a provincial adaptation plan that prioritizes actions by district, strengthens institutional coordination, promotes drought-tolerant seeds, enhances participatory governance, and establishes a data-driven monitoring and evaluation system. Overall, this work provides a coherent pathway from data and models to public decision-making, aiming to sustainably improve bean productivity and reinforce the resilience of rural households in Rwanda.

Key-words

Modelling, Public policy, Climate change adaptation, Productivity, Beans.

Liste des sigles et acronymes

Sigle	Définition
AIMS RIC	African Institute for Mathematical Sciences Research and Innovation Centre
CAD	Comité d'Aide au Développement
CEPMMT (ECMWF)	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)
CIP	Crop Intensification Program
PHC5	Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitat
ENACTS	Enhancing National Climate Services
ENR&CC	Environment, Natural Resources and Climate Change Mainstreaming Strategy
ERA5	European ReAnalysis version 5
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GAEZ	Global Agro-Ecological Zones
GEE	Google Earth Engine
GGCRS	Green Growth and Climate Resilience Strategy
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
ISAR	Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda
JRA-55	Japanese 55-year Reanalysis
MAE	Mean Absolute Error
MINAGRI	Ministry of Agriculture and Animal Resources
MINECOFIN	Ministry of Finance and Economic Planning
MINIRENA	Ministry of Natural Resources
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSE	Mean Squared Error
NAP	National Agriculture Policy
NDC	Nationally Determined Contribution
NISR	National Institute of Statistics of Rwanda
NST	National Strategy for Transformation
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
ODD	Objectifs de Développement Durable
PAM	Programme alimentaire mondial
PDP	Partial Dependence Plot
PIB	Produit Intérieur Brut
PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement

PSTA	Strategic Plan for the Transformation of Agriculture
RAB	Rwanda Agriculture Board
REMA	Rwanda Environment Management Authority
RF	Random Forest
RIMP	Rwanda Irrigation Master Plan
RLM	Régression linéaire multiple
RMSE	Root Mean Squared Error
SAS	Seasonal Agricultural Survey
SHAP	SHapley Additive exPlanations
SPAM	Spatial Production Allocation Model
SPI	Standardized Precipitation Index
UN	United Nations
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
XGBoost	eXtreme Gradient Boosting

Table des matières

Remerciements	2
Dédicace	3
Résumé	3
Mots-clefs	4
Abstract	4
Key-words	5
Liste des sigles et acronymes	5
I. Introduction	1
II. Revue bibliographique	5
2.1. Pratiques agricoles, variables climatiques et géographiques : synthèse des impacts sur le rendement des cultures en Afrique de l’Est	5
2.2. Contexte national et cadre institutionnel de l’adaptation du secteur agricole au changement climatique au Rwanda	6
2.2.1. Cadre stratégique national et sectoriel pour l’adaptation de l’agriculture au changement climatique au Rwanda	6
2.2.2. Dispositifs spécifiques pour la filière haricot	7
2.3. Modélisation des rendements agricoles au Rwanda	8
2.4. Vulnérabilité climatique et enjeux pour la filière haricot	9
2.5. Typologie des haricots cultivés au Rwanda	10
III. Cadre analytique de l’étude : Matériels et Méthodes	11
3.1. Description de la zone de l’étude	11
3.2. Méthodologie d’analyse des politiques d’adaptation	12
3.3. Données et variables utilisées pour la modélisation	13
3.4. Méthodologie de modélisation du rendement du haricot	15
3.5. Méthodologie d’élaboration du plan provincial d’adaptation	20
IV. Résultats	22
4.1. Analyse des politiques d’adaptation du Rwanda	22
4.1.1. Analyse de la prise en compte de l’adaptation de la filière haricot dans la deuxième Stratégie Nationale de Transformation (NST2 2024-2029)	22
4.1.2. Analyse de la prise en compte de l’adaptation de la filière haricot dans la conception du Plan Stratégique pour la Transformation de l’Agriculture (PSTA 5) 2024-2029	23
4.1.3. Analyse de la prise en compte de l’adaptation de la filière haricot dans la Politique Agricole Nationale (NAP) 2018	24
4.1.4. Analyse de la prise en compte de l’adaptation de la filière haricot dans le Rwanda Irrigation Master Plan (2020)	25
4.1.5. Analyse de la prise en compte de l’adaptation de la filière haricot dans la stratégie de la Croissance verte et résilience climatique (GGCRS, mise à jour en 2021)	25

4.1.6. Analyse de la prise en compte de l'adaptation de la filière haricot dans la Stratégie d'intégration de l'environnement, des ressources naturelles et du changement climatique ENR&CC (2018)	26
4.1.7. Analyse de la prise en compte de l'adaptation de la filière haricot dans les Contributions Déterminées au Niveau National (NDC) 2020	28
4.2. Modélisation du rendement du haricot dans la Province de l'Est du Rwanda	29
4.2.1. Caractérisation descriptive des données agronomiques, climatiques et géographique	29
4.2.2. Évaluation de la performance des modèles	32
4.2.3. Evaluation de l'importance des variables explicatives suivant le modèle de SHAP (SHapley Additive exPlanations)	33
4.2.4. Analyse des Dépendances Partielles	35
4.3. Plan provincial d'adaptation au changement climatique pour la filière haricot	37
4.3.1. Diagnostic synthétique de la filière haricot dans la Province de l'Est	37
4.3.2. Axes stratégiques et mise en œuvre du plan provincial d'adaptation de l'haricot au changement climatique	38
4.3.3. Stratégie de mobilisation des ressources pour la mise en oeuvre du plan provincial	42
4.3.4. Plan d'action pour la mobilisation de ressources	43
4.3.5. Mécanisme de suivi-évaluation du plan provincial	45
V. Discussion	48
5.1. Analyse des politiques d'adaptaion du Rwanda	48
5.2. La modélisation de l'impact des variables agricoles, climatiques et géographiques sur le rendement du haricot dans la province de l'Est du Rwanda	49
5.3. Le plan provincial d'adaptation de la filière haricot face au changement climatique	51
5.4. Limites méthodologiques	54
VI. Conclusion et perspectives	55
VII. Références bibliographiques	58
VIII. Liste des illustrations	68
IX. Liste des tableaux	69
X. Glossaire	70
XI. Annexes	71

I. Introduction

La sécurité alimentaire constitue un défi majeur à l'échelle mondiale, en particulier dans les régions où les systèmes de production dépendent fortement de ressources naturelles vulnérables aux perturbations climatiques (Abosedo, 2020). En Afrique subsaharienne, plus de 60 % de la population dépend de l'agriculture pluviale, une activité hautement sensible aux fluctuations météorologiques et aux variations interannuelles des précipitations (Yannick & Bergaly, 2023; Diallo & Atangana Ondo, 2025). Plusieurs études soulignent que l'intensification de la variabilité climatique, caractérisée par la hausse des températures, la fréquence accrue des sécheresses et l'irrégularité des précipitations, compromet la productivité agricole et aggrave la pauvreté en milieu rural (Gebremedhin, 2018; Berhanu & Wolde, 2019). Le Rwanda, pays enclavé à forte densité de population, est également concerné par cette problématique. L'agriculture y représente 33 % du PIB et emploie 70 % de la population active (Weatherspoon et al., 2021; Sunday et al., 2024). La province de l'Est, la plus vaste du pays, occupe une place centrale dans la sécurité alimentaire nationale, mais elle demeure aussi la plus exposée aux aléas climatiques, enregistrant une augmentation de la température moyenne annuelle de +1,87 °C entre 1983 et 2021, ainsi qu'une forte baisse des précipitations saisonnières (Rwema et al., 2025).

Parmi les principales cultures vivrières du Rwanda, le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) occupe une place stratégique dans l'économie agricole, la sécurité alimentaire et les politiques publiques. Il est cultivé par près de 79,9 % des ménages agricoles au niveau national et 80,5 % dans la Province de l'Est (PHC5, 2022), ce qui en fait la culture vivrière la plus répandue du pays, devant le maïs, le manioc et le riz. Sa superficie moyenne annuelle, estimée à environ 329 000 hectares (NISR, 2024), traduit son rôle central dans les systèmes de production et dans l'approvisionnement alimentaire national. Sur le plan nutritionnel, le haricot constitue une source majeure de protéines végétales, de fer et de micronutriments essentiels, contribuant significativement à la lutte contre la malnutrition, notamment chez les ménages à faibles revenus (Larochelle et al., 2016; Tangwa et al., 2020).

Sur le plan socio-économique, cette culture assure des revenus stables à des milliers de petits exploitants et occupe une place importante dans les marchés locaux ainsi que dans les programmes d'alimentation scolaire. Les politiques agricoles récentes, telles que le Programme d'intensification des cultures (CIP), la Politique Agricole Nationale (NAP, 2018) et le Plan Stratégique pour la Transformation de l'Agriculture (PSTA 5, 2024-2029), la reconnaissent parmi les cultures prioritaires à forte valeur nutritionnelle et stratégique pour la résilience des ménages ruraux (MINAGRI, 2023).

Toutefois, la culture du haricot demeure particulièrement vulnérable aux aléas climatiques. Elle est sensible au stress hydrique et thermique, ce qui en fait l'une des cultures les plus

exposées à la variabilité climatique, avec des pertes de rendement pouvant atteindre 30 à 60 % en cas de sécheresse prolongée ou d'irrégularité pluviométrique (Tangwa et al., 2020). Cette vulnérabilité est exacerbée dans la Province de l'Est, caractérisée par des sols peu fertiles, une pluviométrie irrégulière et des températures élevées. La dépendance quasi exclusive à l'agriculture pluviale renforce la fragilité des exploitations familiales, compromettant à la fois la productivité, les revenus et la sécurité alimentaire des ménages ruraux.

Conscients de ces enjeux, le gouvernement rwandais a multiplié les politiques publiques d'adaptation visant à renforcer la résilience du secteur agricole, telles que le développement de semences tolérantes à la sécheresse, l'extension de l'irrigation, subventions aux intrants et digitalisation des pratiques agricoles (Rubyogo et al., 2015; Kim et al., 2022). La Stratégie Nationale de Transformation (NST1 et NST2), la Politique Nationale Agricole (NAP, 2018) et les Plans Stratégiques pour la Transformation de l'Agriculture (PSTA) incarnent cette volonté de modernisation et de résilience. Des dispositifs ciblés, comme la diffusion de variétés améliorées ou la mise en place d'assurances climatiques, ont permis des progrès notables (Katungi et al., 2018; Helwig et al., 2023).

Cependant, la littérature scientifique reste critique sur l'effectivité et l'équité de ces politiques ; leur mise en œuvre demeure souvent inégale, avec une prédominance d'approches top-down qui peinent à s'adapter aux réalités locales et à intégrer les besoins spécifiques des groupes les plus vulnérables, notamment les femmes et les petits producteurs (Ingabire et al., 2017; Ombogoh et al., 2018). Le manque de suivi-évaluation différencié par filière ou territoire limite la capacité d'ajuster les interventions et d'assurer leur efficacité réelle (Jiri & Mafongoya, 2017).

Ainsi, il apparaît indispensable d'évaluer l'impact réel des politiques d'adaptation au changement climatique, en tenant compte de leur dimension territoriale et de leur capacité à accroître la productivité et la résilience de cultures clés comme le haricot. C'est dans cette optique que la présente étude se propose d'analyser de manière critique l'ensemble des dispositifs mis en œuvre dans la province de l'Est du Rwanda. En mobilisant une méthodologie de modélisation, ce travail ambitionne de combler le déficit d'études locales sur l'efficacité différenciée des politiques publiques, tout en formulant des recommandations pour une gouvernance agricole plus inclusive, équitable et adaptée aux défis du terrain. Enfin, cette recherche s'inscrit dans la perspective des Objectifs de Développement Durable (ODD 2 et 13) et de la Vision 2050 du Rwanda, soulignant que la lutte contre l'insécurité alimentaire et le changement climatique nécessite des réponses innovantes, multi-échelles et centrées sur les besoins réels des populations les plus exposées (Ansoms et al., 2022).

Afin de répondre à la problématique de l'efficacité des politiques sur la productivité de haricot dans la Province de l'Est du Rwanda, l'objectif général de ce mémoire est de contribuer à l'élaboration d'un plan provincial d'adaptation de la filière haricot.

Plus spécifiquement, notre travail consiste à :

- Analyser les politiques agricoles mises en place au Rwanda pour favoriser l'adaptation au changement climatique, en mettant un accent particulier sur la culture du haricot.
- Modéliser l'influence des pratiques agricoles, des variables climatiques et géographiques sur le rendement du haricot.
- Proposer un plan d'adaptation au changement climatique pour la filière haricot au niveau provincial, visant à améliorer la résilience de la production et la sécurité alimentaire dans la Province de l'Est du Rwanda.

Afin de structurer l'analyse et d'atteindre les objectifs fixés, les questions de recherche suivantes ont été posées :

- Comment les politiques agricoles rwandaises favorisent-elles l'adaptation de la culture du haricot aux effets du changement climatique ?
- Comment les pratiques agricoles, les variables climatiques et les facteurs géographiques influencent-ils le rendement du haricot dans la Province de l'Est du Rwanda ?
- Quelles mesures et stratégies peuvent être intégrées dans un plan d'adaptation au changement climatique, à l'échelle provinciale, pour renforcer la résilience de la filière haricot et améliorer la sécurité alimentaire ?

Pour mener à bien cette recherche, le mémoire est structuré en trois parties complémentaires.

Il analyse d'abord le cadre stratégique et institutionnel de l'adaptation agricole au Rwanda et la place de la filière du haricot, en mobilisant le cycle des politiques publiques et la grille d'évaluation OCDE/CAD. Cette approche permet d'évaluer les forces, les limites et les perspectives des principaux documents stratégiques : NST2, PSTA5, NAP, GGCRS, ENR&CC, NDC et RIMP. Il présente ensuite l'approche empirique, fondée sur les données agricoles issues du SAS, les données climatiques couvrant la période 2014-2024 et les données géographiques à l'échelle des districts de la Province de l'Est, afin d'établir un diagnostic statistique et de modéliser le rendement du haricot à l'aide d'une régression linéaire multiple, d'un Random Forest et d'un XGBoost, pour identifier les déterminants majeurs et comparer les performances prédictives. Enfin, l'étude opérationnalise ces résultats à travers l'élaboration d'un plan provincial d'adaptation pour la filière du haricot, comprenant un diagnostic synthétique, des axes stratégiques assortis d'un calendrier de mise en œuvre, des

mécanismes de financement et de gouvernance, ainsi qu'un dispositif de suivi-évaluation fondé sur des indicateurs opérationnels.

II. Revue bibliographique

L'agriculture constitue le socle des économies africaines et la principale source de revenus pour la majorité des populations rurales. Elle demeure néanmoins fortement exposée aux aléas climatiques en raison de sa dépendance à la pluviométrie et de la faiblesse des capacités d'adaptation (Serdeczny et al., 2017) . Dans la région subsaharienne, cette vulnérabilité apparaît encore plus prononcée, rendant l'adaptation au changement climatique indispensable pour renforcer la résilience des systèmes agricoles (Niang et al., 2014). Cette analyse ouvre la voie aux sections ci-dessous consacrées aux politiques et stratégies d'adaptation mises en œuvre sur le continent africain et particulièrement au Rwanda.

2.1. Pratiques agricoles, variables climatiques et géographiques : synthèse des impacts sur le rendement des cultures en Afrique de l'Est

Les pratiques agricoles constituent un levier majeur de la productivité des cultures vivrières en Afrique de l'Est, notamment à travers le choix des variétés, l'utilisation d'engrais minéraux, l'intensification des pratiques culturales, la rotation des cultures et la gestion des maladies. Plusieurs études ont démontré que l'introduction de variétés améliorées et l'apport d'engrais sont associés à des augmentations significatives du rendement, bien que la rentabilité dépende du contexte local et du type de variété utilisé (Kayakez et al., 2017), (Girma, 2017). Par ailleurs, la gestion efficace des maladies comme la tache angulaire du haricot joue un rôle clé pour limiter les pertes et stabiliser la production, certaines variétés grimpantes se révélant plus résistantes et plus productives (Mbeugang et al., 2017).

L'influence des variables climatiques sur le rendement des cultures est également largement documentée. Les anomalies de température peuvent affecter négativement la productivité sur le long terme, tandis que les variations de précipitations, en particulier la survenue de sécheresses ou d'excès d'eau pendant la saison culturale, influencent les rendements à court terme (Mubenga-Tshitaka et al., 2023). Dans le cas du Rwanda, les projections indiquent que les cultures comme le haricot, le maïs et la pomme de terre sont particulièrement vulnérables à la variabilité climatique, notamment dans les zones de savane de l'Est, où une baisse significative de rendement est attendue sous l'effet du changement climatique (Austin et al., 2020).

Enfin, les variables géographiques telles que l'altitude, la topographie et le type de sol jouent un rôle déterminant dans la productivité agricole en modulant les conditions climatiques locales, la disponibilité en eau et la fertilité des sols. Par exemple, l'altitude influence la température et l'humidité, favorisant ou limitant la croissance de certaines variétés, tandis que la structure du paysage conditionne l'accès aux ressources et la résistance aux aléas climatiques (Austin et al., 2020). L'intégration simultanée de ces variables dans les modèles

de rendement est donc essentielle pour cibler les interventions agronomiques et adapter les politiques agricoles au contexte local.

2.2. Contexte national et cadre institutionnel de l'adaptation du secteur agricole au changement climatique au Rwanda

2.2.1. Cadre stratégique national et sectoriel pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique au Rwanda

Le cadre politique et institutionnel de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique au Rwanda s'est construit progressivement depuis les années 2000, à travers une succession de stratégies nationales et sectorielles qui témoignent d'un engagement croissant en faveur d'une agriculture résiliente et durable. Dès les premières orientations de la Vision 2020, puis de la Vision 2050, le Rwanda a intégré la nécessité de lutter contre la vulnérabilité agricole dans son projet de développement. Cette dynamique s'est accélérée avec la Stratégie Nationale de Transformation (NST), d'abord NST1 (2017-2024) puis (NST2 2024-2029), qui constituent l'ossature de la planification et font de l'adaptation une priorité transversale, avec la mise en avant de cultures stratégiques comme le haricot, la diffusion d'innovations climato-intelligentes, l'extension de l'irrigation et le renforcement des chaînes de valeur.

La déclinaison opérationnelle de cette vision s'est faite à travers les Plans Stratégiques pour la Transformation Agricole (PSTA), qui mettent l'accent sur la modernisation de l'agriculture, l'irrigation, l'amélioration des semences, la gestion durable des terres et l'accompagnement des producteurs vulnérables. Parallèlement, la Politique Nationale Agricole (2018) vise à diversifier et rendre plus résilient le secteur, tout en valorisant le haricot pour la sécurité alimentaire et la nutrition.

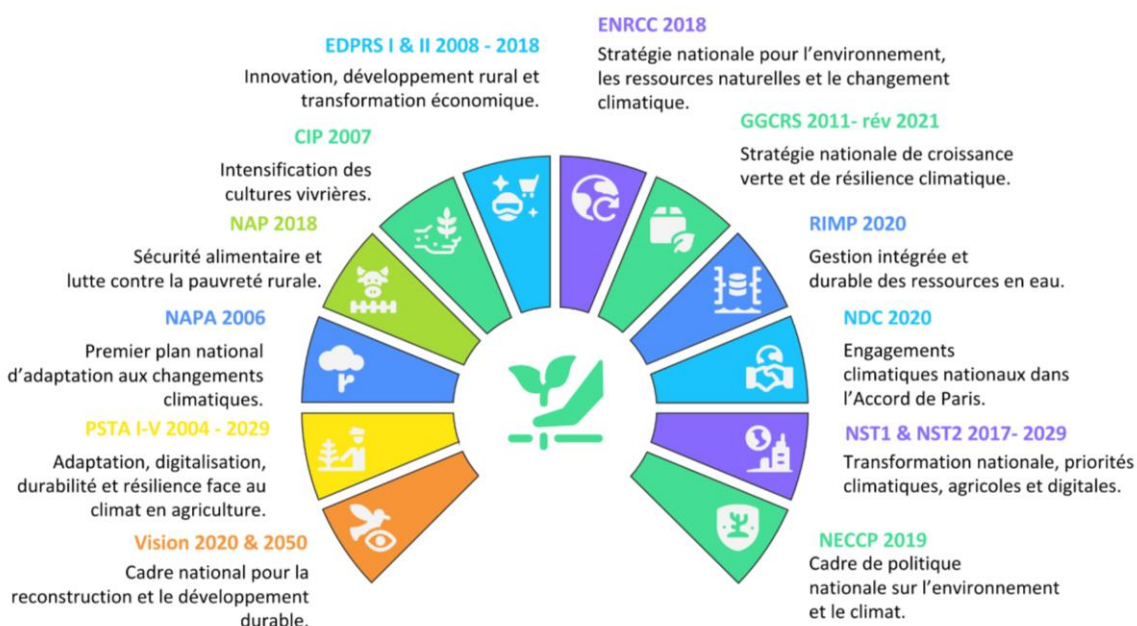


Figure 1: Récapitulatif du Cadre stratégique national et sectoriel pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique au Rwanda

Sur le plan international, le Rwanda s'est aligné sur les grands cadres climatiques en adoptant un Plan National d'Adaptation et ses Contributions Déterminées au Niveau National (NDC, 2020) dans le cadre de l'Accord de Paris, confirmant le rôle central de l'agriculture dans sa stratégie d'adaptation. La Stratégie de la Croissance Verte et Résilience Climatique (GGCRS, actualisée en 2021) et la Stratégie d'intégration de l'environnement, des ressources naturelles et du changement climatique (l'ENR&CC Mainstreaming Strategy) viennent compléter ce dispositif en favorisant l'intégration systématique de l'environnement et du climat dans toutes les politiques publiques. Enfin, des plans sectoriels spécifiques, comme le Plan directeur d'irrigation du Rwanda (Rwanda Irrigation Master Plan, 2020), cherchent à renforcer l'accès à l'eau et la résilience agricole, surtout dans les zones vulnérables comme la Province de l'Est, même si les dispositifs ciblés pour la filière haricot restent encore limités.

2.2.2. Dispositifs spécifiques pour la filière haricot

Au-delà des orientations générales portées par les grandes politiques agricoles et climatiques du Rwanda, plusieurs dispositifs spécifiques ont été mis en place pour soutenir la culture du haricot, reconnue comme une filière stratégique pour la sécurité alimentaire et la nutrition des populations rurales (Larochelle et al., 2016; Katungi et al., 2018).

Dans les principaux documents stratégiques, tels que la Politique d'Intensification des Cultures (CIP), le NST2, ou les politiques nationales agricoles, le haricot est explicitement cité parmi les cultures prioritaires pour sa richesse en protéines, son rôle dans l'alimentation scolaire et sa contribution à la résilience nutritionnelle des ménages vulnérables, particulièrement dans la Province de l'Est où il constitue une base alimentaire essentielle (Paul et al., 2018; Nsabimana et al., 2021).

La Consolidation de l'utilisation des terres (Land Use Consolidation, LUC), pilier central du CIP, prévoit que les agriculteurs regroupent leurs parcelles pour cultiver collectivement des cultures prioritaires, dont le haricot, sur des superficies minimales de 5 hectares par site. Ce dispositif, coordonné par le Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales (MINAGRI) et le Conseil de l'agriculture du Rwanda (Rwanda Agriculture Board, RAB), facilite l'accès à des intrants subventionnés (semences améliorées, engrais) ainsi qu'à un appui technique structuré. Toutefois, les recherches montrent que sa mise en œuvre repose souvent sur une approche descendante, avec une participation limitée des producteurs dans le choix des cultures, ce qui peut réduire l'adhésion locale et l'adaptation aux conditions agro-écologiques spécifiques (Ntihinyurwa & Masum, 2017).

Des programmes ciblés ont été développés pour améliorer la productivité et l'adaptabilité du haricot face aux stress climatiques. La diffusion à grande échelle de variétés améliorées (tolérantes à la sécheresse, enrichies en fer, résistantes aux maladies), portée par le Conseil de l'agriculture du Rwanda, la FAO et des partenaires internationaux, est devenue un levier central. L'adoption de ces variétés est favorisée par des campagnes de sensibilisation, des foires semencières et des subventions, avec un accent sur les petits producteurs et les zones exposées aux aléas climatiques (Larochelle et al., 2016; Katungi et al., 2018).

L'appui à l'irrigation, bien que limité pour le haricot comparé à d'autres cultures, progresse via des projets pilotes dans certains districts de l'Est (Paul et al., 2018). Un accompagnement technique (formations, vulgarisation, farmer field schools) contribue à diffuser les bonnes pratiques : gestion durable des sols, rotations, usage de composts, intégration de l'agroforesterie (Narcisse et al., 2019).

Des innovations telles que l'introduction du microcrédit et de dispositifs d'assurance climatique sont également testées pour limiter la vulnérabilité économique liée aux risques de mauvaises récoltes (Helwig et al., 2023). La filière haricot bénéficie aussi d'un soutien institutionnel via son intégration dans les programmes nationaux d'alimentation scolaire et nutritionnelle, ce qui stimule la demande et la commercialisation locale (Nsabimana et al., 2021).

Cependant, des défis persistent. L'accès aux innovations reste inégal selon les territoires, le financement dédié au haricot est inférieur à celui des cultures d'exportation, et la coordination entre institutions, ONG et producteurs doit être renforcée pour maximiser l'impact des mesures (Paul et al., 2018). Enfin, l'absence de suivi-évaluation différencié limite la capacité à adapter les interventions aux réalités locales.

2.3. Modélisation des rendements agricoles au Rwanda

Au Rwanda, la modélisation empirique des rendements agricoles a principalement concerné des cultures comme le riz, le maïs et la pomme de terre, tandis que les études quantitatives avancées portant spécifiquement sur le haricot restent limitées. Les premiers travaux reposaient sur des modèles statistiques classiques, en particulier la régression linéaire multiple, utilisés pour analyser l'impact de facteurs tels que la taille de la parcelle, la quantité d'engrais, la main-d'œuvre ou le choix variétal sur la productivité. Par exemple, pour le riz, des modèles de régression linéaire et des arbres de décision ont été comparés pour prédire le rendement à partir de données sur les pratiques agricoles et les variables climatiques, et il a été montré que les modèles d'arbres de décision, comme le Random Forest et le XGBoost, offraient une meilleure précision prédictive dans les périmètres irrigués (Mugemangango et al., 2024). Dans le district de Musanze, des approches basées sur le Random Forest, la régression polynomiale et le Support Vector Machine (SVM) ont été appliquées à des données

climatiques (température, précipitations) pour estimer les rendements du maïs et de la pomme de terre, et il a été constaté que le Random Forest donnait la meilleure performance en termes de précision (Uwizeyimana et al., 2022).

Par ailleurs, des initiatives récentes mobilisent l'Internet des objets pour la collecte de données agronomiques. À Musanze, une plateforme reliant des capteurs de sol et des capteurs météorologiques à des modèles Random Forest a permis d'améliorer la prédiction des rendements du maïs et de la pomme de terre à l'échelle locale. (Kuradusenge et al., 2024). Pour l'aide à la décision concernant le choix des cultures à planter, des modèles de réseau de neurones ont également été testés à partir de données de composition du sol (azote, phosphore, potassium, pH) afin de recommander la culture la plus adaptée à chaque parcelle (Musanas et al., 2023). Cependant, il faut souligner que la majorité de ces travaux portent sur le riz, le maïs ou la pomme de terre et mobilisent principalement une seule famille de variables (climatiques ou agronomiques) ; les modèles appliqués spécifiquement au haricot restent rares et n'intègrent pas simultanément l'ensemble des facteurs climatiques, agronomiques et géographiques à l'échelle des districts. Cette situation contraste avec certains pays voisins, comme l'Éthiopie, où des travaux empiriques sur le haricot ont montré l'intérêt d'une analyse multifactorielle, incluant à la fois pratiques culturales, variables climatiques et facteurs géographiques (Girma, 2017). Le manque d'études empiriques intégrant les dimensions climatiques, agronomiques et géographiques sur la culture du haricot au Rwanda révèle une lacune scientifique majeure. Il souligne la nécessité de recherches mobilisant des modèles avancés pour mieux analyser et optimiser les rendements dans ce contexte.

2.4. Vulnérabilité climatique et enjeux pour la filière haricot

La région est régulièrement exposée à des sécheresses, pluies torrentielles et vents violents qui menacent la stabilité des rendements et la sécurité alimentaire (Niyonsenga et al., 2024). Le haricot reste sensible à la sécheresse, en particulier lors de la floraison et du remplissage des gousses, et les pertes de rendement peuvent dépasser 30 % lors des années défavorables (Tangwa et al., 2020). Le manque de mécanisation, l'accès limité à l'irrigation et aux semences améliorées, ainsi que l'insuffisance des services de vulgarisation, aggravent l'exposition des producteurs aux risques (Rwema et al., 2025). Les politiques publiques ciblent donc la province de l'Est avec des programmes de diffusion de variétés tolérantes à la sécheresse, des projets d'irrigation et un soutien aux coopératives (Paul et al., 2018). Néanmoins, la résilience du secteur dépend toujours de l'accès à l'innovation, à la sécurisation foncière et à l'accompagnement ciblé des exploitants les plus vulnérables (Clay & King, 2019).

2.5. Typologie des haricots cultivés au Rwanda

Le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) constitue l'une des principales cultures vivrières du Rwanda. Il est à la fois une source essentielle de protéines végétales et un pilier de la sécurité alimentaire pour les ménages ruraux. Deux grands types de haricots sont cultivés dans le pays selon leur port et leur comportement agronomique : le haricot buissonnant (Bush bean) et le haricot grimpant (Climbing bean) (MINAGRI, 2018).

Le haricot buissonnant est caractérisé par une croissance déterminée et un cycle de production relativement court. Il se développe sous forme compacte, sans besoin de tuteurage, et convient bien aux zones à saison de culture courte. Ce type est largement cultivé dans les régions de l'Est et du Sud du Rwanda, où les conditions agroclimatiques sont plus sèches et les terres plus étendues. Les agriculteurs l'apprécient pour sa facilité de culture et sa moindre exigence en main-d'œuvre, bien que ses rendements soient généralement inférieurs à ceux des variétés grimpantes (MINAGRI, 2018 ; NISR, 2023).

Le haricot grimpant, quant à lui, possède une croissance indéterminée avec des tiges longues et volubiles nécessitant un tuteurage. Il est mieux adapté aux zones de haute altitude, notamment dans les provinces du Nord et de l'Ouest, où les sols sont plus fertiles et les précipitations plus abondantes. Ce type de haricot présente un potentiel de rendement plus élevé et contribue à améliorer la fertilité des sols grâce à sa capacité de fixation biologique de l'azote (RAB, 2022). En revanche, il demande davantage de main-d'œuvre et de matériaux pour le tuteurage. Les deux types se complètent dans les systèmes agricoles rwandais. Le haricot buissonnant est privilégié pour sa flexibilité et son adaptation aux zones sèches, tandis que le haricot grimpant est favorisé dans les zones humides et montagneuses pour sa productivité supérieure. Leur combinaison contribue à la diversification des systèmes de culture et au renforcement de la sécurité alimentaire nationale (MINAGRI, 2018).

III. Cadre analytique de l'étude : Matériels et Méthodes

3.1. Description de la zone de l'étude

La Province de l’Est du Rwanda (figure 2), la plus vaste des cinq provinces du pays, occupe une place stratégique dans le paysage agricole national. Elle se distingue à la fois par son potentiel productif, sa diversité écologique et sa vulnérabilité accrue aux aléas climatiques. Cette région, à dominante rurale, concentre la plus grande population du pays, soit 3 563 145 habitants en 2022, selon le recensement de la population et de l’habitat (PHC5), et couvre près de 10 000 km², ce qui en fait un espace clé pour la sécurité alimentaire et le développement rural du Rwanda (Rwema et al., 2025).

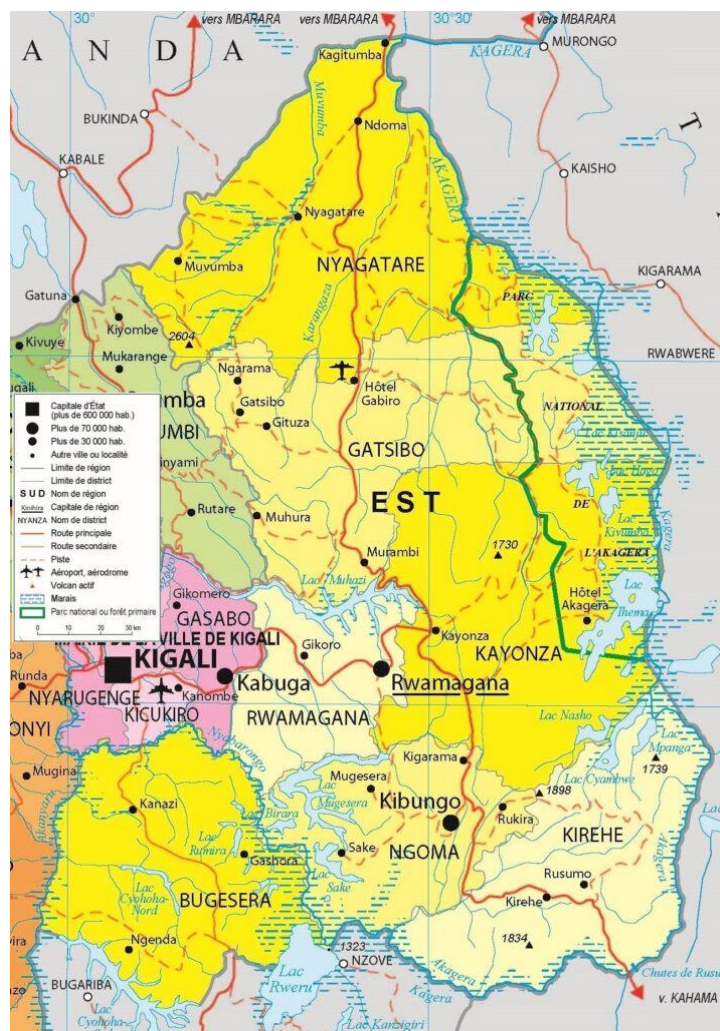


Figure 2 : Carte de la province de l'Est, Rwanda (<https://gifex.com>)

- Caractéristiques agro-climatiques de la Province de l'Est

La province de l'Est connaît une pluviométrie irrégulière et une forte variabilité interannuelle, caractérisées par une saison sèche prolongée et des épisodes récurrents de sécheresse

(Rwema et al., 2025). Les précipitations annuelles se situent généralement entre 800 et 1 200 mm, avec de fortes disparités selon les districts et d'une année à l'autre. Le calendrier agricole rwandais s'articule autour de trois saisons. La saison A s'étend de septembre à février et la saison B de mars à juin, toutes deux largement tributaires des pluies pour les principales cultures vivrières. La saison C, de juillet à septembre, est consacrée à la production en périmètres irrigués et dans les marais aménagés (NISR, 2023). Les températures moyennes, comprises entre 20 et 30 °C, accentuent l'évapotranspiration et le stress hydrique, notamment pour les cultures pluviales comme le haricot (Tangwa et al., 2020).

Les sols, majoritairement ferrallitiques et sablo-argileux, présentent une fertilité modérée à faible. Ils sont souvent affectés par l'érosion et une baisse de la matière organique, limitant ainsi le potentiel de rendement et augmentant la vulnérabilité des systèmes de production (Hashakimana et al., 2023). La gestion de l'eau reste un enjeu central, la majorité des exploitants dépendant encore de la pluie pour l'irrigation (Mikwa et al., 2014).

3.2. Méthodologie d'analyse des politiques d'adaptation

L'analyse des politiques agricoles d'adaptation au changement climatique appliquée à la filière haricot dans la Province de l'Est du Rwanda s'appuie sur une méthodologie structurée fondée sur la littérature scientifique internationale et sur les recommandations de l'OCDE. Sept politiques publiques majeures ont été retenues, à savoir la Stratégie nationale de transformation 2024-2029 (NST2), le Plan stratégique pour la transformation de l'agriculture 2024-2029 (PSTA5), la Politique agricole nationale 2018 (NAP), la Stratégie révisée de croissance verte et de résilience climatique 2021 (GGCRS), les Contributions déterminées au niveau national actualisées 2020 du Rwanda (CDN), le Plan directeur de l'irrigation du Rwanda 2020 (RIMP) et la Stratégie d'intégration de l'environnement, des ressources naturelles et du changement climatique 2018 (ENR&CC). Le choix de ces politiques repose sur le fait qu'elles sont actuellement en cours de mise en œuvre et concernent les domaines de l'adaptation au changement climatique, de l'agriculture et de l'environnement.

L'analyse s'appuie sur un double cadre (voir Tableau 6 en annexe).

- Le cycle des politiques publiques

Chaque politique est évaluée selon les cinq grandes étapes du cycle classique : mise à l'agenda, formulation, adoption, mise en œuvre et évaluation. Ce cadre est largement reconnu dans la littérature sur l'analyse des politiques publiques (Knoepfel et al., 2006; Howlett & Ramesh, 2009).

- Mise à l’agenda : étude de la manière dont un problème public est identifié et inscrit parmi les priorités politiques, en tenant compte des acteurs impliqués, des données disponibles et des facteurs déclencheurs ;
- Formulation : analyse des solutions envisagées, des objectifs fixés, des moyens mobilisés et des compromis réalisés entre les parties prenantes ;
- Adoption : observation du processus décisionnel officiel qui valide la politique, des institutions compétentes et des actes réglementaires ou stratégiques adoptés ;
- Mise en œuvre : description des actions déployées, de la mobilisation des ressources et de la coordination entre acteurs, ainsi que des éventuelles difficultés rencontrées sur le terrain ;
- Évaluation : analyse des dispositifs de suivi, des indicateurs utilisés, des retours d’expérience et des ajustements effectués pour améliorer l’action publique.

- **Une grille d’analyse multicritère**

À chaque étape, une grille multicritère inspirée du référentiel OCDE/CAD est mobilisée, évaluant six dimensions essentielles : pertinence, cohérence, efficacité, efficience, impact et durabilité. Ce choix méthodologique s’appuie sur les recommandations de l’OCDE pour l’évaluation des politiques publiques (OCDE, 2021), et sur la littérature relative à l’analyse multicritère des politiques (Drechsler, 2010).

- **Attribution des scores et échelles qualitatives**

Pour chaque critère et à chaque étape, une note standardisée est attribuée sur une échelle de 1 à 5 (voir Tableau 7 en annexe). Cette échelle s’étend d’un niveau 1 correspondant à une mention très vague ou marginale, sans adaptation spécifique à la filière haricot, jusqu’à un niveau 5 reflétant un ciblage explicite, une priorisation stratégique, un diagnostic détaillé ainsi que des dispositifs clairement définis et suivis pour la filière haricot et la province de l’Est. Ce type d’échelle qualitative ordonnée est reconnu pour sa robustesse dans la conversion des jugements d’experts en scores comparables, conformément aux recommandations de la littérature scientifique et des bonnes pratiques internationales (Drechsler, 2010; OCDE, 2021).

3.3. Données et variables utilisées pour la modélisation

Les analyses menées dans ce travail reposent sur un ensemble de données multi-sources couvrant la période 2014-2024 et permettant de croiser l’influence des pratiques agricoles, des variables climatiques et géographiques sur le rendement du haricot dans la Province de l’Est du Rwanda. L’ensemble des données agricoles provient principalement des rapports d’Enquête agricole saisonnière (SAS), élaborés par l’Institut national de la statistique du Rwanda (NISR) en collaboration avec le Ministère de l’Agriculture (MINAGRI). Ces rapports fournissent, à l’échelle du district (ou nationale), des informations précises sur la superficie

cultivée, la production totale, les rendements moyens, ainsi que l'adoption des principales pratiques agricoles : utilisation de semences améliorées, fertilisation (organique et inorganique), utilisation de pesticides, irrigation et protection anti érosion (NISR, s.d.). Les différentes variables climatiques ont été mobilisées à partir de sources complémentaires. Les températures minimales (Tmin), maximales (Tmax) et les précipitations proviennent de Météo Rwanda, collectées au niveau sectoriel et consolidées grâce à l'initiative ENACTS (Enhancing National Climate Services) qui combine les observations de stations météorologiques de qualité contrôlée avec la réanalyse japonaise JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis), afin de combler les lacunes spatiales et temporelles (Dinku et al., 2018; Siebert et al., 2019). Pour compléter ces données, la température de l'air a été extraite de la réanalyse ERA5-Land (European ReAnalysis version 5-Land component) produite par le CEPMMT (Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme, disponible via Google Earth Engine (GEE), qui fournit une vision cohérente de l'évolution des variables terrestres sur plusieurs décennies. La température de surface terrestre (LST) a été obtenue à partir du produit satellitaire MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), OD11A1 V6.1, accessible également via Google Earth Engine, lequel fournit des données quotidiennes diurnes et nocturnes à haute résolution (Safari et al., 2022). Enfin, l'humidité relative a été dérivée des données de la réanalyse ERA5, également intégrées via Google Earth Engine.

Pour pallier l'absence de séries désagrégées sur certaines années (2014-2018), une désagrégation proportionnelle a été appliquée en s'appuyant sur la structure spatiale observée en 2019-2024. L'ensemble des sources a ensuite été harmonisé, contrôlé et fusionné afin de constituer une matrice unique par district, année et saison, avec vérification des doublons et de la cohérence des formats.

Les variables agronomiques retenues correspondent aux parts d'agriculteurs recourant aux semences améliorées, aux engrais organiques et minéraux, aux pesticides, à l'irrigation et aux pratiques antiérosives. L'estimation des taux d'adoption spécifiques au haricot par district et par saison (2014-2024) repose sur quatre étapes étayées par la littérature récente. Premièrement, une calibration « top-down » par motif spatial normalise le profil inter-districts 2019-2024 des séries toutes-cultures (moyenne ramenée à 1) et l'ancre aux moyennes nationales haricot 2014-2016 pour produire des niveaux plausibles par district et saison, dans l'esprit des cadres GAEZ et SPAM et des approches de désagrégation contrainte/non contrainte en démographie spatiale (Fischer et al., 2021; Yu et al., 2020; WorldPop, n.d.; Thomson et al., 2022; Baynes et al., 2022; Swanwick et al., 2022). Deuxièmement, un facteur de correction et un benchmarking convertissent les séries toutes-cultures en séries haricot via un ratio haricot/toutes-cultures par district-saison, puis les agrégats sont recalés selon les principes du World Programme for the Census of Agriculture 2020 et les méthodes récentes d'estimation sur petite zone (small area estimation) (FAO, 2015; FAO, 2018; Steorts et al., 2020; Molina, 2024). Troisièmement, le ratio est appliqué aux observations 2020-2024 avec encadrement pour éviter des corrections extrêmes (FAO, 2015; FAO, 2018). Quatrièmement,

les années intermédiaires 2017-2019 sont interpolées linéairement entre 2016 (calibré) et 2019 (corrigé), puis les premières années sont imputées avec bornage et contrôles de qualité, conformément aux guides techniques et standards statistiques de la FAO (FAO, 2019; FAO, 2023). La variable géographique mobilisée est l'altitude.

L'ensemble des analyses, incluant la préparation des données ainsi que l'estimation des modèles statistiques et de machine learning (régression linéaire multiple, Random Forest, XGBoost, etc.), a été intégralement réalisé dans les environnements R et Python. Ces travaux ont permis d'identifier les principaux déterminants du rendement et de formuler des recommandations adaptées au contexte de la Province de l'Est du Rwanda.

3.4. Méthodologie de modélisation du rendement du haricot

Le schéma méthodologique (figure 3) illustre les différentes étapes suivies pour la modélisation.

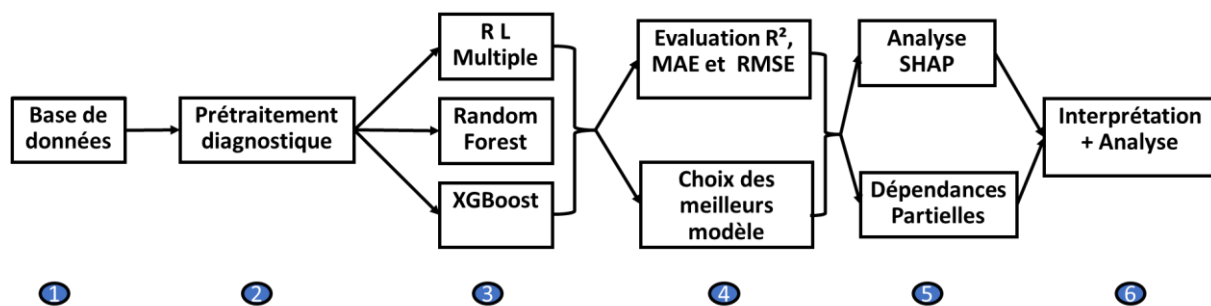


Figure 3 : Schéma méthodologique adopté pour la modélisation du rendement du haricot

- Prétraitement des données

La première étape a consisté en la collecte et la préparation des données issues du Seasonal Agricultural Survey (SAS), des bases climatiques nationales et des bases cartographiques. Après la fusion de ces différentes sources, un contrôle qualité a permis d'éliminer les doublons, d'harmoniser les formats, et d'appliquer une désagrégation proportionnelle pour certaines années sans données désagrégées. Les variables climatiques calculées (SPI, température moyenne) ont été intégrées à la base finale.

$$SPI = \frac{P_i - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

où P_i désigne la précipitation observée pour la période i , μ la moyenne des précipitations pour cette période et σ l'écart-type pour cette période (Pande et al., 2024).

- Analyses préliminaires et diagnostic des données pour la modélisation

Avant d'initier toute modélisation prédictive sur le rendement agricole moyen (exprimé en kg/ha), il est fondamental de procéder à une exploration minutieuse des variables explicatives disponibles. Cette phase diagnostique vise à évaluer le potentiel informatif des données, à

identifier les éventuels problèmes statistiques (multicolinéarité, faibles corrélations, etc.), et à orienter rationnellement le choix des futurs modèles.

❖ **Analyse des corrélations et régressions linéaires simples**

Dans le cadre de cette recherche, les relations bivariées entre les variables explicatives et le rendement du haricot ont été explorées à l'aide du test de corrélation de Pearson (figure 18 en annexe). Cette approche permet de mettre en évidence la direction et l'intensité des associations linéaires entre variables, et d'identifier les facteurs susceptibles d'exercer une influence directe sur la productivité. Afin de compléter cette analyse, des modèles de régression linéaire simple ont été mobilisés figure pour estimer la contribution individuelle de chaque variable explicative au rendement. Cette étape a pour objectif de distinguer les pratiques agricoles et les paramètres climatiques ayant un effet direct, et de vérifier la significativité statistique de ces relations.

❖ **Diagnostic de la multicolinéarité et implications méthodologiques**

Un diagnostic de la multicolinéarité a été conduit (figure 19) à travers le calcul des facteurs d'inflation de variance (VIF)(Chicco et al., 2021), permettant d'évaluer la redondance statistique entre les variables indépendantes.

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (2)$$

où R_j^2 est le coefficient de détermination de la régression de la variable j sur l'ensemble des autres variables explicatives. La multicolinéarité désigne un phénomène statistique dans lequel certaines variables explicatives sont très fortement corrélées entre elles, ce qui génère de l'instabilité dans les modèles de régression. La VIF est l'indicateur de référence pour quantifier cette redondance. Une VIF très élevée (généralement supérieur à 10, voire 100) indique une colinéarité problématique, rendant difficile l'interprétation fiable des coefficients du modèle.

Cette démarche vise à identifier les variables présentant une forte interdépendance, susceptibles de compromettre la stabilité des coefficients dans les modèles de régression. Lorsque des situations de colinéarité extrême sont détectées, le protocole retenu consiste à réduire les dimensions concernées à une variable représentative unique, de manière à améliorer la robustesse et la lisibilité des estimations.

L'ensemble de ces analyses préliminaires constitue une étape essentielle de préparation à la modélisation multivariée. En effet, la combinaison de tests de corrélation, de régressions simples et du diagnostic de colinéarité permet non seulement d'éclairer les premières

tendances dans les relations entre climat, pratiques agricoles et productivité, mais aussi de définir les ajustements nécessaires pour la construction de modèles plus avancés.

- **Choix et description des modèles de modélisation du rendement**

Pour modéliser l'influence combinée des variables climatiques, agronomiques et géographiques sur le rendement du haricot, trois modèles ont été sélectionnés : la régression linéaire multiple, le Random Forest et le XGBoost. Ce choix est motivé par la nécessité de comparer la performance et l'interprétabilité de modèles linéaires et non linéaires dans le contexte complexe des systèmes agricoles.

❖ **Régression linéaire multiple (RLM)**

La régression linéaire multiple constitue un modèle de référence en agronomie pour quantifier l'effet linéaire de chaque variable explicative sur le rendement. Elle s'exprime sous la forme :

$$Rend_{agt} = \beta_0 + \beta_1 pluvio_t + \beta_2 temp_max_t + \beta_3 temp_min + \beta_4 humi_t + \beta_5 spi_t + \beta_6 LST_jr + \beta_7 LST_nuit + \beta_9 Sem_t + \beta_{10} irrig_t + \beta_{11} fert_org_t + \beta_{12} fert_inorg_t + \beta_{13} anti_eros_t + \beta_{14} pesti_t + \beta_{15} altit_t + ut \quad (3)$$

Avec :

La variable dépendante est le rendement agricole noté $Rend_{ag}$, il s'exprime en kilogramme/hectare. Ce rendement moyen est le rendement des trois saisons.

Les variables indépendantes :

- β_0 : constante (niveau moyen du rendement quand toutes les variables explicatives valent 0).
- $Pluvio_t$: cumul pluviométrique (mm) sur la période considérée.
- $Tmax_t$: température maximale (°C).
- $Tmin_t$: température minimale (°C).
- $Humid_t$: humidité relative moyenne (%).
- SPI_t : Standardized Precipitation Index .
- LST_jr_t : température de surface terrestre (jour) issue satellite (°C).
- LST_nuit_t : température de surface terrestre (nuit) (°C).
- $Tair_t$: température de l'air (°C).
- Sem_t : semences améliorées (% de producteurs utilisateurs).
- $Irrig_t$: irrigation (ex. % de surface irriguée).
- $Fert_t$: usage d'engrais organiques (% d'adoptants).

- $Ferti_inorg_t$: usage d'engrais minéraux/chimiques
- $Anti_ero_t$: pratiques antiérosives (terrasses, paillis, bandes enherbées ; % d'adoptants).
- $Pesti_t$: utilisation de pesticides (% d'utilisateurs).
- $Altit_t$: altitude (m) .
- u_t : terme d'erreur (chocs non observés, mesure l'aléa).
- β : chaque β_t mesure la variation marginale du rendement associée à une unité de plus de la variable correspondante, toutes choses égales par ailleurs.

Ce modèle présente l'avantage d'être interprétable et de fournir une base de comparaison pour les méthodes plus avancées. Il permet également d'identifier la direction des effets et de tester la significativité des variables. Toutefois, il repose sur des hypothèses strictes : linéarité, indépendance des résidus, homoscedasticité et absence de multicollinéarité forte.

❖ Random Forest

Le modèle Random Forest est une méthode d'ensemble qui agrège plusieurs arbres de décision construits sur des sous-échantillons aléatoires des données et des sous-ensembles de variables. Chaque arbre prédit un rendement \hat{y}_t , et la prédiction finale est la moyenne :

$$\hat{y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \hat{y}^{(t)} \quad (4)$$

où T est le nombre d'arbres.

Chaque arbre se construit par partition binaire des données, selon des règles d'impureté (minimisation de la variance intra-groupe). Le Random Forest est particulièrement adapté à la modélisation de phénomènes agricoles caractérisés par des relations non linéaires et des interactions complexes entre variables explicatives. Il présente une grande robustesse face à la multicollinéarité, aux valeurs aberrantes et aux distributions non normales.

Dans ce projet, le Random Forest a été utilisé pour tester la robustesse d'un modèle non paramétrique, capable de gérer des interactions naturelles entre pratiques agricoles et climat. Son potentiel à expliquer des variations que la régression linéaire ne peut capturer est particulièrement intéressant dans des contextes agronomiques multidimensionnels.

Des paramètres ont été choisis pour la modélisation (après recherche des meilleurs paramètres pour le modèle basée sur nos données) (voir tableau 10 en annexe).

❖ XGBoost (eXtreme Gradient Boosting)

Le modèle XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) repose sur la construction séquentielle d'arbres de décision, chaque nouvel arbre venant corriger les erreurs du modèle précédent. La prédiction finale s'écrit comme une somme pondérée des arbres construits :

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), \quad f_k \in F \quad (5)$$

f_k représente un arbre de décision et F l'ensemble des arbres possibles. L'objectif d'XGBoost est de minimiser une fonction de perte augmentée d'un terme de régularisation, selon la formule :

$$L = \sum_i l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_k \Omega(f_k) \quad (6)$$

où l désigne la fonction de perte (ici l'erreur quadratique moyenne, MSE) et $\Omega(f_k)$ la pénalité de complexité des arbres, permettant de limiter le surapprentissage.

XGBoost est reconnu pour sa capacité à gérer les relations non linéaires et les interactions complexes, tout en offrant un contrôle efficace du surapprentissage grâce à des paramètres de régularisation. Il est également capable de traiter des jeux de données volumineux et hétérogènes, ce qui en fait un outil particulièrement pertinent pour l'analyse multifactorielle des rendements agricoles.

La sélection conjointe de la régression linéaire multiple, du Random Forest et de XGBoost permet de confronter un modèle linéaire interprétable à deux approches non linéaires puissantes et robustes, adaptées à la complexité et à la diversité des variables influençant le rendement du haricot dans le contexte rwandais. Cette approche comparative garantit une analyse complète et fiable, tout en facilitant l'interprétation des déterminants majeurs du rendement.

- **Validation et critères de performance des modèles**

L'ensemble des modèles a été validé par séparation des données en ensemble d'entraînement et de test, ou par validation croisée selon les cas. Les performances des modèles ont été évaluées à l'aide de trois critères principaux (Chicco et al., 2021) :

- ❖ Le coefficient de détermination (R^2) mesure la proportion de la variance de la variable expliquée par le modèle. En régression, il s'écrit :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

- ❖ L'erreur quadratique moyenne (RMSE) quantifie la différence entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs observées.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (8)$$

- ❖ L'erreur absolue moyenne (MAE) représente la moyenne des erreurs absolues entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs réelles observées.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (9)$$

où :

Y_i : la valeur observée de la variable dépendante pour l'observation i

\hat{Y}_i : la valeur prédite par le modèle pour l'observation i .

\bar{Y} : la moyenne des valeurs observées.

n : le nombre total d'observations.

- **Interprétation et explicabilité des modèles**

L'interprétation des résultats a reposé sur l'analyse de l'importance des variables, évaluée à l'aide du critère d'impureté pour le Random Forest et des valeurs SHAP pour XGBoost. Les courbes de dépendance partielle (PDP) ont été utilisées pour visualiser l'effet marginal de chaque variable sur le rendement, tandis que l'analyse des valeurs SHAP a permis d'identifier les facteurs prédictifs majeurs et de détecter d'éventuels effets de seuil ou d'interactions.

3.5. Méthodologie d'élaboration du plan provincial d'adaptation

L'élaboration du plan provincial d'adaptation au changement climatique repose sur une approche méthodologique structurée et inspirée des cadres internationaux de planification stratégique et d'adaptation climatique (FAO, 2018 ; UNFCCC, 2019 ; OCDE, 2021). Cette démarche vise à traduire les résultats de la modélisation et de l'analyse des politiques en un outil opérationnel de planification aligné sur les priorités nationales et territoriales. Elle s'articule en cinq étapes complémentaires : le cadrage, le diagnostic, la formulation, la mobilisation des ressources et le suivi-évaluation.

La première étape, dite de cadrage, consiste à définir la vision, les objectifs et le périmètre du plan. Elle précise le cadre institutionnel, les acteurs impliqués et les niveaux d'intervention (provincial et district). Cette phase permet de situer le plan dans les orientations nationales, notamment la Stratégie nationale de transformation (NST2) et le Plan stratégique pour la transformation de l'agriculture (PSTA5), tout en intégrant les priorités climatiques du Rwanda (GGCRS, NDC, ENR&CC).

La deuxième étape est celle du diagnostic participatif. Elle vise à identifier les vulnérabilités, les capacités d'adaptation et les priorités locales à partir des données agro-climatiques, socio-économiques et institutionnelles. Ce diagnostic mobilise des outils tels que l'analyse SWOT (forces, faiblesses, opportunités et menaces) et les évaluations de vulnérabilité climatique, selon la logique de l'approche GIZ-OCDE (GIZ, 2018 ; OCDE, 2021). Cette phase fonde le plan sur des données probantes et sur la concertation avec les parties prenantes locales (autorités, coopératives, producteurs, institutions techniques).

La troisième étape concerne la formulation du plan, qui traduit les constats du diagnostic en axes stratégiques et en actions concrètes. Les priorités sont hiérarchisées par thématique (gouvernance, pratiques agricoles, gestion de l'eau, innovation, financement) et par district. Chaque action est associée à des indicateurs de performance, des échéances et des acteurs

responsables. Cette phase s’inspire des approches de planification logique et de théorie du changement recommandées pour les plans d’adaptation (UNDP, 2020 ; FAO, 2021).

La quatrième étape porte sur la mobilisation des ressources. Elle comprend la cartographie des besoins financiers, l’identification des sources potentielles de financement (budgets publics, Fonds vert pour le climat, coopération bilatérale, secteur privé) et la préparation de projets bancables à soumettre aux partenaires techniques et financiers. Cette dimension garantit la faisabilité du plan et son alignement avec les instruments de financement climatique (PNUD, 2019).

Enfin, la cinquième étape concerne la mise en œuvre et le suivi-évaluation. Un dispositif de suivi-évaluation est défini autour d’indicateurs de résultat et d’impact mesurant la performance des actions menées. Ce mécanisme permet d’assurer la redevabilité, d’ajuster les interventions et de favoriser un apprentissage continu. Il repose sur une approche participative, associant les institutions provinciales, les coopératives agricoles et les partenaires techniques, conformément aux recommandations de l’OCDE/CAD et du PNUD (OCDE, 2021 ; UNDP, 2022).

IV. Résultats

4.1. Analyse des politiques d'adaptation du Rwanda

4.1.1. Analyse de la prise en compte de l'adaptation de la filière haricot dans la deuxième Stratégie Nationale de Transformation (NST2 2024-2029)

L'analyse de la deuxième Stratégie Nationale de Transformation (NST2) révèle une politique ambitieuse et cohérente, visant à renforcer l'adaptation du secteur agricole rwandais face aux défis climatiques, avec un accent particulier sur la filière haricot dans la province de l'Est. La stratégie obtient des scores très élevés en pertinence (5/5) et cohérence (4/5) (Figure 4), témoignant d'un alignement parfait avec la Vision 2050, les Objectifs de Développement Durable (ODD), les Contributions Déterminées au Niveau National (NDC) et la stratégie de la Croissance verte et résilience climatique (GGCRS, mise à jour en 2021). Elle répond ainsi pleinement aux enjeux de sécurité alimentaire et d'innovation agricole du pays.

La NST2 propose des mesures structurantes telles que l'augmentation ciblée de la productivité des cultures prioritaires, l'accès élargi aux semences résilientes, le renforcement de l'irrigation, la digitalisation des pratiques agricoles et la création d'Agri-hubs. La filière haricot bénéficie ainsi d'une attention spécifique, la stratégie identifiant explicitement les zones à risque et les dispositifs prioritaires pour accompagner l'adaptation.

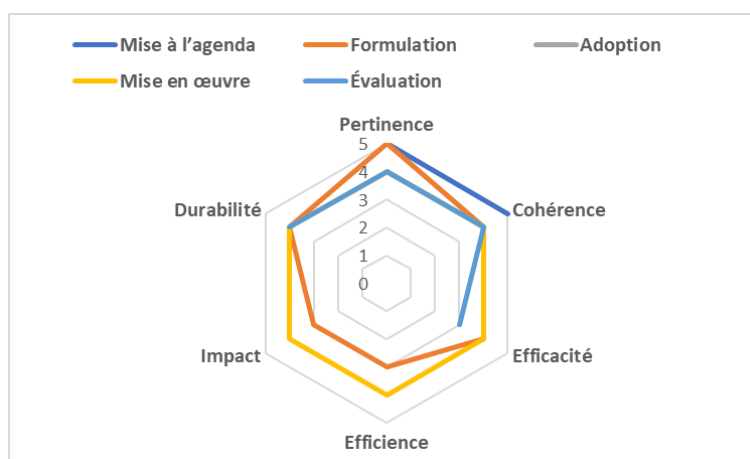


Figure 4 : Illustration de l'appréciation de la deuxième Stratégie Nationale de Transformation (NST2)

Cependant, certains axes de la politique, en particulier l'efficacité (3/5), l'efficience (3/5), l'impact (2/5) et la durabilité (3/5) présentent des marges d'amélioration, principalement en ce qui concerne la précision du ciblage, le suivi différencié des dispositifs et la capacité à anticiper les besoins d'accompagnement dans la mise en œuvre. Cela traduit le fait que, même si le cadre stratégique est solide et bien articulé avec les autres politiques nationales et

internationales, la concrétisation des ambitions dépendra de la capacité à opérationnaliser ces dispositifs et à assurer leur adaptation au terrain, notamment pour la filière haricot dans la province de l'Est.

4.1.2. Analyse de la prise en compte de l'adaptation de la filière haricot dans la conception du Plan Stratégique pour la Transformation de l'Agriculture (PSTA 5) 2024-2029

L'analyse du cinquième Plan Stratégique pour la Transformation de l'Agriculture (PSTA 5) 2024-2029 révèle une stratégie agricole nationale cohérente et ambitieuse, centrée sur l'adaptation au changement climatique et la sécurité alimentaire, accordant une attention particulière à la Province de l'Est et à la filière haricot. La stratégie se caractérise par un diagnostic précis et par l'intégration des priorités liées au haricot à tous les niveaux stratégiques (Vision 2050, NST2, NDC, GGCRS). Elle propose des mesures innovantes, telles que le développement de semences résilientes, l'extension de l'irrigation et le soutien post-récolte. L'approche participative, la coordination institutionnelle et le système de suivi-évaluation renforcent la solidité du cadre conceptuel.

Toutefois, l'analyse critique révèle certaines limites. Malgré des scores élevés en pertinence et cohérence lors de la mise à l'agenda et de la formulation, des défis persistent lors de la mise en œuvre, avec une efficacité et une efficience perfectible, et un impact limité sur la durabilité de la filière haricot. L'appropriation locale, le suivi différencié et la coordination inter-acteurs restent des axes à renforcer pour assurer l'adaptation effective sur le terrain.

On observe un contraste entre une conception stratégique solide et les défis de l'application opérationnelle (figure 5).

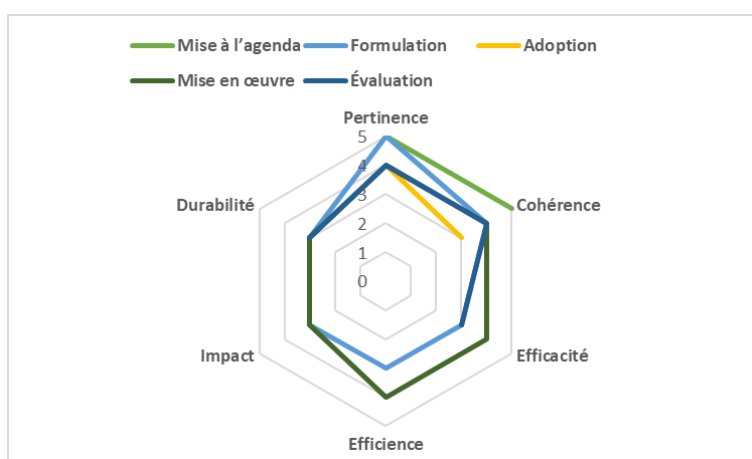


Figure 5 : Illustration de l'appréciation du cinquième Plan Stratégique pour la Transformation de l'Agriculture (PSTA 5) 2024-2029

Celui-ci illustre la différenciation des scores selon les critères OCDE/CAD à chaque étape du cycle politique : la pertinence (5/5) et la cohérence (4/5) ressortent nettement lors de la conception, alors que l'efficacité, l'efficience et l'impact restent modestes lors de la mise en œuvre et de l'évaluation.

4.1.3. Analyse de la prise en compte de l'adaptation de la filière haricot dans la Politique Agricole Nationale (NAP) 2018

La Politique Agricole Nationale (NAP) 2018 du Rwanda affirme la priorité accordée à la sécurité alimentaire et à la résilience climatique, en insistant particulièrement sur les zones vulnérables, telles que la province de l'Est, et sur les cultures stratégiques comme le haricot. Cette orientation se traduit par des scores très élevés en pertinence et cohérence, témoignant d'un bon alignement avec les grandes stratégies nationales et internationales (Figure 6).

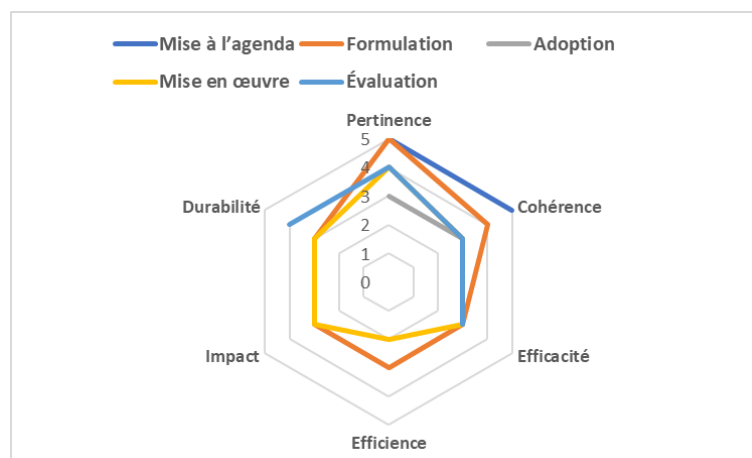


Figure 6 : Illustration de l'appréciation de la Politique Agricole Nationale (NAP) 2018

Toutefois, l'efficacité, l'efficience et l'impact sont plus modérés, ce qui suggère que, malgré des objectifs clairs, la mise en œuvre opérationnelle reste générale. Le ciblage spécifique de la filière haricot et de la province de l'Est nécessite un renforcement. L'adoption et la mise en œuvre reposent sur la participation de nombreux acteurs et des dispositifs classiques, mais manquent encore de spécificités locales et sectorielles. En résumé, la NAP 2018 propose une base solide et cohérente, mais sa réussite pour l'adaptation du haricot passera par une plus grande personnalisation des interventions et un suivi différencié pour les zones et cultures les plus sensibles au changement climatique.

4.1.4. Analyse de la prise en compte de l'adaptation de la filière haricot dans le Rwanda Irrigation Master Plan (2020)

Le Plan directeur d'irrigation du Rwanda (Rwanda Irrigation Master Plan (RIMP)) 2020 présente une politique particulièrement pertinente et cohérente visant à renforcer l'adaptation agricole, en accordant une attention marquée à la province de l'Est et à la filière haricot. Le plan obtient des scores maximaux en pertinence et cohérence, traduisant un alignement stratégique solide. Il cible notamment la résilience à la sécheresse, la modernisation de l'irrigation et la priorisation de technologies adaptées (figure 7).

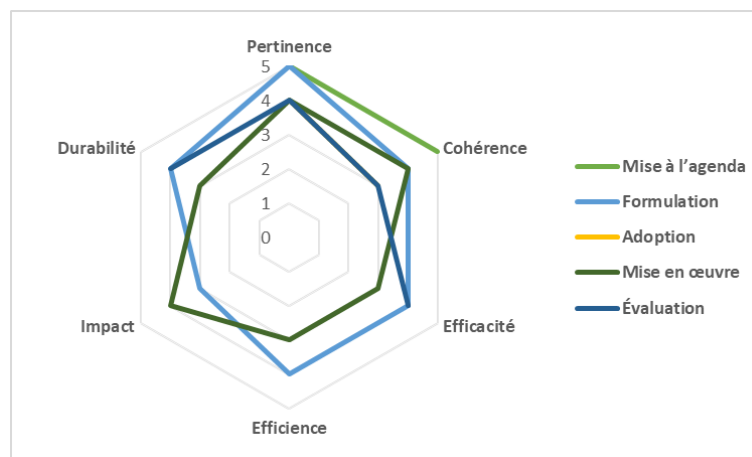


Figure 7 : Illustration de l'appréciation du Plan directeur d'irrigation du Rwanda

La formulation du plan s'appuie sur un diagnostic solide des contraintes hydriques et propose des solutions concrètes, comme l'irrigation goutte-à-goutte, la sélection de zones prioritaires pour le haricot et la priorisation des investissements techniquement et financièrement viables. Ces choix expliquent les scores élevés observés en efficacité, efficience, impact et durabilité.

L'adoption de la politique s'est réalisée grâce à une large concertation des parties prenantes, renforçant l'appropriation locale et institutionnelle. La mise en œuvre privilégie l'accompagnement ciblé, la mutualisation des ressources et la valorisation d'expériences pilotes dans l'Est. Enfin, la stratégie se distingue par un système de suivi-évaluation solide, incluant des indicateurs différenciés par filière et région, ainsi que par une planification à long terme et des mécanismes de financement pérennes.

4.1.5. Analyse de la prise en compte de l'adaptation de la filière haricot dans la stratégie de la Croissance verte et résilience climatique (GGCRS, mise à jour en 2021)

La Stratégie de la Croissance Verte et Résilience Climatique (Green Growth and Climate Resilience (GGCRS), actualisée en 2021) se distingue par une forte pertinence et cohérence

stratégique pour l'adaptation climatique, avec une attention spécifique à la province de l'Est et à la filière haricot. La politique obtient des scores maximaux lors des phases de mise à l'agenda et de formulation (Figure 8), traduisant l'alignement de la politique sur la Vision 2050, les NDC et les priorités internationales. Le diagnostic régional est solide et les mesures proposées sont concrètes : intensification agricole, semences résilientes, extension de l'irrigation et accompagnement ciblé des filières vulnérables.

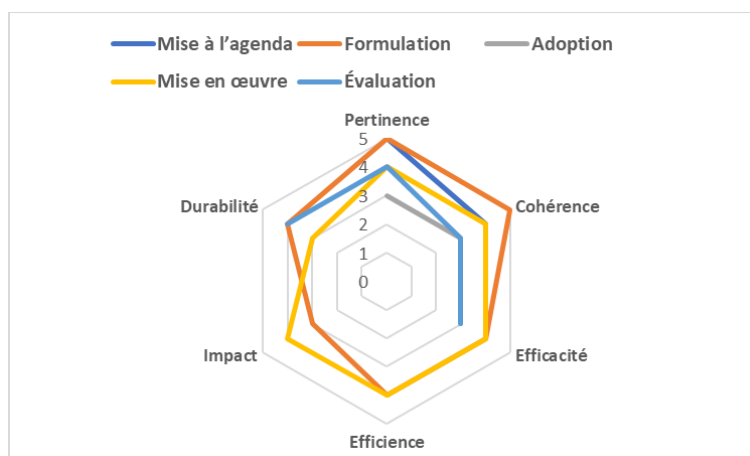


Figure 8 : Illustration de l'appréciation de la Stratégie de la Croissance Verte et Résilience Climatique (GGCRS) 2021

L'adoption a impliqué une large concertation multi-niveau, renforçant l'appropriation locale. La mise en œuvre repose sur des programmes d'action, l'innovation et la mobilisation de financements dédiés. Les dispositifs de suivi-évaluation, bien structurés, assurent la durabilité à travers des indicateurs sectoriels et l'apprentissage institutionnel. Si la GGCRS 2021 offre un cadre robuste et pertinent pour l'adaptation de la filière haricot, son efficacité dépendra de la capacité à traduire ces orientations ambitieuses en actions concrètes sur le terrain. La stratégie gagnerait à mieux préciser le ciblage des interventions en faveur du haricot dans la province de l'Est, à renforcer la coordination opérationnelle et à garantir un suivi différencié capable de s'ajuster rapidement aux besoins locaux. Sans cela, la cohérence affichée pourrait rester largement théorique pour les populations les plus exposées.

4.1.6. Analyse de la prise en compte de l'adaptation de la filière haricot dans la Stratégie d'intégration de l'environnement, des ressources naturelles et du changement climatique ENR&CC (2018)

L'analyse de la Stratégie d'intégration de l'environnement, des ressources naturelles et du changement climatique (ENR&CC Mainstreaming Strategy) 2018 révèle une politique pertinente et cohérente pour intégrer l'adaptation climatique dans les secteurs clés du

développement au Rwanda, avec un ciblage particulier sur les régions vulnérables comme la province de l'Est et les filières stratégiques telles que le haricot (figure 9).

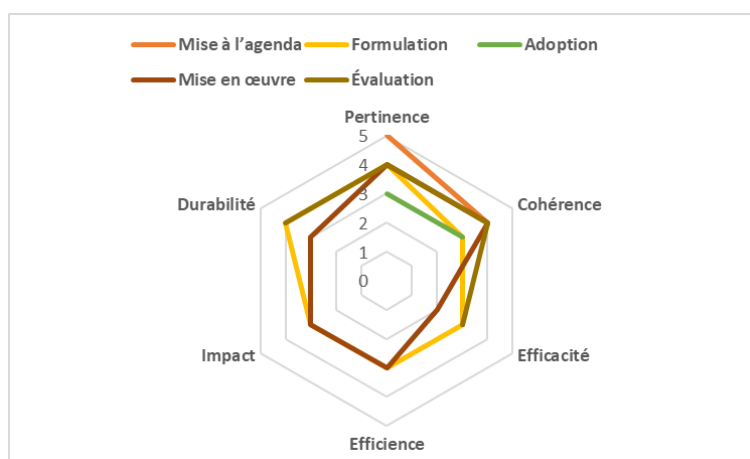


Figure 9 : Illustration de l'appréciation de la stratégie nationale d'intégration de l'environnement, des ressources naturelles et du changement climatique

La formulation de la stratégie s'appuie sur un diagnostic précis, identifiant les priorités régionales (gestion durable des terres, irrigation, innovation agricole et agroforesterie dans l'Est). Toutefois, les scores intermédiaires en efficacité et en efficience montrent que, bien que des mesures d'adaptation soient prévues, leur ciblage opérationnel sur la filière haricot et la province de l'Est reste général et perfectible, les dispositifs demeurant souvent larges et sectoriels.

L'adoption s'est appuyée sur un processus participatif, mobilisant les parties prenantes nationales et locales, mais sans volet entièrement dédié à la filière haricot, ce qui explique le score modéré à cette étape. La mise en œuvre s'organise autour de programmes intégrés, d'une coordination institutionnelle solide, de la mutualisation des ressources et de la promotion de l'innovation agricole dans les zones vulnérables, ce qui explique les scores satisfaisants observés en efficacité, efficience et impact dans le graphique radar.

Le suivi-évaluation repose sur un dispositif solide, incluant indicateurs, revues annuelles et ajustements institutionnels, d'où des scores élevés en durabilité et une attention forte à la gestion à long terme. La stratégie ENR&CC Mainstreaming se distingue par sa pertinence et son intégration institutionnelle, créant un cadre favorable à l'innovation et à la résilience climatique. Toutefois, l'analyse radar souligne la nécessité de renforcer l'opérationnalisation et la priorisation directe des mesures pour la filière haricot et la province de l'Est, afin de garantir un impact réel et une adaptation pleinement différenciée dans les zones les plus exposées.

4.1.7. Analyse de la prise en compte de l'adaptation de la filière haricot dans les Contributions Déterminées au Niveau National (NDC) 2020

L'analyse de la version actualisée des Contributions Déterminées au Niveau National (NDC) du Rwanda (2020), via la grille multicritère, met en avant une politique qui reconnaît la vulnérabilité de la province de l'Est et identifie le haricot parmi les cultures stratégiques pour la sécurité alimentaire. Les scores élevés en pertinence et cohérence lors de la mise à l'agenda et de la formulation (figure 10), reflètent un diagnostic solide et un bon alignement avec les cadres nationaux et internationaux (Vision 2050, ODD, GGCRS).

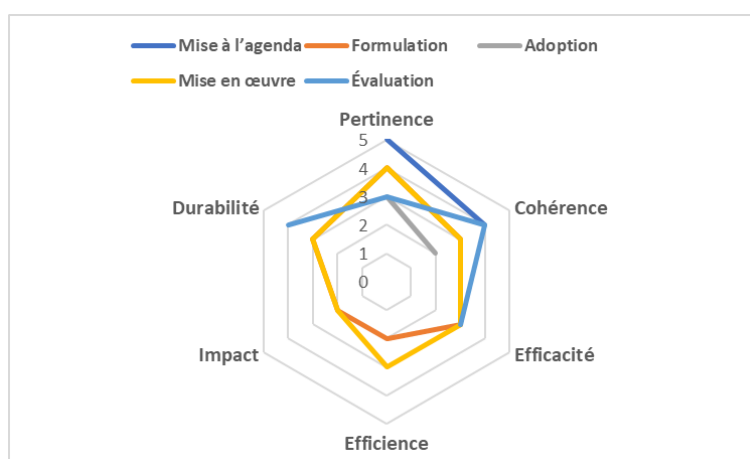


Figure 10 : Illustration de l'appréciation des Contributions Déterminées au Niveau National (NDC, 2020)

Cependant, la priorisation opérationnelle en faveur de la filière haricot et de la province de l'Est reste limitée. Les mesures d'adaptation, telles que les variétés résilientes, l'irrigation et la gestion durable de l'eau, sont présentes, mais demeurent générales, d'où des scores moyens en efficacité, efficience et impact. L'adoption affiche un score modéré, la participation étant réelle mais sans implication forte et ciblée des acteurs locaux de la filière haricot. La mise en œuvre reste perfectible : les dispositifs spécifiques pour le haricot ou l'Est sont peu détaillés, expliquant les notes moyennes sur le radar.

Le dispositif de suivi-évaluation, fondé sur un système MRV robuste, assure un suivi multi-niveaux mais manque encore de granularité pour la filière haricot et la province de l'Est, ce qui justifie des scores corrects mais non maximaux en évaluation et durabilité. La structuration stratégique et la reconnaissance formelle des enjeux du haricot et de l'Est (figure 10) rappelle que l'opérationnalisation, la priorisation réelle et le suivi différencié doivent être renforcés pour maximiser l'impact de la NDC sur l'adaptation de la filière haricot dans les zones les plus vulnérables.

L'analyse du cadre stratégique et institutionnel met en évidence la cohérence des politiques d'adaptation au Rwanda, mais aussi certaines limites dans leur mise en œuvre locale. Ces

constats justifient la nécessité d'une approche empirique fondée sur la modélisation, afin d'évaluer de manière quantitative l'influence des facteurs agricoles, climatiques et géographiques sur la productivité du haricot dans la Province de l'Est.

4.2. Modélisation du rendement du haricot dans la Province de l'Est du Rwanda

4.2.1. Caractérisation descriptive des données agronomiques, climatiques et géographique

- Synthèse statistique des variables principales

L'analyse statistique (tableau 11 en annexe) révèle une grande variabilité dans les conditions de production agricole de la province. Les superficies cultivées et récoltées varient fortement, avec des moyennes autour de 11 000 ha (médiane 13 841 ha, écart-type supérieur à 8 600 ha, minimum 0, maximum plus de 31 000 ha), témoignant d'importants écarts entre districts. La production totale moyenne est de 8 376 tonnes (médiane 9 676 t, écart-type 7 067 t, maximum 31 124 t), et le rendement moyen s'établit à 766 kg/ha (médiane 729 kg/ha), mais fluctue fortement (écart-type 353 kg/ha, minimum 0, maximum 2 168 kg/ha), soulignant la forte hétérogénéité spatiale et temporelle des performances agricoles. L'adoption des semences améliorées reste très faible en moyenne (0,18 %), tout comme celle des engrais inorganiques (1,7 %), des pesticides (1,87 %) et de l'irrigation (1,31 %), malgré des pics locaux (jusqu'à 34,7 % d'irrigation ou 33,2 % de pesticides dans certains districts). En revanche, l'utilisation d'engrais organique (7,94 % en moyenne, maximum 65,8 %) et la protection contre l'érosion (10,2 % en moyenne, maximum 68,8 %) sont plus répandues, mais restent très inégalement réparties.

Du côté climatique, la température moyenne de l'air est stable (21,35 °C en moyenne, écart-type 0,81 °C), de même que la température minimale (16,34 °C) et maximale (27,23 °C), tandis que les précipitations présentent une variabilité marquée (moyenne 18,8 mm, écart-type 13,4 mm, maximum 51,1 mm). L'humidité relative varie de 40 % à 74 % (moyenne 62 %), et le SPI saisonnier standardisé, centré sur 0 mais très dispersé (écart-type 0,96, de -1,77 à +2,63), met en évidence l'alternance d'épisodes secs et humides. Enfin, l'altitude des zones agricoles oscille de 1 358 à 1 653 m (moyenne 1 481 m, écart-type 98 m), traduisant une diversité géographique notable susceptible d'influencer les conditions agro-écologiques.

L'ensemble de ces chiffres confirme que la province de l'est est marquée par de fortes disparités dans les pratiques agricoles, les contraintes climatiques et les caractéristiques géographiques, ce qui légitime le recours à des modèles multifactoriels pour expliquer et optimiser les rendements.

- Analyse spatiale et temporelle de la productivité du haricot

Le rendement médian du haricot varie de 700 kg/ha (Bugesera, Gatsibo, Nyagatare, Rwamagana) à près de 950 kg/ha (Kirehe, Ngoma) (figure 11). La dispersion des rendements est forte dans tous les districts, avec des valeurs extrêmes dépassant parfois 2 000 kg/ha, et des minima proches de zéro, surtout à Gatsibo et Kayonza. Plusieurs districts (Rwamagana, Kayonza, Bugesera et Ngoma) affichent de nombreux outliers, traduisant des écarts importants entre producteurs. Cette forte variabilité confirme l'existence de disparités locales et le potentiel d'amélioration du rendement dans la province.

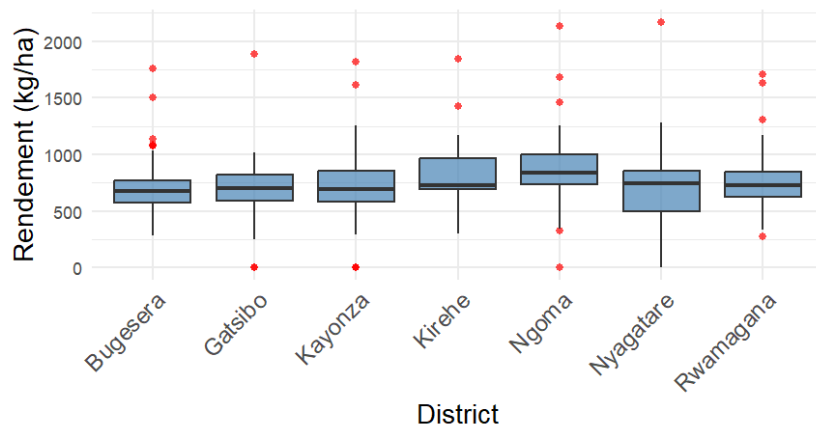


Figure 11 : Illustration du rendement par district sur la période de 2014-2024

- Analyse de la superficie cultivée en haricot par district

La répartition de la superficie cultivée en haricot dans différents districts (figure 12) montre que la médiane varie d'environ 9 000 hectares à Rwamagana à près de 18 000 hectares à Nyagatare, qui enregistre ainsi la plus grande superficie cultivée. Les districts de Kayonza et Gatsibo présentent également des superficies relativement importantes, accompagnées d'une forte dispersion. À l'inverse, Rwamagana et Bugesera se caractérisent par des superficies plus modestes et une variabilité plus faible. La largeur des boîtes indique que certains districts, notamment Nyagatare, connaissent une grande variation des superficies cultivées au fil du temps. Ces différences reflètent la diversité des contextes agricoles et peuvent influencer à la fois la production totale et les stratégies d'aménagement local.

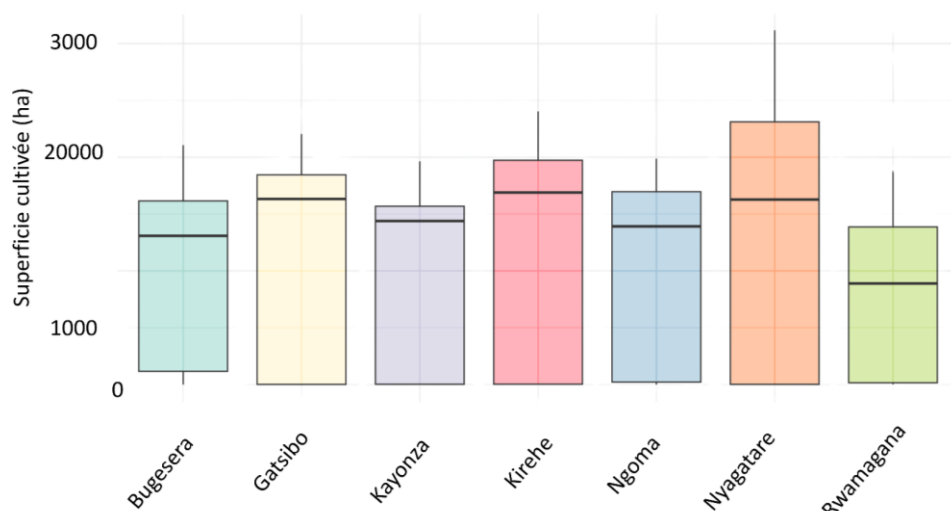


Figure 12 : Illustration de la superficie cultivée en haricot par district sur la période de 2014-2024

- Analyse du taux d'utilisation des pratiques agricoles par districts

L'usage moyen des principales pratiques agricoles par district (figure 13) montre que la protection contre l'érosion est la pratique la plus répandue dans tous les districts, atteignant plus de 20 % des agriculteurs à Bugesera et des niveaux importants à Nyagatare, Ngoma et Gatsibo. L'application d'engrais organique varie de 5 à 15 % selon les districts, avec des pics à Bugesera et Kirehe. Les autres pratiques (semences améliorées, engrais inorganique, pesticides, irrigation) restent peu adoptées partout, rarement au-dessus de 5 %. L'usage de l'irrigation et des pesticides demeure particulièrement marginal. Cette situation reflète une transition encore limitée vers l'intensification agricole moderne, avec de fortes disparités entre districts ; elle souligne le rôle dominant de la lutte antiérosion et de l'amendement organique dans les stratégies paysannes locales. Ces écarts d'adoption pourraient expliquer en partie les différences de rendements observées entre districts.

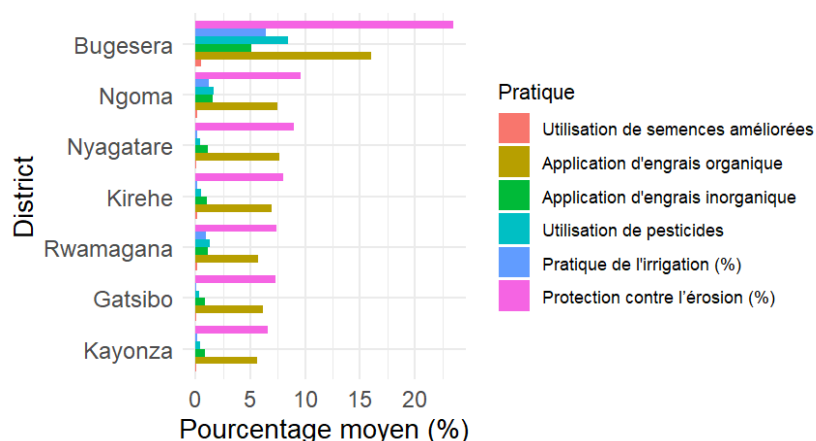


Figure 13 : Illustration de taux d'utilisation des pratiques agricoles par district de 2014-2024

- **Fréquence et intensité des événements climatiques extrêmes : distribution du stress hydrique**

la fréquence et l'intensité des sécheresses modérées à extrêmes, selon le SPI saisonnier standardisé, dans chaque district et pour différentes années agricoles (figure 14) montre que tous les districts ont connu au moins un épisode de sécheresse modérée ou sévère entre 2014 et 2023. Les années 2016, 2017 et 2020 ressortent comme particulièrement marquées par des sécheresses sévères ($SPI < -1,5$) dans plusieurs districts, notamment Kayonza, Ngoma et Gatsibo. Certains districts, comme Kayonza et Gatsibo, présentent une récurrence élevée des épisodes de sécheresse, tandis que d'autres, comme Bugesera ou Rwamagana, semblent avoir été relativement moins touchés. L'irrégularité des années affectées et la variabilité de l'intensité montrent que la sécheresse est un risque structurel important mais inégalement réparti dans la région, pouvant avoir un impact majeur sur la production agricole locale.

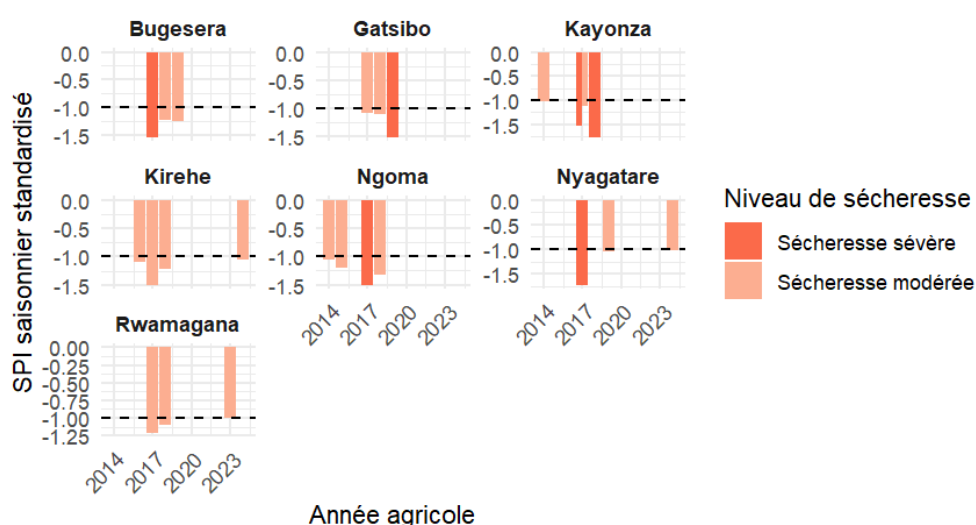


Figure 14 : Illustration de la sécheresse par district et année agricole sur la période de 2014 à 2024

4.2.2. Évaluation de la performance des modèles

L'analyse comparative des performances des trois modèles révèle des différences majeures en termes de capacité prédictive (figure 15). La régression linéaire multiple (RLM) présente des résultats très limités, avec un coefficient de détermination (R^2) de seulement 0,16, ce qui signifie qu'elle explique à peine 16 % de la variabilité des rendements observés. Les erreurs de prédiction sont également élevées ($RMSE = 355,5 \text{ kg/ha}$; $MAE = 254,3 \text{ kg/ha}$), illustrant l'incapacité de ce modèle à saisir la complexité des relations entre les variables climatiques, agronomiques et le rendement.

En revanche, le modèle Random Forest offre une amélioration significative. Son R^2 atteint 0,58, indiquant une meilleure prise en compte des interactions et non-linéarités entre les facteurs explicatifs. Les erreurs sont également réduites (RMSE = 252,0 kg/ha ; MAE = 179,1 kg/ha), ce qui atteste de sa précision accrue par rapport à la régression linéaire.

Le modèle XGBoost s'impose nettement comme le plus performant : il explique près de 80 % de la variance des rendements ($R^2 = 0,795$) et affiche les plus faibles erreurs (RMSE = 192,4 kg/ha ; MAE = 149,9 kg/ha). Cette supériorité est due à sa capacité à modéliser des relations complexes et à intégrer efficacement l'ensemble des informations disponibles, aussi bien climatiques qu'agronomiques.

En résumé, les résultats montrent que les méthodes d'ensemble, en particulier XGBoost, sont nettement plus adaptées que la régression linéaire classique pour prédire le rendement agricole dans ce contexte. Elles offrent des prédictions bien plus fiables et exploitables pour l'aide à la décision et l'évaluation des politiques agricoles.

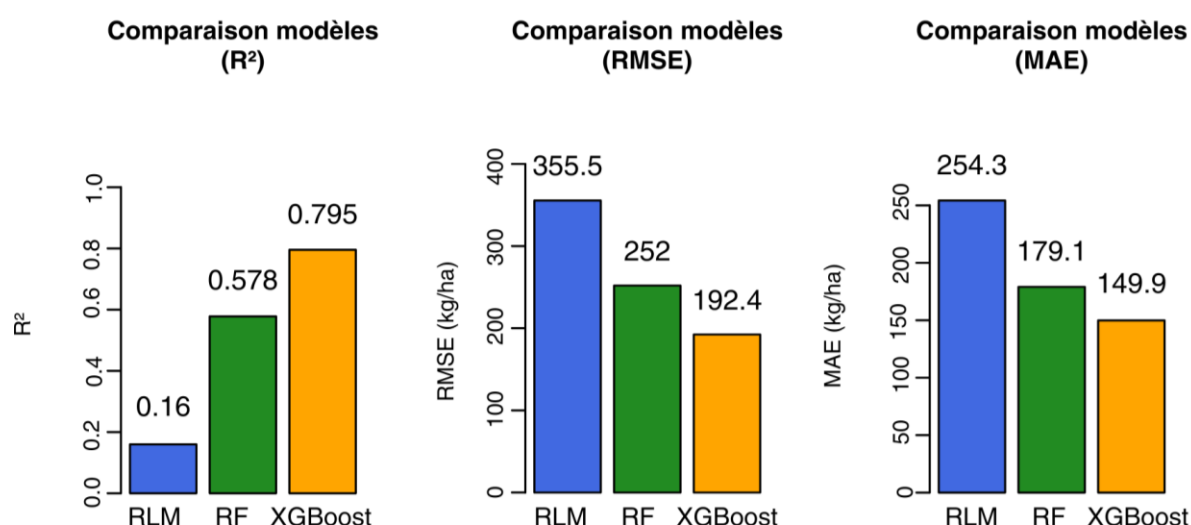


Figure 15 : Comparaison des performances prédictives des modèles RLM, Random Forest et XGBoost pour le rendement du haricot (R^2 , RMSE, MAE)

4.2.3. Evaluation de l'importance des variables explicatives suivant le modèle de SHAP (SHapley Additive exPlanations)

L'importance moyenne des variables dans la prédiction du rendement du haricot selon le modèle XGBoost, mesurée par la valeur moyenne absolue des valeurs SHAP ($\text{mean}(|\text{SHAP value}|)$) révèlent que l'humidité relative (%) est de loin la variable la plus influente, avec un impact moyen supérieur à 100 sur la sortie du modèle (figure 16). La température de l'air vient ensuite, avec une importance moyenne d'environ 90, suivie par le pourcentage d'agriculteurs utilisant des pesticides (environ 45), la température de surface du sol en journée (environ 30) et la pluviométrie (environ 25).

Les températures maximales et minimales, l'application d'engrais (organique et inorganique), ainsi que l'indice SPI, la protection contre l'érosion, les semences améliorées, l'irrigation et l'altitude, ont des importances moyennes nettement inférieures (généralement inférieures à 20), traduisant une contribution beaucoup plus faible à la variabilité du rendement selon le modèle.

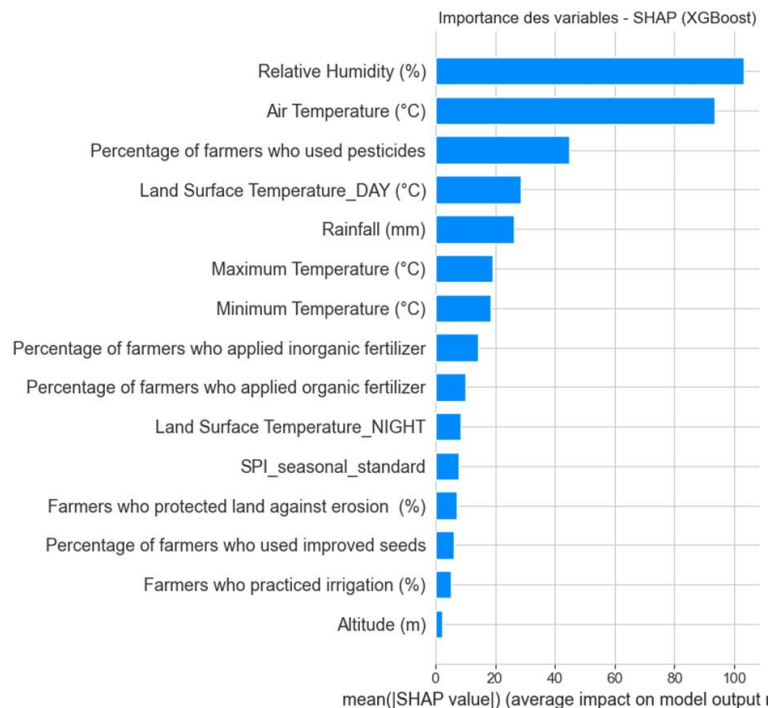


Figure 16 : Importance relative des variables explicatives dans la prédiction du rendement du haricot (SHAP, XGBoost)

- Le résumé du SHAP - XGBoost

L'analyse des valeurs SHAP issues du modèle XGBoost (figure 17) révèle que l'humidité relative et la pluviométrie sont les principaux facteurs positivement associés au rendement agricole, tandis que des températures élevées, qu'elles concernent l'air ou la surface du sol, ont un effet négatif marqué. Les pratiques agricoles, notamment l'utilisation de pesticides, contribuent également à l'augmentation du rendement, alors que l'impact de l'application d'engrais et des autres pratiques telles que l'irrigation ou la protection contre l'érosion demeure moins déterminant dans ce modèle. Ces résultats soulignent l'importance des conditions climatiques et invitent à promouvoir des solutions d'adaptation ciblées, tout en encourageant une gestion raisonnée des intrants agricoles.

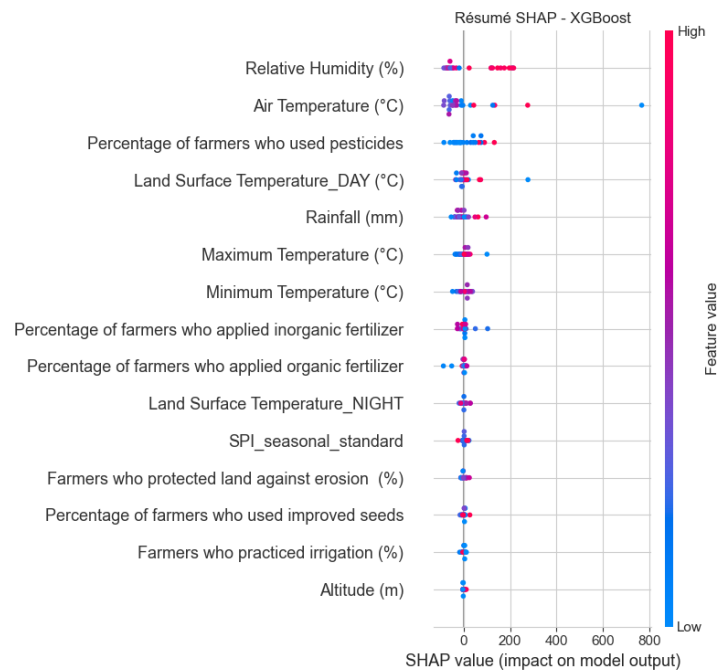


Figure 17 : Effet des variables sur le rendement - SHAP (XGBoost)

4.2.4. Analyse des Dépendances Partielles

L'analyse des dépendances partielles issues du modèle XGBoost (figure 20 en annexe) illustre l'effet marginal de chaque variable sur le rendement prédit du haricot. On remarque que plusieurs variables ont un effet non linéaire et parfois des seuils très marqués.

Parmi les variables climatiques, la température de l'air montre que le rendement reste stable entre 20,5 °C et 22 °C, puis augmente fortement au-delà de 22,5 °C. La température de surface du sol en journée a un effet positif jusqu'à environ 31 °C, puis tend à plafonner. Pour l'humidité relative, les rendements restent faibles et constants jusqu'à 60 %, puis augmentent rapidement à partir de ce seuil, atteignant un pic à plus de 900 kg/ha. Les précipitations (rainfall) ont également un effet croissant, surtout au-delà de 30 mm, où le rendement grimpe nettement. Le SPI saisonnier indique que les conditions humides (valeurs positives) sont associées à des rendements supérieurs.

Concernant les pratiques agricoles, l'utilisation de pesticides est liée à une forte hausse du rendement dès que le pourcentage de producteurs concernés dépasse 1 %. La protection contre l'érosion et l'application d'engrais inorganiques ou organiques montrent également un effet positif, mais surtout à partir de certains seuils (par exemple, plus de 7-8 % de producteurs pour l'érosion). L'effet de l'irrigation et des semences améliorées apparaît positif mais limité à de faibles niveaux d'adoption, avec un effet plateau rapidement atteint.

Pour les variables géographiques, une augmentation de l'altitude au-delà de 1 550 m est associée à une légère hausse du rendement.

Au global, ces graphiques montrent que l'effet des facteurs sur le rendement est rarement linéaire : des seuils d'effet, des plateaux ou des réponses en escalier sont fréquents. Les résultats confirment l'importance des précipitations, de l'humidité relative, de certaines pratiques agricoles (pesticides, lutte antiérosion, engrais) et de la température, tout en montrant que des effets maximaux ne sont atteints qu'au-delà de niveaux critiques d'adoption ou de conditions climatiques. Cela suggère la nécessité d'intensifier certains leviers techniques ou d'atteindre des niveaux suffisants pour observer des impacts significatifs sur la productivité du haricot.

Les résultats issus de la modélisation permettent d'identifier les déterminants majeurs du rendement et de mieux comprendre les leviers d'action pour renforcer la résilience agricole. Sur cette base, un plan provincial d'adaptation a été élaboré pour traduire les enseignements scientifiques en orientations stratégiques et en actions concrètes au niveau territorial.

4.3. Plan provincial d'adaptation au changement climatique pour la filière haricot

4.3.1. Diagnostic synthétique de la filière haricot dans la Province de l'Est

L'analyse des données, agro climatiques et de production met en évidence un ensemble de forces, faiblesses, vulnérabilités et opportunités qui caractérisent la filière haricot dans la Province de l'Est (tableau 1). Ce diagnostic constitue la base de la formulation du plan provincial d'adaptation.

Tableau 1 : Diagnostic de la filière haricot dans la Province de l'Est

FORCES	FAIBLESSES
<ul style="list-style-type: none"> -importance socio-économique stratégique : principale source de protéines végétales, pilier de la sécurité alimentaire et source de revenus. - savoir-faire paysan : maîtrise technique héritée de plusieurs générations. -organisation collective : coopératives et associations facilitant l'accès aux intrants et marchés. -soutien institutionnel : alignement avec PSTA5, NAP et NST2. 	<ul style="list-style-type: none"> -pratiques culturelles peu adaptées aux changements climatiques : forte dépendance à la pluie. -accès limité aux intrants de qualité : semences améliorées et fertilisants coûteux ou indisponibles. -infrastructures de stockage insuffisantes : pertes post-récolte élevées. -capacités organisationnelles hétérogènes dans les coopératives.
MENACES	OPPORTUNITÉS
<ul style="list-style-type: none"> -sécheresses fréquentes et irrégularité des pluies. -érosion hydrique et perte de fertilité des sols. -maladies et ravageurs favorisés par les stress climatiques. -dépendance quasi-totale à la pluviométrie. 	<ul style="list-style-type: none"> -disponibilité de variétés améliorées résistantes à la sécheresse et aux maladies. -programmes d'agriculture intelligente face au climat. -potentiel pour le développement de périmètres irrigués. -intérêt croissant du secteur privé pour la transformation et la commercialisation.

4.3.2. Axes stratégiques et mise en œuvre du plan provincial d'adaptation de l'haricot au changement climatique

Cette section (tableau 2) présente de manière intégrée les axes stratégiques, le plan de mise en œuvre et du programme d'adaptation au changement climatique pour la filière haricot au niveau provincial. L'objectif est de fournir un cadre cohérent qui relie directement les priorités stratégiques aux actions concrètes, aux responsabilités institutionnelles, aux ressources nécessaires et aux mécanismes de suivi.

Tableau 2 : Plan provincial d'adaptation de la filière haricot : actions et priorités par district

Axe stratégique	Objectif	Actions prioritaires	Acteurs clés	Calendrier	Indicateurs de suivi et ajustement	Priorités spécifiques par district	Coût estimatif
Axe 1 : Renforcement des pratiques agricoles résilientes	Adapter les systèmes de production du haricot aux conditions climatiques changeantes afin de maintenir et améliorer les rendements.	<p>1.Diffuser et promouvoir des variétés tolérantes à la sécheresse et aux maladies.</p> <p>2.Techniques de conservation des sols (courbes de niveau, paillage, agroforesterie).</p> <p>3.Rotation culturale et association avec cultures résistantes.</p> <p>4.Formation aux pratiques agricoles intelligentes face au climat.</p>	MINAGRI, ISAR, Meteo Rwanda, ONG agricoles, coopératives	Court terme (0-2 ans)	<p>•% de producteurs adoptant les nouvelles variétés.</p> <p>•Rendements moyens en période de sécheresse.</p> <p>Fréquence : suivi semestriel, ajustement annuel selon météo et rendement.</p>	<p>Ngoma : irrigation et semences résistantes à la sécheresse.</p> <p>Kirehe : introduction de variétés tolérantes aux maladies.</p> <p>Kayonza : conservation des sols en zones de pente.</p>	<p>Irrigation : 2 000-2500 USD/ha.</p> <p>Formation : 200 USD/groupe.</p> <p>Aménagement sols : 1 000-1 500 USD/ha.</p>

Axe 2 : Gestion des risques climatiques et environnementaux	Réduire l'impact des aléas climatiques sur la production et les revenus.	1.Développer l'irrigation de proximité. 2.Systèmes d'alerte précoce et prévisions météorologiques renforcées. 3.Aménagement des bassins versants. 4.Lutte intégrée contre les maladies et ravageurs.	MINAGRI, districts, Meteo Rwanda, agences de gestion de l'eau, coopératives	Court et moyen terme (0-4 ans)	<ul style="list-style-type: none"> •Nombre de systèmes d'alerte installés. •Surface irriguée (ha) par district. Fréquence : suivi trimestriel, ajustement après chaque saison agricole. 	Ngoma : systèmes d'alerte et irrigation. Kirehe : lutte intégrée contre ravageurs. Kayonza : aménagement anti-érosif.	Irrigation : 2 000-2 500 USD/ha. Système d'alerte : 5 000 USD/unité. Aménagement anti-érosif : 1 000-1 500 USD/ha.
Axe 3 : Gouvernance, coordination et renforcement des capacités locales	Améliorer la gestion collective et la participation communautaire.	1.Renforcement des coopératives. 2.Cadre provincial de coordination multi-acteurs. 3.Participation active des producteurs. 4.Partenariats public-privé pour transformation et commercialisation.	MINAGRI, autorités provinciales et district, coopératives, secteur privé, ONG	Moyen terme (2-4 ans)	<ul style="list-style-type: none"> •Nombre de coopératives renforcées. •Nombre de réunions multi-acteurs tenues. Fréquence : suivi annuel, ajustement tous les 2 ans. 	Gatsibo : organisation des producteurs et accès marché. Rwamagana : partenariats pour transformation.	Formation coopérative : 200 USD/groupe. Infrastructures marché : À déterminer.

Axe 4 : Innovation, suivi-évaluation et recherche appliquée	Utiliser les données scientifiques et les innovations pour améliorer l'adaptabilité.	1.Système provincial de suivi-évaluation. 2.Modélisation climatique pour la planification. 3.Recherche participative. 4.Base de données géoréférencée.	ISAR, universités, Meteo Rwanda, MINAGRI, partenaires techniques et financiers	Long terme (4-5 ans)	<ul style="list-style-type: none"> •Base de données mise à jour. •Nombre de décisions planifiées avec modélisation. Fréquence : suivi annuel, ajustement selon résultats de recherche.	Rwamagana : suivi post-récolte et données sur stockage. Gatsibo : base de données production/sols. Kirehe : surveillance maladies via données climatiques.	Système de suivi : À déterminer. Base de données : À déterminer.
---	--	---	--	----------------------	--	--	---

4.3.3. Stratégie de mobilisation des ressources pour la mise en oeuvre du plan provincial

La mise en œuvre du plan d'adaptation nécessite des ressources financières, matérielles et humaines substantielles. La mobilisation des ressources doit donc être diversifiée, combinant sources internes, externes et innovantes, pour garantir la pérennité des actions.

Tableau 3 : La stratégie de mobilisation de ressources

Type de ressource	Description	Sources potentielles	Utilisation prévue	Exemple concret par district
Ressources internes	Budgets publics dédiés à l'adaptation climatique dans la filière haricot	Province de l'Est, budgets de districts	Financement des actions prioritaires locales (irrigation, stockage, formation)	Ngoma : financement public pour systèmes d'irrigation à pompage solaire Kirehe : budget district pour lutte contre les ravageurs Kayonza : financement pour aménagement antiérosif
	Contributions des coopératives et associations de producteurs	Coopératives, groupements agricoles	Cofinancement des infrastructures légères et formations	Rwamagana : coopératives finançant l'achat collectif de semences améliorées Gatsibo : cotisations pour entrepôts communautaires
	Redevances agricoles	Fonds local alimenté par une taxe sur les ventes de haricot	Irrigation, stockage, lutte antiérosive	Bugesera : fonds pour entrepôt de stockage post-récolte
Ressources externes	Financement multilatéral et bilatéral	Fonds Vert Climat, FAO, FIDA, Banque mondiale, PNUD, GIZ	Projets d'infrastructure, renforcement des capacités, systèmes d'alerte	Ngoma : Fonds Vert Climat pour extension de l'irrigation Kirehe : FIDA pour projets de lutte intégrée Rwamagana : FAO pour formation en pratiques climato-intelligentes
	ONG internationales	One Acre Fund, World Vision, CRS	Fourniture de semences, formation technique, équipement	Gatsibo : One Acre Fund pour distribution de semences résilientes Bugesera : World Vision pour équipements de stockage

	Partenariats public-privé	Entreprises agroalimentaires locales et régionales	Transformation, commercialisation, logistique	Rwamagana : PPP pour unité de transformation de haricots Ngoma : partenariat avec commerçants régionaux pour garantir l'achat
Mécanismes innovants	Financement climatique	Fonds carbone, initiatives d'agroforesterie	Projets de séquestration de carbone et conservation des sols	Kayonza : agroforesterie avec coopératives pour crédits carbone
	Microfinance agricole	IMF locales, coopératives	Crédit pour intrants, outils et équipements	Kirehe : microcrédits pour pompes d'irrigation Gatsibo : crédit pour outils antiérosifs
	Assurance agricole	Compagnies d'assurance, projets pilotes	Couverture des pertes dues aux aléas climatiques	Ngoma : assurance sécheresse pour producteurs

4.3.4. Plan d'action pour la mobilisation de ressources

Le plan d'action opérationnel décrit la stratégie de mobilisation des ressources nécessaires à la mise en œuvre du plan provincial d'adaptation au changement climatique pour la filière haricot (Tableau 4). Il repose sur les priorités définies dans les chapitres 1 et 2 et précise les principales étapes, les acteurs responsables, les échéances ainsi que des exemples d'application adaptés à chaque district.

Tableau 4 : Le plan d'action opérationnel pour la mobilisation de ressources

Étape	Action	Responsable	Échéance	Indicateur	Exemple concret par district
1	Cartographier les besoins financiers par axe stratégique et par district	Cellule technique provinciale	3 mois	Plan de financement détaillé validé	Ngoma : besoin élevé en irrigation solaire Kirehe : estimation coûts lutte contre ravageurs Kayonza : budget pour aménagement antiérosif

2	Identifier et cibler les sources de financement adaptées	Comité de pilotage provincial	6 mois	Liste des sources validée et priorisée	Ngoma : Fonds Vert Climat Bugesera : PPP pour stockage Rwamagana : FAO pour formation
3	Élaborer et soumettre des propositions de projets	Équipe technique provinciale + partenaires	12 mois	Nombre de projets soumis	Kirehe : projet lutte intégrée financé par FIDA Gatsibo : projet semences résilientes avec ONG
4	Conclure les accords de financement et de partenariat	Gouvernorat de province et districts	Permanent	Nombre d'accords signés	Rwamagana : accord PPP pour unité de transformation Ngoma : partenariat avec commerçants régionaux
5	Suivre l'utilisation et l'impact des fonds	Cellule de suivi-évaluation	Permanent	% de fonds utilisés efficacement et indicateurs de performance	Gatsibo : suivi adoption semences résistantes Kayonza : suivi efficacité mesures antiérosives

4.3.5. Mécanisme de suivi-évaluation du plan provincial

Le mécanisme de suivi-évaluation du plan provincial d'adaptation au changement climatique dans la filière haricot est structuré autour de plusieurs composantes clairement définies (tableau 5). Il détaille pour chacune d'elles la description, les acteurs responsables, la fréquence de mise en œuvre, les indicateurs de performance ainsi que des exemples d'application au niveau des districts, en cohérence avec les priorités et les résultats présentés dans les chapitres 1 et 2.

Tableau 5 : Mécanisme de suivi évaluation du plan provincial d'adapation

Composante	Description	Responsable	Fréquence	Indicateur	Exemple concret par district
Collecte des données	Enquêtes de terrain, registres coopératifs, stations météo locales, rapports des agents de vulgarisation agricole.	Agents de vulgarisation, Cellule S&E provinciale	Trimestrielle (technique), Annuelle (impact)	Nombre d'enquêtes réalisées, couverture de la collecte (%)	Ngoma : données météo et irrigation relevées chaque trimestre Kirehe : enquêtes sur infestation ravageurs

Analyse et reporting	Consolidation provinciale et comparaison avec objectifs fixés et résultats passés.	Cellule S&E provinciale	Semestrielle	Rapports semestriels produits et validés	Rwamagana : analyse évolution rendement/ha Gatsibo : suivi adoption semences résilientes
Indicateurs techniques	Suivi des paramètres agricoles clés.	Cellule S&E + Coopératives	Trimestrielle	Rendement moyen, taux d'adoption semences résistantes, surface irriguée	Kayonza : suivi superficie sous irrigation Bugesera : suivi réduction pertes post-récolte
Indicateurs socio-économiques	Suivi de l'impact sur les revenus et la sécurité alimentaire.	Cellule S&E + Partenaires ONG	Annuelle	Revenus moyens, pertes post-récolte, accès au marché	Gatsibo : suivi hausse revenu ménages Ngoma : suivi prix de vente haricot

Indicateurs climatiques/ environnementaux	Mesure de l'impact environnemental des pratiques adoptées.	Cellule S&E + Services environnementaux	Annuelle	Taux couverture végétale, érosion des sols, séquestration carbone	Kirehe : suivi érosion sur parcelles aménagées Kayonza : suivi arbres plantés agroforesterie
Boucle de rétroaction	Réunions annuelles pour ajuster les priorités et diffuser les résultats.	Comité de pilotage provincial	Annuelle	Nombre de réunions, recommandations intégrées	Rwamagana : ajustement plan irrigation après sécheresse Bugesera : ajout mesures stockage suite pertes élevées

V. Discussion

5.1. Analyse des politiques d'adaptation du Rwanda

L'analyse transversale des politiques publiques d'adaptation au Rwanda révèle une forte cohérence stratégique, avec un alignement prononcé sur la Vision 2050, les ODD, la NDC. La filière haricot et la province de l'Est y sont clairement reconnues comme priorités nationales face aux défis climatiques. Cette orientation s'inscrit dans la dynamique plus large observée en Afrique de l'Est et australe, où de nombreux pays promeuvent la résilience agricole via des mesures structurantes telles que l'accès aux semences résilientes, l'extension de l'irrigation, la digitalisation des pratiques agricoles et le soutien post-récolte (Rubyogo et al., 2015; Johansson et al., 2019; Kim et al., 2022). La pertinence et la cohérence élevées de ces politiques s'expliquent par la convergence des diagnostics sur la vulnérabilité accrue des systèmes de culture, la baisse des rendements, l'augmentation de la variabilité climatique et la nécessité d'innover pour garantir la sécurité alimentaire (Tangwa et al., 2020; Kori et al., 2024).

Toutefois, l'analyse critique montre que le ciblage des mesures, la différenciation territoriale et sectorielle ainsi que l'opérationnalisation concrète restent des points faibles. Comme dans d'autres pays de la région, le passage du cadre stratégique à l'action sur le terrain s'accompagne de difficultés à adapter les dispositifs aux réalités locales, à la diversité des producteurs, et à la spécificité des filières ou districts (Ingabire et al., 2017; Shikuku et al., 2017; Onzima et al., 2020). Le manque de granularité du suivi-évaluation, déjà pointé au Rwanda, est un problème courant en Afrique, car peu de dispositifs permettent d'apprécier finement l'impact par culture ou par territoire (Jiri & Mafongoya, 2017; Kim et al., 2022). Les expériences du Global-GAP au Kenya et les approches collectives en Ouganda ou Tanzanie montrent que l'efficacité de l'adaptation dépend d'un accompagnement technique renforcé, d'une structuration des chaînes de valeur, et d'une intégration des spécificités locales dans la conception et la mise en œuvre des politiques (Otieno et al., 2017; Ombogoh et al., 2018).

La réussite des interventions dépend également de l'appropriation locale, du renforcement de la gouvernance participative et de l'inclusion des groupes vulnérables, notamment les femmes, qui jouent un rôle clé dans la production et la commercialisation du haricot (Ombogoh et al., 2018; Amosah et al., 2023). Plusieurs études africaines recommandent de renforcer la concertation multi-niveaux, la formation, l'accès à l'information climatique, le financement local et la création de groupes de producteurs pour améliorer la diffusion et la réussite des stratégies d'adaptation (Shikuku et al., 2017; Johansson et al., 2019; Kori et al., 2024).

En somme, l'exemple rwandais illustre les avancées notables de l'Afrique de l'Est en matière de planification stratégique, mais montre aussi que l'efficacité et la durabilité de l'adaptation de la filière haricot, en particulier dans la province de l'Est restent conditionnées à la capacité de territorialiser et de différencier les dispositifs, d'assurer un suivi-évaluation fin, et de renforcer l'autonomisation des acteurs locaux. Cette conclusion rejoint largement les constats tirés dans d'autres contextes africains : seule une adaptation véritablement ancrée dans les territoires et sensible aux spécificités des filières permettra d'atteindre des résultats durables et équitables face au changement climatique (Ingabire et al., 2017; Jiri & Mafongoya, 2017; Ombogoh et al., 2018; Kim et al., 2022; Kori et al., 2024).

5.2. La modélisation de l'impact des variables agricoles, climatiques et géographiques sur le rendement du haricot dans la province de l'Est du Rwanda

L'influence croisée des pratiques agricoles, des variables climatiques et géographique sur le rendement du haricot constitue un enjeu fondamental pour la compréhension des dynamiques agricoles dans l'Est du Rwanda, mais aussi pour la région de l'Afrique de l'Est plus largement. La présente étude corrobore que l'explication de la variabilité du rendement du haricot doit s'envisager comme un système multifactoriel et dynamique.

D'abord, les pratiques agricoles se révèlent être un levier essentiel pour l'amélioration des rendements, même si leur effet est fortement conditionné par les contextes locaux et leur niveau d'adoption. La présente analyse confirme l'importance statistique de la lutte anti érosion, de l'utilisation de pesticides, et dans une moindre mesure, de l'irrigation, de la fertilisation et des semences améliorées. Ce constat rejoint largement la littérature, qui souligne que l'introduction de variétés améliorées et la fertilisation (organique ou inorganique) constituent des stratégies efficaces pour augmenter la productivité des légumineuses, tout en réduisant la vulnérabilité aux maladies et à la variabilité climatique (Kaizzi et al., 2018; Franke et al., 2019; Rurangwa et al., 2020). Toutefois, le faible taux d'adoption de ces pratiques observés dans la Province de l'Est (moins de 2 % pour l'irrigation, les pesticides, ou les semences améliorées) limite leurs impacts positifs à l'échelle du territoire. D'autres études menées dans des contextes similaires, notamment en Éthiopie et au Burundi, ont montré que l'adoption à grande échelle de ces innovations techniques peut permettre des gains de rendement de l'ordre de 20 à 60 % selon les cas (Larochelle et al., 2019)

L'importance de la gestion phytosanitaire, notamment à travers l'usage de pesticides, ressort nettement. Plusieurs études régionales mettent en avant que les pertes dues aux maladies et aux ravageurs peuvent atteindre 30 à 50 % de la production, et que la lutte raisonnée contre ces menaces s'avère indispensable pour stabiliser et accroître la production (Dushimeyesu et al., 2023). Cependant, l'accès aux intrants et le manque d'accompagnement technique

freinent encore l'efficacité de cette gestion dans le contexte rwandais, ce qui souligne la nécessité d'investissements ciblés dans l'information et la vulgarisation agricole (Narcisse et al., 2019).

La fertilisation, bien qu'encore sous-utilisée sous forme inorganique, s'avère décisive lorsque correctement intégrée. Les méta-analyses menées sur le continent montrent que l'application d'engrais adaptés peut multiplier les rendements par 2 à 3, à condition que les doses, les types et le calendrier d'application soient ajustés localement (Kaizzi et al., 2018; Rurangwa et al., 2020). Dans le cas du haricot, l'apport d'azote et de phosphore est particulièrement recommandé pour soutenir la phase végétative et la fixation symbiotique, en complément des pratiques organiques (fumure animale ou compost) (Franke et al., 2019; Rurangwa et al., 2020).

Ensuite, les variables climatiques apparaissent comme des facteurs de premier ordre, avec une influence qui s'exerce à la fois sur le court terme (sécheresse, anomalies de précipitation) et le long terme (tendances de température). Les modèles d'apprentissage automatique confirment la primauté de l'humidité relative, de la température de l'air, et de la pluviométrie dans l'explication de la productivité du haricot, résultats corroborés par des études à large échelle sur les légumineuses en Afrique (Muhire et al., 2015; Tangwa et al., 2020; Umutoni & Limbu, 2022). L'analyse des paramètres hydriques révèle que la variabilité des précipitations et de l'humidité relative influence de manière significative la productivité du haricot dans la Province de l'Est. Ces résultats confirment les travaux de Mupenzi et al. (2020) et de Mukamugema et al. (2021), qui soulignent le rôle déterminant des conditions hydriques dans la performance des légumineuses au Rwanda. La gestion de l'eau, à travers des pratiques telles que la conservation des sols, l'irrigation localisée ou le paillage, apparaît ainsi comme un levier essentiel pour renforcer la résilience des systèmes de culture du haricot face à la variabilité climatique. Les analyses de dépendance partielle mettent en avant des seuils d'effet : par exemple, une humidité relative dépassant 60 % et des précipitations cumulées suffisantes (> 30 mm en phase de croissance) conditionnent les pics de rendement, tandis que les sécheresses modérées à sévères provoquent des baisses immédiates et parfois durables de la production. Les travaux de Tangwa et al. (2020) et Umutoni & Limbu (2022) soulignent la sensibilité particulière du haricot aux stress hydriques, qui perturbent la floraison et la fixation azotée.

Les épisodes de sécheresse récurrents observés dans plusieurs districts de la province de l'Est, notamment Ngoma, Kirehe, Kayonza et Bugesera, entre 2014 et 2020 coïncident avec les années de faible rendement, confirmant l'importance d'une gestion proactive du risque climatique à l'échelle locale. À ce titre, le développement de l'irrigation, des pratiques de conservation de l'eau (paillage, semis direct) et le choix de variétés plus tolérantes au déficit hydrique apparaissent comme des leviers stratégiques, largement reconnus par la recherche, pour renforcer la résilience (Hitimana et al., 2021).

Enfin, les variables géographiques, et en particulier l'altitude, modulent les conditions agro-écologiques locales. L'altitude influence la température, l'humidité, la structure du sol et donc la capacité de production, mais cet effet demeure secondaire par rapport aux variables climatiques et aux pratiques agricoles, comme l'indique aussi la synthèse de Tangwa et al. (2020). Il est toutefois reconnu que les districts situés à plus haute altitude présentent des rendements potentiellement plus élevés, sous réserve d'un accès suffisant à l'eau et à la fertilité, mais peuvent aussi être exposés à d'autres risques comme le froid ou l'érosion accrue (Tangwa et al., 2020).

L'intégration simultanée de ces trois dimensions dans les modèles statistiques et de machine learning constitue un progrès méthodologique majeur pour la compréhension et la prédiction des rendements, permettant d'identifier les facteurs réellement prioritaires selon le contexte. Les analyses récentes sur l'agriculture est-africaine ont montré la supériorité de ces approches multifactorielle et non linéaires par rapport aux modèles traditionnels, ouvrant la voie à leur généralisation pour la gestion intelligente du secteur haricot (Okorie et al., 2023).

En résumé, cette étude, soutenue par la littérature internationale, montre que les meilleures perspectives d'optimisation des rendements résident dans l'intensification ciblée des pratiques innovantes (irrigation, protection, fertilisation, variétés améliorées), combinée à une gestion adaptative des risques climatiques et une prise en compte du contexte géographique. Les efforts doivent porter sur la vulgarisation, l'accès aux intrants, le renforcement des dispositifs de suivi climatique et la promotion de modèles d'aide à la décision pour une agriculture de précision et résiliente.

5.3. Le plan provincial d'adaptation de la filière haricot face au changement climatique

Le plan provincial d'adaptation élaboré à partir des résultats constitue un cadre cohérent et opérationnel visant à renforcer la résilience de la filière haricot face au changement climatique dans la Province de l'Est du Rwanda. Il s'inscrit dans la continuité des politiques nationales telles que la National Strategy for Transformation (NST2, 2024-2029) et le Plan stratégique pour la transformation de l'agriculture (PSTA5, 2024-2029), qui placent la résilience climatique au cœur de la modernisation du secteur agricole (MINAGRI, 2023 ; MINICOFIN, 2024). Ce plan traduit concrètement la volonté du pays d'ancrer l'action publique dans les réalités locales, conformément à la logique de décentralisation prônée par la Vision 2050 et la Stratégie de Croissance Verte et de Résilience Climatique (GGCRS, 2021), qui vise un développement bas carbone et inclusif. Il s'aligne également sur la Stratégie d'intégration de l'environnement, des ressources naturelles et du changement climatique (ENR&CC Mainstreaming Strategy, REMA, 2018), qui recommande d'intégrer les enjeux environnementaux et climatiques dans les politiques sectorielles et territoriales.

L'un des apports majeurs du plan provincial est sa capacité à articuler la modélisation empirique et la planification territoriale. Les résultats obtenus à l'aide du modèle XGBoost ont mis en évidence le rôle déterminant de l'humidité relative, de la température de l'air, des précipitations, de la température de surface et de l'usage des pesticides dans la variabilité du rendement du haricot. Ces éléments ont orienté la conception des axes stratégiques du plan, notamment la diffusion de variétés tolérantes à la sécheresse, la promotion de pratiques de conservation des sols et la gestion rationnelle de l'eau. Ce lien direct entre la production scientifique et la planification publique illustre l'approche fondée sur les données préconisée par la FAO (2017, 2021) et par le PNUD (2019), selon lesquels les politiques d'adaptation efficaces doivent reposer sur des diagnostics empiriques fiables et un suivi régulier des impacts. Dinku et al. (2018) soulignent également que les politiques climatiques en Afrique de l'Est gagnent en efficacité lorsqu'elles s'appuient sur des systèmes d'information climat-agriculture bien coordonnés, ce que le plan provincial tente de mettre en œuvre à travers la mobilisation de Meteo Rwanda et du Rwanda Agriculture Board.

La structure du plan, fondée sur des axes à la fois techniques et institutionnels, reflète une conception intégrée de la résilience agricole. Les actions proposées combinent l'innovation agronomique, le renforcement institutionnel et la gouvernance participative, rejoignant ainsi les constats de Rubyogo, Sperling, Nasirumbi et Buruchara (2015), qui démontrent que la résilience des filières vivrières en Afrique de l'Est repose sur la diffusion de variétés améliorées et la formation continue des producteurs. L'intégration des coopératives et des organisations paysannes dans la mise en œuvre renforce la pertinence du plan, en cohérence avec les analyses d'Ingabire, Mutware et Niyonkuru (2017), qui plaident pour une approche participative de l'adaptation agricole au Rwanda. En différenciant les priorités selon les districts, par exemple, l'irrigation solaire à Ngoma ou les aménagements antiérosifs à Kayonza, le plan répond à la nécessité d'une adaptation fine et contextualisée, conforme aux recommandations de la FAO (2021) sur la planification territoriale de la résilience.

Sur le plan de la gouvernance, le dispositif de coordination entre le Ministère de l'Agriculture et des Ressources animales, le Rwanda Agriculture Board, Meteo Rwanda, les province et les coopératives correspond à la logique de coopération multi-niveaux encouragée par la GGCRS (2021). Ce modèle de gouvernance intégrée vise à assurer la cohérence entre politiques publiques et actions communautaires. Cependant, plusieurs études soulignent les limites institutionnelles auxquelles font face les gouvernements locaux dans la gestion de l'adaptation. Ombogoh, Ayuya et Gido (2018) montrent que la réussite des programmes climatiques dépend fortement de la clarté des responsabilités et de la disponibilité de compétences techniques locales, un enjeu également évoqué par Jiri et Mafongoya (2017) dans leur analyse de la résilience des petits producteurs en Afrique australe. Dans la Province de l'Est, où les capacités varient considérablement d'un district à l'autre, la durabilité du plan

provincial dépendra de la consolidation des ressources humaines et financières au niveau local.

La stratégie de mobilisation des ressources présentée dans le plan représente un levier essentiel pour sa mise en œuvre. Elle prévoit une cartographie des besoins financiers, l'identification de sources de financement adaptées, la formulation de projets et la signature d'accords de partenariat avec des institutions publiques et privées. Cette approche correspond aux orientations de l'OCDE (2021), qui encourage les gouvernements à diversifier les instruments de financement de la résilience et à renforcer la transparence budgétaire. Le recours à des financements hybrides, associant fonds publics, partenariats public-privé et instruments de financement climatique tels que le Fonds vert pour le climat, le FIDA ou la Banque mondiale, illustre une stratégie pragmatique. Néanmoins, la littérature récente (World Bank, 2022 ; FAO, 2021) insiste sur la nécessité d'un accompagnement technique pour garantir la bonne gestion de ces financements et éviter la dépendance aux bailleurs extérieurs.

Le mécanisme de suivi-évaluation intégré au plan constitue une avancée méthodologique importante. Il prévoit la collecte périodique de données par les agents de vulgarisation et les coopératives, l'analyse semestrielle des résultats et l'ajustement des actions sur la base d'indicateurs techniques et socio-économiques. Ce dispositif rejoint les principes de la gestion adaptative mis en avant par le PNUD (2019) et Drechsler (2010), qui considèrent le suivi-évaluation comme un pilier de l'apprentissage institutionnel. En introduisant des indicateurs différenciés selon les districts et les types d'intervention, le plan corrige l'une des principales faiblesses des politiques précédentes, souvent limitées à des bilans nationaux sans prise en compte des disparités territoriales.

Malgré sa cohérence, le plan provincial présente certaines limites. L'accès inégal aux intrants agricoles et aux infrastructures d'irrigation risque de creuser les disparités entre districts plus équipés, comme Nyagatare, et ceux plus vulnérables, tels que Ngoma ou Bugesera. De plus, la dimension de genre reste encore insuffisamment intégrée, alors que les femmes représentent une part essentielle de la main-d'œuvre agricole, comme le rappellent Ombogoh et al. (2018). Enfin, la pérennité du plan dépendra de la continuité des financements et du renforcement de l'autonomie institutionnelle des acteurs locaux. Ces constats rejoignent les observations de Gebremedhin (2018) et de Berhanu et Wolde (2019), selon lesquelles la résilience agricole durable exige une autonomie organisationnelle et financière accrue des producteurs.

En définitive, le plan provincial d'adaptation de la filière haricot illustre une approche novatrice et intégrée de la planification climatique territoriale au Rwanda. En reliant les données empiriques issues de la modélisation, les politiques publiques nationales et les dynamiques locales, il contribue à la mise en œuvre d'une adaptation plus ciblée, équitable et durable. Ce plan constitue à la fois un instrument d'action et une contribution scientifique à

la réflexion sur la gouvernance décentralisée de l'adaptation climatique. Il s'inscrit dans la trajectoire des Objectifs de développement durable 2 et 13, en promouvant une agriculture productive et résiliente au service de la Vision 2050 du Rwanda.

5.4. Limites méthodologiques

Cette étude présente certaines limites qui méritent d'être prises en compte dans l'interprétation des résultats. Les données mobilisées, issues de sources statistiques et climatiques nationales, comportent des variations d'échelle et des discontinuités temporelles ayant nécessité des ajustements prudents. L'analyse au niveau du district ne permet pas de saisir les disparités locales liées aux conditions agroécologiques et aux pratiques spécifiques des exploitants. Par ailleurs, les politiques publiques évaluées reposent sur des cadres temporels et institutionnels distincts, ce qui limite la comparabilité malgré l'usage d'une grille d'analyse commune. Enfin, la dimension prospective de la modélisation reste contrainte par les hypothèses stationnaires et par l'absence d'intégration de variables socio-économiques évolutives.

Malgré ces limites, la démarche adoptée offre une vision cohérente et rigoureuse des interactions entre politiques d'adaptation, dynamiques climatiques et productivité du haricot, tout en ouvrant la voie à des recherches futures fondées sur des données plus détaillées et des approches interdisciplinaires.

VI. Conclusion et perspectives

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de recherche visant à éclairer les interactions entre politiques publiques d'adaptation au changement climatique, pratiques agricoles et productivité du haricot dans un territoire particulièrement vulnérable, la Province de l'Est du Rwanda. En mobilisant une approche intégrée qui combine analyse stratégique, modélisation empirique et formulation de recommandations opérationnelles, il contribue à identifier les leviers techniques et institutionnels capables de renforcer la résilience des systèmes agricoles face aux perturbations climatiques.

L'examen critique du cadre stratégique rwandais met en évidence une forte cohérence des documents de politique publique, notamment la Stratégie nationale de transformation (NST2), le Plan stratégique pour la transformation de l'agriculture (PSTA5), la Politique agricole nationale (NAP), la Stratégie de croissance verte et de résilience climatique (GGCRS), le Plan directeur de l'irrigation du Rwanda (RIMP), les Contributions déterminées au niveau national (NDC) et la stratégie ENR&CC. La filière haricot et la Province de l'Est y sont clairement identifiées comme prioritaires en raison de leur rôle central dans la sécurité alimentaire et de leur exposition élevée aux risques climatiques. Cette cohérence s'accompagne toutefois de limites, parmi lesquelles un ciblage opérationnel insuffisant, une différenciation territoriale et sectorielle encore faible et un déficit de dispositifs de suivi-évaluation finement désagregés, ce qui pèse sur l'effectivité et l'équité des interventions.

Une analyse empirique a ensuite été conduite à partir de données agricoles, climatiques et géographiques couvrant la période 2014 - 2024. Trois familles de modèles ont été testées, régression linéaire multiple, Random Forest et XGBoost. XGBoost s'impose comme la meilleure option avec un coefficient de détermination R^2 égal à 0,80, signe d'une forte capacité explicative. Les analyses d'explicabilité mettent en avant le rôle déterminant de l'humidité relative, de la température de l'air, de la température de surface, des précipitations et de l'usage des pesticides dans la variation des rendements du haricot. Ces résultats confirment la nécessité d'appuyer l'adaptation sur des diagnostics locaux et sur une compréhension fine des interactions entre pratiques et conditions agro-climatiques.

Sur cette base, un plan provincial d'adaptation au changement climatique a été élaboré pour la filière haricot dans la Province de l'Est. Il repose sur un diagnostic synthétique, des priorités stratégiques adaptées au contexte local, un dispositif réaliste de mobilisation des ressources et un cadre de suivi-évaluation construit autour d'indicateurs différenciés. L'objectif est d'opérationnaliser les ambitions nationales à l'échelle décentralisée en alignant les objectifs globaux avec les besoins spécifiques des producteurs. Cette contribution s'inscrit dans la mise en œuvre des Objectifs de développement durable 2 (Faim zéro) et 13 (Lutte contre les changements climatiques), ainsi que dans les orientations de la Vision 2050 du Rwanda.

Dans cette perspective, ce travail présente plusieurs apports. Sur le plan scientifique, il propose une démarche originale alliant analyse de politiques, science des données et planification territoriale. Sur le plan méthodologique, il illustre l'intérêt de combiner des approches qualitatives et quantitatives pour renforcer la robustesse des diagnostics. Sur le plan opérationnel, il met à disposition un outil d'aide à la décision pour les autorités locales et les parties prenantes du développement rural. Les recommandations issues des différentes analyses sont intégrées et mises en œuvre dans le cadre du troisième objectif, à travers l'élaboration du plan provincial d'adaptation.

Ce travail ouvre la voie à plusieurs pistes de recherche et d'approfondissement :

- l'approche méthodologique développée dans cette étude pourrait être appliquée à d'autres cultures stratégiques telles que le maïs, le manioc ou le riz, ainsi qu'à d'autres provinces du Rwanda. Une telle extension permettrait de construire une vision plus systémique de la territorialisation des politiques climatiques agricoles et d'évaluer la cohérence de leur mise en œuvre à l'échelle nationale ;
- l'intégration de nouvelles variables explicatives représente également une perspective importante. L'ajout de dimensions socio-économiques, institutionnelles et culturelles, comme le niveau de revenu des ménages, la sécurité foncière, l'accès au crédit, la qualité des services de vulgarisation ou encore les pratiques endogènes d'adaptation, permettrait de raffiner les modèles et d'enrichir l'analyse des déterminants de la productivité agricole ;
- l'étude pourrait aussi être approfondie sous l'angle du genre et de l'équité. La prise en compte des différences d'accès aux ressources, aux innovations et aux services entre hommes et femmes renforcerait la pertinence sociale des politiques d'adaptation. Une analyse différenciée selon le genre favoriserait ainsi la conception de stratégies plus inclusives et mieux adaptées aux réalités locales ;
- entreprendre une modélisation théorique des politiques d'adaptation, afin de formaliser les relations entre les acteurs, les instruments politiques et les résultats attendus en matière de résilience agricole. Cette démarche permettrait d'élaborer un cadre conceptuel explicatif des dynamiques d'adaptation et d'approfondir la compréhension des mécanismes par lesquels les politiques publiques renforcent la réduction de la vulnérabilité face aux changements climatiques.
- enfin, la valorisation des résultats auprès des décideurs publics et des partenaires techniques constitue une étape essentielle. La traduction des conclusions en outils opérationnels tels que des notes de politique, des tableaux de bord de suivi ou des guides pratiques de territorialisation faciliterait leur utilisation par les institutions

publiques, les organisations non gouvernementales et les bailleurs de fonds engagés dans la promotion de la sécurité alimentaire et de l'adaptation au changement climatique.

VII. Références bibliographiques

- Abosede, S. (2020). Water, Food Security, and Trade in Sub-Saharan Africa. In V. Erokhin & T. Gao (Eds.), *Handbook of Research on Globalized Agricultural Trade and New Challenges for Food Security* (pp. 384-399). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1042-1.ch019>
- Alamu, S. A. (2024). Climate change-resilience farming model for enhanced food security and sustainable development in Sub-Saharan Africa. *Science World Journal*, 19(4), Article 4. <https://doi.org/10.4314/swj.v19i4.23>
- Amosah, J., Lukman, T., & Nassè, T. B. (2023). FROM ADAPTATION TO RESILIENCE : THE CAPABILITY OF WOMEN SMALLHOLDER FARMERS IN THE NABDAM DISTRICT OF THE UPPER EAST REGION. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 5(7), Article 7. <https://doi.org/10.51594/ijmer.v5i7.510>
- Ansoms, A., Aoun, E., Chemouni, B., Niyonkuru, R.-C., & Williams, T. P. (2022). The politics of policymaking in Rwanda: Adaptation and reform in agriculture, energy, and education. *Journal of Eastern African Studies*, 16(2), 205-227. <https://doi.org/10.1080/17531055.2022.2143468>
- Aremu, T., Olayide, O., Ndagijimana, A., & Mudahunga, J. C. (2021). Climate Change-Driven Postharvest Losses and Household Food Security in Kayonza District, Rwanda. In *Handbook of Climate Change Management* (pp. 1-19). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22759-3_180-1
- Austin, K. G., Beach, R. H., Lapidus, D., Salem, M. E., Taylor, N. J., Knudsen, M., & Ujeneza, N. (2020). Impacts of Climate Change on the Potential Productivity of Eleven Staple Crops in Rwanda. *Sustainability*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su12104116>
- Baynes, J., Neale, A., & Hultgren, T. (2022). Improving intelligent dasymetric mapping population density estimates at 30 m resolution for the conterminous United States by excluding uninhabited areas. *Earth System Science Data*, 14(6), 2833-2849. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2833-2022>
- Bedeke, S. B. (2023). Climate change vulnerability and adaptation of crop producers in sub-Saharan Africa: A review on concepts, approaches and methods. *Environment, Development and Sustainability*, 25(2), 1017-1051. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02118-8>
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology*, 4, 35. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00035>

- Berhanu, M., & Wolde, A. O. (2019). Review on Climate Change Impacts and its Adaptation strategies on Food Security in Sub-Saharan Africa. *Agricultural Socio-Economics Journal*, 19(3), 145-154. <https://doi.org/10.21776/ub.agrise.2019.019.3.3>
- Brindis, C. D., & Macfarlane, S. B. (2019). Challenges in Shaping Policy with Data. In S. B. Macfarlane & C. AbouZahr (Eds.), *The Palgrave Handbook of Global Health Data Methods for Policy and Practice* (pp. 45-63). Palgrave Macmillan UK. https://doi.org/10.1057/978-1-137-54984-6_3
- Byishimo, P. (2017). ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON CROP YIELDS AND FARMERS' ADAPTATION MEASURES: A case of Rwanda. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.265578>
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- Clay, N., & King, B. (2019). Smallholders' uneven capacities to adapt to climate change amid Africa's 'green revolution': Case study of Rwanda's crop intensification program. *World Development*, 116, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.11.022>
- Diallo, S., & Atangana Ondo, H. (2025). Climate shocks and labor market in sub-Saharan Africa : Effects on gender disparities in urban and rural areas. *Journal of Social and Economic Development*, 27(1), 203-225. <https://doi.org/10.1007/s40847-024-00331-x>
- Dinku, T., Thomson, M. C., Cousin, R., del Corral, J., Ceccato, P., Hansen, J., & Connor, S. J. (2018). Enhancing National Climate Services (ENACTS) for development in Africa. *Climate and Development*, 10(7), 664-672. <https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1405784>
- Drechsler, M. (2010). Multi-Criteria Analysis for Policy Evaluation. In K. Bizer, S. Lechner, & M. Führ (Eds.), *The European Impact Assessment and the Environment* (pp. 119-129). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11670-4_6
- Dushimeyesu, E., Habimana, S., Rwalinda, F. M., & James, M. (2023). Evaluation of yield decrease in common beans due to anthracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) below sub-temperate environment of Northwestern of Rwanda. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v11i2.264-269.5593>
- FAO. (2017). *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*. 2nd Edition. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (Ed.). (2018). Building climate resilience for food security and nutrition. FAO.

FAO. (2021). *The State of Food and Agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb4476en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). *World Programme for the Census of Agriculture 2020. Volume 1: Programme, concepts and definitions*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c5afd226-08ab-4cda-bc45-871f1f95a3be/content>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *World Programme for the Census of Agriculture 2020. Volume 2: Operational guidelines*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9c31f984-d6d0-47af-bc13-f05df9fe002f/content>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Data editing and imputation: Technical guidelines*. FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Statistical Standard Series: Imputation*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/519783f5-8328-4c72-9380-a7b7c57c1a95/content>

Fischer, G., Nachtergaele, F.O., van Velthuisen, H.T., Chiozza, F., Franceschini, G., Henry, M., Muchoney, D. and Tramberend, S. (2021). *Global Agro-Ecological Zones v4 - Model documentation*. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4744en>

Gebremedhin, G. G. (2018). A Review Of Impact Of Climate Change On Food Availability And Adaptation At Farm Level In Sub-Saharan Africa, 6(1). <https://rjwave.org/ijedr/papers/IJEDR1801144.pdf>

Franke, A. C., Baijukya, F., Kantengwa, S., Reckling, M., Vanlauwe, B., & Giller, K. E. (2019). POOR FARMERS - POOR YIELDS : SOCIO-ECONOMIC, SOIL FERTILITY AND CROP MANAGEMENT INDICATORS AFFECTING CLIMBING BEAN PRODUCTIVITY IN NORTHERN RWANDA. *Experimental Agriculture*, 55(S1), 14-34. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000028>

Girma, T., Tefera, T., & Kaske, D. (2017). *Determinants and Resource Use Efficiency of Haricot Bean Production in Halaba Special District, Southern Ethiopia*.

Hashakimana, L., Tessema, T., Niyitanga, F., Cyamweshi, A. R., & Mukuralinda, A. (2023). Comparative analysis of monocropping and mixed cropping systems on selected soil properties, soil organic carbon stocks, and simulated maize yields in drought-hotspot regions of Rwanda. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19041>

Helwig, K., Biosca, O., Christensen, E., Mikulewicz, M., Mugiraneza, P., & Mukamana, L. (2023). Climate Resilience Through Microfinance: Insights from Rwanda. Université calédonienne de Glasgow. <https://doi.org/10.59019/IVKP2328>

Hitimana, S., Hamudu, R., & Valens, N. (2021). Effect Of Different Mulch Application On Soil Moisture Conservation, Growth And Grain Yield Of Beans Under Semiarid Of Rain Fed Fersiallitic Soil Conditions In Eastern Of Rwanda. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 28(1), Article 1. <https://doi.org/10.52155/ijpsat.v28.1.3434>

Ingabire, C., Mshenga, M. P., Langat, K., Bigler, C., Musoni, A., Butare, L., & Birachi, E. (2017). Towards commercial agriculture in Rwanda: understanding the determinants of market participation among smallholder bean farmers. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 17(2), 12492-12508. <https://doi.org/10.18697/ajfand.80.16825>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srccl/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). An Introduction to Statistical Learning : With Applications in R. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1418-1>

Johansson, T., Owidi, E., Ndonge, S., Achola, S., Garedew, W., & Capitani, C. (2019). Community-Based Climate Change Adaptation Action Plans to Support Climate-Resilient Development in the Eastern African Highlands. In W. Leal Filho (Ed.), *Handbook of Climate Change Resilience* (pp. 1-26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71025-9_38-1

Jiri, O., & Mafongoya, P. (2017). A Synthesis of Smallholder Farmers' Adaptation to Climate Change in Southern Africa: Averting Adaptation Vacuum. In W. Leal Filho, S. Belay, J. Kalangu, W. Menas, P. Munishi, & K. Musiyiwa (Eds.), *Climate Change Adaptation in Africa: Fostering Resilience and Capacity to Adapt* (pp. 247-265). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49520-0_16

Kabirigi, M., Musana, B., Ngetich, F., Mugwe, J., Mukuralinda, A., & Nabahungu, N. L. (2015). Applicability of conservation agriculture for climate change adaptation in Rwanda's situation. <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/589648e8-bdc1-4b61-832d-125ac32b1678/content>

- Kaizzi, K. C., Cyamweshi, A. R., Kibunja, C. N., Senkoro, C., Nkonde, D., Maria, R., & Wortmann, C. S. (2018). Bean yield and economic response to fertilizer in eastern and southern Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 111(1), 47-60. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9915-9>
- Kim, S. K., Marshall, F., & Dawson, N. M. (2022). Revisiting Rwanda's agricultural intensification policy: Benefits of embracing farmer heterogeneity and crop-livestock integration strategies. *Food Security*, 14(3), 637-656. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01241-0>
- Kori, D. S., Musakwa, W., & Kelso, C. (2024). A bibliometric analysis of smallholder farmers' climate change adaptation challenges: A SADC region outlook. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 17(1), 174-197. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-08-2023-0106>
- Larochelle, C., Asare-Marfo, D., Birol, E., & Alwang, J. (2019). Assessing the Adoption of Improved Bean Varieties in Rwanda and the Role of Varietal Attributes in Adoption Decisions. *Gates Open Res*, 3(129), Article 129. <https://doi.org/10.21955/gatesopenres.1115103.1>
- Mbeugang, D. L., Suh, C. H., Mbong, G. A., & Ngueguim, M. (2017). Effet de la maladie des taches angulaires sur le rendement des varietes de haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) a Foumbot dans L'ouest Cameroun. *Agronomie Africaine*, 29(2), Article 2. <https://www.ajol.info/index.php/aga/article/view/164708>
- Mersha, F., & Leta, A. (2019). Climate Change and Its Impact on Agricultural Production: An Empirical Review from Sub-Saharan African Perspective.
- MINAGRI. (2018). *Strategic Plan for Agriculture Transformation (PSTA4)*. Ministry of Agriculture and Animal Resources, Kigali.
- MINAGRI. (2022). *National Adaptation Plan (NAP) for Agriculture*. Kigali: Ministry of Agriculture and Animal Resources.
- MINAGRI. (2023). *Strategic Plan for the Transformation of Agriculture Phase V (PSTA5) 2024–2029*. Kigali: Ministry of Agriculture and Animal Resources.
- MINICOFIN. (2024). *National Strategy for Transformation (NST2) 2024–2029*. Kigali: Ministry of Finance and Economic Planning.
- Mikwa, J. N., Luwesi, C. N., Akombo, R. A., Mukashema, A., Ruhakana, A., Mutiso, M. N., Muthike, J. M., & Mathenge, J. M. (2014). Overlaying Spatial Parameters to Determine the Most Suitable Irrigation Strategies in Bugesera Region, Eastern Rwanda. <https://ir->

library.ku.ac.ke/server/api/core/bitstreams/f8d06765-efff-443d-8835-11bd80883917/content

Molina, I. (2024). *Frontiers in small area estimation research: Application to welfare indicators* (Policy Research Working Paper No. 10828). The World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099035506262422943/pdf/IDU199b2f16a1839c148df1bec41178c0d80c122.pdf>

Mubenga-Tshitaka, J.-L., Dikgang, J., Muteba Mwamba, J. W., & Gelo, D. (2023). Climate variability impacts on agricultural output in East Africa. *Cogent Economics & Finance*, 11(1), 2181281. <https://doi.org/10.1080/23322039.2023.2181281>

Mugemangango, C., Nzabanita, J., Muhoza, D. N., & Cahill, N. (2024). Comparative Analysis of Machine Learning Models for Predicting Rice Yield : Insights from Agricultural Inputs and Practices in Rwanda. *Research on World Agricultural Economy*, 350-366. <https://doi.org/10.36956/rwae.v5i4.1247>

Muhire, I., Ahmed, F., Abutaleb, K., & Kabera, G. (2015). Impacts of projected changes and variability in climatic data on major food crops yields in Rwanda. *International Journal of Plant Production*, 9(3), 347-372. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2015.2221>

Musanase, C., Vodacek, A., Hanyurwimfura, D., Uwitonze, A. et Kabandana, I. (2023). Analyse basée sur les données et système de recommandation de cultures et d'engrais basé sur l'apprentissage automatique pour révolutionner les pratiques agricoles. *Agriculture* , 13 (11), 2141. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112141>

Mutegi, J., Ameru, J., Harawa, R., Kiwia, A., & Njue, A. (2018). Soil health and climate change: Implications for food security in Sub-Saharan Africa.

Narcisse, M., Antoine, K., & Chrysostome, N. J. (2019). Factors Affecting Technical Efficiency of Beans Production among Smallholder Farmers in Rwanda. *Research & Reviews: Journal of Agriculture and Allied Sciences*, 8(1), 71-78. <https://www.rroij.com/peer-reviewed/factors-affecting-technical-efficiency-of-beans-production-among-smallholder-farmers-in-rwanda-87532.html>

NISR. (2023). Seasonal Agricultural Survey 2023 – Main findings. National Institute of Statistics of Rwanda, Kigali.

Nsabimana, A., Niyitanga, F., Weatherspoon, D. D., & Naseem, A. (2021). Land Policy and Food Prices: Evidence from a Land Consolidation Program in Rwanda. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, 19(1), 63-73. <https://doi.org/10.1515/jafio-2021-0010>

Ntihinyurwa, P. D., & Masum, F. (2017). *Participatory land use consolidation in Rwanda: From principles to practice*. FIG Working Week 2017: Surveying the world of tomorrow - From

digitalisation to augmented reality, Helsinki, Finland. International Federation of Surveyors (FIG)

OCDE. (2021). Recommandation du Conseil sur l'évaluation des politiques publiques. <https://www.oecd.org/fr/topics/sub-issues/development-co-operation-evaluation-and-effectiveness/evaluation-criteria.html>

Okorie, I. E., Afuecheta, E., & Nadarajah, S. (2023). Time series and power law analysis of crop yield in some east African countries. *PLOS ONE*, 18(6), e0287011. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0287011>

Ombogoh, D. B., Tanui, J., McMullin, S., Muriuki, J., & Mowo, J. (2018). Enhancing adaptation to climate variability in the East African highlands: A case for fostering collective action among smallholder farmers in Kenya and Uganda. *Climate and Development*, 10(1), 61-72. <https://doi.org/10.1080/17565529.2016.1174665>

Onzima, B., Katungi, E. M., & Bonabana-Wabbi, J. (2020). The effect of climate change adaptation strategies on bean yield in central and northern Uganda. <https://hdl.handle.net/10568/107469>

Otieno, P. S., Ogutu, C. A., Mburu, J., & Nyikal, R. A. (2017). Effect of Global-GAP policy on smallholder French beans farmers climate change adaptation strategies in Kenya. *African Journal of Agricultural Research*, 12(8), 577-587. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12149>

Pande, C. B., Sidek, L. M., Varade, A. M., Elkhachy, I., Radwan, N., Tolche, A. D., & Elbeltagi, A. (2024). Forecasting of meteorological drought using ensemble and machine learning models. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 160. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00975-w>

Paul, B. K., Frelat, R., Birnholz, C., Ebong, C., Gahigi, A., Groot, J. C. J., Herrero, M., Kagabo, D. M., Notenbaert, A., Vanlauwe, B., & van Wijk, M. T. (2018). Agricultural intensification scenarios, household food availability and greenhouse gas emissions in Rwanda: Ex-ante impacts and trade-offs. *Agricultural Systems*, 163, 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.007>

Programme des Nations unies pour le développement (PNUD). (2019). Guide pratique pour le suivi et l'évaluation des projets de développement. New York: PNUD. <https://www.undp.org/fr>

RAB. (2022). *Annual Report 2021–2022*. Rwanda Agriculture and Animal Resources Board, Kigali.

REMA. (2018). *Environment and Natural Resources, Climate Change Mainstreaming Strategy (ENR&CC)*. Kigali: Rwanda Environment Management Authority

Republic of Rwanda. (2021). Revised Green Growth and Climate Resilience Strategy (GGCRS). Ministry of Environment. <https://fonerwa.org/ggcrs>

Rurangwa, E., Vanlauwe, B., & Giller, K. E. (2020). The response of climbing bean to fertilizer and organic manure in the Northern Province of Rwanda. *Experimental Agriculture*, 56(5), 722-737. <https://doi.org/10.1017/S0014479720000277>

Rwema, M., Safari, B., Sylla, M. B., Roininen, L., & Laine, M. (2025). Understanding Farmers' Knowledge, Perceptions, and Adaptation Strategies to Climate Change in Eastern Rwanda. *Sustainability*, 17(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/su17156721>

Rwema, M., Sylla, M. B., Safari, B., Roininen, L., & Laine, M. (2025). Trend analysis and change point detection in precipitation time series over the Eastern Province of Rwanda during 1981-2021. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(2), 98. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05317-7>

Seasonal Agricultural Survey | National Institute of Statistics of Rwanda. (s. d.). Consulté 1 juillet 2025, à l'adresse <https://statistics.gov.rw/data-sources/surveys/Seasonal-Agricultural-Survey>

Shikuku, K. M., Winowiecki, L., Twyman, J., Eitzinger, A., Perez, J. G., Mwongera, C., & Läderach, P. (2017). Smallholder farmers' attitudes and determinants of adaptation to climate risks in East Africa. *Climate Risk Management*, 16, 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.03.001>

Siebert, A., Dinku, T., Vuguziga, F., Twahirwa, A., Kagabo, D. M., delCorral, J., & Robertson, A. W. (2019). Evaluation of ENACTS-Rwanda : A new multi-decade, high-resolution rainfall and temperature data set—Climatology. *International Journal of Climatology*, 39(6), 3104-3120. <https://doi.org/10.1002/joc.6010>

Steorts, R. C., Schmid, T., & Tzavidis, N. (2020). Smoothing and benchmarking for small area estimation. *International Statistical Review*, 88(3), 580-598. <https://doi.org/10.1111/insr.12373>

Sunday, F. X., Uwineza, Y., Ndahayo, E., Ishimwe, I. P., Rajeswaran, L., & Maryse, U. (2024). Exploring the benefits, challenges, and rationale behind growing crops of choice among farmers in Rwanda. *Journal of Agriculture and Food Sciences*, 22(1), 133-157. <https://doi.org/10.4314/jafs.v22i1.11>

Swanwick, R. H., Read, Q. D., Guinn, S. M., Williamson, M. A., Hondula, K. L., & Elmore, A. J. (2022). Dasymeric population mapping based on US census data and 30-m gridded estimates of impervious surface. *Scientific Data*, 9, 523. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01603-z>

Tangwa, E., Voženílek, V., Brus, J., & Pechanec, V. (2020). Climate change and the agricultural potential of selected legume crops in East Africa. *GEOLINKS Conference Proceedings, Book 1 Volume 2*. GEOLINKS International Conference. <https://doi.org/10.32008/GEOLINKS2020/B1/V2/02>

Thomson, D. R., Leasure, D. R., Bird, T., Tzavidis, N., & Tatem, A. J. (2022). How accurate are WorldPop-Global-Unconstrained gridded population data at the cell-level? : A simulation analysis in urban Namibia. *PLOS ONE*, 17(7), e0271504. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271504>

Thornton, P. K., & Herrero, M. (2014). Climate change adaptation in mixed crop-livestock systems in developing countries. *Global Food Security*, 3(2), 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.02.002>

Umutoni, M. A., & Limbu, P. T. S. (2022). Characteristics of Extreme Precipitation and Their Effect on Bean Yield in Rwanda. *Tanzania Journal of Engineering and Technology*, 41(04), Article 04. <https://www.ajol.info/index.php/tjet/article/view/240702>

United Nations (UN). (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2012). National adaptation plans: Technical guidelines for the national adaptation plan process. Bonn: UNFCCC. <https://unfccc.int/topics/adaptation-and-resilience/workstreams/national-adaptation-plans>

Yu, Q., You, L., Wood-Sichra, U., Ru, Y., Joglekar, A. K. B., Fritz, S., Xiong, W., Lu, M., Wu, W., & Yang, P. (2020). A cultivated planet in 2010 - Part 2 : The global gridded agricultural-production maps. *Earth System Science Data*, 12(4), 3545-3572. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3545-2020>

Weatherspoon, D. D., Miller, S. R., Niyitanga, F., Weatherspoon, L. J., & Oehmke, J. F. (2021). Rwanda's Commercialization of Smallholder Agriculture : Implications for Rural Food Production and Household Food Choices. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, 19(1), 51-62. <https://doi.org/10.1515/jafio-2021-0011>

World Bank. (2022). *Rwanda Country Climate and Development Report (CCDR)*. Washington, DC: The World Bank. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/>

WorldPop. (n.d.). *Top-down estimation modelling: Constrained vs unconstrained*. University of Southampton. Consulté le 12 août 2025, sur https://www.worldpop.org/methods/top_down_constrained_vs_unconstrained/ WorldPop

VIII. Liste des illustrations

Figure 1: Récapitulatif du Cadre stratégique national et sectoriel pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique au Rwanda	7
Figure 2 : Carte de la province de l'Est, Rwanda (https://gifex.com)	11
Figure 3 : Schéma méthodologique adopté pour la modélisation du rendement du haricot	15
Figure 4 : Illustration de l'appréciation de la deuxième Stratégie Nationale de Transformation (NST2)	22
Figure 5 : Illustration de l'appréciation du cinquième Plan Stratégique pour la Transformation de l'Agriculture (PSTA 5) 2024-2029	24
Figure 6 : Illustration de l'appréciation de la Politique Agricole Nationale (NAP) 2018	24
Figure 7 : Illustration de l'appréciation du Plan directeur d'irrigation du Rwanda	25
Figure 8 : Illustration de l'appréciation de la Stratégie de la Croissance Verte et Résilience Climatique (GGCRS) 2021	26
Figure 9 : Illustration de l'appréciation de la stratégie nationale d'intégration de l'environnement, des ressources naturelles et du changement climatique	27
Figure 10 : Illustration de l'appréciation des Contributions Déterminées au Niveau National (NDC, 2020)	28
Figure 11 : Illustration du rendement par district sur la période de 2014-2024	30
Figure 12 : Illustration de la superficie cultivée en haricot par district sur la période de 2014-2024	31
Figure 13 : Illustration de taux d'utilisation des pratiques agricoles par district de 2014-2024	32
Figure 14 : Illustration de la sécheresse par district et année agricole sur la période de 2014 à 2024	32
Figure 15 : Comparaison des performances prédictives des modèles RLM, Random Forest et XGBoost pour le rendement du haricot (R^2 , RMSE, MAE)	33
Figure 16 : Importance relative des variables explicatives dans la prédiction du rendement du haricot (SHAP, XGBoost)	34
Figure 17 : Effet des variables sur le rendement - SHAP (XGBoost)	35
Figure 18 : Corrélations et Significativité des variables explicatives du Rendement du haricot	81
Figure 19 : Illustration de la multicolinéarité des variables indépendantes	81
Figure 20 : Analyse des Dépendances Partielles (XGBoost)	87
Figure 21 : Graphe de corrélation de Pearson	90
Figure 22 : Importance moyenne des facteurs explicatifs (SHAP)- Random Forest	90
Figure 23 : Variables clés selon SHAP - Random Forest	91
Figure 24 : Analyse des Dépendances Partielles (Random Forest)	95

IX. Liste des tableaux

Tableau 1 : Diagnostic de la filière haricot dans la Province de l'Est	37
Tableau 2 : Plan provincial d'adaptation de la filière haricot : actions et priorités par district	39
Tableau 3 : La stratégie de mobilisation de ressources	42
Tableau 4 : Le plan d'action opérationnel pour la mobilisation de ressources	43
Tableau 5 : Mécanisme de suivi évaluation du plan provincial d'adaptation	45
Tableau 6 : Grille d'analyse par critère et étape	72
Tableau 7 : Échelle de pertinence stratégique des politiques agricoles	73
Tableau 8 : Fiche synthétique des politiques publiques d'adaptation au Rwanda	74
Tableau 9 : Choix des paramètres pour la modélisation (Random Forest)	77
Tableau 10 : Choix des paramètres pour la modélisation (XGBoost)	77
Tableau 11 : Synthèse statistique des variables principales	79
Tableau 12 : Résultat de la régression linéaire simple entre les variables indépendantes et le rendement moyen	82

X. Glossaire

Adaptation : L'adaptation désigne l'ensemble des initiatives, stratégies ou actions mises en œuvre pour réduire la vulnérabilité des systèmes humains et naturels face aux effets négatifs du changement climatique. Elle peut être anticipative (préventive) ou réactive (en réponse à un choc), autonome (spontanée) ou planifiée (institutionnalisée), selon les typologies établies par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014).

Politiques publiques : Ce concept renvoie à l'ensemble des interventions, décisions ou dispositifs mis en œuvre par l'État ou ses démembrements en vue d'orienter les comportements des acteurs sociaux. Dans le domaine de l'adaptation au changement climatique, les politiques publiques incluent la formulation de plans d'action nationaux ou locaux, l'allocation de financements (subventions, crédits), la promotion de technologies climato-intelligentes, ainsi que le développement de services de vulgarisation agricole. Elles jouent un rôle déterminant dans la création d'un environnement favorable à l'adoption des mesures d'adaptation (Ansoms et al., 2022).

Politique publique d'adaptation au changement climatique : elle désigne l'ensemble des décisions, mesures et instruments adoptés par les autorités publiques dans le but de réduire la vulnérabilité des populations, des secteurs économiques et des écosystèmes face aux impacts actuels et futurs du climat, tout en renforçant leur résilience. Elle peut prendre la forme de lois, de stratégies, de plans d'action ou de programmes sectoriels, souvent intégrés dans les cadres de développement nationaux. L'adaptation vise ainsi à modérer ou à éviter les dommages liés aux aléas climatiques, ou à en exploiter les éventuelles opportunités, dans une logique de développement durable. (OCDE, 2015 ; UN, 2015; UNFCCC, 2012; IPCC, 2022).

Productivité agricole : La productivité agricole correspond à l'efficacité avec laquelle les ressources agricoles (terre, travail, intrants) sont transformées en production. Elle est mesurée en termes de rendement par hectare, de production par travailleur ou de valeur ajoutée par unité d'intrant. Elle dépend fortement des conditions climatiques, des pratiques culturales, de la qualité des intrants utilisés, ainsi que du cadre institutionnel et politique dans lequel évoluent les producteurs (Thornton & Herrero, 2014).

Haricot (*Phaseolus vulgaris* L) : Le haricot est une légumineuse largement cultivée et consommée au Rwanda. Source importante de protéines végétales, il constitue un pilier de la sécurité alimentaire nationale. Cette culture est cependant très sensible aux aléas climatiques, notamment à la sécheresse, aux irrégularités de précipitations et à l'épuisement des sols (Beebe et al., 2013).

Changement climatique Le changement climatique fait référence à la variation durable des régimes climatiques (température, précipitations, événements extrêmes), due à l'activité

humaine et aux processus naturels. Il affecte directement les systèmes agricoles en modifiant les conditions de croissance des cultures (IPCC, 2019).

Impact : Il se définit comme les résultats d'un programme ou projet appréciés par référence aux objectifs de développement ou aux buts à long terme de ce programme ou projet. C'est donc un changement, planifié ou non, positif ou négatif, qu'un programme ou projet cherche à introduire dans une situation donnée (PNUD, 2019).

Vulnérabilité : La vulnérabilité désigne le degré auquel un système est susceptible de subir des dommages en raison de l'exposition à un aléa climatique. Elle dépend de l'exposition, de la sensibilité du système, et de sa capacité d'adaptation (IPCC, 2014). Dans le cas des exploitants de haricot, la vulnérabilité dépendra notamment de la taille des exploitations, de l'accès aux ressources productives et de l'intégration dans les dispositifs publics d'appui.

XI. Annexes

Tableau 6 : Grille d'analyse par critère et étape

Étape du cycle	Pertinence	Cohérence	Efficacité	Efficienne	Impact	Durabilité
Mise à l'agenda	En quoi la politique répond-elle aux enjeux spécifiques de la filière haricot face au climat dans l'Est ?	Les priorités climatiques/haricot sont-elles alignées avec les stratégies nationales et régionales ?	Les objectifs annoncés sont-ils susceptibles d'amorcer un changement pour l'adaptation haricot ?	Les moyens et ressources alloués sont-ils proportionnés à l'ambition ?	Quelle portée attendue pour le secteur haricot, d'après les dispositions ?	Les mesures annoncées sont-elles conçues pour durer (ex : institutionnalisation, financement à long terme) ?
Formulation	Les besoins spécifiques de la filière haricot/climat sont-ils bien identifiés ?	La formulation prend-elle en compte la synergie entre secteurs (ex : eau, sol, marchés) ?	Les choix stratégiques sont-ils adaptés pour faire évoluer la filière haricot face au climat ?	L'allocation des ressources prévues semble-t-elle optimale ?	Les effets positifs anticipés sont-ils explicités ?	Les stratégies sont-elles pensées pour la résilience à long terme ?
Adoption	Les décisions prises sont-elles justifiées par des analyses ?	Les choix adoptés sont-ils cohérents avec d'autres politiques ?	Le processus d'adoption permet-il de garantir une mise en œuvre efficace ?	Les moyens de mise en œuvre sont-ils réalistes ?	Les impacts attendus sont-ils mesurables ?	Les dispositifs adoptés garantissent-ils une continuité ?

Mise en œuvre	Les mécanismes prévus sont-ils adaptés au contexte local haricot/Est ?	La mise en œuvre prévue évite-t-elle les contradictions avec d'autres politiques ?	Les actions prévues sont-elles efficaces sur la filière haricot ?	L'utilisation des ressources prévues est-elle rationnelle ?	Les résultats attendus sur l'adaptation sont-ils précisés ?	Les mécanismes assurent-ils la pérennité des actions ?
Évaluation	Les dispositifs de suivi/évaluation ciblent-ils bien l'adaptation haricot/climat ?	Les indicateurs proposés sont-ils en cohérence avec les objectifs ?	L'évaluation prévue permet-elle d'améliorer les politiques futures ?	Le rapport coût/bénéfice de l'évaluation est-il pertinent ?	Les impacts de l'évaluation sont-ils pris en compte ?	L'évaluation alimente-t-elle un apprentissage institutionnel ?

Tableau 7 : Échelle de pertinence stratégique des politiques agricoles

Score	Niveau de pertinence et de spécificité
1	Mention très vague ou marginale, sans adaptation locale/haricot
2	Prise en compte générique, peu détaillée, sans dispositifs clairs pour l'Est/haricot
3	Prise en compte moyenne, quelques mesures citées mais pas priorisées ni structurées
4	Prise en compte forte, mesures ou diagnostics clairs, dispositifs opérationnels pour l'Est ou haricot mais sans priorité extrême
5	Ciblage explicite, priorisation stratégique, diagnostic détaillé, innovation, dispositifs clairs et suivis pour la filière haricot et l'Est

Tableau 8 : Fiche synthétique des politiques publiques d'adaptation au Rwanda

	Nom de la politique / document	Est-ce une politique d'adaptation ?	Toujours en vigueur en 2025 ?	Portée	Source	Ministère responsable	Objectif principal	Axe spécifique sur l'adaptation	Budget estimé
1	Leveraging Private Sector Strategy (2019)	Partiellement (composante d'adaptation)	Non (prévue jusqu'en 2024)	Politique sectorielle agricole privée	MINAGRI / PSTA 4	MINAGRI	Attirer l'investissement privé dans l'agriculture	Oui (gestion du risque, irrigation, résilience)	122 milliards RWF (5 ans)
2	ENR&CC Mainstreaming Strategy (2018)	Oui	Non (prévue jusqu'en 2024, mais principes encore valables)	Politique transversale environnement/climat	MoE / REMA	MoE / REMA	Intégrer l'environnement et le climat dans les politiques publiques	Oui (transversal)	Non précisé (stratégie de cadrage)
2	National Agriculture Policy (2018)	Oui	Oui	Politique sectorielle agricole	MINAGRI	MINAGRI	Moderniser et rendre durable l'agriculture rwandaise	Oui (climate-smart agriculture, irrigation)	Non spécifié dans le document
3	NECCP - National Environment and Climate Change Policy (2019)	Oui	Oui	Politique environnementale et climatique	MoE	MoE	Protéger l'environnement et renforcer la résilience climatique	Oui (secteurs sensibles et approche écosystémique)	Non précisé

	Nom de la politique / document	Est-ce une politique d'adaptation ?	Toujours en vigueur en 2025 ?	Portée	Source	Ministère responsable	Objectif principal	Axe spécifique sur l'adaptation	Budget estimé
4	NST2 - National Strategy for Transformation 2 (2024–2029)	Oui	Oui	Stratégie nationale multisectorielle	Ministère de la Planification / Primature	MINECOFIN (coordination nationale)	Accélérer la transformation socio-économique du pays	Oui (pilier sur la résilience au climat)	N/A (stratégie nationale globale)
5	Nutrition Sensitive Agriculture Guideline (2020)	Non (mais contribution indirecte)	Oui	Document sectoriel nutrition-agriculture	MINAGRI / Ministère de la Santé	MINAGRI / MINISANTE	Améliorer la nutrition par l'agriculture	Non (implicite par certaines pratiques)	Non précisé
6	PSTA 5 - Plan stratégique de transformation agricole (2024–2029)	Oui	Oui	Politique agricole nationale	MINAGRI	MINAGRI	Transformer durablement l'agriculture et renforcer la résilience	Oui (agriculture résiliente, filets sociaux)	2 178 Mds RWF (prévision 2024-2029)
7	Rwanda Irrigation Master Plan (2020)	Oui	Oui	Plan sectoriel eau/irrigation	MINAGRI	MINAGRI / Rwanda Water Board	Planifier l'irrigation pour sécuriser la production agricole	Oui (technologies d'irrigation et gestion eau)	2,7 milliards USD d'ici 2050
8	NDC - Contribution déterminée au niveau national (2020)	Oui	Oui (jusqu'en 2030)	Engagement climatique international	Ministère de l'Environnement	MoE	Renforcer la résilience et réduire les émissions	Oui (24 priorités d'adaptation sectorielle)	5,3 milliards USD (2020-2030)

	Nom de la politique / document	Est-ce une politique d'adaptation ?	Toujours en vigueur en 2025 ?	Portée	Source	Ministère responsable	Objectif principal	Axe spécifique sur l'adaptation	Budget estimé
9	Vision 2050 (2020)	Non (cadre stratégique général)	Oui	Vision de développement à long terme	Primature	MINECOFIN	Faire du Rwanda un pays prospère et climato-résilient d'ici 2050	Oui (pilier de durabilité mais non détaillé)	N/A (vision long terme)
10	Plan stratégique de pays PAM - Rwanda (2025–2029)	Oui	Oui	Cadre de coopération multisectoriel avec le PAM	MINAGRI + PAM	MINAGRI (mise en œuvre conjointe avec PAM)	Renforcer les systèmes alimentaires, la nutrition et la résilience	Oui (résilience alimentaire et climatique)	202 millions USD (2025-2029)
11	Revised GGCRS - Green Growth and Climate Resilience Strategy (2021)	Oui	Oui (stratégie actualisée et alignée Vision 2050)	Stratégie nationale climat-environnement	MOF/REMA, 2021	MoF / REMA	Favoriser une croissance verte et résiliente au climat	oui (central)	2 milliards USD/an (estimé)

Tableau 9 : Choix des paramètres pour la modélisation (Random Forest)

Modèle	Paramètres	Définition / Rôle	Utilité / Importance
Random Forest	n_estimators = 50	Nombre d'arbres dans la forêt	Plus d'arbres = meilleure stabilité, mais temps de calcul accru
	max_depth = 5	Profondeur maximale des arbres	Limite la complexité des arbres pour éviter l'overfitting
	random_state = 42	Graine aléatoire	Assure que les résultats sont reproductibles
	max_features = auto	Nombre de variables testées à chaque split	Permet de garder la diversité des arbres

Tableau 10 : Choix des paramètres pour la modélisation (XGBoost)

Modèle	Paramètre	Définition / Rôle	Utilité / Importance
XGBoost	n_estimators = 45	Nombre total d'arbres boostés	Influence la complexité et la capacité de correction du modèle
	max_depth = 10	Profondeur de chaque arbre	Contrôle la capacité d'apprentissage locale
	learning_rate = 0.1	Poids donné à chaque nouvel arbre	Taux de correction des erreurs précédentes (plus bas = apprentissage plus lent mais plus stable)

	subsample = 0.9	Portion de l'échantillon utilisée par arbre	Réduit le surapprentissage en diversifiant les sous-ensembles
	objective = 'reg:squarederror'	Fonction de perte utilisée	Permet de mesurer la différence entre la prédiction et la réalité
	random_state = 60	Reproductibilité	Fixe le tirage aléatoire pour avoir les mêmes résultats à chaque lancement

Tableau 11 : Synthèse statistique des variables principales

Variable	Moyenne	Médiane	Écart-type	Minimum	Maximum
Superficie cultivée (ha)	11 053,49	13 841,44	8 655,18	0	31 179,65
Superficie récoltée (ha)	11 081,97	13 841,44	8 687,39	0	31 179,64
Production totale (TM)	8 376,22	9 676,19	7 067,43	0	31 124
Rendement moyen (kg/ha)	766,18	729	352,84	0	2 168,04
Pourcentage d'agriculteurs utilisant des semences améliorées	0,18	0,11	0,33	0	2,51
Pourcentage d'agriculteurs utilisant de l'engrais organique	7,94	7,37	7,78	0	65,83
Pourcentage d'agriculteurs utilisant de l'engrais inorganique	1,70	1,16	2,77	0	20,18
Pourcentage d'agriculteurs utilisant des pesticides	1,87	0,41	5,39	0	33,18
Pourcentage d'agriculteurs pratiquant l'irrigation	1,31	0,04	4,45	0	34,71
Pourcentage d'agriculteurs protégeant les terres contre l'érosion	10,18	9,60	10,89	0	68,80
Température de l'air (°C)	21,35	21,18	0,81	19,74	23,87
Température de surface jour (°C)	29,52	29,46	1,96	25,67	34,68

Température de surface nuit (°C)	16,65	16,58	0,50	15,62	18,10
Température minimale (°C)	16,34	16,24	0,83	12,62	18,55
Température maximale (°C)	27,23	27,23	0,79	25,20	29,21
Température moyenne (°C)	21,78	21,75	0,54	20,14	23,22
Précipitations (mm)	18,79	19,41	13,40	0,10	51,11
Humidité relative (%)	62,08	67,00	9,86	39,89	74,40
SPI saisonnier standardisé	0,00	-0,25	0,96	-1,77	2,63
Altitude (m)	1 480,69	1 453,80	97,89	1 357,50	1 652,50

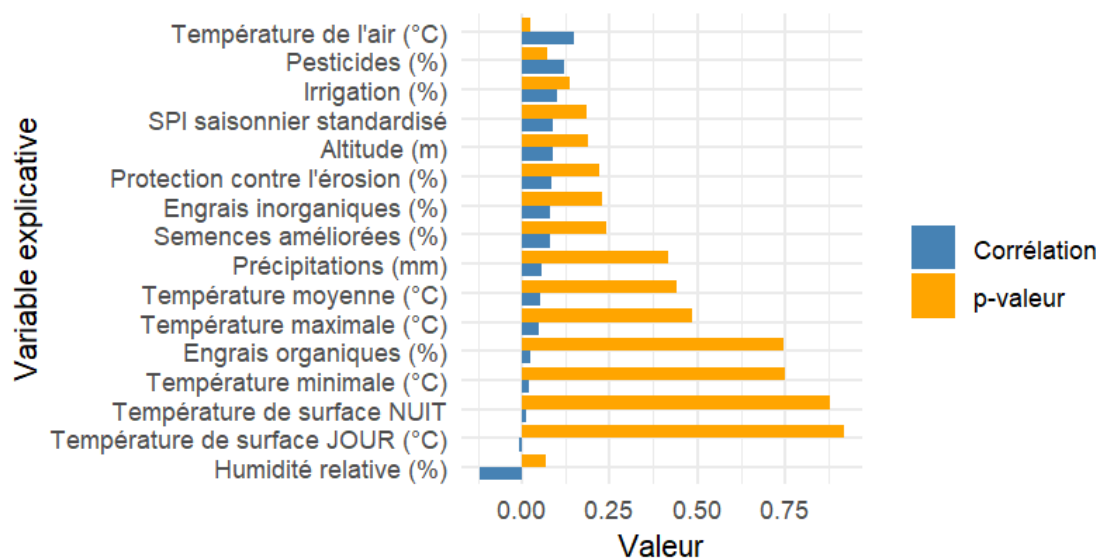


Figure 18 : Corrélations et Significativité des variables explicatives du Rendement du haricot

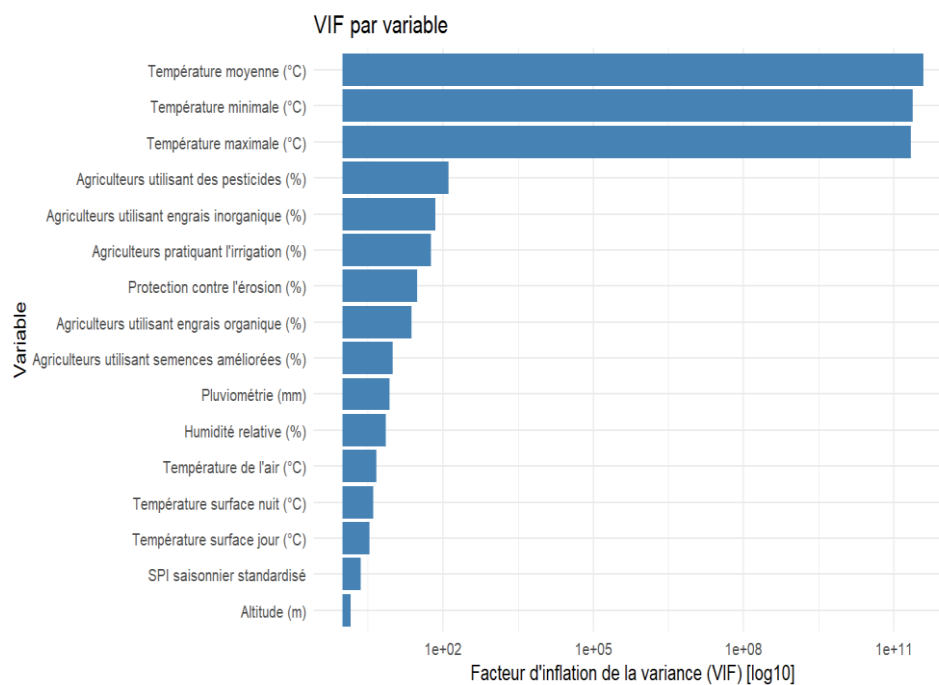
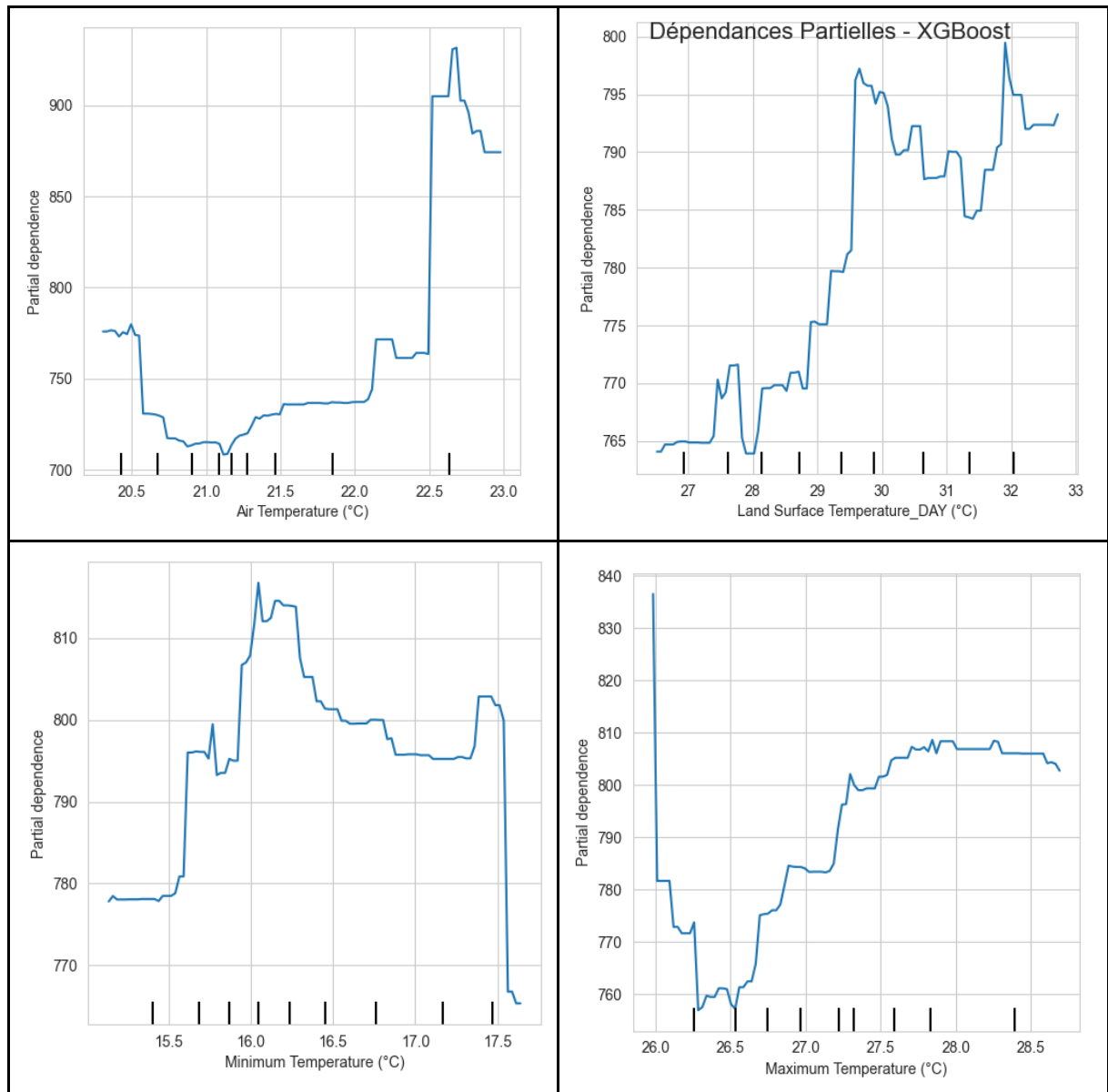


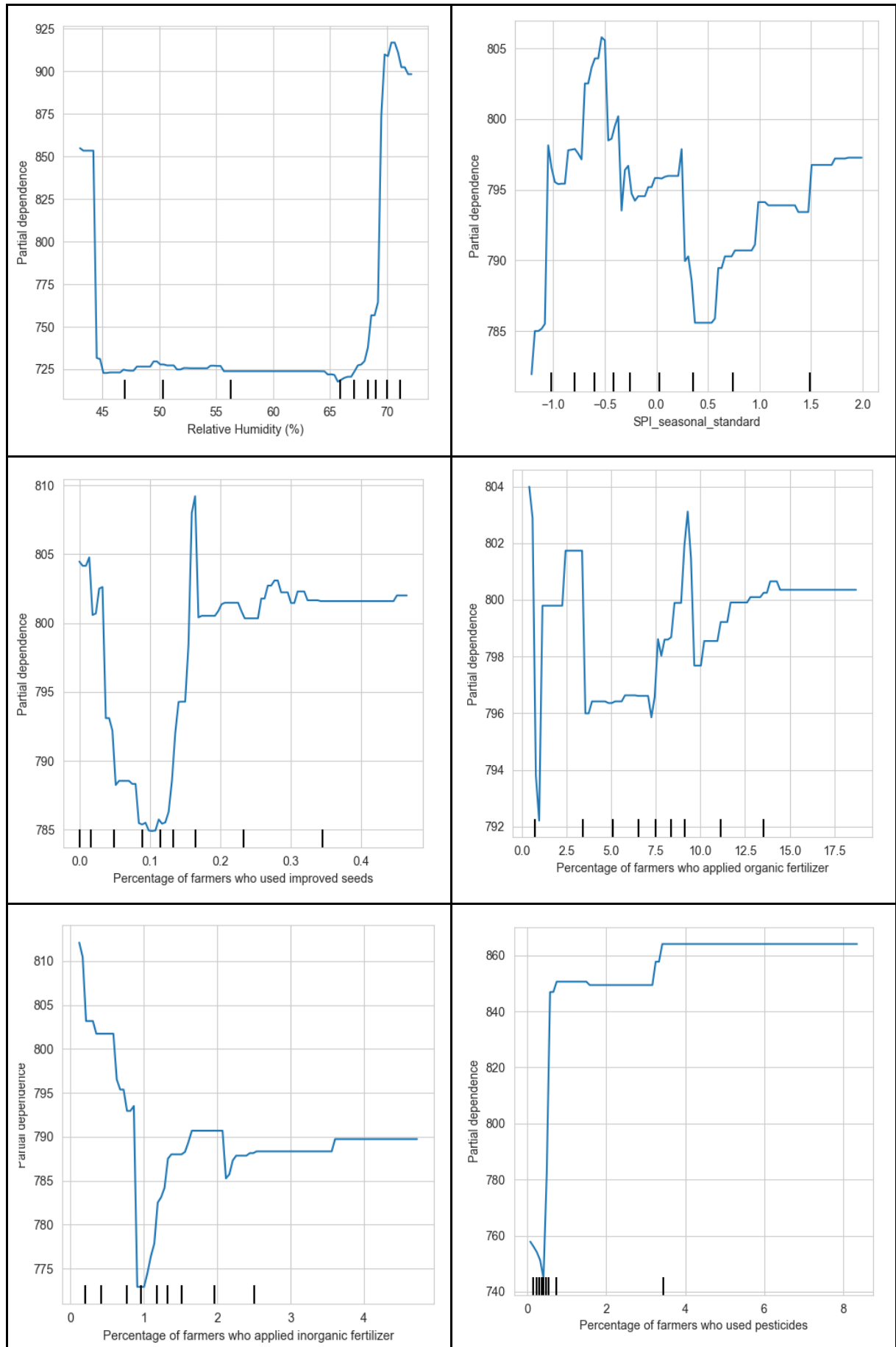
Figure 19 : Illustration de la multicolinéarité des variables indépendantes

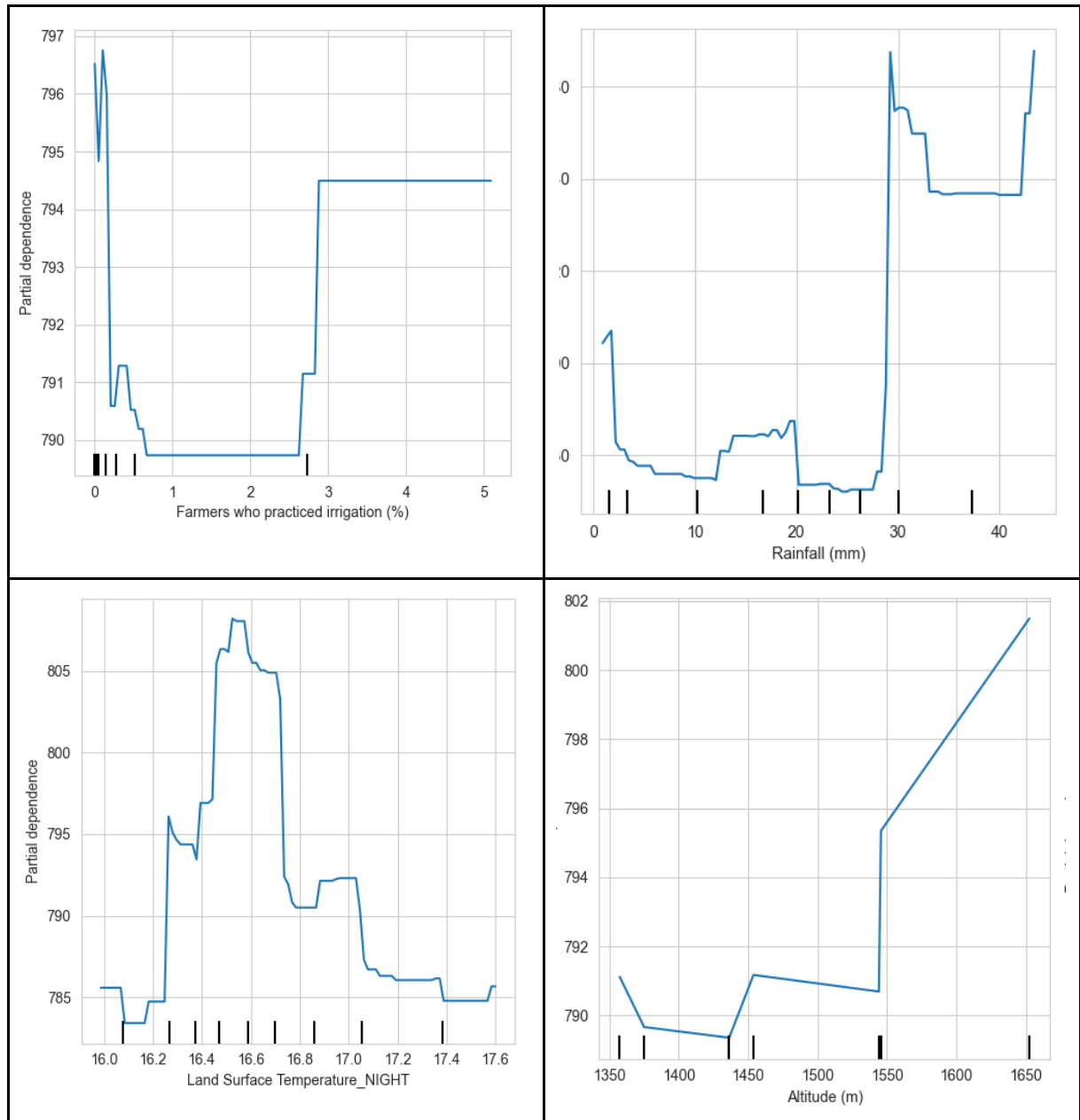
Tableau 12 : Résultat de la régression linéaire simple entre les variables indépendantes et le rendement moyen

Variable	Coefficient	Erreur standard	t de Student	p-valeur
Pourcentage d'agriculteurs ayant utilisé des semences améliorées	115,0544	70,19429	1,639085	0,102569
Pourcentage d'agriculteurs ayant appliqué des engrais organiques	4,371083	2,984056	1,464813	0,144344
Pourcentage d'agriculteurs ayant appliqué des engrais minéraux (inorganiques)	14,8801	8,367154	1,778395	0,076666
Pourcentage d'agriculteurs ayant utilisé des pesticides	8,690884	4,284081	2,028646	0,043652
Agriculteurs ayant pratiqué l'irrigation (%)	8,780152	5,208447	1,685752	0,093206
Agriculteurs ayant protégé les terres contre l'érosion (%)	4,630891	2,118395	2,186038	0,029826
Température de l'air (°C)	34,38259	28,73833	1,196402	0,232777
Température de surface terrestre (jour) (°C)	-10,0282	11,90808	-0,84214	0,40059

Température de surface terrestre (nuit)	25,52917	46,98034	0,543401	0,587382
Température minimale (°C)	7,196046	28,06424	0,256413	0,797862
Température maximale (°C)	5,039808	29,3376	0,171787	0,863757
Température moyenne (°C)	14,09986	43,36512	0,325143	0,74537
Précipitations (mm)	3,71365	1,722764	2,155635	0,032155
Humidité relative (%)	-0,75447	2,364519	-0,31908	0,749958
SPI saisonnier standard	32,9705	24,14471	1,365537	0,173424
Altitude (m)	0,376906	0,236874	1,591166	0,112952







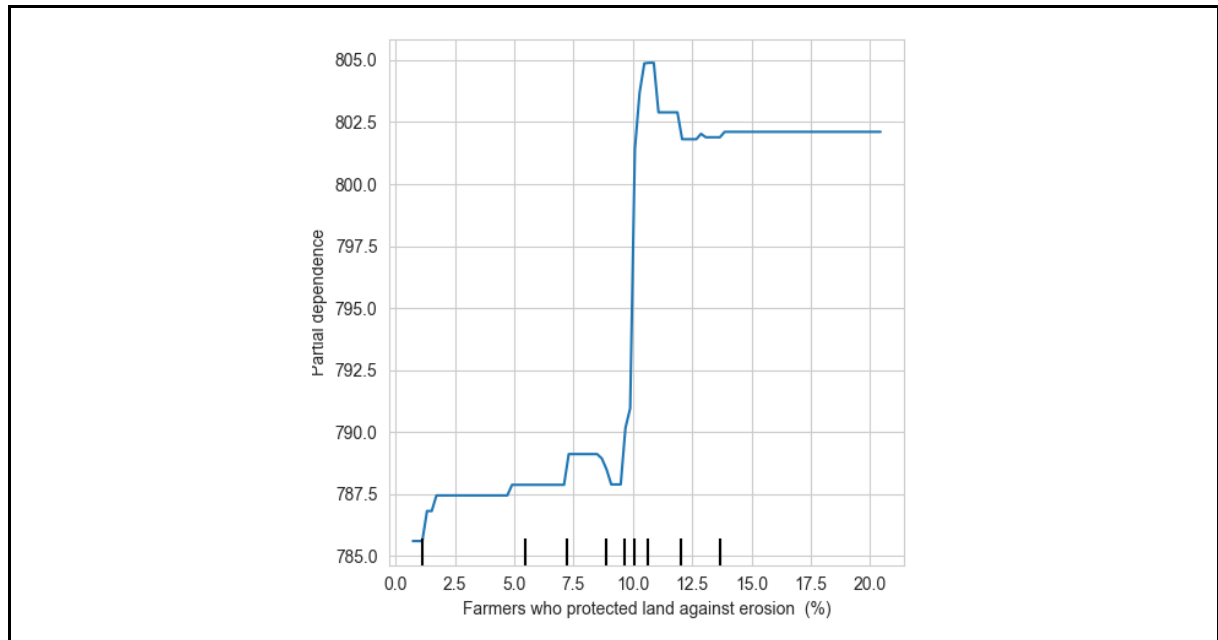
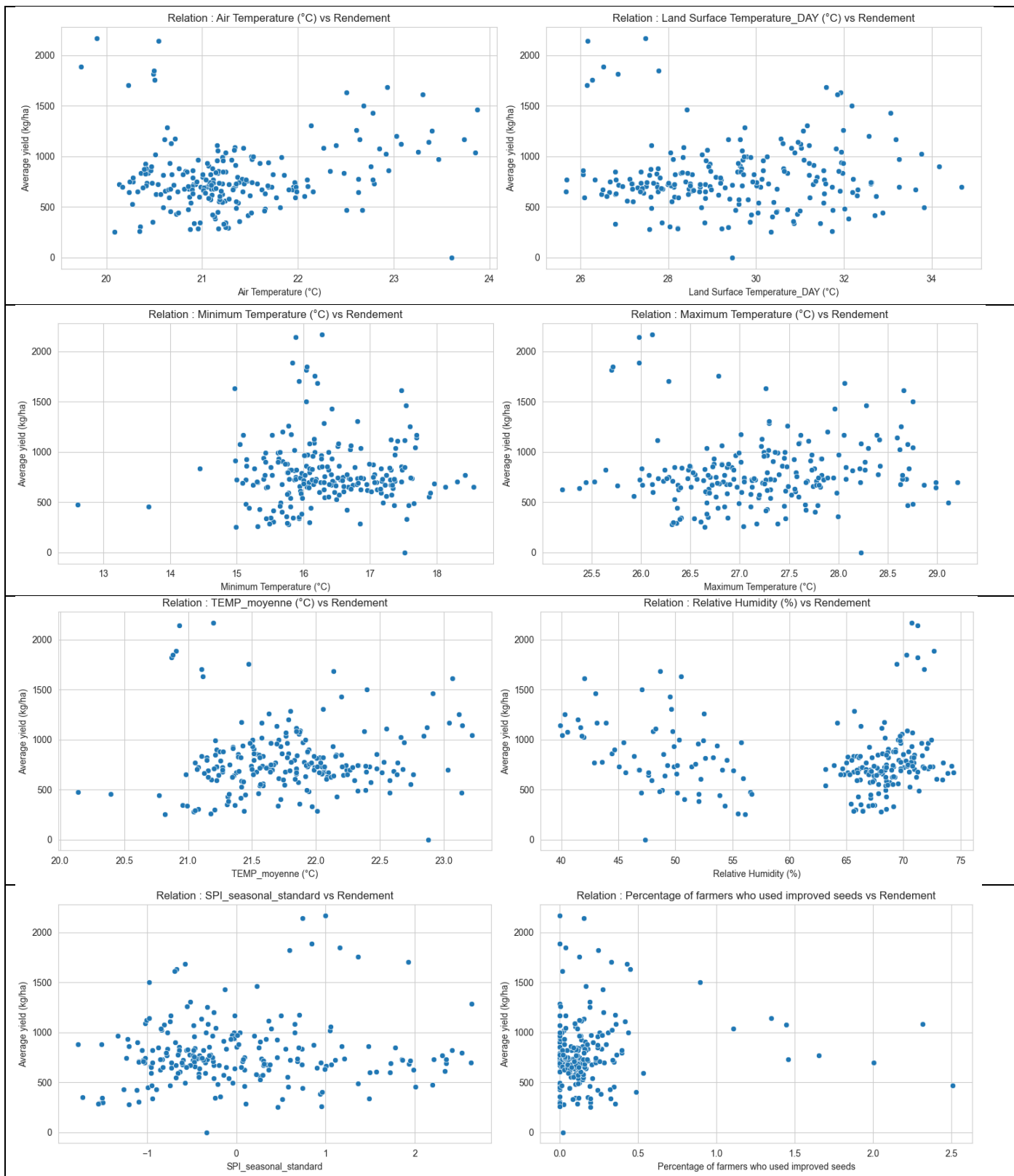
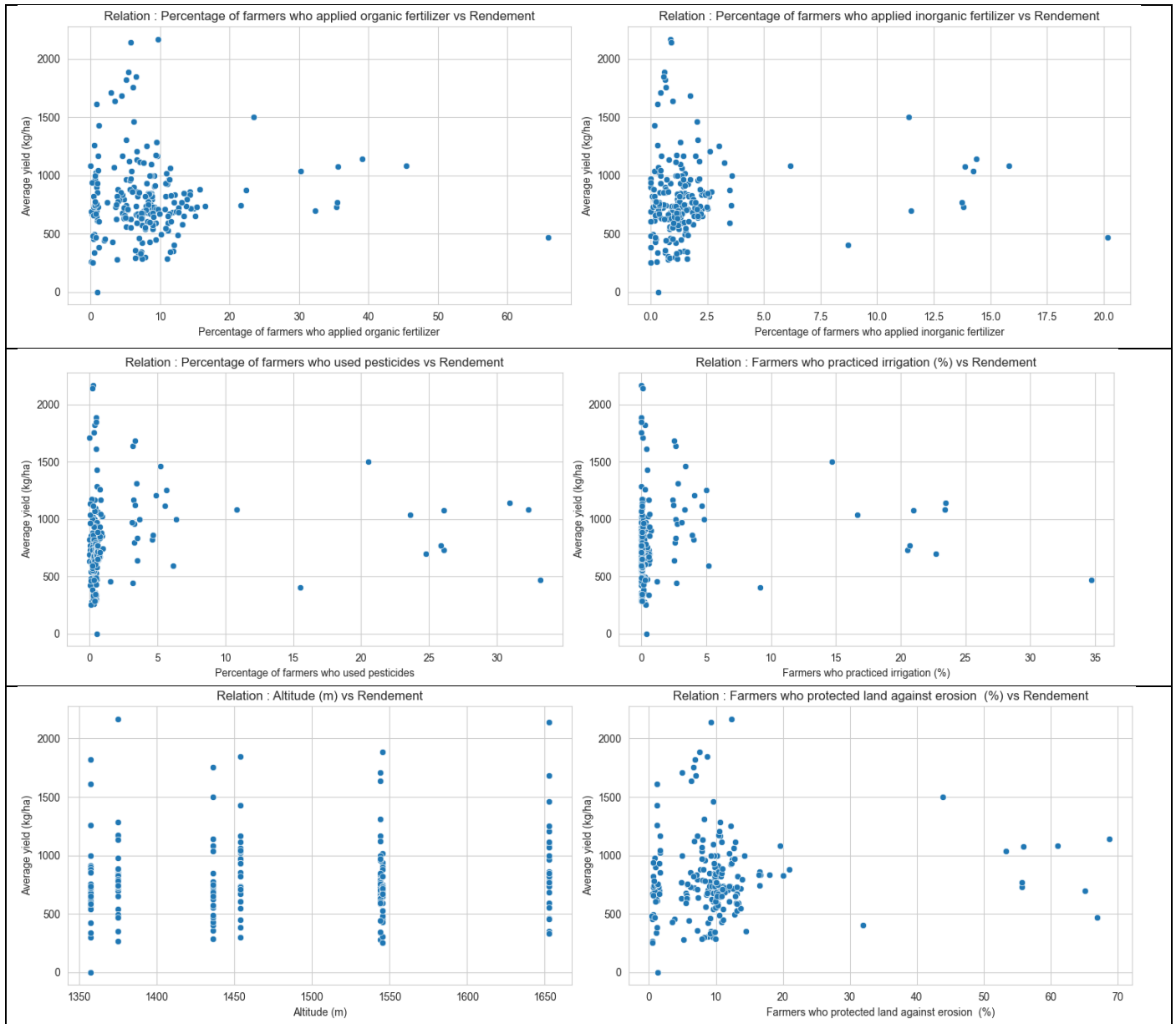


Figure 20 : Analyse des Dépendances Partielles (XGBoost)





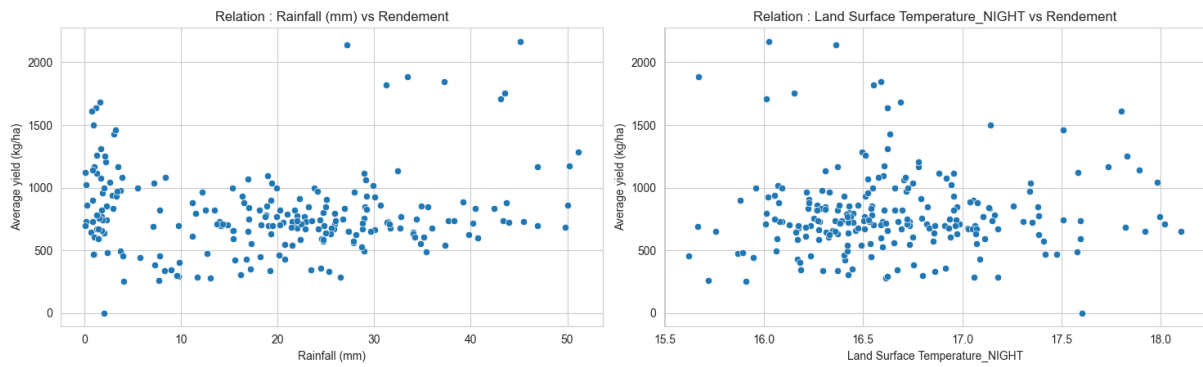


Figure 21 : Graphe de corrélation de Pearson

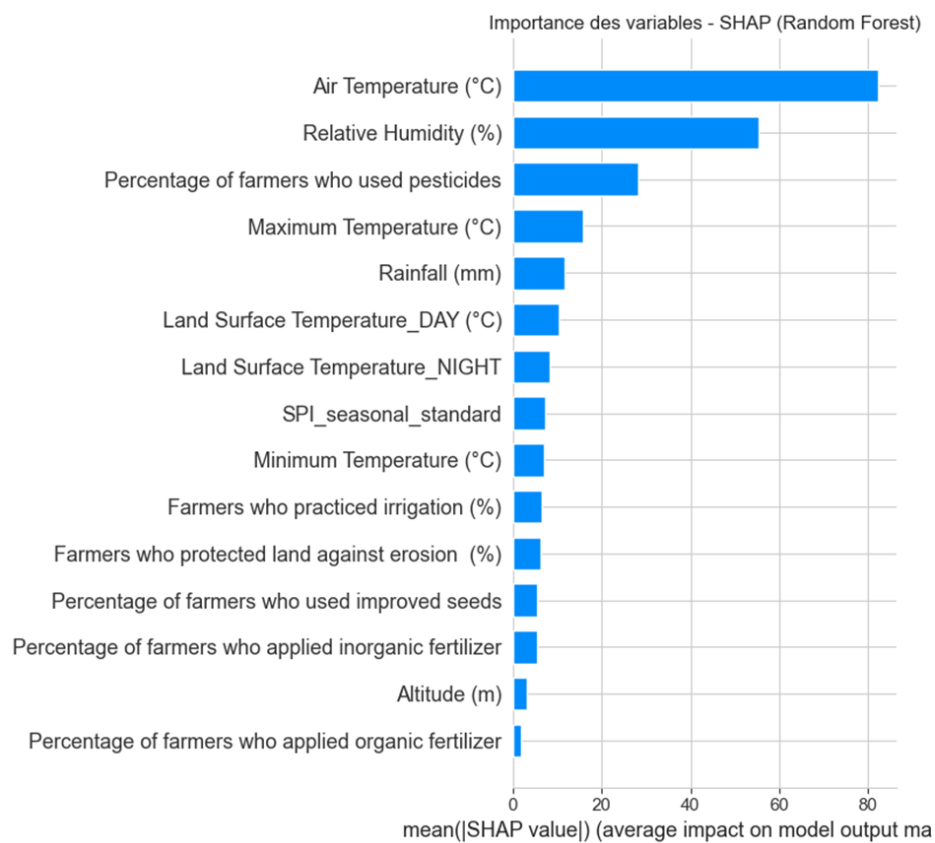


Figure 22 : Importance moyenne des facteurs explicatifs (SHAP)- Random Forest

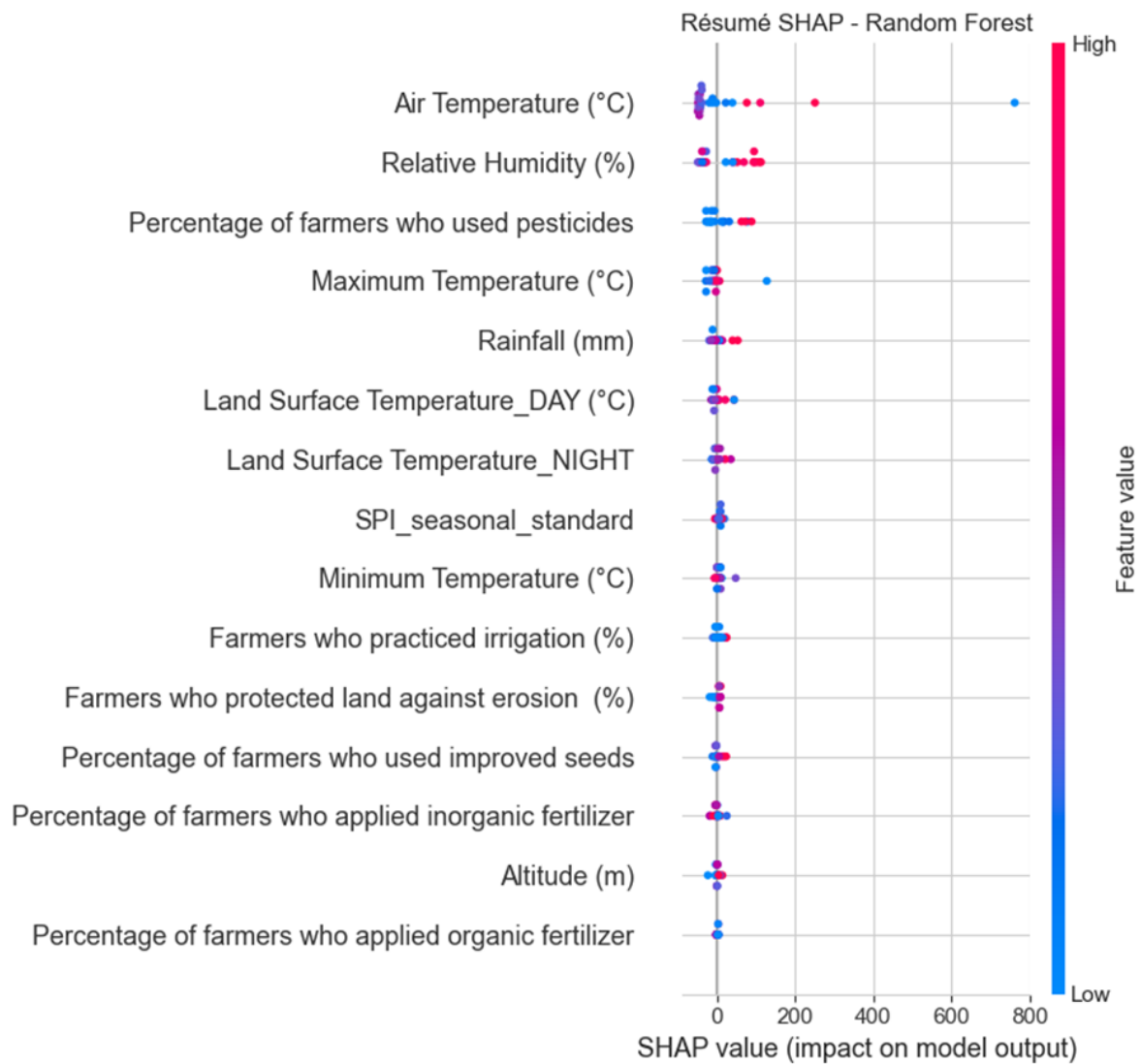
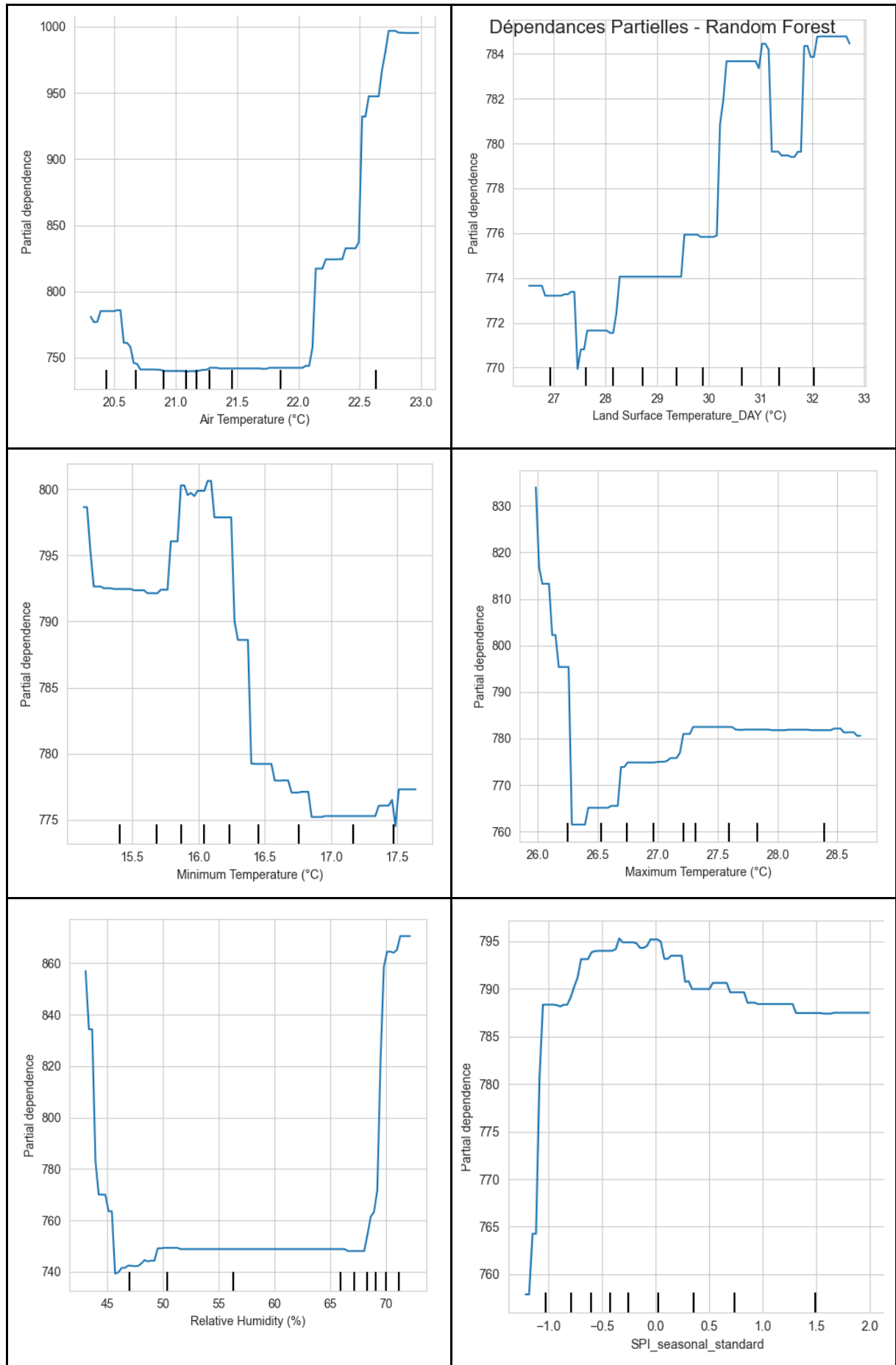
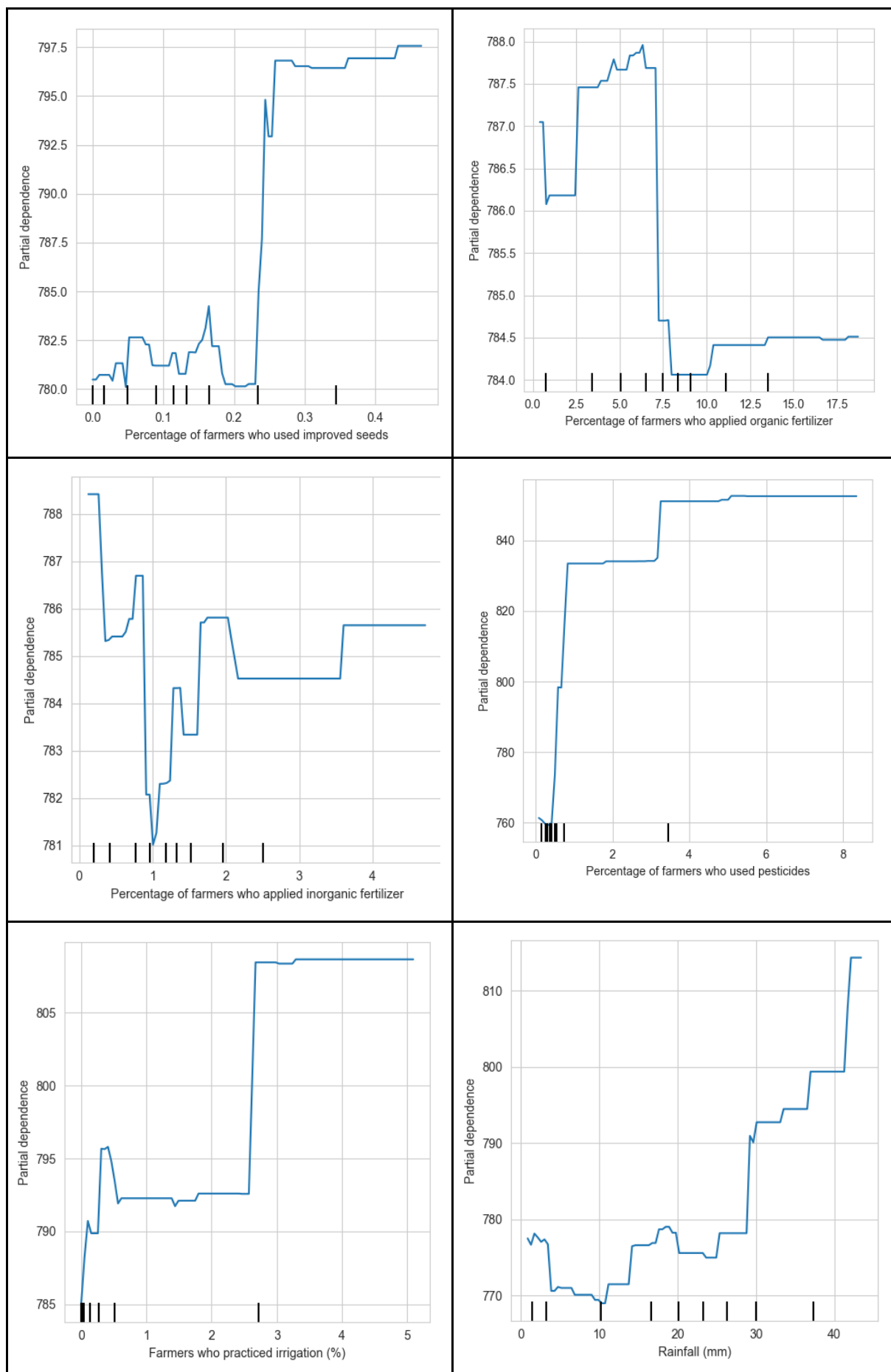


Figure 23 : Variables clés selon SHAP - Random Forest





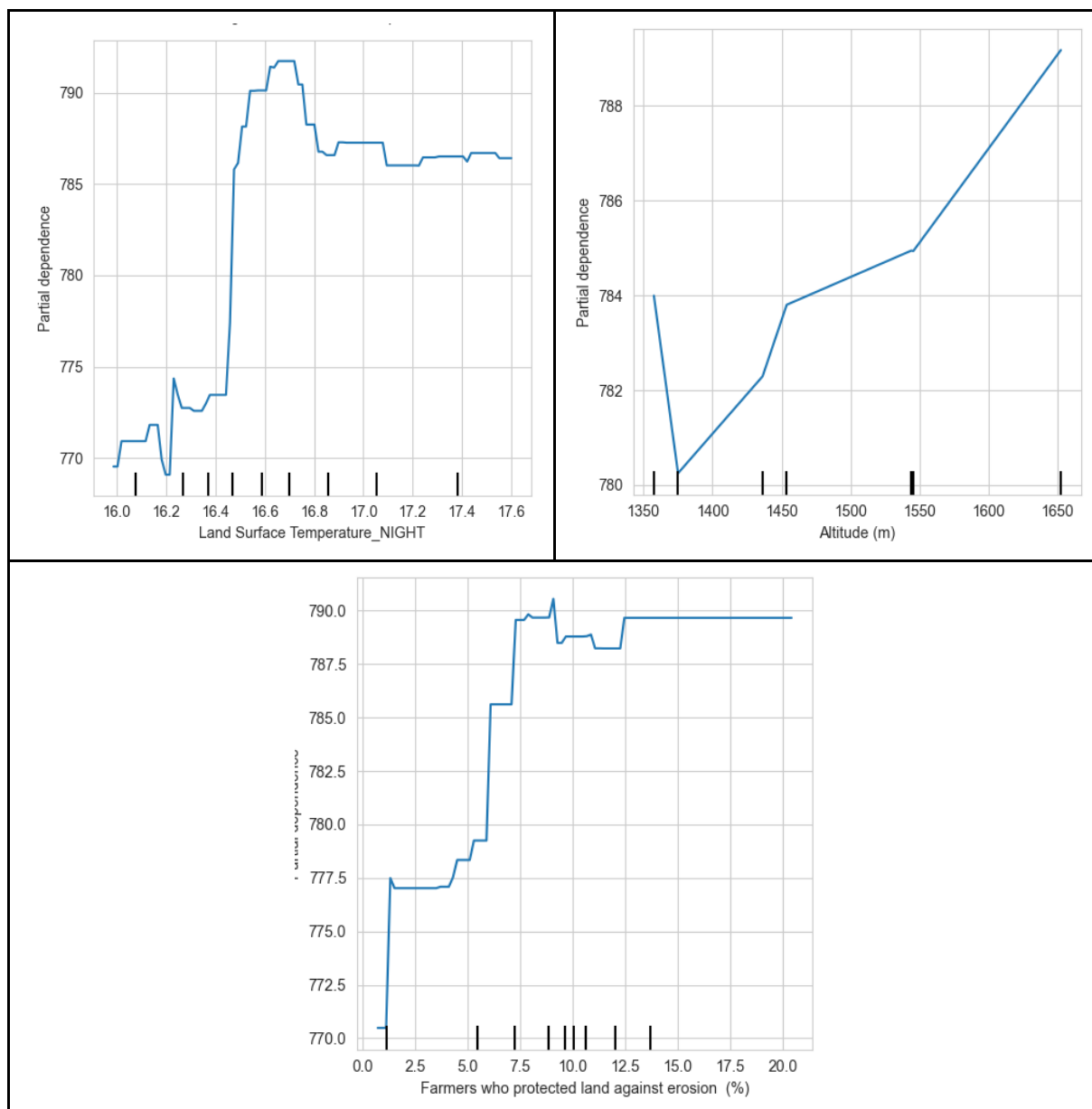


Figure 24 : Analyse des Dépendances Partielles (Random Forest)