

Titre : Analyse du terme de l'échange bétail/céréale pour l'orientation des mesures de gestion des crises alimentaires au Burkina Faso

Title: Analysis of livestock /cereal terms of trade to guide food crisis management measures in Burkina Faso

Wièmè SOME^{1,2,3}, Pierre OZER³, Bakary DJABY³, Hassan Bismark NACRO², Adrien Marie Gaston BELEM², Bernard TYCHON³

¹Ministère des Ressources Animales & Halieutiques, Secrétariat Permanent en charge de la gestion des crises et vulnérabilités en élevage, Avenue du Président Thomas Sankara, 03 BP 7026, Ouagadougou, Burkina Faso ; E-mail: wienesome@gmail.com (W.S)

²Université Nazi BONI, Institut du Développement Rural, 01 BP 1091, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso ; E-Mail: nacrohb@yahoo.fr (B.H. N) ; belemamg@hotmail.fr (A. M. G.B)

³ Université de Liège (ULiège), UR SPHERES, Faculté des Sciences, Campus d'Arlon, Département des Sciences et Gestion de l'environnement, Equipe Eau et Environnement-Développement, 185 Avenue de Longwy B-6700, Arlon, Belgique ; E-Mail: Bakary.Djaby@uliege.be (B.D); pozer@uliege.be (P.O); Bernard.Tychon@uliege.be (B.T)

Conflits d'intérêts

Cet article a été rédigé sans conflit d'intérêts.

Remerciements

Cette recherche a été possible grâce au financement de la bourse doctorale de mobilité de l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) qui a permis notre séjour au sein l'unité de recherche SPHERES du département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège. A cet effet, nous remercions vivement la Coopération au Développement, et l'Université de Liège pour leur soutien à la réalisation de cette ambition.

Contribution des auteurs

Tous les auteurs ont contribué à la réalisation de cette étude. La collecte de données institutionnelle et les analyses ont été effectuées par **Wièmè SOME**. La première ébauche du manuscrit a été guidée par **Hassan Bismarck NACRO, Adrien Marie Gaston BELEM, et Bakary DJABY**. La révision critique du manuscrit a été réalisée par **Pierre OZER et Bernard TYCHON**. Tous les auteurs ont lu et approuvé le manuscrit final.

Résumé

Le terme de l'échange bétail/céréale (TDE) est un indicateur local utilisé pour le suivi des conditions d'accès des populations vulnérables aux sources de nourritures dans les pays du Sahel. Il est actuellement utilisé pour l'alerte précoce dans le dispositif de la sécurité alimentaire au Burkina Faso. Il contient des informations facilitant l'orientation des mesures de gestion des crises alimentaires. L'objectif de cette étude vise à déterminer l'importance relative de vingt variables pré-identifiées comme pouvant potentiellement expliquer la dégradation des termes des TDE. L'étude a été menée dans la zone d'influence du marché au bétail de Kaya couvrant le Sahel fragile au Burkina Faso. Des séries chronologiques mensuelles sur la période 2003 à 2021 des prix du taureau, du bélier, du bouc et du sorgho, ont été utilisées pour le calcul des TDE selon les normes de l'Organisation internationale du travail. La mesure de l'importance relative des variables dans leur explication des variations de TDE a été conduite à partir d'une approche Random Forest. Des tests de stationnarité ont été menés sur ces séries chronologiques de TDE, afin de s'assurer de leurs stabilités, garantissant les conditions de mise en œuvre de Random Forest. Les résultats indiquent que les cinq variables présentant les « mesures de l'importance des variables » les plus élevées sont : la monnaie (Cédi), l'inflation alimentaire, l'indice de sécheresse (PDSI), l'indice de transport et le prix du carburant. Cette démarche de la mesure de l'importance des variables pourrait être améliorée en élargissant la liste des variables potentiellement explicatives des TDE considérées dans l'analyse et en répliquant l'analyse sur d'autres localités.

Mots clés : Termes de l'échange, produits agropastoraux, importance des variables, sécurité alimentaire, Burkina Faso

Abstract

The term livestock/cereal exchange (TDE) is a local indicator used to monitor the conditions of access of poor populations to food sources in the Sahel countries. It is currently used for early warning in the food security system in Burkina Faso. It contains information to help guide food crisis management measures. The objective of this study is to determine the relative importance of twenty variables identified as potentially explaining the degradation of (TDE) terms. The study was conducted in the area of influence of the Kaya livestock market covering the fragile Sahel in Burkina Faso. Monthly time series for the period 2003 to 2021 of bull, ram, goat and sorghum prices were used for the calculation of TDE according to International Labour Organization standards. The measurement of the relative importance of variables in their explanation of TDE variations was conducted using a Random Forest approach. Stationarity tests were conducted on these TDE time series, to ensure their stability, guaranteeing the conditions of implementation of Random Forest. The results indicate that the five variables with the highest "measures of variable importance" are: currency (Cedi), food inflation, drought index (PDSI), transport index and fuel price. This approach to measuring the importance of variables could be improved by expanding the list of variables potentially explanatory of the TDE considered in the analysis and by replicating the analysis on other localities.

Keywords: Terms of trade, agropastoral products, variable importance, food security, Burkina Faso

1. INTRODUCTION

Le suivi de la vulnérabilité structurelle et conjoncturelle des ménages sur le plan alimentaire reste un défi majeur dans le dispositif du système d'alerte précoce (SAP) au Burkina Faso (<https://sisa.bf/>). Le commerce des produits agropastoraux occupe une place importante dans la réalisation de la sécurité alimentaire des groupes vulnérables (AFD, 2010). La chaîne de valeur bétail-viande présente une diversité d'acteurs qui contribuent à la création de la valeur ajoutée. La contribution de la filière bétail-Viande est estimée à 9,35% pour le PIB national et à 25,25 % pour le PIB agricole (EASYPol, 2007). Plus de 20 050 emplois à temps plein concernaient le commerce du

bétail au Burkina Faso (**IEPC, 2005**). Les marchés des produits agropastoraux sont des instruments particulièrement utiles pour l'évaluation de la disponibilité et de l'accessibilité des sources de nourriture aux populations vulnérables (**PAM, 2013; AFD, 2010**). En période de crise, les prix des produits agropastoraux sont utiles pour produire des informations aidant à gérer la situation alimentaire des plus vulnérables (**DEVARAJAN AND KASEKENDE, 2011**).

Les groupes vulnérables en milieu rural sont représentés par les catégories de ménages qui dépendent des marchés pour la commercialisation de leurs produits et de l'achat de céréales de base pour leur alimentation (**OUÉDRAOGO et al., 2007; PINAUD, 2019**). Ces catégories de populations sont représentées par les petits agriculteurs-éleveurs, les pasteurs, les agropasteurs, les commerçants de bétail et de céréales. Les crises affectant les marchés de produits agropastoraux ont un impact sur leurs revenus et leurs conditions d'alimentation (**GOLAY, 2010**). Le prix élevé des céréales et sa forte variation impactent négativement les moyens de subsistance et la consommation alimentaire des ménages vulnérables et accentuent leurs recours à des stratégies extrêmes d'adaptation (**TRAORÉ et al., 2022**). En période de crise, les lieux d'approvisionnement et les circuits de distribution peuvent être perturbés avec un risque très élevé de la dégradation de leurs conditions de vie (**PAM, 2013 ; AFD, 2010**). Le nombre croissant des populations vulnérables appelle à une offre alimentaire importante à des prix plus accessibles aux plus pauvres (**TOMEN, 2014; BASSOLET ET LUTZ, 1998**). Les pouvoirs publics sont amenés à gérer des situations de crise où les faits sont incertains, les valeurs contestées, les enjeux importants, et les décisions urgentes (**FUNTOWICZ AND RAVETZ, 1993**). A cet effet, le suivi des facteurs de volatilité des prix des produits agropastoraux est indispensable pour faciliter l'orientation des mesures politiques en faveur des groupes vulnérables (**TOMEN, 2014, BASSOLET ET LUTZ, 1998**).

Les pays de la zone de l'Union Economique Monétaire Ouest Africain (UEMOA) restent très exposés aux chocs extérieurs compte tenu de la grande dépendance de leurs économies aux marchés extérieur de l'UEMOA (**BCEAO, 2022**). Ainsi, le suivi du coût de la vie occupe une place importante dans les politiques de prévention et de gestion des crises alimentaires (**BCEAO, 2022**). Il est réalisé à partir d'indicateurs macroéconomiques. Ces indicateurs ont pour avantage d'être relativement faciles à calculer, d'être observables régulièrement, et de ne pas impliquer des coûts financiers importants pour leur élaboration (**BCEAO, 2001**). A l'échelle des pays, l'indice harmonisé des prix à la consommation (IHPC) est élaboré pour les grandes agglomérations urbaines en ciblant les produits de grande consommation (**INSD, 2022**).

Cependant, un grand contraste peut exister entre la réalité de la vie en ville et celle du milieu rural. Les villes sont alimentées la majeure partie du temps par des produits importés qui transmettent l'inflation aux produits locaux (**BCEAO, 2008**), ce qui peut constituer une source importante de détérioration des TDE pouvant mener à des crises alimentaires chez les plus pauvres. En 2008, l'augmentation des prix des produits alimentaires a occasionné des protestations et des manifestations violentes contre la vie chère dans les principales villes du Burkina Faso (**DGPSE, 2008**). En 2009, le TDE a été adopté dans le dispositif de la sécurité alimentaire pour améliorer le suivi de la dégradation du pouvoir d'achat des populations en milieu rural. Le TDE bétail/céréale est défini comme le rapport de l'indice élémentaire du prix d'une catégorie de bétail (Ib (t)) sur l'indice élémentaire de 100Kg de la céréale la plus consommée de la localité (Ic (t)) (**DGPSE, 2009**).

Les interactions entre les marchés de céréales, du bétail et le marché financier ont été étudiées par **COLLIOT (1993)** au Nord de la province du Yatenga au Burkina Faso. A cette époque, il rapportait le comportement peu rationnel des acteurs qui interviennent sur ces marchés. A chaque marché, il était observé des femmes qui échangeaient du lait soit contre du mil, ou de l'argent avec l'unité de mesure la louche. Ainsi, **COLLIOT (1993)** définit pour la première fois le TDE lait/mil comme étant le rapport des valeurs d'échange entre la louche de lait et la louche de mil pour le suivi de l'évolution de la situation alimentaire au cours de l'année. Par ailleurs, il rapporte que tout ce qui intéressait l'éleveur à la période de soudure alimentaire était uniquement de convertir la valeur de son

animal en quantité de mil. Cependant, le TDE n'a pas été indexé au prix d'un animal vendu à cause des difficultés rencontrées pour établir les prix du bétail en absence du Système d'Information sur les Marchés de bétail (SIM/bétail). L'établissement du TDE en 2009 a facilité le rapprochement des SIM dans leur fonctionnement. Ce rapprochement s'est manifesté à travers l'identification des marchés communs pour le suivi, et la mise en place d'une méthode d'analyse des prix et des termes d'échange (**DGPSE, 2009**).

De nos jours, le TDE est un indicateur local et d'origine contrôlée qui fait référence au bouc (mâle de la chèvre) du Plateau Mossi au Burkina Faso. Le bouc est l'animal possédé en majorité par les plus pauvres au niveau des ruminants. Le TDE est mieux compris et utilisé par les populations dans les villages pour décrire leurs propres conditions de vie. Il est l'un des indicateurs les plus utilisés par les acteurs du dispositif de la sécurité alimentaire pour l'appréciation des conditions d'accès des ménages pauvres aux sources de nourriture au Burkina Faso. Il est utilisé dans le dispositif de la sécurité alimentaire au Sénégal, et son mode de calcul se réfère aux prix des bovins, caprins, ovins et du riz brisé non parfumé importé (**MEPA, 2024**). Au niveau du Centre Régional AGRHYMET, il existe une version du TDE calculée sur la base du rapport de prix des cultures de rentes sur les céréales (**CILSS, 2023**). Mais cet indice formulé de cette manière permet de cerner la réalité des populations rurales vivantes dans des pays côtiers. En effet, en zone sahélienne, les agriculteurs de cultures de rentes sont les meilleurs producteurs de céréales avec un indice d'autonomie céréalière très élevé. Le TDE est élaboré et communiqué périodiquement dans le dispositif du Système d'alerte précoce (SAP) de la sécurité alimentaire des pays du Sahel (**CILSS, 2023**). La FAO dispose d'un outil de surveillance et d'analyse des prix des aliments (FPMA) avec un indicateur d'alerte précoce permettant de détecter une croissance anormale des prix sur les marchés de consommation (<https://fpma.fao.org/>). L'indice d'anomalies des prix (IPA) des denrées alimentaires informe sur la présence d'un choc sur le marché, mais son utilisation est aussi limitée pour la prise de décision éclairée.

Dans le dispositif du SAP au Burkina Faso, le seuil déclencheur du TDE pour les mécanismes de gestion des crises alimentaires est fixé à une valeur inférieure à 0,7 pendant au moins trois mois (**DGPSE, 2009**). Au Sénégal, une échelle d'appréciation du pouvoir d'achat des éleveurs est construite à partir du TDE (**MEPA, 2024**). Au Burkina Faso, les valeurs des TDE calculées lors de la crise alimentaire de 2012 ont évolué à proximité du seuil d'alerte pour plusieurs marchés au bétail situés en zone sahélienne. Cette situation était expliquée par le prix élevé du mil à la sortie d'une mauvaise campagne agropastorale obligeant les éleveurs à brader leurs bétails pour constituer leurs réserves de céréales (**MRAH, 2018**). La sécheresse de 2012, dans la zone sahélienne avait été caractérisée par un début tardif de la campagne agropastorale et une fin précoce à partir du mois d'août, poussant de nombreux agropasteurs à l'abandon de leurs champs de mil. L'accélération de la détérioration du terme de l'échange à cette époque avait contribué à éclairer les acteurs du dispositif de la sécurité alimentaire sur la nécessité d'initier des opérations de vente de céréale à prix social dans les boutiques témoins et de distribuer gratuitement des vivres au profit des couches les plus vulnérables. Au Burkina Faso, l'année 2012 avait été reconnue officiellement par le Gouvernement comme une période de crise alimentaire (**MRAH, 2018**). La figure 1 présente le cluster des points d'évolution mensuelle des TDE taureau sur le marché de Kaya de 2008 à 2020.

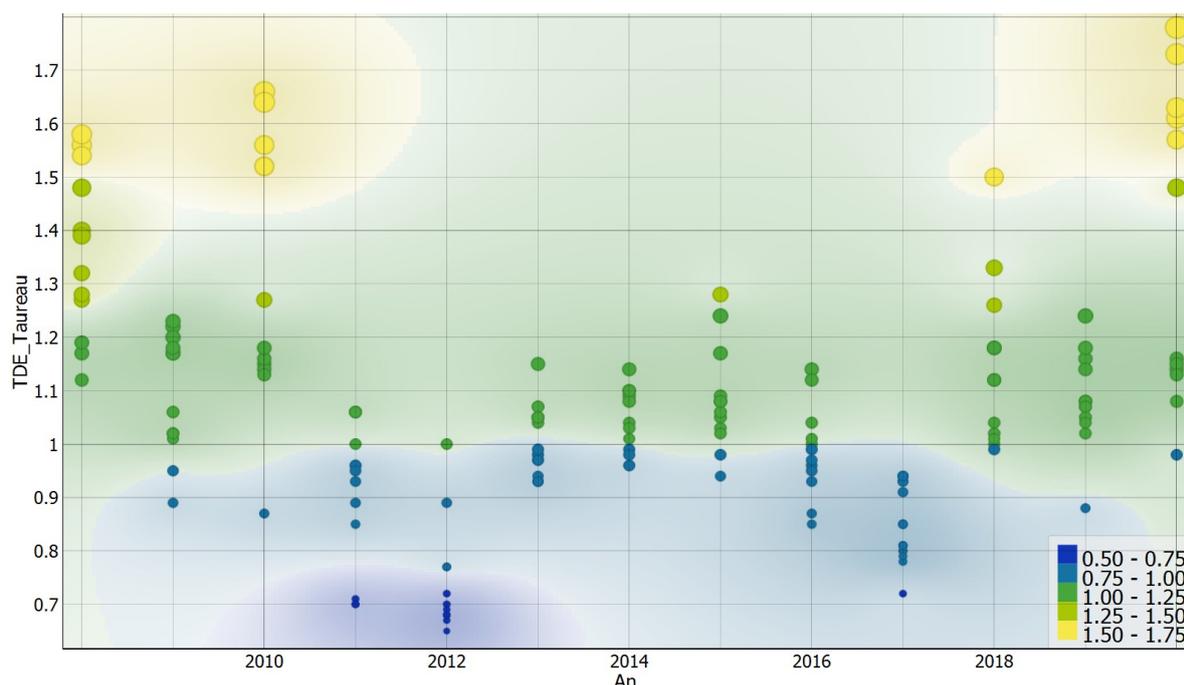


Figure 1. Cluster des points de distribution des valeurs TDE du taureau sur le marché au bétail de Kaya de la période 2008 à 2020.

L'indice TDE est un bon marqueur de suivi de l'évolution des conditions alimentaires des plus pauvres au cours de l'année car il permet de visualiser les variations interannuelles et mensuelles. Ainsi, son utilisation se limite uniquement qu'à la comparaison de ses valeurs par rapport aux différentes périodes pour l'alerte précoce (AFD, 2010; MAAHM, 2021). L'analyse du TDE est très limitée dans les dispositifs de la sécurité alimentaire des pays du Sahel, alors qu'il est porteur d'information stratégique pour l'aide à la prise de décision en matière de gestion des crises alimentaires affectant les plus vulnérables. Il n'est pas défini dans le dispositif du SAP des seuils déclencheurs de l'indicateur TDE pour les cas de crises inflationnistes marquées par des valeurs très élevées des TDE. Par ailleurs, l'identification des variables pouvant potentiellement expliquer la dégradation du TDE n'a jamais été faite alors que cela pourrait permettre d'identifier des informations importantes pour l'orientation des mesures de gestion des chocs affectant les marchés des produits agro-pastoraux.

Les périodes de crises alimentaires sont marquées par une dégradation très prononcée du terme de l'échange bétail/céréale (AFD, 2010). Ce qui oblige parfois les pouvoirs publics à trouver les bonnes mesures pour garantir des conditions d'alimentation convenables aux plus pauvres (BLEIN et al., 2008). Cependant, décider en période de crise est une tâche très périlleuse à cause de la faible connaissance des facteurs agissants (FALLON et al., 2020). Certains facteurs de crise sont très difficiles à cerner du fait du manque de données, ou d'insuffisance des analyses liées à la complexité et aux limites des techniques et méthodes utilisées (AFD, 2010). Une bonne connaissance des facteurs de crise permet de faciliter l'orientation des mesures politiques de gestion des urgences (AFD, 2010).

Ainsi, la méthode statistique de la mesure de l'importance des variables (VIM : Variable importance measure) (GENUER, 2010; HJERPE, 2016) pourrait aider à mieux comprendre les variables entrant dans la dégradation des TDE. Plusieurs techniques existent pour la mesure du VIM (MAIN, 2018), dont l'approche de Random Forest (DESBOULETS, 2018) qui a été sélectionnée dans cette étude. Les forêts aléatoires de BREIMAN (2001) ou Random Forest sont de nos jours,

l'une des techniques les plus populaires et utilisées pour l'établissement de modèles de prédiction (**GENUER, 2010**). Cette technique via permutation des variables permet de trier et classer les variables en fonction de leur importance pour prédire la variable d'intérêt souhaitée (**STROBL et al., 2007**). Au Nigeria, l'approche de Random Forest a été utilisée pour la prédiction de l'indice de prix des maisons au Nigeria (**ADETUNJI et al., 2022**). Aux Etats-Unis, la prévision de l'inflation reste une tâche difficile, mais la méthode de "machine learning" qui mérite le plus d'attention pour ce faire est le modèle de forêt aléatoire grâce à sa bonne performance liée à sa spécificité pour la sélection des variables, et aux non-linéarités potentielles entre les variables macroéconomiques (**MEDEIROS et al., 2021**). En Turquie, il est rapporté que les forêts aléatoires ont fourni des résultats acceptables pour la prévision multivariée des prix de produits agricoles (**ÖZDEN, 2023**). Au Canada, **RAHMANI et al., (2024)** ont prouvé que Random Forest et AdaBoost présentent les meilleurs scores de performance pour la prédiction des prix de bovins. Les techniques de "machine learning" sont une opportunité pour l'identification des variables pouvant influencer les équilibres de marchés des produits agropastoraux.

L'objectif global de cette étude vise à contribuer à l'identification des variables pouvant potentiellement expliquer la dégradation des TDE bétail/céréale en vue de faciliter l'orientation des mesures politiques de gestion des crises alimentaires en faveur des groupes vulnérables au Burkina Faso. Plus précisément, il s'agit : i) de trouver une meilleure formulation du TDE bétail/céréale ; ii) de décrire les caractéristiques statistiques en lien avec la stationnarité des séries chronologiques des TDE bétail/céréale ; iii) et de mesurer l'importance relative de 20 variables pré-identifiées comme pouvant potentiellement expliquer la dégradation des TDE bétail/céréale sur le marché de Kaya couvrant la zone du Sahel fragile au Burkina Faso.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

Cette étude est menée au marché de bétail de Kaya qui est le chef-lieu de la région du Centre-Nord au Burkina Faso. Ce marché a une zone d'influence couvrant la partie du Sahel fragile au Burkina Faso (Figure 2). Cette zone d'influence regroupe les régions frontalières du Centre-Nord et la région du Centre abritant le plus grand marché de consommation intérieure du Burkina Faso à Ouagadougou. Elle est géographiquement située entre les latitudes 11, 5° et 15, 1° et les longitudes 2, 9° et 2, 4°. Elle représente la zone de genèse des crises alimentaires au Burkina Faso. La plupart des crises alimentaires dans cette zone sont liées à une insuffisance de précipitations entraînant un manque d'eau, de faibles rendements fourragers et céréaliers.

Le marché de bétail de Kaya est un point de regroupement stratégique d'animaux en provenance de la région du Sahel (Djibo, Dori, Gorom-Gorom, Seytenga), du Nord (Youba) et du marché de Yilou situé à proximité. Le bétail collecté à Kaya est convoyé vers les plus grands marchés de consommation intérieure (à Ouagadougou) et d'exportation (à Pouytenga, et Fada N'Gourma et Bittou). Kaya, chef-lieu de la région, enregistre le plus grand nombre de Personnes Déplacées Internes (PDI) suite aux attaques terroristes. A la date du 31 juillet 2022, la population des PDI au Burkina Faso était estimée à 2 641 697 de personnes et à plus de de 657 041 personnes dans la région du Centre Nord, soit à plus de 25% du total national (**OIM, 2022**). Cette situation crée une forte demande des besoins d'assistance alimentaire et la nécessité d'un suivi humanitaire rapproché (**OZER et al., 2022**).

Les années de crises alimentaires dans le Sahel fragile au Burkina Faso sont marquées par des évolutions négatives des paramètres agro-climatiques. Cette zone a beaucoup souffert dans le passé des effets adverses du climat. Les plus importants chocs climatiques relevés sur la période de 1970-2022 ont été les sécheresses des années 1970-1973 ; 1983-1987 ; 1990-1991 ; 1992-1993 ; 1996-

1997 ; 2001-2002 ; 2004-2005 ; 2011-2012 ; 2015-2016 (IDRC, 1985; SIMONSSON, 2005; VANIER, 2005; HOUTONDI et al., 2006; DE LONGUEVILLE et al., 2016). Ces périodes de sécheresses ont été classées de gravité modérée à extrême. Les années de sécheresses sévères et extrêmes sont marquées par des pertes importantes de bétail, et par des déficits de céréales conduisant à une hausse de leur prix et à une décapitalisation d’animaux suite à des ventes massives des reproducteurs (CILSS,2004). Les écosystèmes dans le Sahel fragile sont caractérisés par une grande fluctuation interannuelle de la production fourragère. La figure 2 présente les rendements fourragers des pâturages de la campagne 2020-2021 dans la zone du Sahel fragile au Burkina Faso.

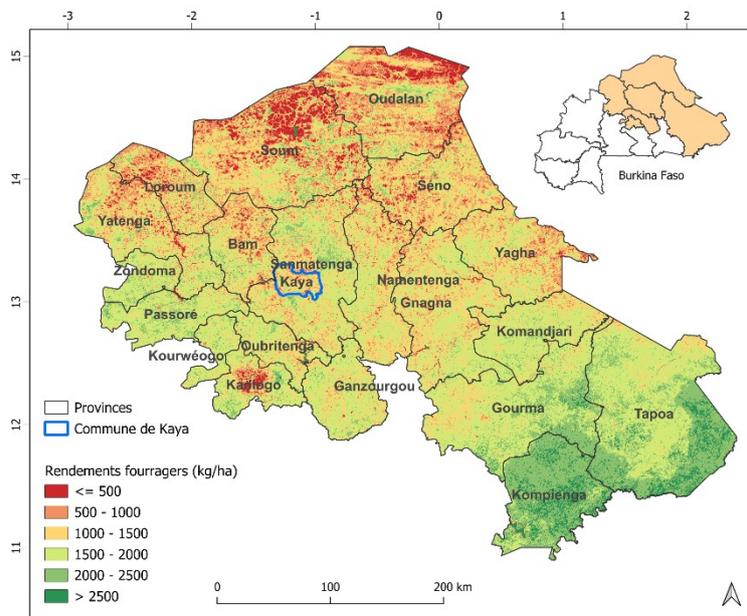


Figure 2. Rendements fourragers des pâturages du Sahel fragile au Burkina Faso prédits par le modèle national d’estimation des pâturages de la campagne agropastorale 2020-2021 (MRAH, 2020)

- **Relevé des prix des produits agropastoraux**

Dans la zone du Sahel fragile, la vente du bétail pour l’achat des céréales est une pratique très répandue en période de soudure alimentaire (JANIN, 2004). Les produits agropastoraux concernés par cette étude sont le taureau, le bélier, le bouc et le sorgho. Les prix de ces produits sont issus des Systèmes d’Information sur les Marchés (SIM) dont le SIM/bétail et le SIM/céréales.

Dans la région du Centre-Nord, le sorgho est la céréale la plus consommée et utilisée au niveau national pour la fabrication de la bière locale. Les relevés des prix de céréales se font sur les marchés à partir de pesées des Unités de Mesure Locale (UML).

Le SIM/bétail, présente des données mensuelles incomplètes pour la période 2003 à 2022 pour le marché au bétail de Kaya. Pour compléter ces données, des registres d’enregistrement des prix du marché à bétail de Kaya ont été consultés pour établir les séries mensuelles manquantes. L’établissement des prix mensuels a été possible en utilisant la démarche de calcul des prix mensuels du SIM/Bétail.

Cette démarche est basée sur le prix des transactions conclues en l’absence de bascule pour la pesée des animaux. Le prix moyen d’un jour de marché pour une catégorie d’animaux est une variable dépendante du temps d’animation du marché et de l’état physique de l’animal présenté. Ainsi, pour une catégorie d’animaux vendus, le prix relevé est observé en trois temps (**t1, t2 et t3**) correspondant à des niveaux d’animation différents pendant lesquels les acheteurs et les vendeurs ont conclu leur

transaction. L'état physique du bétail peut correspondre au format bon ou mauvais. Le prix moyen du jour (**Prj**) du marché pour une catégorie d'espèce animale est établi par la moyenne arithmétique des prix observés aux temps t1 ; t2 et t3 pour les animaux de formats bon ou mauvais (équation 1). Le prix moyen mensuel (**Prm**) dépend du nombre total des ventes réalisées pour l'ensemble des jours de marché du mois et du Prj (équation 2). Les formules suivantes présentent les termes d'expression des prix du jour de marché et du prix mensuel de chaque catégorie d'animaux suivi.

$$Prj = \frac{(Pbt\ 1 + Pbt\ 2 + Pbt\ 3 + Pmt\ 1 + Pmt\ 2 + Pmt\ 3)}{6} \quad (1)$$

$$Prm = \frac{(NVj\ 1 * Prj\ 1 + NVj\ 2 * Prj\ 2 + \dots + NVjn * Prjn)}{(NVj\ 1 + NVj\ 2 + \dots + NVjn)} \quad (2)$$

Avec, Prj : Prix moyen du jour ; Prm : Prix moyen mensuel ; j : jour de marché, Pb : prix de l'animal en bon format ; Pm : prix de l'animal en mauvais format ; NV : nombre de vente ; t : temps d'animation du marché.

2.2. Identification des variables potentielles explicatives du TDE

Plusieurs variables contribuent à expliquer la baisse du pouvoir d'achat des ménages en milieu rural (**AFD, 2010**). Selon le cadre théorique du Food Security Monitoring System (FSMS), la vulnérabilité à l'insécurité alimentaire des ménages est liée aux conditions environnementales, économiques, aux pratiques socio-culturelles et à la gouvernance (**PAM, 2012**). Ceci nous a amené à identifier des variables agro-climatiques impactant la production agropastorale, des variables en lien avec le commerce des produits agropastoraux, de l'économie et les finances, et des variables associées aux pratiques socio-culturelles (Figure 3). La liste détaillée des vingt variables identifiées pour cette étude est reprise ci-après :

- **i) les variables agro-climatiques.** Elles ont une forte influence sur l'environnement de la production qui détermine l'offre annuelle des produits agricoles et alimentaires, y compris le fourrage et l'eau. Ces variables climatiques sont le cumul mensuel des précipitations (**Cum_PPT**), l'évapotranspiration de référence (**ET0**), l'évapotranspiration réelle (**AET**), le déficit climatique en eau (**DEF**), la radiation solaire (**Srad**), les températures maximales (**Tmax**) et minimales (**Tmin**) de la surface de la terre, l'humidité du sol à 10 cm (**Hu_soil**) et le Palmer Drought Severity Index (**PDSI**). Les données mensuelles sur ces variables climatiques sont disponibles et librement accessibles à partir du site web <https://climatetoolbox.org/>. Ces données ont été extraites notre zone d'étude et couvre toute la zone du "Sahel fragile" du Burkina Faso.
- **ii) les variables économiques et financières.** Elles correspondent aux prix des hydrocarbures qui déterminent le coût de transport des produits agropastoraux, à la valeur de la monnaie dont le Cédi (Ghana), et le Naira (Nigeria) convertis en FCFA, aux indices de consommation alimentaire (**I_aliment**) et de transport (**I_transp**), à l'inflation alimentaire (**Infl_Aliment**) et du transport (**Infl_transp**). Le Cedi et le Naira ont été ciblés du fait que le commerce du bétail est très développé avec le Ghana et le Nigeria. Ces acheteurs étrangers sont très fréquents sur les principaux marchés d'exportation. Les données économiques et financières sont disponibles en temps réel et librement accessibles sur le site de l'Entrepôt de Données Economiques et Financières (EDN) de la Banque Centrale des Etats de l'Afrique de l'Ouest (BCEAO) via le site web <https://edenpub.bceao.int/index.php>. Les prix des hydrocarbures sont des prix de vente à la pompe relevés pour la ville de Kaya. Il s'agit du prix du litre d'essence super 91, du pétrole, du gasoil et du mélange « essence à 2 temps ». Les données ont été mise à disposition à la suite d'une demande adressée à la Société Nationale Burkinabè d'Hydrocarbures (SONABHY). **Des mesures d'ajustements des prix** sont opérées par le Gouvernement suivant la conjoncture nationale et internationale. Ces mesures correspondent à des compensations ou à des augmentations de prix de vente.

- **iii) les variables associées aux pratiques socio-culturelles.** Les périodes des fêtes entraînent une hausse de la demande en bétail et un besoin accru d'argent chez les éleveurs. La période d'influence retenue est le mois précédant la fête et le mois de la fête. La vente des animaux pour les préparatifs de la fête peut s'étendre au moins sur deux mois. Les fêtes religieuses qui ont été retenues sont la Tabaski, le Ramadan, la Pâques et la Saint-Sylvestre.
- **iv) les variables de la mercuriale.** Elles portent sur les prix mensuels du taureau, du bélier du bouc et du sorgho. Le sorgho est la céréale la plus consommée au Centre-Nord et fait l'usage important pour la fabrication de la bière locale au niveau national. Les ruminants mâles sont les plus vendus par les ménages pauvres. Leur état d'embonpoint dépend de la qualité de la campagne agropastorale. Les prix de ces produits agropastoraux ont été mis à la disposition à la suite de demande institutionnelle. La figure 3 présente la synthèse des sources de données utilisées en lien avec les variables ciblées.

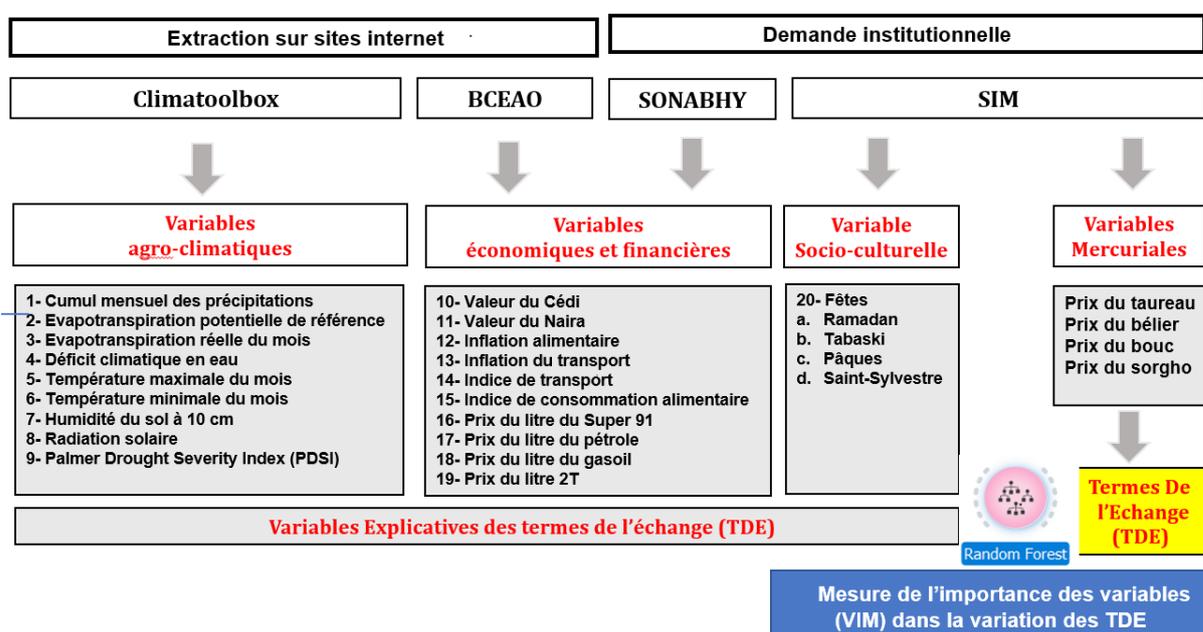


Figure 3. Sources de données utilisées et les variables ciblées par cette d'étude

2.3. Formulation du terme de l'échange bétail /céréale

Dans le cadre de cette étude, le terme de l'échange bétail/céréale sera considéré comme un indicateur permettant de mesurer le niveau de détérioration du pouvoir d'achat des groupes vulnérables en matière d'insécurité alimentaire. Il est défini comme le rapport de l'indice élémentaire du prix d'une catégorie de bétail ($I_b(t)$) sur l'indice élémentaire du prix de la céréale la plus consommée de la localité ($I_c(t)$). L'indice élémentaire est le rapport du prix du produit à l'instant t sur son prix de référence (**MAZEROLLE, 2006**) qui correspond au prix moyen observé sur plusieurs années et typiquement 5, 10, 15 et 20 ans. Quatre types de moyenne seront utilisées pour le calcul des prix de référence : la moyenne quadratique (Q), la moyenne arithmétique (X), la moyenne géométrique (G) et la moyenne harmonique (H). Le Manuel de l'indice des prix à la consommation indique que la moyenne géométrique est la meilleure métrique statistique pour calcul des prix de référence (**OIT, 2004**). Le TDE est calculé mensuellement. Les variables utilisées pour le calcul du TDE correspondent toujours, pour le bétail, au prix pour une unité ou tête de bétail et pour les céréales à 100 kg de céréale. Ces variables, dites mercuriales, correspondent, dans le cadre de cette étude, aux prix mensuels du taureau, du bélier, du bouc et du sorgho. Les ruminants mâles sont en

effet les plus vendus par les ménages pauvres. Leur état d'embonpoint dépend de la qualité de la campagne agropastorale. Le sorgho quant à lui est la céréale la plus consommée au Centre-Nord du Burkina Faso et est fortement utilisé au niveau national pour la fabrication de la bière locale. Les prix de ces produits agropastoraux sont disponibles sur demande aux institutions concernées.

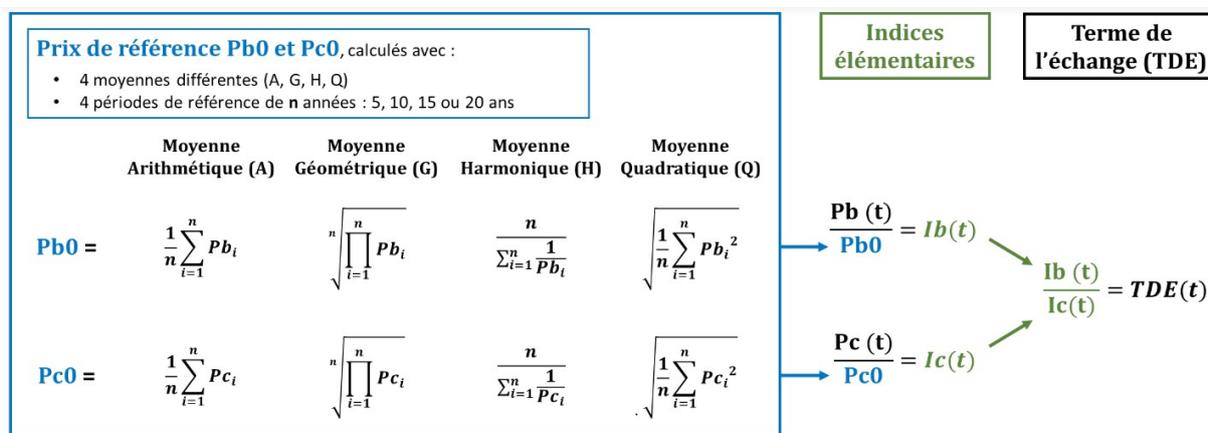


Figure 4 : Formulations des termes de l'échange (TDE) calculés sur base de 16 prix de référence différents, pour le bétail et pour les céréales, résultants de l'utilisation de 4 moyennes différentes sur les prix (A, G, H, Q) et de 4 périodes de référence de n années (5, 10, 15 ou 20 ans).

Pb0 : Prix de référence de la catégorie de bétail ; Pc0 : Prix de référence de la céréale ; Pb(t) : prix de la catégorie de bétail à l'instant t ; Pc(t) : Prix de la céréale à l'instant t ; Ib(t) : indice élémentaire de la catégorie de bétail à l'instant t ; Ic(t) : indice élémentaire de la céréale à l'instant t ; TDE(t) : terme de l'échange à l'instant t ;

2.4. Stationnarité des séries chronologiques des TDE

La stationnarité d'une série chronologique est une caractéristique statistique recherchée permettant une plus grande fiabilité de la prédiction (**MÉLARD AND ECARES, 2006**). La stationnarité reflète le niveau de stabilité des observations au cours du temps (**ONDO, 2002**). Une série chronologique est dite stationnaire, si ses propriétés statistiques (moyenne, variance, asymétrie, et autocorrélation etc) ne changent pas au cours du temps (**ONDO,2002**). En probabilité, une fonction de répartition d'une série chronologique stationnaire ne change pas quand on ajoute une même quantité à tous les temps t de cette série (**HAURIE, 1966**).

La stationnarité peut varier de forte à faible. Plus le comportement du processus générateur de la série s'écarte de la stationnarité, moins sa capacité de décrire le phénomène est grande (**ONDO, 2002**). La non stationnarité d'une série chronologique peut être due à un changement structurel dans le temps (rupture), à une tendance déterministe ou stochastique (racine unitaire).

Des méthodes graphiques peuvent être utilisées pour apprécier la stationnarité d'une série chronologique. Le corrélogramme permet d'observer des composantes non-stationnaires d'une série temporelle (**ONDO, 2002**). Il repose sur la représentation de coefficients de corrélation issus des fonctions d'autocorrélation (ACF) et des fonctions d'autocorrélation partielles (PACF). Un coefficient d'autocorrélation d'ordre θ est le coefficient de corrélation linéaire calculé entre la série temporelle et cette même série décalée de θ périodes de temps (**ONDO, 2002**).

Cependant, le corrélogramme ne permet pas de conclure avec beaucoup de confiance que la série étudiée est non stationnaire. En outre, ce graphique ne permet pas de quantifier le degré de signification statistique.

La détermination de la stationnarité d'une série peut se faire à l'aide de plusieurs tests statistiques. Les tests les plus utilisés sont ceux de Dickey-Fuller Augmenté (ADF), et de Phillips-Perron (PP) (**Ouahiba,2014**). L'hypothèse nulle (H_0) de ces tests est la présence d'une racine unitaire ($\theta=1$) indiquant la non stationnarité de la série pour les tests ADF et PP. Le test ADF permet de corriger l'autocorrélation. Le test de PP prend en compte l'hétéroscédasticité qui traduit une non constance de la variance de l'erreur (**Ouahiba, 2014**).

Une série chronologique non stationnaire peut dans certains cas être la transformation par différenciation ou par régression linéaire est recommandée pour stabiliser la série chronologique (DAUDIN *et al.*, 1996). Les tests ADF et PP seront utilisés pour vérifier cette stabilité des séries chronologiques des TDE.

2.5. Mesure de l'importance des variables par la méthode de Random Forest

Plusieurs approches existent pour la mesure de l'importance relative des variables (AZEN AND BUDESCU, 2003; MAIN, 2018). L'approche de Random Forest est de nos jours l'une des techniques les plus populaires (STROBL *et al.*, 2007). Cette technique est très efficace pour la sélection des variables explicatives (SALIFOU AND HOUSSOU, 2020). Le tirage aléatoire des variables à chaque nœud pour la construction des arbres de décision permet de réduire l'effet de la multi-colinéarité (GENUER, 2010 ; SALIFOU ET HOUSSOU, 2020).

La méthode de Random Forest présente deux termes pour la mesure de l'importance relative des variables. Le premier terme quantifie l'importance des variables à partir de l'augmentation de la pureté de la classification que les variables permettent aux nœuds des arbres de décisions. Il s'agit de la diminution moyenne de « l'impureté » (Mean Decrease Impurity: MDI). Ce terme est connu sous le nom de Gini importance. Dans le cas de la méthode de Random Forest Regression, cette mesure de pureté d'un arbre est donnée par la somme des carrés des résidus. Le second terme compare la puissance prédictive des variables mesurée par l'augmentation du taux d'erreur ou de la diminution moyenne de la précision (Mean Decrease Accuracy : MDA) (DESBOULETS, 2018). La mesure par la permutation de Breiman non standardisée est fiable pour déterminer l'ordre d'importance des variables explicatives en cas de corrélation entre deux variables importantes (MAIN, 2018).

Dans le cadre de cette étude, la mesure de l'importance de variable a été faite par permutation aléatoire des variables au niveau des nœuds. L'importance d'une variable X^j , ($VI(X^j)$) (tableau1), est définie par la moyenne sur l'ensemble des arbres des différences entre l'erreur moyenne d'un arbre sur l'échantillon OOB perturbé et celle sur l'échantillon OOB non perturbé (GENUER AND POGGI, 2017). Plus les permutations aléatoires de la j ème variable engendrent une forte augmentation de l'erreur, plus la variable est importante. À l'inverse, si la permutation n'a aucun effet sur l'erreur, la variable considérée n'est pas importante (GOEHRY *et al.*, 2021). La valeur de la mesure de l'importance de variable peut être négative ou proche de 0 pour une variable sans importance pour la prédiction (MAIN, 2018). Une valeur négative du VIM observée est expliquée par le fait que la prédiction à la suite de la permutation peut être légèrement meilleure que la prédiction originale (MAIN, 2018). Les termes d'expression du calcul de l'importance des variables sont donnés par le tableaux 1.

L'importance des variables mesurée par l'augmentation du taux d'erreur est une approche permettant de classer des variables explicatives dans un modèle de prédiction (GOEHRY *et al.*, 2021). L'approche de Random Forest est aussi utilisée pour la prédiction des séries chronologiques stationnaires (GOEHRY, 2020). Les paramètres clés d'utilisation de l'algorithme sont : le nombre d'arbres (ntree), le nombre d'observations par arbre, le nombre de variables présélectionnées pour la découpe au niveau du nœud (mtry), et le nombre de feuilles (GOEHRY, 2020).

Pour l'application de cette approche dans cette étude, les séries chronologiques de TDE du taureau, bélier et du bouc en lien avec les catégories d'animaux ont été établies sur la période de 2008 à 2021. Au total, 156 observations étaient disponibles pour chaque série chronologique (12 mois x13 ans). Une liste de 20 variables potentiellement explicatives des variations des TDE a été identifiée, liste composée de 19 variables numériques et d'une variable catégorielle (les fêtes religieuses). 100 observations ont été retenues pour l'entraînement (ou la construction des arbres) et 56 observations (36%) pour le calcul des erreurs Out-of-Bag (OOB). Le nombre d'arbres (ntree) dans la forêt a été défini à 500 arbres. Le nombre de nœuds maximum d'un arbre a été défini à 5. Les échantillons bootstrap ont été générés par la méthode de Bagging. L'ajustement a été fait sur la base de deux

paramètres dont le $mtry$ pour le nombre de variables prédictives aléatoirement présélectionnées dans chaque nœud et le $ntree$ pour le nombre d'arbres de régression (SALIFOU ET HOUESSO, 2020). Un graphique de l'évolution des erreurs "out-of-bag" en fonction du nombre d'arbres permet d'évaluer la stabilité des erreurs en fonction du nombre d'arbres. Lorsque les erreurs se stabilisent très rapidement, la prédiction peut être fiable et avec peu d'observations

Tableau 1. Termes d'expression du calcul de l'importance des variables

Prédiction de la collection	$\hat{h}(x) = 1/q \sum_{t=1}^q \hat{h}(x, \theta t)$	Moyenne en régression (3)
Erreur Out-Of-Bag	$Erreur\ OOB = 1/n \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	Moyenne des carrés des écarts (4)
Importance de variable	$VI(X^j) = \frac{1}{ntree} \sum_t (err\widetilde{OOB}_t^j - err\ OOB_t)$	Moyenne de la somme des écarts des régressions dus à la permutation (5)

$\hat{h}(x)$: prédiction de forêts aléatoires ; q : nombre d'arbres de prédiction ; $\hat{h}(x, \theta t)$: prédiction d'arbre ; θt : variable aléatoire ; n : nombre d'observations ; Y_i : observation i ; \hat{Y}_i : prédiction d'observation i ; $err\ OOB_t$: erreur Out-Of-Bag ; $err\widetilde{OOB}_t^j$: erreur Out-Of-Bag après permutation

3. Résultats

3.1. Evolution des prix des produits agropastoraux

- **Dynamisme d'évolution des prix et des offres sur le marché de bétail de Kaya**

La figure 5 présente les points de la dynamique d'évolution du marché de Kaya donné par l'offre et le prix du bétail de 2003 à 2021. Les catégories d'animaux concernées sont le taureau, le bélier et le bouc sahélien. La distribution des points de la dynamique d'évolution pour chaque catégorie d'animaux ne dégage pas une tendance linéaire. Beaucoup de points ne sont pas contenus dans l'intervalle de confiance issu de l'ajustement linéaire. La relation linéaire entre le prix et l'offre d'animaux n'est pas mise en évidence comme dans le cadre de marché économique parfait. La sensibilité de l'offre par rapport aux variations de prix est faible. Une hausse de la demande et même des prix n'est pas une raison suffisante pour vendre son animal lorsque l'éleveur n'est pas dans le besoin de finances. La décision de vente du bétail vise à se protéger contre des rapports de force encore plus défavorables. Ainsi, un point de dynamisme peut avoir une valeur élevée de l'offre avec un niveau de prix faible. Des chocs pourraient être à l'origine de cette situation observée sur la figure 5.

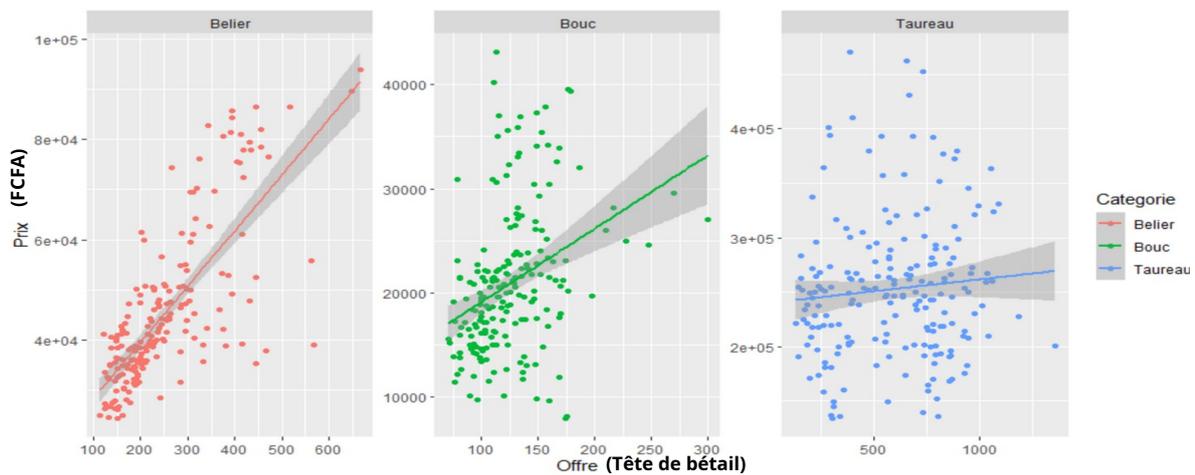


Figure 5. Dynamisme d'évolution entre offre et prix du bétail sur le marché de Kaya sur la période de 2003 à 2021

- **Evolution du prix du bétail et des céréales sur le marché de Kaya**

La figure 6 présente l'évolution des prix moyens mensuels du taureau, du bélier et du bouc sur le marché de Kaya sur la période 2003 à 2021. Une tendance à la hausse des prix du bétail est mise en évidence dans le long temps. Un effet de saisonnalité est observé sur ces courbes d'évolution des prix. Ces variations sont liées aux périodes des fêtes religieuses, à la soudure pastorale et à la période de l'offre abondante du fourrage. Aucun effet de lissage issu d'une politique de prix n'est pas observé.

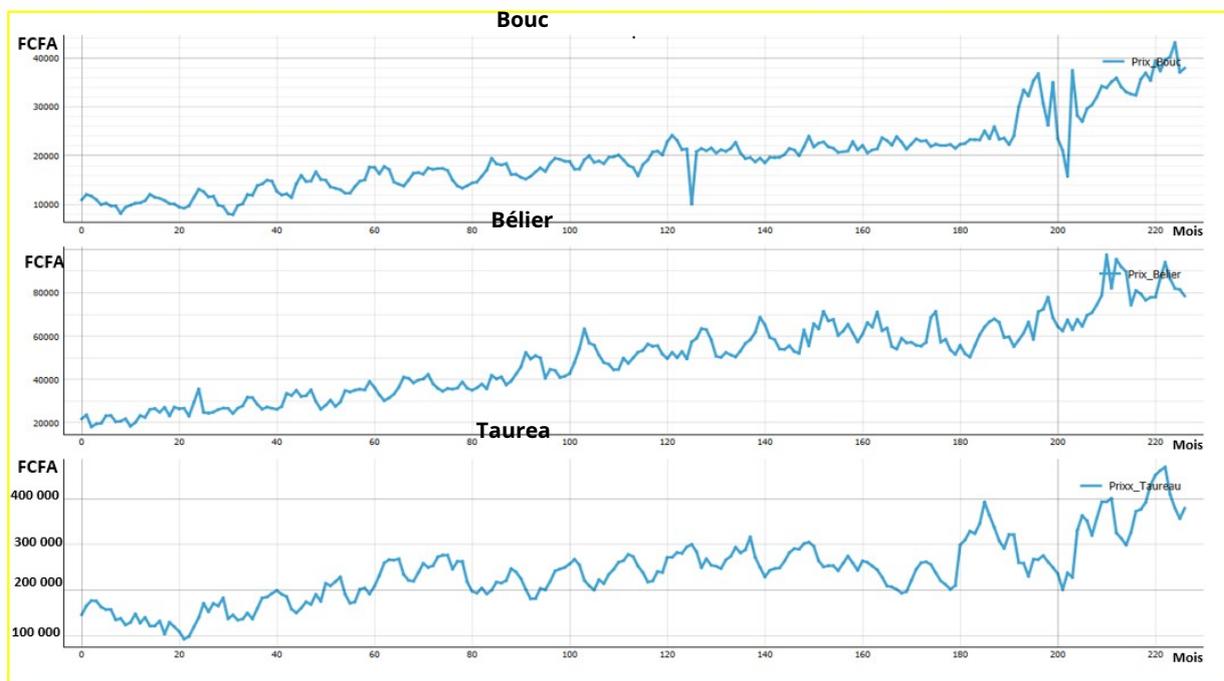


Figure 6. Evolution des prix moyens mensuels du bétail sur le marché de Kaya sur la période 2003 à 2021

La figure 7 présente l'évolution des prix mensuels du sorgho et du mil sur le marché de Kaya de 2003 à 2021. Les prix du mil et du sorgho est au-delà de 150 FCFA par kg depuis la période de la crise alimentaire de 2012 (excepté pour le sorgho en 2020). Ces prix sont marqués par des effets de

saisonnalité qui est cependant parfois effacé par l'influence d'autres facteurs qui provoquent de fortes hausses ou baisses des prix (exemples en 2004-2005, 2011-2012, 2018-2019). Des aléas accidentels sont à l'origine de ces pics et peuvent entraîner une dégradation des termes de l'échange pour l'acheteur dont l'éleveur.

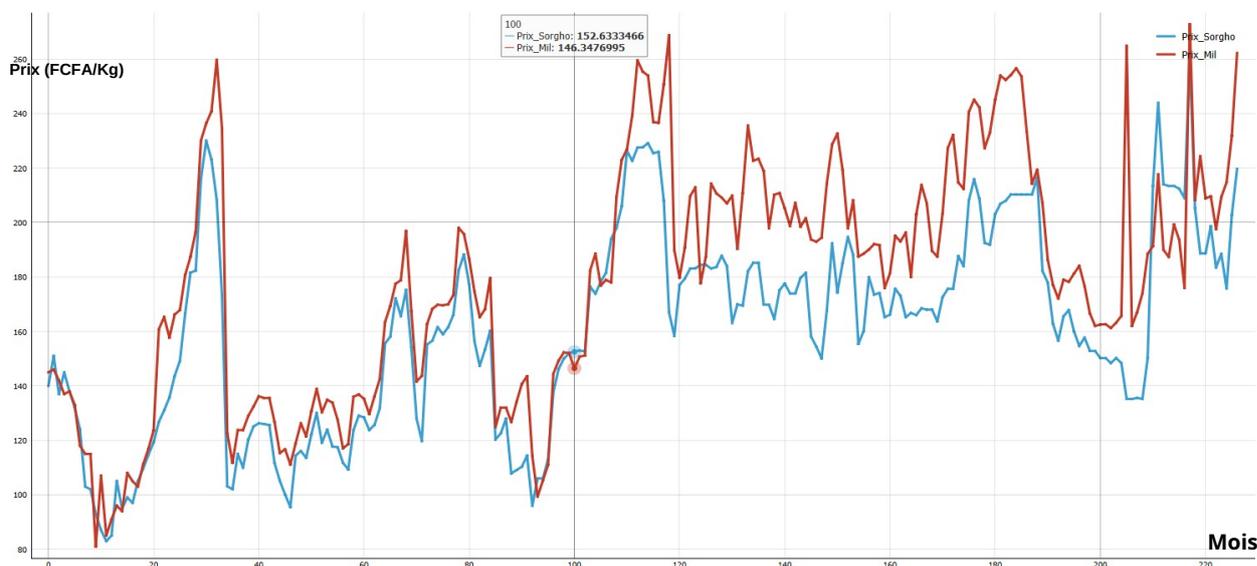


Figure 7. Evolution du prix mensuel du kilogramme de mil et de sorgho sur le marché de Kaya de 2003 à 2021

3.2. Terme de l'échange bétail/céréale

La formulation du terme de l'échange amène à s'interroger sur la métrique statistique et la profondeur des années utilisées pour le calcul des prix de référence. Ce qui permet d'adopter une démarche de visualisation et de comparaison des différents profils afin d'opérer un bon choix.

- **Comparaison des métriques statistiques pour l'établissement de l'indice élémentaire du bouc**

La figure 8 présente les courbes lignes d'évolution des indices élémentaires du bouc (Ib) dont le prix de référence a été calculé avec les différentes métriques statistiques. Il s'agit de : la moyenne arithmétique (X), la moyenne géométrique (G), la moyenne Quadratique (Q), la moyenne Harmonique (H). L'indice élémentaire du bouc (Ib) est une valeur calculée à deux chiffres après la virgule. La visualisation indique une différence des valeurs de l'indice du bouc avec les différentes métriques. A la 101^{ème} observation de la figure 8, l'indice du bouc calculé avec la moyenne harmonique (Ib_H) présente la valeur la plus élevée (1,26), suivi de l'indice du bouc calculé avec la moyenne géométrique (Ib_G) (1,21), de l'indice du bouc calculé avec la moyenne arithmétique (Ib_X) (1,16) et enfin de l'indice du bouc calculé avec la moyenne quadratique (Ib_Q) pour la plus petite valeur (1,13). La moyenne quadratique est très sensible à la présence des chiffres à hautes valeurs alors que la moyenne harmonique pour la présence des chiffres à plus petites valeurs. Ainsi, l'OIT (2004) conseille l'utilisation de la moyenne géométrique afin d'éviter des valeurs trop faible ou élevée de l'indice calculé. Cette métrique statistique est retenue dans la suite de l'étude pour le calcul des prix de référence.

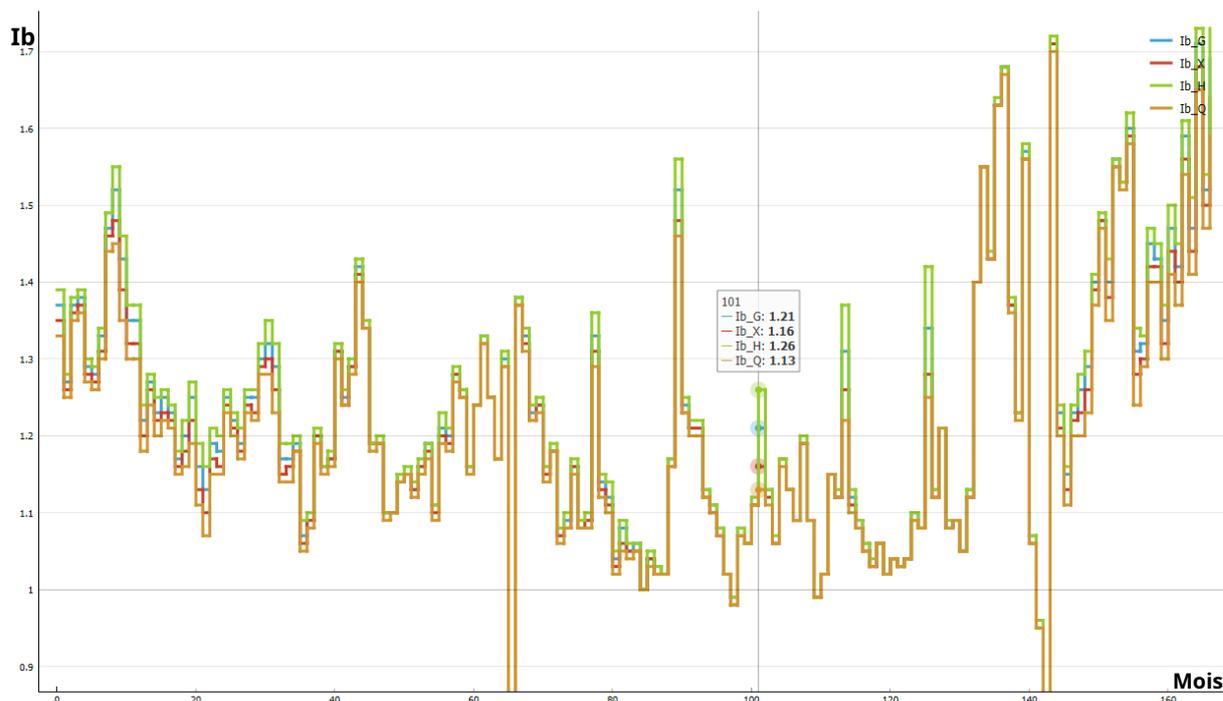


Figure 8. Evolution des indices de prix du bouc selon les métriques statistiques de 2008 à 2021

- **Effet de la profondeur de la période de référence sur le niveau d'évolution des TDE bouc**

La figure 9 présente l'effet du nombre d'années utilisées pour le calcul des prix de référence sur le niveau d'évolution des valeurs du TDE du bouc pour la période de janvier à novembre en 2021. Les périodes de références considérées ont une profondeur de 5 ans, 10 ans, 15 ans et 20 ans. Il ressort de l'observation de ces différents profils, que plus la période de référence est profonde, plus les valeurs des TDE bouc sont élevés. Le niveau d'évolution le plus bas est obtenu avec une période de référence de 5 années. Le niveau d'évolution élevé obtenu avec une période de référence profonde est dû à la capture des valeurs élevées de TDE des années à forte inflation. L'inflation entraîne une élévation du niveau de l'indice. Cependant, des chutes brutales peuvent être observées sur un profil à niveau d'évolution élevé sans traduire une amélioration réelle du coût de la vie chez les éleveurs. En effet, les éleveurs ont déjà vendu ou décapitalisé leur bétail même s'il y a une baisse du taux d'inflation. La profondeur de la période de référence sur 5 années est la plus appropriée pour le calcul du TDE.

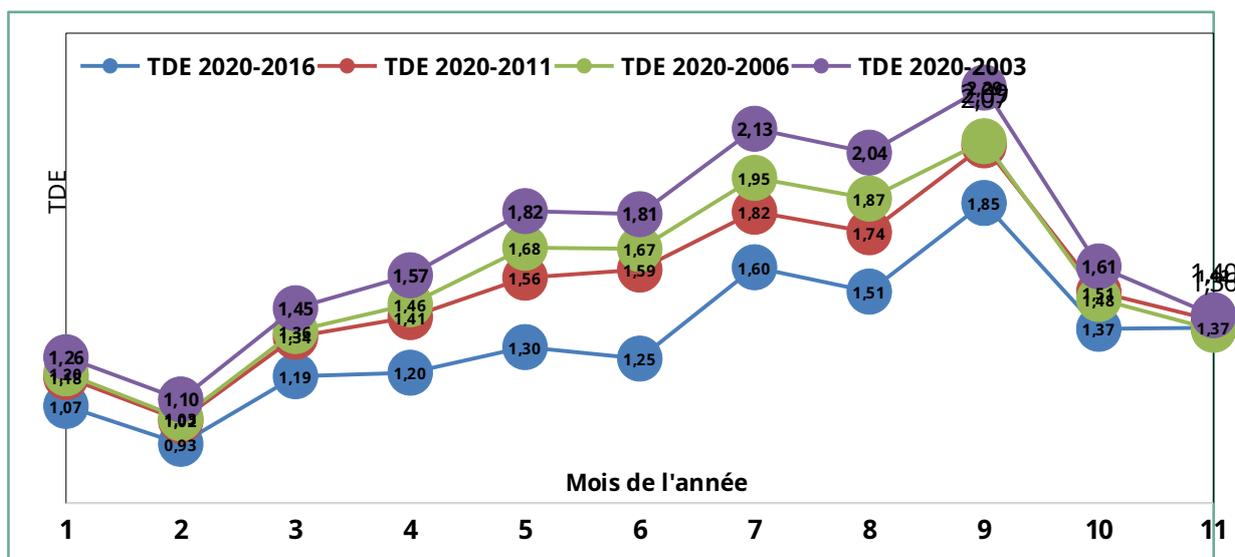


Figure 9. Effet de la profondeur de la période de référence sur le niveau d'évolution des TDE du bouc pour la période de janvier à novembre 2021

- **Comparaison de l'évolution des TDE taureau, bélier et bouc**

La figure 10 présente l'évolution des TDE du taureau, du bélier et du bouc sur la période 2008 à 2021 sur le marché de Kaya. En rappel, le TDE évalue l'accélération de la dégradation du pouvoir d'achat des éleveurs. Le TDE bélier présente le profil le plus élevé, et le TDE taureau le profil le plus bas. Le profil intermédiaire est obtenu avec le TDE du bouc. Sur la figure 10, il est relevé à certaines périodes de l'évolution, une démarcation entre les profils des TDE des petits ruminants (bélier et du bouc) à celui du profil des TDE du gros ruminant (taureau). Ces périodes concernent la soudure pastorale qui dévalorise le commerce du gros bétail.

Le profil d'évolution des TDE bélier maintenu à un niveau élevé est expliqué par l'existence d'un marché potentiel au plan national et sous régional qui protègent le prix du bélier contre les fluctuations les plus basses. Le bélier est l'animal le plus prisé pour les fêtes religieuses (fête de Tabaski surtout) et sa demande reste très forte sur toute l'étendue du territoire national et sous régional. Les baisses des valeurs TDE bélier observées entre les périodes de 0 à 20 mois et de 120 et 140 mois en abscisse sont liées respectivement à la crise socio-politique en Côte d'Ivoire vers les années 2003 et à l'avènement de la COVID-19 en 2020. A ces périodes, l'exportation du bélier sur le marché ivoirien était plus difficile en raison de la fermeture des frontières terrestres. Les TDE du bélier ont été plus sensibles aux chocs extérieurs comparativement à ceux du taureau et du bouc.

Toute faible valeur de TDE indique une détérioration quel que soit le type de bétail. La période de la crise alimentaire de 2011-2012 (40 à 60 mois en abscisse) a été marquée par des baisses importantes des valeurs TDE pour l'ensemble des trois espèces. La baisse des valeurs TDE est plus accentuée pour le TDE taureau comparé à celui du bélier. Le TDE du bélier peut être utilisé comme un indicateur de suivi de la macro-économie, alors que les TDE du taureau et du bouc peuvent être indiqués pour le suivi de la dégradation de la situation alimentaire des groupes vulnérables liée aux changements climatiques. En effet, le bélier est un animal hautement commercial dans la sous-région et réservé pour les fêtes religieuses dont la Côte d'Ivoire comme principal marché d'exportation pour cette catégorie de bétail au Burkina Faso.

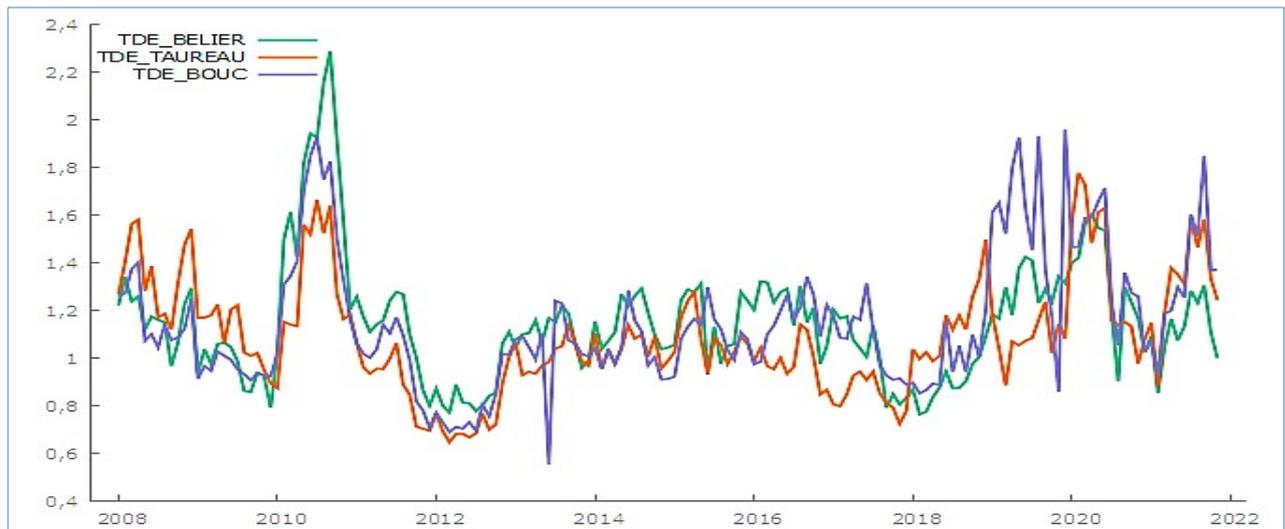


Figure 10. Profils d'évolution des TDE selon les catégories d'animaux de 2008 à 2021

3.3. Stabilité des séries chronologiques des TDE

La stationnarité des séries chronologiques est une caractéristique recherchée pour garantir une meilleure sélection et classement des variables explicatives de la dégradation des termes de l'échange. L'analyse des séries chronologiques par des approches statistiques peut aider à mieux comprendre le niveau de stabilité. Les statistiques descriptives, les tests de signification statistiques aident à apprécier l'état de stationnarité des séries chronologiques de TDE utilisées.

- **Statistiques descriptives des séries chronologiques des TDE**

Le tableau 2 présente les résultats de statistiques descriptives des séries des TDE du bouc, du bœuf et du taureau sur la période de 2008 à 2021. Les valeurs du minimum jamais observées sont de 0,55 pour le bouc, de 0,76 pour le bœuf et de 0,65 pour le taureau. Ces valeurs sont en dessous du seuil d'alerte (de 0,7) utilisée pour l'activation du mécanisme de gestion des urgences alimentaires, sauf pour le cas du bœuf. La moyenne la plus élevée a été obtenue avec le TDE bœuf (1,15) et la plus faible moyenne avec celui du TDE taureau (1,08). Les valeurs des TDE taureau sont en général plus basses que celles des autres espèces. Les valeurs des TDE hors intervalle de confiance sont considérées comme étant des données extrêmes qui indiquent des contextes de crises bien précise. Les intervalles de confiances sont compris entre 0,70 à 1, 57 pour le TDE taureau, de 0,73 à 1,76 pour le TDE bouc et de 0,80 à 1,60 pour le TDE bœuf sur le marché de bétail de Kaya. Les crises alimentaires causées par la sécheresse conduisent à des valeurs TDE inférieures à l'intervalle de confiance, alors que pour les crises inflationnistes à valeurs supérieures à l'intervalle de confiance. Les valeurs extrêmes en situation de crise peuvent persister dans le temps et introduire des déformations dans la distribution des séries chronologiques des TDE. L'existence de ces déformations peuvent être détectées par une analyse des coefficients d'asymétrie et de Kurtosis qui prennent respectivement des valeurs différentes de 0 et 3 en absence de normalité dans la distribution. Les valeurs de ces paramètres de distribution présentées au tableau 2, nous font penser à une absence de normalité dans la distribution de ces séries chronologiques de TDE. Il s'agit de signaux révélateurs de la présence des chocs affectant la distribution de ces séries chronologiques.

Tableau 2. Statistiques descriptives des séries chronologiques des TDE du taureau, du bouc et du bœuf sur le marché au bétail de Kaya au Burkina Faso de 2003 à 2021

TDE	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart-type	CV	Asymétrie	Kurtosis	PC.5%	PC.95%
Taureau	1.0746	1.0465	0.64728	1.7769	0.23174	0.21566	0.77256	0.70566	0.69961	1.5687
Bœuf	1.1497	1.1381	0.76442	2.2881	0.25872	0.22502	1.4348	3.6373	0.80088	1.6027

Bouc	1.1367	1.084	0.55359	1.9595	0.27602	0.24283	1.0205	1.0377	0.7306	1.7558
-------------	--------	-------	---------	--------	---------	---------	--------	--------	--------	--------

Le tableau 3 présente les résultats de tests de normalité de Shapiro-Wilk et de Jarque-Bera. La lecture du tableau 3 indique que l'hypothèse H0 de normalité de la distribution est rejetée ($p < 0,05$). La distribution des données des différentes séries chronologiques du TDE ne suit pas la loi normale. Ces séries sont affectées par des déformations causées par des chocs. Ces chocs sont à l'origine du déplacement des points de la dynamique des marchés observés en figure 4. Cette instabilité peut entraîner une faible stationnarité des séries chronologiques des TDE d'où la nécessité de réaliser des tests de stationnarités.

Tableau 3. Tests de normalité de Shapiro-Wilk et de Jarque-Bera

	TDE Taureau	TDE Bélier	TDE Bouc
Shapiro-Wilk	0,976005	0,958616	0,971772
p. critique	0,008001	0,000133	0,002735
Jarque-Bera	5,47192	8,33636	6,57072
p. critique	0,064832	0,01548	0,037427

- **Tests de stationnarité des séries TDE**

Le tableau 4 présente les résultats de tests statistiques de Dickey-Fuller Augmenté (ADF) et de Phillips-Perron (PP) des séries chronologiques des TDE bouc, bélier et du taureau sur la période 2008 à 2021. Ces tests permettent de vérifier la stationnarité des différentes séries chronologiques. Les résultats du test ADF sont significatifs ($p < 0,05$) pour le bélier et le bouc. A cet effet, l'hypothèse H0 de la présence d'une racine unitaire ou de non stationnarité est rejetée. Les séries TDE du bouc et du bélier ne comportent pas de racine unitaire. Les séries chronologiques sont stationnaires pour le bélier et le bouc, et non stationnaire chez le taureau. Contrairement au test de Dickey-Fuller Augmenté, le test de Phillips-Perron indique le rejet de l'hypothèse nulle H0 de la présence de racine unitaire pour la série du TDE taureau. Les résultats de ces deux tests indiquent que les trois séries chronologiques du TDE établies sont stationnaires. Le TDE élaboré à partir de l'indice de prix du bouc et de celui du sorgho est un indice conditionnel et cette démarche peut améliorer la stabilité et conférer une stationnarité à la série. Les prix du bétail et du sorgho sur le marché de Kaya sont co-intégrés.

Tableau 4. Tests de stationnarité des séries chronologiques de TDE

	Taureau	Bélier	Bouc	Taureau	Bélier	Bouc
Test de Dickey-Fuller- Augmenté (ADF)				Phillips-Perron (Constance + tendance)		
Tau (Valeur observée)	-3,236	-3,48	-3,712	-3,635	-3,514	-4,501
Tau (Valeur critique)	-3,421	-3,421	-3,421	-3,439	-3,439	-3,439
p-value (unilatérale)	0,079	0,043	0,023	0,03	0,041	0,002
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

H0 : La série comporte une racine unitaire

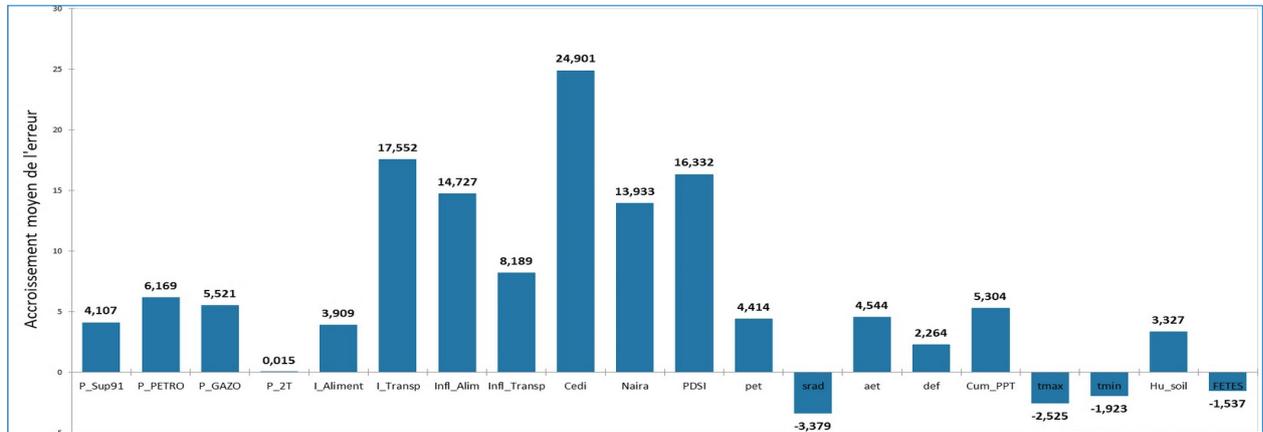
Ha : La série ne comporte pas de racine unitaire. La série est stationnaire

3.4. Valeurs de la mesure de l'importance des variables : VIM

Les graphiques A, B, C et D de la figure 11 présentent respectivement les valeurs de la mesure de l'importance des variables pouvant potentiellement expliquer la dégradation du terme de l'échange taureau/sorgho, bélier/sorgho et bouc/sorgho sur le marché de Kaya pour la période 2008 à 2021.

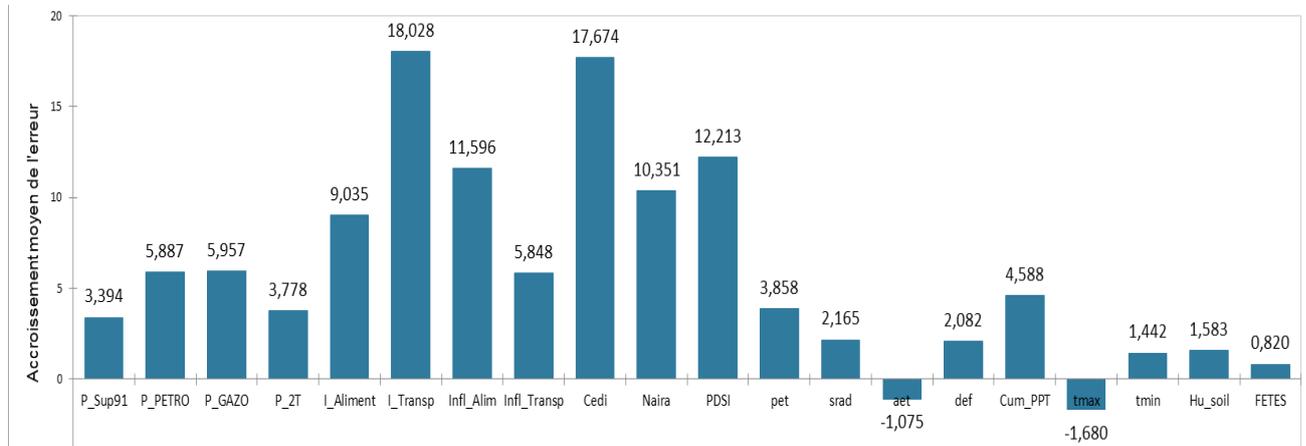
Concernant le TDE du taureau/sorgho, les 5 variables les plus importantes sont par ordre d'importance : la monnaie Cédi (24,9), l'indice du transport (17,6), l'indice de la sécheresse (16,33), l'inflation sur les produits alimentaires (14,73) et la monnaie Naira (13,93), En particulier, cette analyse révèle que l'indice de sécheresse, qui peut permettre d'apprécier la qualité de la campagne agropastorale, peut jouer un rôle important dans l'explication de la dégradation du TDE.

Figure 11. Valeurs de la mesure de l'importance des variables du TDE



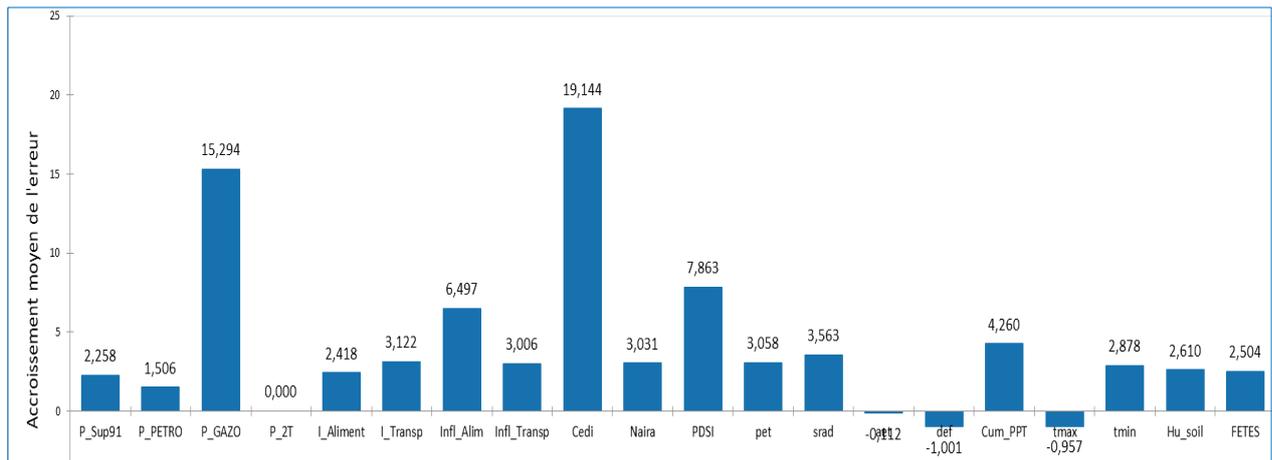
Graphique A : Taureau/Sorgho

Concernant le TDE béliér, les 5 variables les plus importantes par ordre sont l'indice du transport (18,02), la monnaie Cédi (17,67), l'indice de sécheresse (12,21), l'inflation sur les produits alimentaires (11,59), et la monnaie Naira (10,35). L'ordre de classement des variables chez le béliér n'est pas identique à celui du taureau. Néanmoins, l'indice de sécheresse reste toujours une variable bien classée, mais la valeur de son importance a diminué par rapport à celui du taureau.



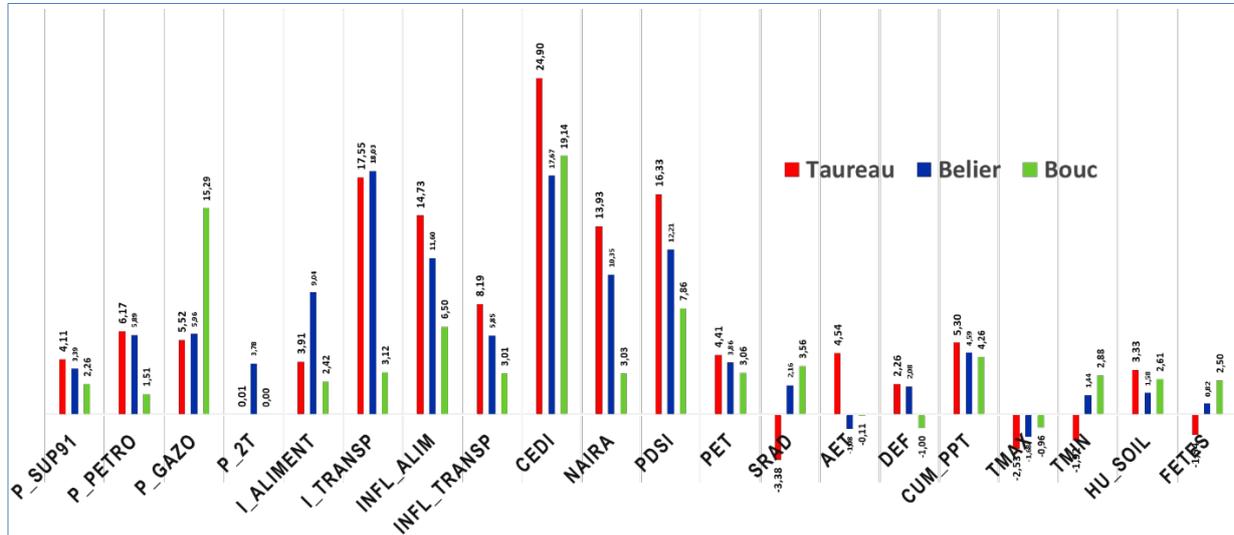
Graphique B : Béliér/Sorgho

Concernant le TDE du bouc, les 5 variables les plus importantes sont par ordre d'importance : la monnaie Cédi (19,14), le prix du gasoil (15,29), l'indice de sécheresse (7,86), l'inflation sur les produits alimentaires (6,50) et le cumul des précipitation (4,3). L'indice de sécheresse reste toujours bien classé. Cependant, sa valeur a encore diminué par rapport à celle du béliér et du taureau.



Graphique C : Bouc/Sorgho

La comparaison des cinq variables les plus importantes pour les TDE des trois espèces révèle que la monnaie Cedi semble être la variable la plus importante, suivie par l'indice du transport ou le prix du gazoil. Les 3^{èmes} et 4^{èmes} variables en termes d'importance sont, pour les trois espèces, le PDSI et l'inflation alimentaire respectivement. La valeur de l'importance de la variable PDSI est cependant plus faible pour le bouc comparativement aux bœuf et taureau, ce qui pourrait peut-être s'expliquer par le fait que le bouc est une catégorie de bétail moins sensible à la sécheresse comparativement au bœuf et taureau. Les variables agro climatiques contribuent moins à la mesure du VIM comparativement aux prix des hydrocarbures. L'augmentation des prix des hydrocarbures peut contribuer à la dégradation des TDE. En effet, le prix des hydrocarbures est une variable entrant dans la formation du coût de transport.



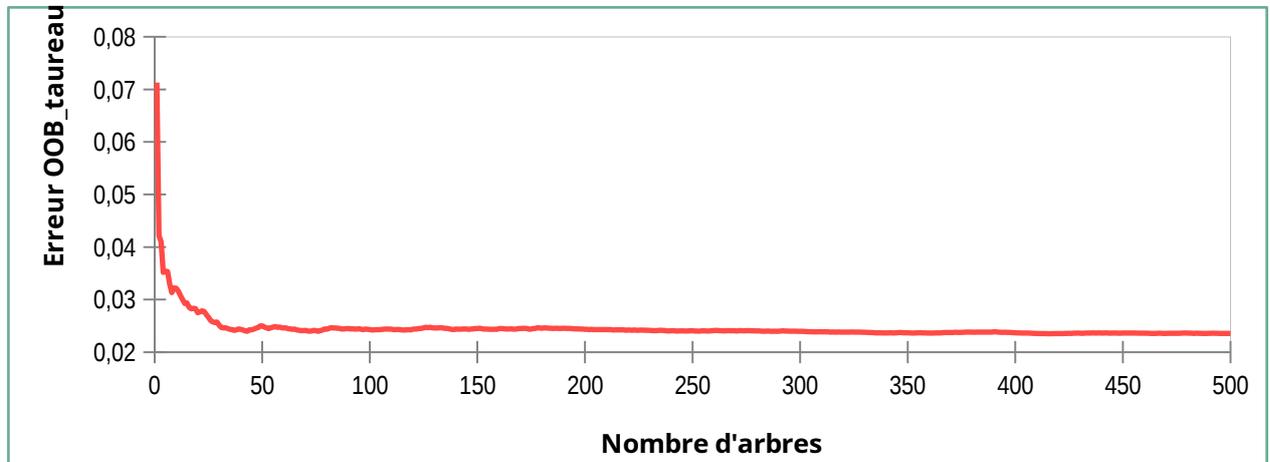
Graphique D : Comparaison de VIM pour les trois catégories de bétail

3.5. Evolution des erreurs Out-of-bag de construction des arbres de forêts aléatoires

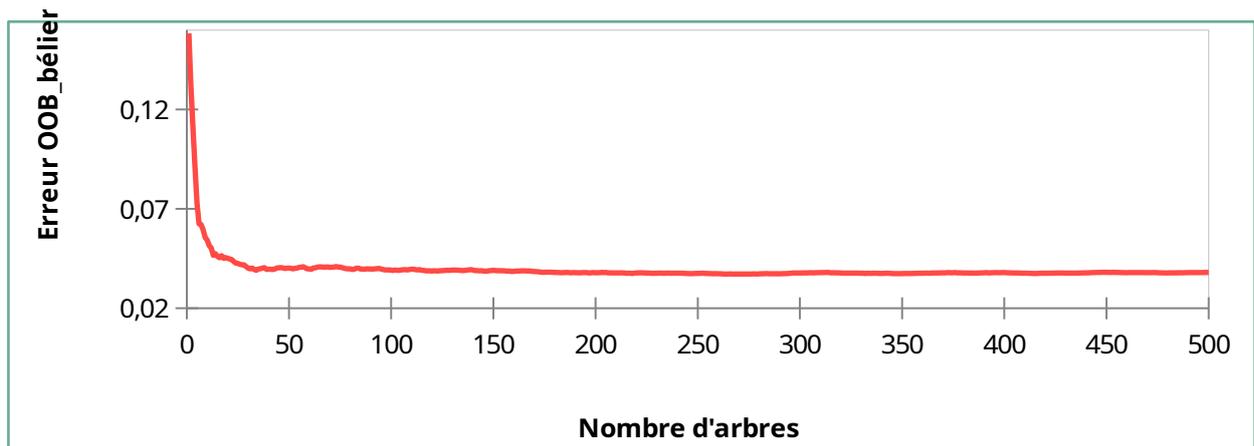
La figure 12 présente l'évolution des erreurs "out-of-bag" en fonction du nombre d'arbres chez les TDE taureau, bœuf et bouc.

L'erreur OOB se stabilise respectivement pour le taureau, le bœuf et le bouc, à approximativement 30, 30 et 200 arbres, avec des erreurs de 0.024, 0.040 et 0.041. Cette observation donne une indication du nombre d'arbres à utiliser lors de la modélisation pour chaque animal et

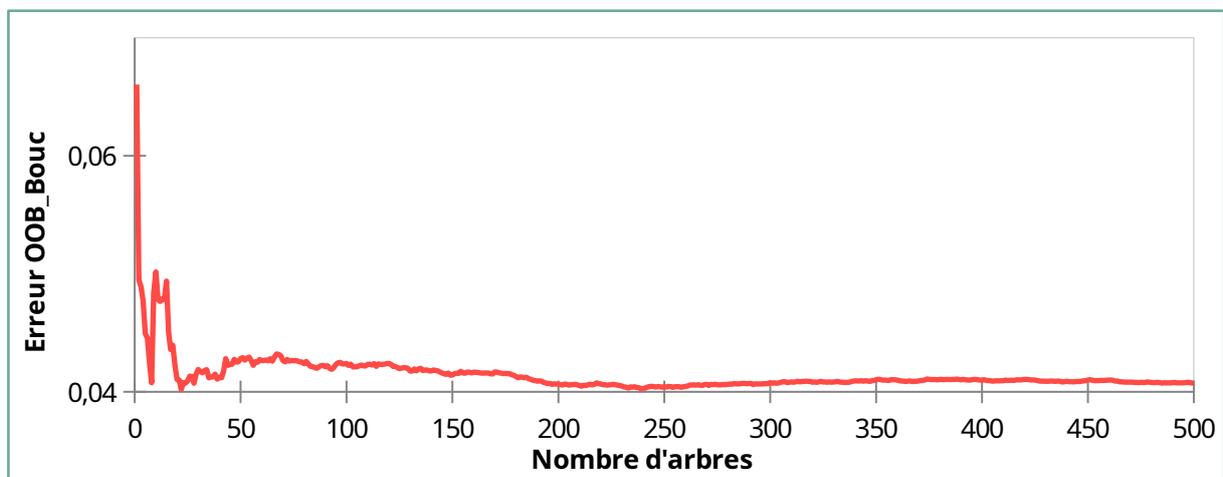
permet de s'assurer que le nombre d'arbre effectivement utilisé dans le cadre de cette étude (500) est suffisant que pour permettre une stabilisation de l'erreur OOB. Aussi, le temps de modélisation minimum serait donc théoriquement plus long pour le bouc puisqu'il nécessite la construction d'un plus grand nombre d'arbres.



Graphique A. Evolution des erreurs "out of bag" pour le TDE taureau



Graphique B : Evolution des erreurs "out of bag" pour le TDE bélier



Graphique C. Evolution des erreurs "out of bag" pour le TDE bouc

3.6. Relation entre valeurs des TDE prédites par Random Forest et observées

Le tableau 5 présente les résultats de la régression entre les valeurs de TDE prédites et valeurs observées pour le taureau, bélier et le bouc. Les corrélations entre les valeurs TDE prédites et observées sont de $r = 0,76$ pour le taureau, et $r = 0,69$ pour le bélier et le bouc. La valeur du R^2 ajusté a été de 0,57 pour le taureau comparé à 0,47 pour le bélier et le bouc. La rapidité de la stabilisation des erreurs OOB détermine la précision des prédictions. Les valeurs de la mesure de l'importance des variables ont tendance à être plus élevées pour une situation de stabilisation plus rapide de l'erreur OOB avec peu d'arbres. Chez le bouc, l'augmentation du nombre d'arbres pour la stabilisation de l'erreur OOB a entraîné une augmentation d'erreur de prédiction. Il ressort que le coefficient de variation (CV) du TDE bouc était le plus élevé. Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne (RMSE : Root Mean Square Error) et de la moyenne absolue de l'erreur en pourcentage (MAPE) ont été plus élevées chez le bouc comparé au taureau et bélier.

Les droites de régressions entre les valeurs de TDE prédites par les modèles Random Forest et les valeurs de TDE observées, et la distribution des résidus normalisés de ces modèles en fonction des valeurs de TDE observées sont présentées comme matériel additionnel de cette recherche en annexe 1.

Tableau 5. Paramètres de régression linéaire entre valeurs des TDE prédites par Random Forest et observées

Catégorie de bétail	Taureau	Bélier	Bouc
Moyenne TDE Prédite	1.074	1.149	1.134
Moyenne TDE observée	1.075	1.150	1.137
R de corrélation	0.758	0.687	0.686
R ² de détermination	0.575	0.472	0.471
R ² ajusté	0.572	0.469	0.467
MSE	0.009	0.008	0.014
RMSE	0.095	0.090	0.119
MAPE	6.631	5.454	6.844
RRMSE (%)	8,84	7,83	10, 50

4. DISCUSSION

Il ne s'agit pas dans cette étude de prédire les valeurs des TDE à partir d'un groupe restreint de variables explicatives, mais de déterminer les variables potentiellement explicatives de la dégradation du terme de l'échange bétail/céréale puis de les classer par ordre d'importance. Une variable peut être importante dans la compréhension d'un phénomène mais non intéressante pour la prédiction de ce phénomène (COSNEFROY ET SABATIER, 2011). En effet son utilisation dans un groupe de variables peut avoir des effets négatifs (GREGORUTTI et al., 2017). Cette discussion est portée sur l'appréciation de la qualité de l'approche de Random Forest utilisée pour la mesure de l'importance des variables et la pertinence des variables explicatives identifiées.

En premier instant, nous pensons que la qualité de l'approche Random Forest peut être appréciée par sa capacité à reproduire l'évolution de la série chronologique. KANE et al., (2014) et KAEWCHADA et al., (2023) ont indiqué que la capacité d'une technique à reproduire la tendance d'évolution est une dimension très importante dans la prédiction des séries chronologiques. Dans une démarche de prévision statistiques, l'exactitude des valeurs et la précision des tendances sont les deux éléments les plus visés. Pour le cas des activités d'alerte précoce, la tendance d'évolution et l'identificateurs des facteurs concourant à cette dynamique sont les résultats les plus attendus. Ainsi, cerner la forme d'évolution de la courbe des prédictions peut être une bonne base de jugement de la qualité de

l'approche utilisée. La figure 13 présente les courbes d'évolution comparées des valeurs TDE prédites et observées du bouc sur la période 2008 à 2021.

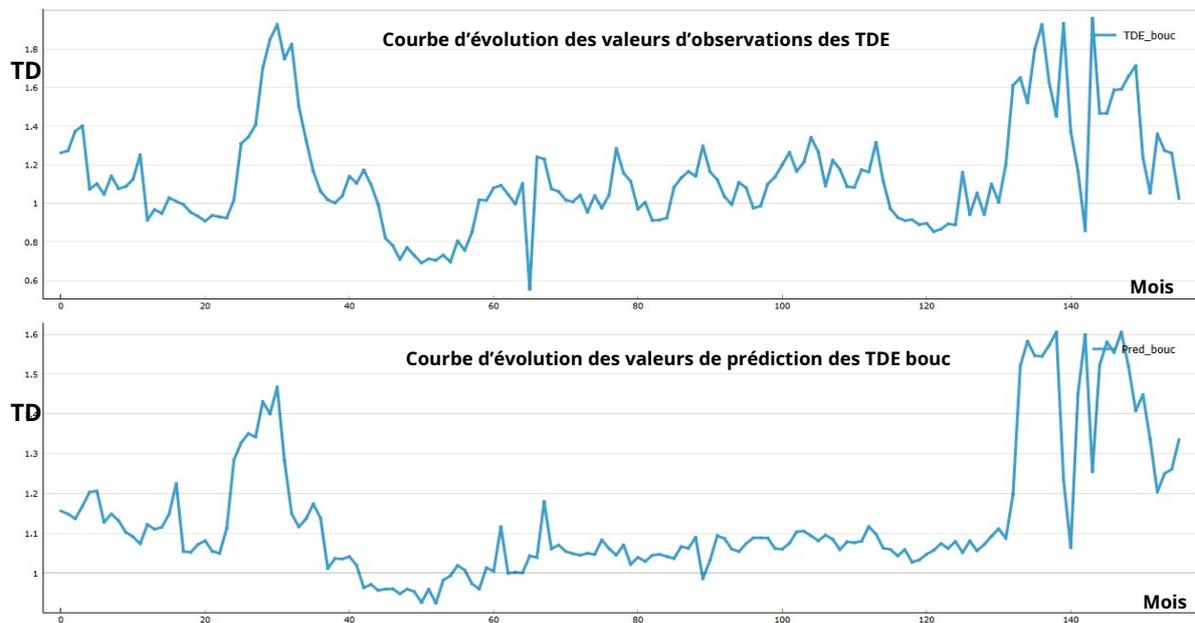


Figure 13. Courbes d'évolution des valeurs observées versus valeurs prédites des TDE bouc

L'observation de la figure 13 nous révèle que la technique de Random Forest présente une certaine capacité à reproduire la forme d'évolution de la série chronologique des TDE bouc. En effet, la courbe de prédiction cerne en globalité les fluctuations importantes induites par les chocs, même s'il est relevé des irrégularités à certaines périodes. L'enjeu majeure de la présente étude consiste à cerner surtout les périodes de grandes fluctuations causées par les chocs et de rechercher les variables qui ont une contribution importante dans ces fluctuations. En effet, les décideurs ont besoin d'agir sur les variables de crise afin de réduire l'impact négatif sur les populations affectées (**FUNTOWICZ AND RAVETZ, 1993**). Ces irrégularités de forme d'évolution observées sur la courbe de prédiction, nous révèlent les limites en matière d'ajustement des valeurs de prédiction données par la technique de Random Forest. Ces irrégularités dans l'ajustement se traduisent par la présence des zones surestimation et de sous-estimation des valeurs TDE prédites. Elles sont mises en évidence par les courbes d'évolution des valeurs observées et des valeurs prédites des TDE bouc (Figure 14). L'approche de Random Forest basée sur une coopération de modèles apprenants forts permet de réduire la variance, mais toutefois elle reste très vulnérable au biais d'ajustement (**KANE et al., 2014**).

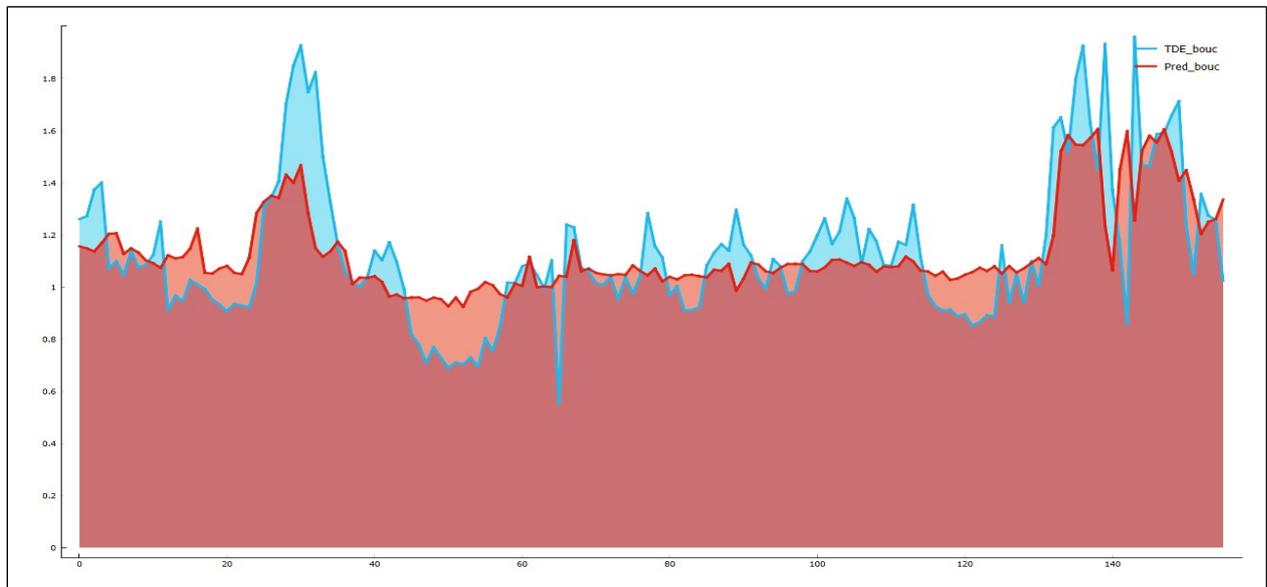


Figure 14. Evolution des valeurs TDE observées et prédites dans le temps et mise en évidence des zones de sous-estimation et surestimation par l'utilisation de Random Forest

La visualisation de la figure 14, nous indique que la sous-estimation a été importante pour les valeurs des TDE trop élevées et la surestimation pour les valeurs des TDE plus faibles. Cependant, la tendance de l'ajustement dominante n'est pas perceptible sur cette même figure 14. Cela nous permet de dire qu'un juste milieu a été trouvé entre le sous-ajustement et le sur-ajustement pour la généralisation à nouveau jeu de données. En d'autres termes la réalisation du compromis entre la variance et le biais a été effective. Le processus n'a pas connu d'arrêt et s'est bien déroulé dans l'ensemble. Ainsi, les erreurs OOB ont été très rapidement stabilisées à moins de 500 arbres. Ce qui témoigne de la qualité de l'approche dans la construction des arbres des forêts aléatoires. La taille des observations n'a pas été une limite dans cette démarche.

Les chocs affectant les séries chronologiques sont à mesure de produire des valeurs trop faibles ou élevées des TDE. Ces chocs entraînent une diminution l'état de la stationnarité des séries chronologiques et rendent très difficile la prédiction des valeurs à travers l'utilisation de modèle empirique (MEI et al., 2014). Dans leurs travaux de prédiction des épidémies de la grippe aviaire en Egypte KANE et al., (2014) ont rapporté que le modèle de Randon Forest a plus de mal à prédire les séries chronologiques sur la phase de volatilité. Cependant, l'approche Random Foret est plus performante pour la prédiction des séries chronologiques comparativement à l'algorithme de moyenne mobile autorégressive intégrée (ARIMA) (KANE et al., 2014 ; MEI et al., 2014).

Les valeurs trop élevées des TDE ont été observées pendant les périodes de crises inflationnistes. L'inflation a une grande capacité à se propager dans les secteurs d'activités économiques (Ha et al., 2023). Plusieurs variables explicatives en lien avec l'augmentation des valeurs TDE ont été identifiées par l'approche de Random Forest comme des variables de la mesure de importantes (VIM). Il s'agit de la monnaie, de l'indice de transport, de l'inflation alimentaire et des prix de carburants. L'inclusion simultanément de plusieurs variables explicatives peut conduire à une complexité du modèle voire à un sur-ajustement.

Les valeurs trop faibles des TDE ont été observées pendant la période de crise alimentaire causée par la sécheresse. Parmi la liste des variables explicatives qui ont présenté une mesure de l'importance des variables (VIM) élevée et en lien avec la baisse des TDE était l'indice de sécheresse PDSI. A cela, nous pensons que le nombre de variables d'entrées significatives était trop limité pour expliquer les fluctuations de la baisse des TDE. La sécheresse, tout comme l'inflation a des effets amplificateurs

dans plusieurs secteurs d'activités. D'autres variables explicatives en lien avec la baisse des TDE pourraient être utiles pour réduire le biais d'estimation. Les variables en lien avec la baisse des valeurs TDE peuvent être recherchées dans les mesures d'adaptions ou d'atténuation de la crise.

La plus grande valeur du MAPE a été obtenue avec les TDE du taureau (MAE=6, 84) alors que **KAEWCHADA et al., (2023)** donnent une classe de valeur de MAPE < 10% pour une haute précision de la prédiction du prix des légumes en Thaïlande par l'approche de Random Forest. L'approche de Random Forest nous a fourni des erreurs relatives (RRMSE) inférieure à 10% le cadre du classement des variables potentiellement explicatives des TDE.

Le classement indique que la monnaie, l'inflation des produits alimentaires, l'indice de sécheresse, l'indice de transport, l'indice de consommation alimentaire et le carburant sont les principales variables qui ont un fort pouvoir de prédiction des TDE. Ces variables ont présenté des valeurs plus élevées de la mesure de l'importance de variables.

Nous jugeons que le classement de ces variables par l'approche de Random Forest a été très efficace. En effet, cette approche a permis de cerner des variables qui sont déjà bien connues pour expliquer la dégradation du terme de l'échange. Elle peut aider à mieux identifier les facteurs expliquant la dégradation de la situation alimentaire afin de mieux formuler des options de réponse.

Certaines variables cernées par l'approche de Random Forest ont été identifiées comme étant des variables explicatives dans le cadre de modèle de prévision de l'inflation dans les pays membres de l'UEMOA (**TOE, 2010**). Il s'agit notamment du taux de change, du cours de pétrole, de l'inflation des produits alimentaires, de l'indice de consommation alimentaire. Quant à la sécheresse, cette variable a été cernée dans le cadre de modèle de prévision des prix du bétail par **SIMONET et al. (2020)**. La sécheresse crée l'inflation à travers les pénuries alimentaires (**VANIER, 2005**). Ces résultats montrent que la dégradation des TDE n'est pas uniquement le fait de la sécheresse. L'inflation peut conduire à la dégradation du pouvoir d'achat des ménages au sein de l'espace économique (**BCEAO, 2020**). La figure 15 présente l'évolution de l'indice PDSI dans la zone d'étude et de l'inflation alimentaire sur la période 2003 à 2020. Il ressort bien de ces deux profils, qu'il peut y avoir une inflation alimentaire en absence de sécheresse.

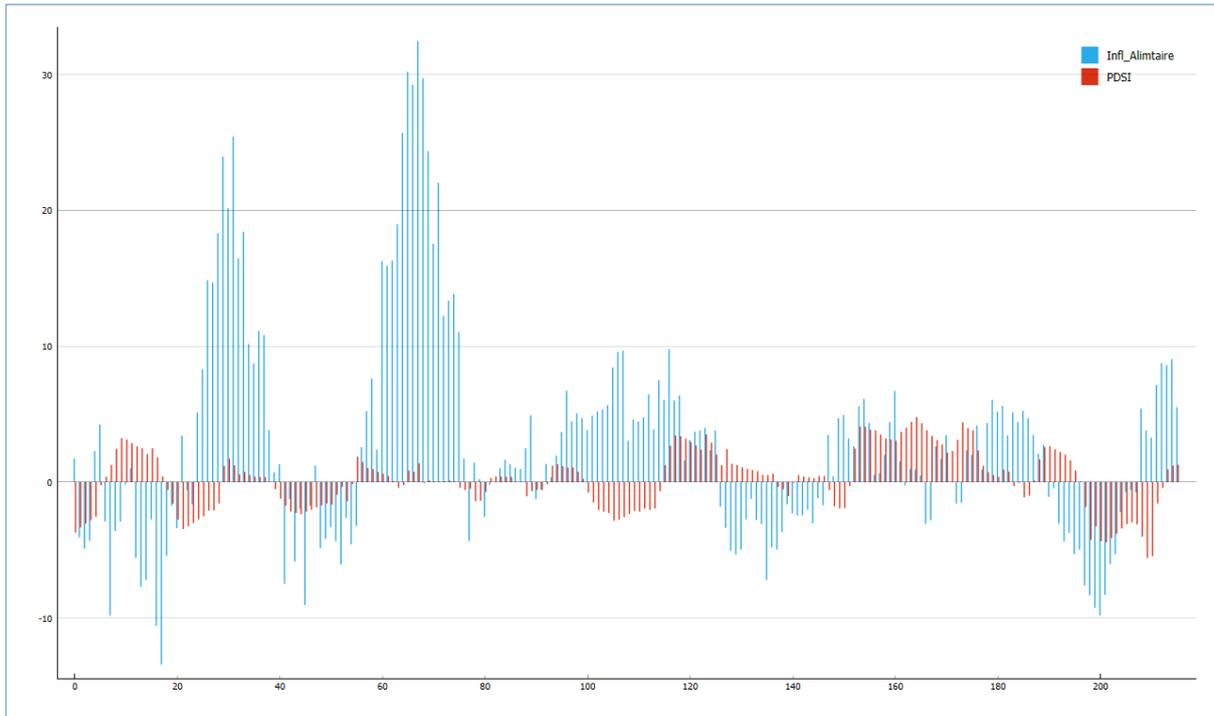
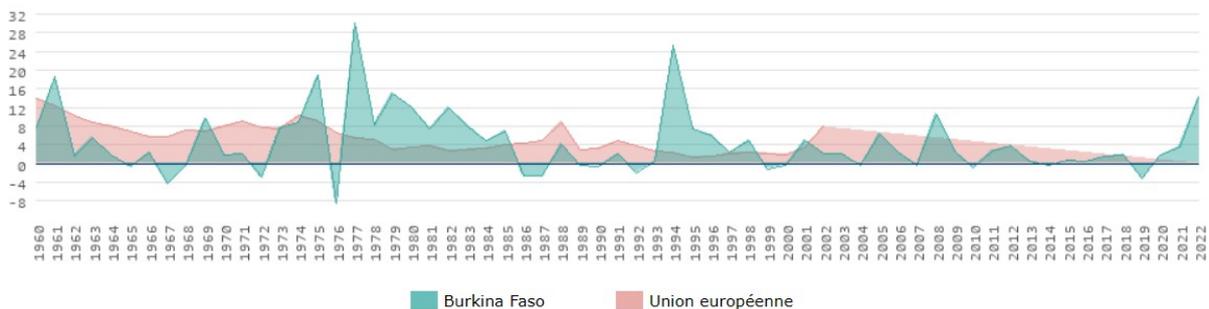


Figure 15. Profil de l'indice PDSI et l'inflation alimentaire sur la période 2003 à 2020

L'inflation peut avoir plusieurs origines (BCEAO, 2020). Elle peut être d'origine interne ou importée. L'inflation importée peut provenir de la zone Euro ou de l'émergence de nouvelles crises internationales (COVID-19, la crise russo-ukrainienne) (EUROSTAT, 2022). L'inflation importée de la zone de l'euro est l'un des principaux déterminants de l'évolution des prix dans la zone de l'UEMOA (BCEAO, 2020). Cependant, comme le montre la figure 19 présentant les profils de l'inflation du Burkina Faso et de l'Union Européenne, cette relation n'est pas si évidente. La figure 16 indique une forte présence de l'inflation alimentaire au Burkina Faso sur la période 2020-2022 alors qu'elle ne l'est pas pour la zone Euro. Les taux historiques de l'inflation des biens de consommation les plus élevés au Burkina Faso ont été observés pour les années 2022 (+14,22%), 2008 (+10,66%), 1994 (+25,18%) et en 1980 (+12,80%) etc. En 2022, le taux d'inflation annuel de la zone euro était à 8,83% comparé à un niveau mondial de 7,97% (EUROSTAT, 2022).



(Source : <https://www.donneesmondiales.com/afrique/burkina-faso/inflation.php>)

Figure 16. Profil d'évolution de l'inflation au Burkina Faso et de l'Union Européenne

Les pics de l'inflation observés sur le profil du Burkina Faso seraient expliqués par des chocs induits par la sécheresse, la demande et les cours mondiaux de pétrole, et la dévaluation de la monnaie du FCFA vers les années 1994. Il ressort qu'au niveau mondial, les facteurs de fluctuation de

l'inflation sont définis comme étant des facteurs communs à celle de l'inflation mensuelle de l'indice global des prix à la consommation (HA et al., 2023). A ce niveau, il est rapporté un large éventail des chocs, y compris la demande mondiale, l'offre, le prix du pétrole, et les chocs liés aux taux d'intérêt (HA et al., 2023).

L'envol des prix des biens alimentaires et de l'énergie constituent une menace pour la sécurité alimentaire au sein de l'espace UEMOA. La flambée des prix risque d'être bien plus préoccupante que les pénuries réelles de produits de première nécessité à court et moyen termes (GOURDON ET UBEDA, 2022).

La monnaie occupe la première place pour les variables entrant dans la dégradation des TDE. En effet, le Burkina Faso exporte du bétail vers le Nigeria et le Ghana. Les marchés d'exportation du bétail sont animés selon la présence de ces acheteurs étrangers (DDC, 2017). Une perte de la valeur du naira et du cedi se répercute sur le commerce de bétail au Burkina Faso et même sur toute l'Afrique de l'Ouest (DDC, 2017). Cela ouvre l'idée de la recherche vers d'autres types de facteurs explicatifs. Depuis 2016, la situation sécuritaire impacte la commercialisation du bétail. Cela a été aggravé avec l'avènement de la crise sanitaire de la COVID-19 (RBM, 2020). Mais des difficultés liées à l'accès aux données en temps réel ont limité la prise en compte de ces nouveaux risques. Cependant, SIMONET *et al.*, (2020) ont démontré l'influence des attaques terroristes dans un modèle de prédiction du prix du bétail en zone d'insécurité dont le Burkina Faso, le Mali et le Niger. A cet effet, nous pensons que la liste des facteurs peut s'élargir à d'autres types de variables. La prise en compte des variables en lien avec les interventions humanitaires de gestion de la crise (vente à prix subventionné de céréale, distribution de cash) peuvent aussi aider à mieux comprendre l'efficacité de ces mesures sur la dégradation du TDE.

Le terme de l'échange bétail/céréale formulé selon les recommandations de l'OIT en 2004 est un bon indicateur pour le suivi de la situation alimentaire des plus pauvres au Burkina Faso. Dans la philosophie actuelle de l'utilisation du TDE, il est élaboré pour suivre la dégradation du pouvoir d'achat des ménages vendant des petits ruminants pour s'acheter des céréales de base (maïs, mil, sorgho). C'est dans ce sens que le bouc qui est l'animal le plus vendu a été retenu pour le suivi de la dégradation du pouvoir d'achat des éleveurs. Mais, l'analyse de nos résultats indique un contraste d'évolution entre le TDE élaboré avec le bouc comparé à celui du taureau. En effet, le TDE du taureau présente un profil plus dégradé que celui du bouc. En se focalisant uniquement sur le bouc pour le suivi de la dégradation du TDE, les pasteurs et les commerçants de bovins peuvent connaître un affaiblissement important de leur pouvoir d'achat sans que cela ne soit rapporté dans le dispositif de la sécurité alimentaire. A cet effet, il serait recommandé d'associer le TDE taureau pour le suivi inclusif de la détérioration des conditions d'alimentation des groupes vulnérables ciblés.

D'une manière spécifique, les résultats ont indiqué que la période de référence est importante dans l'interprétation du TDE. En effet, si la période de référence est marquée par une inflation ou par une baisse des prix persistante dans le temps comme dans le cadre de l'insécurité, il peut avoir un biais dans l'interprétation du TDE. Des études ont rapporté que les indices ont tendance à être élevé en présence de l'inflation (OIT,2004). Ce qui peut ne pas forcément refléter l'amélioration du pouvoir d'achat des groupes vulnérables suivis. Une prudence devrait donc être observée dans l'interprétation des résultats du TDE.

CONCLUSION

Nous pouvons retenir que l'approche de Random Forest est une technique très efficace pour la sélection et le classement des variables entrant dans la dégradation des termes de l'échange bétail/céréale. L'ordre de classement des variables ne remet pas en cause les connaissances empiriques de terrain en lien avec les facteurs entrant dans la détérioration des conditions d'alimentation des populations vulnérables. L'approche de Random Forest a relevé que la monnaie, (surtout le Cédi, mais aussi le Naira dans une moindre mesure), l'indice de transport, l'indice de

sécheresse PDSI la sécheresse, l'inflation alimentaire, l'indice de transport et les prix des carburants sont les variables qui ont le plus fort pouvoir de prédiction des TDE. La dégradation du terme de l'échange bétail/céréale n'est pas le simple fait de la sécheresse. La sécheresse peut entretenir l'inflation mais l'inflation peut se produire en absence de la sécheresse. La dégradation du terme de l'échange bétail/céréale est aussi causée par les nouvelles crises émergentes au niveau national et international.

Afin de compléter cette analyse et pour contribuer à une meilleure prise de décision dans la gestion des crises alimentaires, il pourrait être intéressant d'évaluer plus précisément l'impact des mesures d'ajustement des prix des hydrocarbures sur les capacités d'accès des populations vulnérables aux sources de nourritures, d'élargir la liste des variables potentiellement explicatives des variations du TDE étudiées, et de multiplier le nombre de localités étudiées.

BIBLIOGRAPHIE

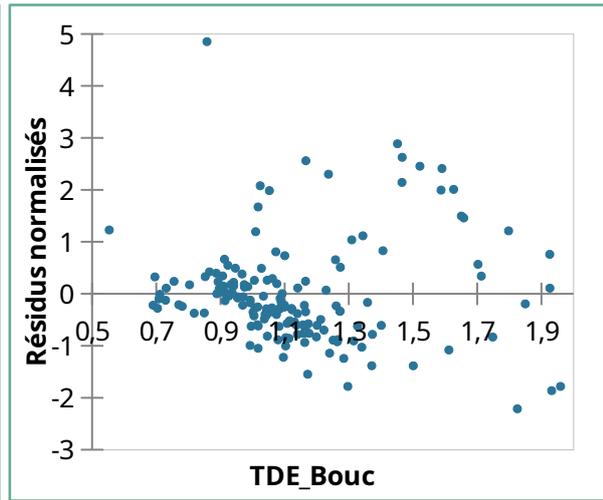
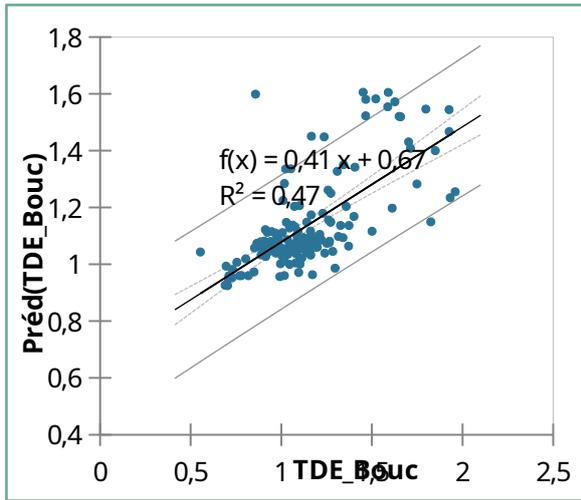
- Adetunji, A.B., Akande, O.N., Ajala, F.A., Oyewo, O., Akande, Y.F., Oluwadara, G., 2022. House Price Prediction using Random Forest Machine Learning Technique. *Procedia Computer Science* 199, 806–813. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.100>
- AFD, 2010. Prévenir les crises alimentaires au Sahel : des indicateurs basés sur les prix de marché. Document de travail n°95. 134 pages
- Azen, R., Budescu, D.V., 2003. The dominance analysis approach for comparing predictors in multiple regression. *Psychological Methods* 8, 129–148. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.8.2.129>
- Bassolet, B., Lutz, C., 1998. Service d'information et intégration des marchés céréaliers au Burkina Faso. *Revue d'économie du développement* 6, 45–65. <https://doi.org/10.3406/recod.1998.979>
- BCEAO, 2001. Outils d'analyse de la pauvreté. Notes d'Information et Statistiques, N°517 Août/Septembre. URL <https://www.bceao.int/>.
- BCEAO, 2008. Rapport sur l'évolution des prix à la consommation dans l'UEMOA en 2008 et perspectives en 2009. 25 pages.
- BCEAO, 2020. Balance des paiements et position extérieure globale du Burkina Faso. Ministère de l'Economie, des Finances et du Développement. Comité de la Balance des Paiements. 66 pages
- BCEAO, 2022. Rapport sur l'évolution des prix à la consommation dans l'UEMOA en 2021 et perspectives. 33pages.
- Blein, R., Bellora, C., Goura, B.S., 2008. La réponse ouest-africaine à la crise des prix 3. Grain de sel, n° 43. p 24-26.
- Breiman, L., 2001. Random Forest. Statistics Department University of California Berkeley, CA 94720.
- CILSS, 2004. Vingt ans de prévention des crises alimentaires au Sahel. Bilan et Perspectives. 88 pages.
- CILSS, 2023. Rapport Régionale sur la sécurité alimentaire et nutritionnelle au Sahel et en Afrique de l'Ouest (RRSAN), 81pages.
- Colliot, E., 1993. Les interactions entre le marché des céréales, le marché du bétail et le marché financier (Nord Yatenga au Burkina Faso). Dossier : systèmes financiers ruraux. *Les Cahiers de la Recherche Développement*, n°35, p19-33.
- Cosnefroy, O., Sabatier, C., 2011. Estimation de l'importance relative des prédicteurs dans un modèle de régression multiple. Intérêt et limites des méthodes récentes. *L'Année Psychol.* 2011, 111, 253, doi:10.4074/S0003503311002028.
- Daudin, J.J., Duby, C., Robin, S., Trécourt, P., 1996. Analyse de Séries Chronologiques. URL <https://docplayer.fr/11450450-Analyse-de-series-chronologiques-j-j-daudin-c-duby-s-robin-p-trecourt-ina-pg-mathematiques.html>.
- DDC, 2017. Etablissement de situation de référence pour le Programme d'appui à la commercialisation du bétail en Afrique de l'Ouest (PACBAO), Phase 1, 2017-2021.

- De Longueville, F., Hountondji, Y. C., Kindo, I., Gemenne, F., & Ozer, P. (2016). Long-term analysis of rainfall and temperature data in Burkina Faso (1950–2013). *International Journal of Climatology*, 36:4393–4405.
- Desboulets, L., 2018. A Review on Variable Selection in Regression Analysis. *Econometrics* 6, 45. <https://doi.org/10.3390/econometrics6040045>
- Devarajan, S., Kasekende, L., 2011. Africa and the Global Economic Crisis: Impacts, Policy Responses and Political Economy. *African Development Review* 23, 421–438.
- DGPSEA, 2008. Impact de la hausse des prix sur les conditions de vie des ménages et les marchés de Ouagadougou et de Bobo-Dioulasso. Mission Conjointe Gouvernement/Agences du SNU/ONG Save The Children UK, 14 pages.
- DGPSE, 2009. Rapport de synthèse de rapprochement des systèmes d'information sur les marchés (SIM) Agricoles au Burkina Faso. Direction Générale des Statistiques et de l'Economie de l'Elevage (DGPSE)/Ministère des Ressources Animales (MRA), 12 pages.
- EASYPol, 2007. Analyse de la filière bétail-viande au Burkina Faso. Ressources complémentaires, module EASYPol 105. 163 pages.
- Eurostat, 2022. Euro indicateurs. Estimation rapide-juillet 2022. <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/news/euro-indicators>
- Fallon, C., Thiry, A., Brunet, S., 2020. Planification d'urgence et gestion de crise sanitaire. La Belgique face à la pandémie de Covid-19. *Courrier hebdomadaire du CRISP* n° 2453-2454, 5. <https://doi.org/10.3917/cris.2453.0005>
- Funtowicz, S.O., Ravetz, J.R., 1993. Science for the post-normal age. *Futures* 25, 739–755. [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(93\)90022-L](https://doi.org/10.1016/0016-3287(93)90022-L)
- Genuer, R., 2010. Forêts aléatoires : aspects théoriques, sélection de variables et applications. *Mathématiques [math]*. Université Paris Sud - Paris XI, 2010. Français. fftel-0055098 (phdthesis). Université Paris Sud - Paris XI.
- Genuer, R., Poggi, J.-M., 2017. Arbres CART et Forêts aléatoires, Importance et sélection de variables. <https://hal.science/hal-01387654v2>
- Goehry, B., 2020. Random forests for time-dependent processes. *ESAIM: PS* 24, 801–826. <https://doi.org/10.1051/ps/2020015>
- Goehry, B., Yan, H., Goude, Y., Massart, P., & Poggi, J.-M., 2023. Random Forests for Time Series. *REVSTAT-Statistical Journal*, 21(2), 283-302. <https://doi.org/10.57805/revstat.v21i2.400>.
- Golay, C., 2010. Crise et sécurité alimentaires : vers un nouvel ordre alimentaire mondial ? *International Development Policy | Revue internationale de politique de développement* 229–248. <https://doi.org/10.4000/poldev.133>
- Gourdon, J., de Ubeda, A.-A., 2022. Conflit Russie - Ukraine : quelles conséquences sur les économies africaines ? Note brève n°233. Fondation pour les études et recherches sur le développement international (FERDI), 16 pages.
- Gregorutti, B., Michel, B., Saint-Pierre, P., 2017. Correlation and variable importance in random forests. *Stat. Comput.* 27, 659–678, doi:10.1007/s11222-016-9646-1
- Ha, J., Kose, A.M., Ohnsorge, F., Yilmazkuday, H., 2023. What Explains Global Inflation. Policy Research Working Paper 10648. Prospects Group, Development Economics, World Bank Group. p54. <http://www.worldbank.org/prwp>
- Haurie, A., 1966. Recherche opérationnelle : l'analyse spectrale des séries chronologiques. *ae* 42, 324–338. <https://doi.org/10.7202/1003288ar>
- Hjerpe, A., 2016. Computing Random Forests Variable Importance Measures (VIM) on Mixed Numerical and Categorical Data. Master's Thesis. KTH Royal Institute of Technology School of Computer Science and Communication 61p.

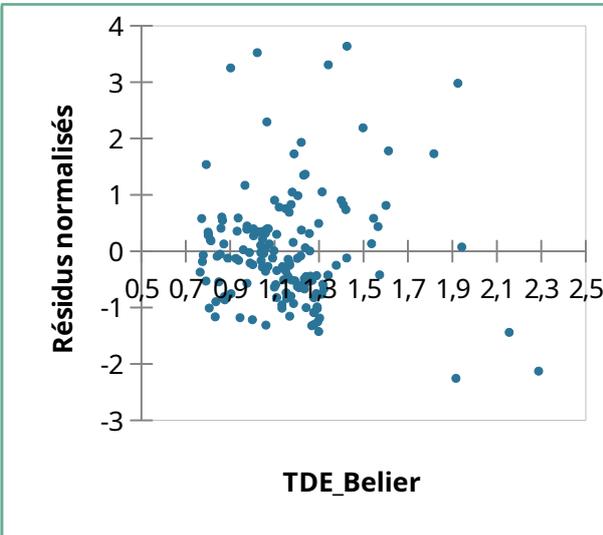
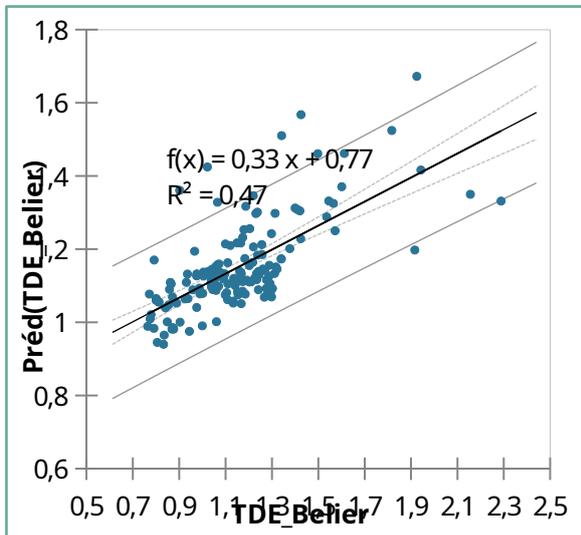
- Hountondji, Y.-C., Sokpon, N., & Ozer, P., 2006. Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982-1999) for the monitoring of desertification. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (5-6), 871-884. doi:10.1080/01431160500382782
- IDRC, 1985. Symposium sur la sécheresse en Afrique : compte rendu et sommaire d'un symposium tenu à Ottawa, Canada, 12-14 août 1985. 208 pages.
- IEPC, 2005. BURKINA FASO : Initiative « Elevage, pauvreté et croissance (IEPC) » - Propositions pour un Document national. Rapport principal. Version soumise aux comités de revue FAO et Banque mondiale. 135 pages.
- INSD, 2022. Indice harmonisé des prix à la consommation base 2014 du mois de mai. Ministère de l'Economie, des Finances et de la Prospective/ Institut National de la Statistique et de la Démographie, 6 pages.
- Janin, P., 2004. Gestion spatio-temporelle de la soudure alimentaire dans le Sahel Burkinabé. *Revue Tiers Monde* 180, 909. <https://doi.org/10.3917/rtm.180.0909>
- Kaewchada, S., Ruang-On, S., Kuhapong, U., Songsri-in, K., 2021. Random forest model for forecasting vegetable prices: a case study in Nakhon Si Thammarat Province, Thailand. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 13, No. 5, pp. 5265~5272. doi: 10.11591/ijece.v13i5.pp5265-5272.
- Kane, J.M., Price, N., Scotch, M., Rabinowitz, P., 1994. Comparison of ARIMA and Random Forest time series models for prediction of avian influenza H5N1 outbreaks. *BMC Bioinformatics*, 15:276. doi:10.1186/1471-2105-15-276.
- MAAHM, 2021. Deuxième mission conjointe de suivi et d'évaluation de la campagne agropastorale 2021/2022 et de la situation alimentaire et nutritionnelle des ménages du 29 août au 04 septembre 2021. 53 pages.
- Main, A., 2018. Mesure de l'importance de variables à partir de forêt aléatoire : Applications à la génétique. Mémoire de Master en Sciences de la gestion option Analytique d'affaires, HEC MONTRÉAL, 144 pages.
- MARNDR, 2017. Analyse d'intégration de marchés : cas des marchés de Pont-Sondé et de Croix-des-Bossales Octobre 2012 à Décembre 2016. Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural/ Unité des statistiques Agricole et Informatique. 27 pages.
- Mazerolle, F., 2006. Statistique descriptive : séries statistiques une et deux variables, séries chronologiques, indices. Gualino éditeur, EJA – Paris – 2006, ISBN 2 - 84200 - 891 – X.
- Medeiros, M.C., Vasconcelos, G.F.R., Veiga, Á., Zilberman, E., 2021. Forecasting Inflation in a Data-Rich Environment: The Benefits of Machine Learning Methods. *Journal of Business & Economic Statistics* 39, 98–119. <https://doi.org/10.1080/07350015.2019.1637745>
- Mei, J., He, D., Harley, R., Habetler, T., 2018. A Random Forest Method for Real-Time Price Forecasting in New York Electricity Market. Conference Paper. ·doi: 10.1109/PESGM.2014.6939932
- Mélard, G., Ecares, C., 2006. Initiation à l'analyse des séries temporelles et à la prévision 48. ECARES CP114 et Institut de Recherche en Statistique, Université Libre de Bruxelles. *Revue MODULAD*, Numéro 35.
- MEPA**, 2023. Bulletin d'information pastorale, N°28 AVRIL 2023. Comité Pastoral. 16pages <https://www.inter-reseaux.org/wp-content/uploads/Bulletin-n%C2%B028FINAL.pdf>
- MRAH, 2018. Cartographie intégrée des risques dans le secteur de l'élevage au Burkina Faso. Rapport définitif dans le cadre de la mise en œuvre du Projet d'Appui au Développement du secteur de l'élevage au Burkina Faso (PADEL-B), 89 pages.
- MRAH, 2020. Rapport de suivi et évaluation des ressources pastorales de la campagne 2020-2021 au Burkina Faso. Direction Générale des Espaces et des Aménagements Pastoraux. 47 pages.
- OIM, 2022. Matrice de suivi des déplacements (DTM) Sahel Central et Liptako-Gourma. Tableau de bord n3. URL <https://reliefweb.int/report/burkina-faso/burkina-faso-rapport-de-situation-16-juin-2022>.
- OIT/FMI/OCDE/CEE-ONU/Eurostat/Banque mondiale, 2004. Manuel de l'indice des prix à la consommation. Théorie et pratique. Guide, indice des prix à la consommation, collecte de données, méthode statistique, calcul, méthodologie, pays développés, pays en développement. 09.0 ISBN 1-58906-330-92. <https://www.imf.org/external/pubs/ft/cpi/manual/2004/fra/cpiguide.pdf> 2).

- Ondo, J.-C., 2002. Étude comparative des tests de stationnarité. Thèse, Université du Québec INRS-Eau, Terre et Environnement (ETE). URL <https://www.worldcat.org/title/Etude-comparative-des-tests-de-stationnarite/oclc/301145491>.
- Ouédraogo, D., Kaboré, M., Kienou, B., 2007. Insécurité alimentaire, vulnérabilité et pauvreté en milieu rural au Burkina : une approche en termes de consommation d'énergie : Mondes en développement n° 140, 65–84. <https://doi.org/10.3917/med.140.0065>
- Özden, C., 2023. Comparative Analysis of CNN, LSTM And Random Forest for Multivariate Agricultural Price Forecasting. *BSJ Agri* 6, 422–426. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1304625>
- Ozer, P., Dembele, A., Yameogo, S.S., Hut E. & De Longueville, F. 2022. The impact of COVID-19 on the living and survival conditions of internally displaced persons in Burkina Faso. — *World Development Perspectives*, 25, 100393; <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2022.100393>
- PAM, 2012. Suivi de la sécurité alimentaire. Guide technique 1, Structure et contenu du rapport d'un système de suivi. Programme Alimentaire Mondiale (PAM) / Service de l'analyse de la sécurité alimentaire (VAM). 48 pages.
- PAM, 2013. Guide de l'analyse des marchés pour les programmes de transferts monétaires Formulation, suivi et analyse d'impact. Programme alimentaire mondial – PAM/ Service de la sécurité alimentaire. 51 pages.
- Pinaud, S., 2019. Le commerçant, le paysan et la distribution du pouvoir de marché dans la Gnagna (Burkina Faso). *Revue internationale des études du développement* 237, 165. <https://doi.org/10.3917/ried.237.0165>
- Rahmani, E.; Khatami, M.; Stephens, E., 2024. Using Probabilistic Machine Learning Methods to Improve Beef Cattle Price Modeling and Promote Beef Production Efficiency and Sustainability in Canada. *Sustainability*, 16, 1789. <https://doi.org/10.3390/su16051789>
- RBM, 2020. Bulletin mensuel de suivi de l'impact de la COVID19 sur les ménages pastoraux et agropastoraux. 6 pages.
- Salifou, M., Houessou, M., 2020. Apprentissage statistique du modèle Cox-logistique : application à la survie des enfants de moins de 5 ans au Bénin. | *Journal of Mathematics and Statistics Studies*.
- Simonet, C., Traoré, S.M., Brunelin, S., Royer, L., 2020. Marchés de bétail au Sahel. Intégration des marchés, rôle du climat et des conflits dans la formation des prix 116.
- Simonsson, L., 2005. Profil de vulnérabilité du Burkina Faso. Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm.
- Strobl, C., Boulesteix, A.-L., Zeileis, A., Hothorn, T., 2007. Bias in random forest variable importance measures: Illustrations, sources and a solution. *BMC Bioinformatics* 8, 25. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-8-25>
- Traoré, S. M., Massaoud, W., Oumarou, D. H., Issoufou, B., Simeoné, C., & Abdouramane, B., 2022. Impact de la production céréalière et des prix des céréales sur la consommation alimentaire et l'évolution des moyens de subsistance des ménages au Burkina Faso. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 22(1), 19252-19270. <https://doi.org/10.18697/ajfand.106.20715>
- Toe, M.D., 2010. Modèles de prévision de l'inflation dans les pays membres de l'UEMOA. 33 pages.
- Tomen, N.H., 2014. Chaînes de valeur agricole et opportunités de développement pour la promotion de la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest. 53 pages.
- Vanier, M., 2005. La politisation de l'aide alimentaire d'urgence au Burkina-Faso. *Revue Tiers Monde* 184, 737. <https://doi.org/10.3917/rm.184.073>

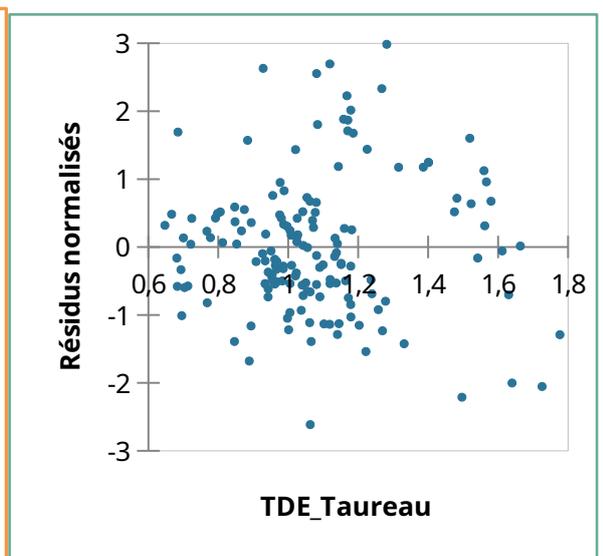
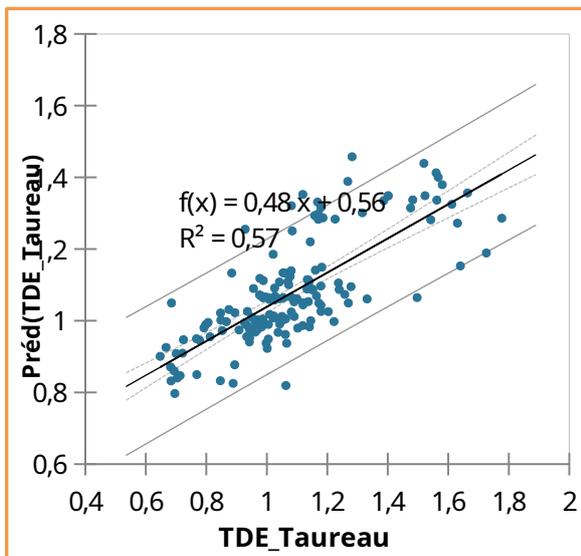
Annexe 1. Figure présentant les droites de régressions entre valeurs prédites et observées des TDE d'une part et autres part résidus et observations



A) Droite de régression entre valeurs prédites et observations d'une part et distribution entre résidus normalisés et observations d'autre part chez le Bouc



B) Droite de régression entre valeurs prédites et observations d'une part et distribution entre résidus normalisés et observations d'autre part chez le Béliet



- c) **Droite de régression entre valeurs prédites et observations d'une part et distribution entre résidus normalisés et observations d'autre part chez le taureau**