

Dimensionnement et impact d'un système d'irrigation autonome alimenté par des panneaux solaires sur l'économie Burundaise

A. Nsengiyumva *

Université de Liège, Département d'Electricité, Electronique et Informatique
Montefiore Institute (Building B28), Quartier Polytech 1
Allée de la découverte N°10, 4000 Liège, Belgique

(reçu le 26 Mars 2019 - accepté le 29 Mars 2019)

Abstract - *This article is part of an evaluation of the impact of the use of micro-networks, based on autonomous photovoltaic systems, in the primary sector of the Burundian economy. In the first part of the article, the work focuses first on a design study of an irrigation system powered by an autonomous system comprising photovoltaic (PV) panels associated with storage devices (batteries). In the second part, the impact is calculated by the multiple regression technique and the estimation of the parameters is made by the Ordinary Least Squares method, under the so-called stochastic and structural assumptions. The results obtained are very satisfactory and show us a positive impact of the integration of micro-networks, based on autonomous photovoltaic systems, in the primary sector of the Burundian economy.*

Résumé - *Cet article s'inscrit dans le cadre d'une évaluation de l'impact de l'utilisation des micro-réseaux, à base des systèmes photovoltaïques autonomes, dans le secteur primaire de l'économie Burundaise. Dans la première partie de l'article, le travail se focalise d'abord sur une étude de dimensionnement d'un système d'irrigation alimenté par un système autonome comportant des panneaux photovoltaïques (PV) associés à des périphériques de stockage (batteries). Dans la deuxième partie, l'impact est calculé par la technique de la régression multiple et l'estimation des paramètres est faite par la méthode des moindres carrés ordinaires, sous les hypothèses dites stochastiques et structurelles. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et nous montrent un impact positif de l'intégration des micro-réseaux, à base des systèmes photovoltaïques autonomes, dans le secteur primaire de l'économie Burundaise.*

Keywords: Autonomous irrigation in Burundi.

1. INTRODUCTION

Le Burundi est un pays enclavé, qui est situé en Afrique de l'Est. Les pays limitrophes sont, à l'Est, la Tanzanie, à l'Ouest, la République Démocratique du Congo et au Nord, le Rwanda. En 2016, la population burundaise était estimée, par le Fond Monétaire International (FMI), à 9.65 millions sur une superficie de 27 834 km².

Le Burundi est parmi les pays les moins développés au monde. L'énergie électrique est un facteur clé dans le développement durable d'un pays.

En 2016, le Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant, était estimé à 287.3 \$US, par le Fond Monétaire International (FMI). Ce faible PIB/hab est dû à l'enclavement, aux crises socio-politico-sécuritaires répétitives, au faible taux d'accès aux réseaux électriques et au fait que plus de 90 % de sa population vivent de l'agriculture artisanale et de l'élevage. [21, 3, 17].

Le Burundi n'a pas réussi à construire de gros réseaux électriques afin d'acheminer l'électricité dans tous les coins du pays. Il n'a même pas intensifié des micro-réseaux pour électrifier les coins les plus reculés. Rappelons que les micro-réseaux sont des systèmes électriques répartis en une ou plusieurs sources d'énergie(s) pouvant

* albert.nsengiyumva@doct.ulg.ac.be

fonctionner en parallèle avec le réseau électrique existant pour alimenter une ou plusieurs charge(s) [4].

La puissance installée est de 32 MW, alors que son potentiel hydroélectrique est estimé à plus de 1700 MW. Le potentiel solaire est aussi considérable avec un ensoleillement moyen annuel de +/- 2000 kWh/m²/an, sans fluctuation saisonnière. La température annuelle moyenne est comprise entre 23 °C et 17 °C, en fonction de l'altitude. Malgré ce potentiel, le Burundi ne parvient pas à satisfaire ses besoins en énergie électrique.

C'est pourquoi, nous pensons que des systèmes d'irrigation alimentés par les panneaux solaires (PV) associés à des périphériques de stockage (batteries), pourront être une solution qui permettrait de relancer la croissance économique en Afrique en générale et au Burundi en particulier [21].

Cette étude démontre l'impact de l'utilisation d'un système d'irrigation autonome, alimenté par un système PV autonome, sur l'économie burundaise. Elle apporte aussi une contribution dans la recherche scientifique en mettant en exergue l'impact de la production d'électricité photovoltaïque sur l'économie d'un pays et le bien être de sa population.

2. LE SECTEUR PRIMAIRE AU BURUNDI

Le secteur primaire est composé des domaines suivants,

- Agriculture vivrière; - Agriculture d'exportation; - Café; - Thé; - Autres cultures d'exportation; - Forêt; -Elevage.

Tous ces domaines n'ont pas les mêmes parts dans la formation du PIB. La figure suivante nous montre les parts de chaque domaine dans le PIB.

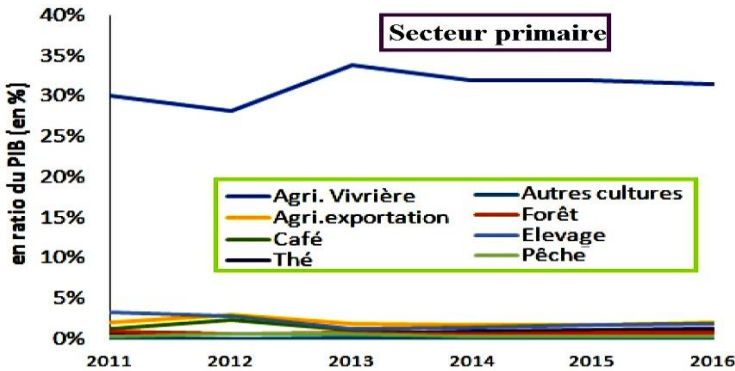


Fig. 1: Parts des domaines du secteur primaire dans le PIB [18]

Sur cette figure, nous constatons que l'agriculture vivrière domine le secteur primaire de l'économie burundaise et occupe, en moyenne, plus de 30 % du PIB. Les autres domaines de ce secteur totalisent ensemble moins de 7 % du PIB et aucun d'eux ne dépasse 4 % du PIB. L'année 2012 a été marquée par une chute de croissance de l'agriculture vivrière d'environ 2 % et est rattrapée en 2013, par une augmentation de plus de 5 %.

Les années qui suivent sont caractérisées par une décroissance lente de moins de 1 % par an sauf en 2014 où la décroissance est à peu près de 2 %. Cette situation est le résultat des crises socio-politiques à répétition.

Cette situation crée l'exode rural, car la majeure partie des gens vivant de l'agriculture vivent dans les milieux ruraux. Pour les autres domaines, nous observons une légère augmentation, en 2012, sauf dans le domaine de l'élevage. Il y a aussi une diminution en 2013 pour tous les domaines. Pour les autres années, nous remarquons une stagnation.

La redynamisation de l'agriculture vivrière permettrait, au moins, l'autosuffisance alimentaire et la croissance économique au Burundi. Cela permettra de réduire cet exode rural, car la cause principale de ce dépeuplement rural est que le métier principal (agriculture) devienne de plus en plus moins rentable. Nous ne pouvons pas ignorer l'effet de la croissance démographique (2 - 3 %) [ISTEEBU]. Une telle croissance démographique, dans un pays où 90 % de la population vive de l'agriculture, provoque l'exode rural si la production agricole ne suit pas le rythme.

La figure suivante nous montre la tendance de la population Burundaise à quitter les zones rurales vers les zones urbaines.

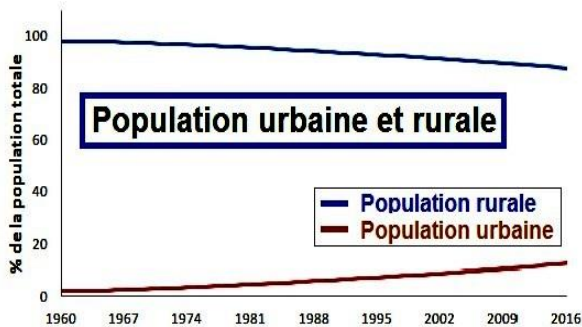


Fig. 2: Evolution de la population urbaine et rurale [16]

Nous constatons que la courbe représentant la population urbaine croît et celle représentant la population rurale décroît au même rythme. Ce qui est tout à fait normal, car ceux qui quittent les zones rurales rejoignent les milieux urbains car leur principale activité (agricole) est devenue de plus en plus moins rentable. De plus, ils n'ont pas la possibilité de développer des métiers, car les zones rurales sont en grande partie déconnectées du réseau électrique national.

Cela montre que, si rien n'est fait pour stabiliser cet exode, la vie deviendrait très difficile d'un côté comme dans l'autre. Les milieux ruraux vont se vider, tandis que les milieux urbains seront surpeuplés. Les zones urbaines n'étant pas capables d'accueillir ces nouveaux arrivants, un risque réel d'augmentation des violences de toutes sortes est évident. La meilleure solution serait de créer des activités génératrices des revenus, dans les zones rurales, pour les retenir.

3. AGRICULTURE VIVRIERE

L'agriculture vivrière occupe 90 % des terres agricoles au Burundi et elle contribue à plus de 80 % au PIB agricole. Dans la production vivrière, nous pouvons distinguer cinq groupes de produits, à savoir, (i) les céréales, (ii) les légumineuses, (iii) les racines, (iv) les tubercules et (v) les oléagineux et les bananes [26].

La production agricole ne peut pas être autosuffisante même si elle est pratiquée par 90 % de la population burundaise. Les raisons sont que cette agriculture n'est pas moderne et que l'Etat ne s'investisse pas suffisamment. C'est ce qui explique la faible part (moins de 45 %) dans le PIB.

Et pourtant, les atouts pour moderniser ce secteur ne manquent pas. Des efforts sont en train d'être menés par les associations des agriculteurs, la société civile et les organisations internationales et locales pour moderniser ce domaine. Le gouvernement devrait les soutenir en allouant un budget considérable au ministère qui a l'agriculture dans ses attributions. Actuellement, l'État dote un faible budget au ministère ayant dans ses attributions l'agriculture et l'alimentation.

L'objectif principal de cette recherche est de démontrer la contribution de l'utilisation des systèmes d'irrigation autonome, alimenté par un système PV autonome, dans le secteur primaire burundais. Partant des atouts favorisant ces systèmes, cette étude permettra aussi de démontrer comment, le Burundi parviendrait à assurer l'auto alimentation et à garantir la sécurité alimentaire.

Les atouts pour avoir une production agricole autosuffisante sont réunis. Nous pouvons citer ici: la température moyenne qui avoisine 25 °C et une bonne pluviométrie.

Les saisons culturales sont subdivisées en trois catégories,

La saison A- communément appelée "Agatasi" qui commence par le mois de Septembre jusqu'au mois de Janvier. C'est une petite saison de pluies.

La saison B- appelée "Impeshi", qui débute avec le mois de Février jusqu'au mois de Mai. C'est la grande saison des pluies.

La saison C- c'est l'été, communément appelé "Ici" qui commence par le mois de juin jusqu'au mois de Septembre. Contrairement à l'été de l'Europe, c'est la saison quasiment sans pluies, seules les cultures irriguées peuvent être pratiquées [26].

Les différentes cultures de l'agriculture vivrière sont, le Maïs, le Blé, le Riz, le Sorgho, l'Éleusine, le Haricot, le Petit pois, l'Igname, la Pomme de terre, la Patate douce, le Manioc, le Colocase et la Banane. Le riz devient, de plus en plus, l'aliment de base des burundais, surtout chez les personnes vivant en communauté comme, les corps de défense, les écoles, les hôpitaux, les prisons, les fonctionnaires et dans certains ménages ruraux.

Le riz est cultivé de trois façons, (i) la riziculture des marais, dans les basses et moyennes altitudes; (ii) pluviale, surtout dans la plaine de l'Imbo de Moso et la riziculture irriguée, surtout dans la plaine de l'Imbo. Ces trois sortes de riziculture diffèrent du point de vue de la production et de l'encadrement agricole. A part la riziculture irriguée qui est bien encadrée, avec une productivité en moyenne de quatre à sept tonnes par hectare, les autres sortes le sont moins et leur productivité est de un à trois tonnes par hectare [22].

4. FORMULATION DU PROBLEME

Au Burundi, l'agriculture connaît plusieurs problèmes, comme le manque des fertilisants et intrants, l'accès limité au crédit, la croissance démographique et le manque de maîtrise de l'eau, alors que 90 % de la population vivent de l'agriculture.

Tous ces problèmes ont fait que, depuis 1970 à 2016, le secteur agricole burundais a vu sa contribution dans le PIB chuter de plus de 30 %, comme le montre la figure suivante.

La figure 3 illustre l'évolution de la part de l'agriculture au PIB. Nous remarquons une tendance décroissante. La croissance démographique est parmi les principales causes de cette décroissance. En 1970, la part du secteur agricole dans le PIB était de 70.63 % pour une population de 3 455 606. Tandis que, en 2016, elle était de 39.75 %

pour une population de 10 524 117. Pour une période de 46 ans, la population a triplée et la part du secteur agricole a été réduite à moitié.

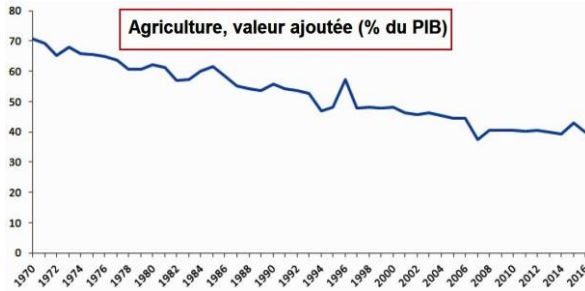


Fig. 3: Evolution de la part de l'agriculture au PIB [16]

Nous pouvons aussi ajouter l'accès limité au réseau électrique car le taux d'accès au réseau est entre 2-3 %. Sans électricité, il est très difficile de pratiquer l'irrigation dans ces zones ou la transformation des produits bruts. Et sans irrigation, la production agricole ne peut pas suffire pour une population qui connaît une croissance galopante.

En 2014, les études menées par l'IRRI-Burundi (International Rice Research Institute) en collaboration avec d'autres chercheurs sous le financement de FIDA, ont montré que, vers les années 1960, les Burundais consommaient un kilogramme de riz par habitant et par an (1 kg/hab/an). En 2014, dans les milieux ruraux, les Burundais ont besoin de dix kilogrammes de riz par habitant et par an (10 kg/hab/an), tandis que aux chef-lieux des provinces, ils ont besoin de 20 kg de riz par habitant et par an (20 kg/hab/an). Dans la capitale Bujumbura, les besoins en riz sont de 30 kg par habitant et par an (30 kg/hab/an).

Aujourd'hui, avec une population d'environ onze millions et demi, dont 87 % vivent dans les milieux ruraux et 13 % dans milieux urbains [selon la Banque Mondiale], la production du riz devrait être de 132 300 Tonnes. Et selon la FAO-ONU (Food and Agriculture Organisation), la production du riz a été de 67 377 Tonnes en 2014. C'est un déficit énorme à relever. Cet article se focalise sur les voies et moyens technico-économiques pour relever ce déficit.

5. LE CHOIX DE LA CULTURE D'ETUDE

La sécurité alimentaire est précaire au Burundi. Avoir trois repas par jour devient de plus en plus difficile pour certains. Et pourtant, le Burundi a tout ce qu'il faut pour avoir une production agricole auto-suffisante.

Dans la section précédente, nous avons vu que le riz occupe une place prépondérante dans l'alimentation des Burundais et des grandes communautés. C'est pourquoi nous avons retenu notre attention sur cette culture. Nous signalons que ces systèmes d'irrigation autonomes actionnés par le solaire peuvent être appliqués dans d'autres domaines du secteur primaire.

La majeure partie de la production nationale du riz provient de la riziculture irriguée de la plaine de l'Imbo (en commune de Gihanga). C'est pourquoi notre étude se focalise sur la culture du riz dans cette localité, mais cela n'empêche pas que cette méthode peut être appliquée ailleurs. La superficie de notre modèle (champ) est de un hectare (1 Ha).

Cette culture a besoin de beaucoup d'eau et pour la cultiver dans les trois saisons, il faut l'irriguer. Actuellement, l'irrigation est pratiquée de manière traditionnelle ou artisanale. L'eau est acheminée dans les champs par des canaux en fonction du débit d'un cours d'eau principal ou la rivière. Si le niveau baisse, les cultivateurs ne savent

pas irriguer leur champs. c'est le cas pour la période de la saison sèche, car le niveau d'eau diminue et l'irrigation devient problématique.



Fig. 4: Canaux d'irrigation et les digues

La figure 4 nous montre comment l'irrigation est pratiquée dans la riziculture. Ce système d'irrigation engendre des pertes en eau par l'évaporation et l'infiltration (chiffres et source). La perte en terres cultivables n'est pas négligeable aussi, car les canaux d'irrigation et les digues destinés à acheminer l'eau dans les différentes parcelles du champ du riz, occupent environ 5 % de la surface cultivable. Cependant l'été, le niveau d'eau baisse et ils ne savent plus irriguer leur champs.

C'est pourquoi, il y a une saison culturale où les riziculteurs ne font rien, alors que c'est la meilleure saison rizicole (saison C). Le manque d'un réseau électrique pour actionner les système de pompage ou d'irrigation, afin de faire parvenir l'eau dans les champs, est un problème majeur. Et pourtant toutes les conditions sont réunies pour avoir l'électricité solaire toute l'année. D'où, la production agricole n'est pas suffisante. Le **Tableau 1** nous montre la production du riz au Burundi, par province, pour l'année 2014.

Tableau 1: Production du riz par province [26]

2014	Saison A. [Tonne]	Saison B [Tonne]	Saison C [Tonne]
Bubanza	4 941	8 285	0
Bujumbura	2 104	7 297	10 235
Bururi	0	0	0
Cankuzo	0	5 274	0
Cibitoke	191	2 169	0
Gitega	6	2 683	255
Karuzi	12	2 516	0
Kayanza	0	3 295	0
Kirundo	36	2 295	0
Makamba	0	1 494	0
Muramvya	0	40	0
Muyinga	0	1 250	0
Mwaro	0	0	0
Ngozi	431	3 041	0
Rutana	1 083	2 378	0
Ruyigi	326	5 828	0

Le G nous montre que les provinces les plus actives dans la riziculture, sont la province de Bubanza et Bujumbura. Si nous faisons une analyse, saison par saison, nous

constatons que la province de Bubanza produit beaucoup plus que la province de Bujumbura dans la saison A et B.

Tandis que la province de Bujumbura produit beaucoup plus que la province de Bubanza dans la saison C. La production de la province de Bujumbura pendant la saison sèche est obtenue par l'irrigation traditionnelle.

Cela est possible grâce à sa géographie et son relief. La province de Bubanza se trouve un peu en hauteur par rapport à la province de Bujumbura où cette irrigation traditionnelle est possible.

6. DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME D'IRRIGATION AUTONOME

6.1 Définition générale du système d'irrigation autonome

Généralement, le mot irrigation est utilisé dans le domaine agricole et consiste à acheminer l'eau sur les terrains cultivés. Cette opération a pour objectif de permettre le développement des plantes et d'augmenter la production. L'irrigation des petites surfaces est appelée l'<arrosage>.

Ce système d'irrigation peut fonctionner soit mécaniquement ou être alimenté par le courant électrique. Si le système fonctionne mécaniquement, c'est pour des petites puissances et pour des petites surfaces ou champs. S'il est alimenté par le courant électrique, il faut une ligne électrique qui arrive dans les champs ou être autonomes.

6.2 Besoin en eau pour la riziculture

Dans cette section, pour trouver les besoins en eau pour irriguer notre champ rizicole (1 Ha), nous avons fait une estimation en excluant les précipitations et l'humidité du sol. Il est important de signaler que dans les régions humides, pendant la période sèche, le sol restitue l'eau aux cultures.

Comme le Burundi est un pays tropical et humide, notre estimation des besoins en eau restera vraie même pendant la saison sèche. Les paramètres (précipitation et humidité) négligés compenseront le déficit de transpiration des cultures et l'évaporation à partir du sol (évapo-transpiration).

Dans ce cas, les besoins en eau pour l'irrigation dépend de plusieurs facteurs. La consommation varie en fonction des types de culture, du sol et des saisons culturales. En supposant que le climat reste élément et que le sol reste identique, la consommation en eau dépendrait seulement du type de culture. Dans cette situation, les besoins en eau ont été estimés à 2000 m³/Ha/an:

C'est sur base de cette quantité d'eau nécessaire que sera dimensionné notre système d'irrigation. Réellement les besoins en eau pour irriguer un hectare rizicole sont estimés entre 1200 - 2000 m³/Ha/an:

Une pluviométrie mensuelle de 200 mm/mois pendant la saison culturale suffirait pour le riz pluvial. Pendant cette période, notre système d'irrigation sera moins sollicité.

6.3 Dimensionnement du système

Le dimensionnement en soit consiste à faire une étude technico-économique d'un système d'irrigation autonome. Ce système, alimenté par les panneaux solaires, doit répondre aux besoins en eau d'un champ d'un hectare de riz.

Pour notre cas, comme l'irrigation se caractérise par le nombre de remplissages et de vidanges du champ rizicole, notre système doit être capable de remplir le champs dans plus ou moins trois jours. Et comme les riziculteurs pratiquent souvent trois remplissages, deux vidanges et que le niveau de l'eau doit rester constant, notre système

est appelé à réguler la hauteur de l'eau pour ne pas asphyxier le riz, ni le noyer. C'est un équilibre difficile à maintenir à cause des problèmes liés au dénivellement du champ.

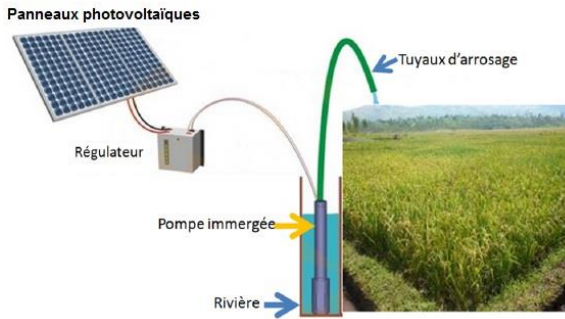


Fig. 5: Dimensionnement - irrigation autonome

La figure 5 nous montre que l'énergie solaire captée par les panneaux solaires va alimenter la pompe via un régulateur de charge intelligent. Sachant que l'ensoleillement dans les champs de riz est beaucoup favorable pour les panneaux solaires (dans la plaine +/- 4500 kWh/m²/an), c'est encore un avantage à saisir pour actionner les pompes.

7. IMPACT D'UN SYSTEME D'IRRIGATION AUTONOME ALIMENTE PAR DES PANNEAUX SOLAIRES SUR L'ECONOMIE BURANDAISE

7.1 Estimation de la consommation du riz horizon 2030 au Burundi

En 2014, les études menées par l'IRRI-Burundi ont montré que dans les milieux ruraux, un habitant avait besoin de dix kilogrammes de riz annuellement (10 kg/hab/an), tandis qu'aux chef-lieux des provinces, ils avaient besoin de 20 kilogrammes de riz (20 kg/hab/an). Dans la capitale Bujumbura, les besoins en riz étaient de 30 kilogrammes (30 kg/hab/an).

En 2030, avec une population estimée à treize millions et demi, toutes choses restant égales, la production du riz devrait être de 1 720 000 Tonnes. Et selon la FAO-ONU, la production du riz a été de 67 377 Tonnes en 2014. C'est un défi énorme à relever.

7.2 Méthodologie de calcul

7.2.1 Hypothèse

Notre hypothèse est que l'intégration des systèmes d'irrigation alimentés par les micro-réseaux à base des panneaux photovoltaïques autonomes, contribue au développement économique d'un pays et sur le bien-être de la population vivant dans les zones non connectées au réseau électrique.

7.2.2 Présentation du modèle linéaire multiple

Le modèle linéaire multiple est une extension du modèle linéaire simple. Pour ce dernier, une seule variable endogène est expliquée à l'aide d'une seule variable exogène. Cependant, il est rare qu'un phénomène économique ou social puisse être appréhendé par une seule variable, c'est pourquoi dans le modèle linéaire multiple nous introduisons plusieurs variables explicatives [23, 24].

Le modèle linéaire multiple est représenté de la façon suivante,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Où,

y_i , est une variable dépendante du temps i ;
 x_{ki} , $k = 1, 2, \dots, k$;
 x_{ki} , variables explicatives;
 $\beta_0 + \beta_1 + \dots + \beta_k$, un vecteur des paramètres inconnus;
 β_{ki} , $k = 1, 2, \dots, k$;
 β_k : $k=0, 1, \dots, k$, les paramètres du modèle à estimer:
 ε_t est une erreur.

De façon pratique, ce modèle linéaire multiple est souvent écrit sous-forme matricielle.

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{21} + \dots + \beta_k x_{k1} + \varepsilon_1$$

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{12} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_k x_{k2} + \varepsilon_2$$

$$y_n = \beta_0 + \beta_1 x_{1n} + \beta_2 x_{2n} + \dots + \beta_k x_{kn} + \varepsilon_n$$

Cette forme peut être réduite aussi de cette façon,

$$Y = \beta X + \varepsilon$$

avec les dimensions différentes suivantes,

$$Y(n,1) ; X(n, k+1) ; \beta(k+1, 1) ; \varepsilon(k,1)$$

C'est la forme matricielle de : a , k variables et n observations. Les paramètres de notre modèle linéaire multiple, seront estimés en minimisant la somme des carrés des erreurs par la méthode de moindres carrés ordinaires (MCO).

$$\text{Min} \sum \varepsilon^2 = \text{Min} \varepsilon_i \varepsilon_i = \text{Min} (Y - \beta X)' (Y - \beta X) \quad (2)$$

$$\text{Min} (Y - \beta X)' (Y - \beta X) = \text{Min} S \quad (3)$$

$\varepsilon_i^?$ est la transposée de ε_i

En minimisant la fonction S , ça nous permet d'estimer les paramètres de notre modèle comme suit,

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y \quad (4)$$

8. HYPOTHESES ET PROPRIETES DES ESTIMATIONS

Les hypothèses sont de deux catégories: stochastiques et structurelles.

8.1 Hypothèses stochastiques

H₁: les variables explicatives sont sans erreurs;

H₂: $E(\varepsilon_i) = 0$. L'espérance est nulle;

H₃: $E(\varepsilon_i^2) = \sigma_\varepsilon^2$; La variance de l'erreur est constante (homoscédasticité)

H₄: $E(\varepsilon_i, \varepsilon_t) = 0 \forall i \neq t$; Les erreurs sont non corrélés (indépendantes)

H₅: $\text{Cov}(X_{it}, \varepsilon_t) = 0$; L'erreur est indépendante des variables explicatives.

8.2 Hypothèses structurelles

H₆: Absence de colinéarité entre les variables explicatives. C'est-à-dire que XX' est singulière et $(X'X)^{-1}$ existe.

H₇: le nombre d'observations toujours supérieur au nombre des séries de variables explicatives

8.3 Propriétés des estimateurs

$E(\hat{\beta}) = \beta$ - L'estimateur $\hat{\beta}$ est sans biais, sinon, il doit être convergent. La variable de l'erreur est,

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{\varepsilon' \varepsilon}{n - k - 1} \quad (5)$$

Les variances des coefficients sont données par la matrice des variances-covariances,

$$\sigma_{\beta}^2 = \sigma_{\varepsilon}^2 (X' X)^{-1} \quad (6)$$

8.4 Qualité d'ajustement et test de significativité

8.4.1 Qualité d'ajustement

L'analyse de la qualité d'ajustement repose sur l'équation d'analyse de la variance. La variabilité totale (SCT) est égale à la variabilité expliquée (SCE) + la variabilité des résidus (SCR). Plus la variance expliquée est proche de la variance totale, meilleur est l'ajustement global du modèle.

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT} \quad (8)$$

C'est le coefficient de détermination, qui nous donne la proportion de la variance expliquée. Le coefficient ajusté, en fonction du faible nombre d'observations, sera calculé comme suit,

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} (1 - R^2) \quad (9)$$

8.4.2 Test de significativité

Dans cette section, il est question de connaître le degré d'influence des variables explicatives sur notre variable endogène. C'est un test d'hypothèse,

$H_0: a_1 = a_2 = \dots = a_k$; Tous les coefficients sont nuls.

$H_1: \exists$; un coefficient non nul.

9. OPTIMISATION DU MODELE

Les techniques statistiques permettent de déterminer quelles sont les variables à retirer ou à ajouter. Pour comparer des modèles impliquant un nombre différent de variables explicatives, nous avons retenu deux critères: critère d'Akaike Information Criterion(AIC) ou de Schwarz Criterion(SC)

$$AIC = \text{Ln} \left(\frac{SCR}{n} \right) + \frac{2k}{n} \quad (10)$$

$$SC = \text{Ln} \left(\frac{SCR}{n} \right) + \frac{k \text{ Ln}(n)}{n} \quad (11)$$

9.1 Les régressions possibles

Le nombre des combinaisons de régressions possibles est égal à $2^k - 1$ combinaisons. Le modèle qui sera retenu est celui qui présentera des valeurs de AIC et SC minimales avec des variables significatives. La limite de cette méthode est que le nombre d'équation à estimer peut être élevé.

9.2 Elimination progressive

Pour un modèle à K variables explicatives, il faut procéder par l'élimination de proche en proche les variables non significatives et réestimer l'équation après chaque élimination mais il faut que la première équation soit estimée.

9.3 Sélection progressive 'Forward Régression'

Dans cette section, nous devons sélectionner parmi des variables explicatives, laquelle est la plus corrélée avec la variable endogène. La seconde étape consiste à calculer les coefficients partiels et retenir la variable ayant un coefficient élevé. La procédure s'arrête lorsqu'il n'y a plus de variables significatives.

9.4 Régression par étape 'Stagewise Regression'

Cette méthode consiste à minimiser les intercorrélations entre les séries explicatives par étude du résidu.

9.4.1 1^{re}étape

La variable explicative dont le coefficient de corrélation simple est le plus élevé avec la variable expliquée est sélectionnée. Elle est notée, X_i

9.4.2 2^{re}étape

Le résidu de la régression de la variable expliquée est calculée comme suit,

$$x_i : e_i = y - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_1 \quad (12)$$

Nous retenons le coefficient de corrélation entre le résidu et les variables explicatives le plus élevé, noté, x_j , et on passe à l'étape suivante.

9.4.3 3^{re}étape

Cette étape consiste à recalculer à nouveau le résidu de cette façon,

$$e_i = y - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_1 - \hat{\beta}_2 x_2 \quad (13)$$

De même, nous retenons le coefficient de corrélation entre le résidu et les variables explicatives le plus élevé comme le nouveau résidu. La procédure s'arrête lorsque le coefficients de corrélations ne sont plus significativement différents de zéro.

10. RESULTATS ET ANALYSE

10.1 Introduction

L'irrigation traditionnelle dans la riziculture est une éthode très gourmande en eau. A part cela, nous avons constaté une perte en surface cultivable énorme de 3 Ha sur 60 Ha cultivés.

L'augmentation de la population, où 90 % est agricole, et une production qui ne suit pas la cadence est une situation très alarmante. Et pourtant les conditions climatiques, météorologiques et géographiques du Burundi sont très favorables pour l'irrigation moderne.

Le **Tableau 1** nous a montré que certaines provinces ne peuvent pas cultiver les trois saisons et/ou la production n'est pas bonne à cause de ce problème. Faisons une analyse

sur la productivité de ces deux provinces: Bubanza et Bujumbura rurale. Le **Tableau** suivant nous rappelle leur production.

Table 2. Production de riz pour les provinces de Bubanza et Bujumbura

2014	Saison A. [Tonne]	Saison B [Tonne]	Saison C [Tonne]
Bubanza	4 941	8 285	0
Bujumbura	2 104	7 297	10 235

Le **Tableau 2** nous montre que, pendant la saison B, la province de Bubanza produit presque le double de sa production: saison A. De même, pendant la saison A, Bubanza produit plus du double de la production de Bujumbura.

Curieusement, pendant la saison C, Bujumbura produit beaucoup plus que la somme de sa production pour la saison A et B. Forcement, la province de Bubanza produirait beaucoup plus que la somme de sa production pour les saisons A et B (+/- 15 000 Tonnes), une fois un système d'irrigation mis en place.

Le cas échéant, la production de la province de Bubanza, pendant la saison C, sera au moins égale à celle de la province de Bujumbura pendant la saison C.

10.2 Résultats et analyse

Le résultat de l'estimation basée sur le modèle linéaire multiple, sous les hypothèses stochastiques et structurelles, est présenté par cette figure.

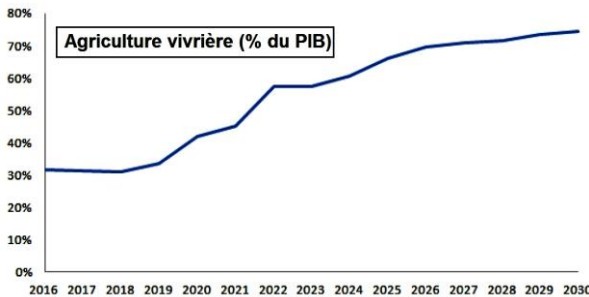


Fig. 6: Estimation de l'impact de l'agriculture vivrière (en % du PIB)

Cette figure nous montre l'évolution d'une estimation de l'impact de l'agriculture vivrière sur le PIB. Nous remarquons une croissance soutenue depuis 2019. Au début, cette croissance est soutenue jusqu'en 2026. Entre la période de 2019 - 2030, l'augmentation est estimée à 31 %.

Cette croissance de l'agriculture vivrière impacterait la part du secteur agricole sur le PIB. L'impact du secteur agricole sur le PIB serait très positif, comme le montre la figure suivante.

La figure 7 illustre l'estimation de l'évolution du secteur agricole jusqu'en 2030. Nous remarquons une nette augmentation après l'application des systèmes d'irrigation. En 2030, la part du secteur agricole sur le PIB est estimé à 85.31 % contre 39.93 %, en 2019.

11. CONCLUSION

Cet article s'est penché sur l'analyse et l'estimation de l'impact de l'application des systèmes d'irrigation autonomes dans le secteur agricole sur l'économie du Burundi.

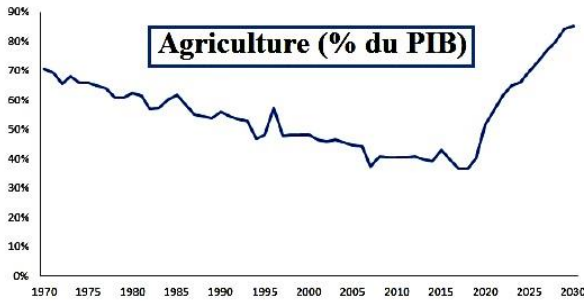


Fig. 7: Estimation de l'impact de l'agriculture (jsq 2030)

Ces systèmes permettront aux agriculteurs de cultiver les trois saisons sans problème et de diversifier les cultures. Au pire des cas, les riziculteurs cultiveront au moins deux saisons culturales et surtout la meilleure saison (saison sèche).

Sur base du modèle linéaire multiple, sous les hypothèses stochastiques et structurelles, nous avons pu montrer que les systèmes d'irrigation autonomes, à base des panneaux solaires, ont un impact très positif sur l'économie du pays.

Toutes choses restant égales dans les autres secteurs de la vie économique du pays, l'impact de l'application des systèmes d'irrigation autonomes dans secteur agricole sur le PIB est estimé à 45.39 % jusqu'en 2030.

En perspective, comme les micro-réseaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines de la vie économique d'un pays, il serait intéressant d'estimer son impact sur les secteurs secondaire et tertiaire de la vie économique du Burundi, afin de mettre en évidence l'impact sur l'économie Burundaise dans l'ensemble.

REFERENCES

- [1] M. Hankins, *'Installations solaires photovoltaïques autonomes'*, Vol. 8, 293 p., 2012.
- [2] Banque de la République du Burundi, *'Rapport du comité de politique monétaire'*, URL : <http://www.brb.bi/>, Profil de pays - Burundi, *'Commission économique pour l'Afrique'*: URL : www.uneca.org/publications/ (mars 2017),
- [3] S. Furfari, *'Dieu, l'Homme et la Nature: L'écologie, nouvel opium du peuple'*, 2010.
- [4] D. Ernst, *'Microgrids and their destructuring effects on the electrical industrial'*, 2014.
- [5] I. Irradiation and A. B. Faso, *'Dimensionnement d'une installation solaire autonome en site isolé (montagne, Burkina Faso)'*, (pp. 5 - 6, 2001)
- [6] Rapport IBGE, *'Une installation photovoltaïque en site isolé'*, 85 p., 2011.
- [7] Rapport préparatoire, PNUD, *'Taux de couverture, taux de desserte et taux d'électrification. Définitions et modes de calculs pour les différentes filières, électrique, énergie domestique et force motrice'*, 2007.
- [8] A. Guyader, *'Régression linéaire'*, Université Rennes 2, Année 2012/2013.
- [9] P. Houée, *'Opportunités dans le secteur des énergies renouvelables au Burundi'*, PNUD République du Burundi.
- [10] B. Africaine, *'Un meilleur accès à l'énergie pour les Africains'*,

- [11] Rapport Technique, Conférence des Ministres Africains de l'énergie, '*Les enjeux des technologies d'énergie renouvelable dans la lutte contre la désertification*', 2004.
- [12] Africa Energy Outlook, '*Une étude sur les perspectives énergétiques de l'Afrique Subsaharienne*', IEA, 2014.
- [13] Banque Africaine de Développement, '*Un plan d'action pour les infrastructures au Burundi*', 2009.
- [14] S. Chatzivasileiadis, D. Ernst, and G. Andersson, '*The Global Grid*', Renewable Energy, Vol. 57, pp. 372 - 383, 2013.
- [15] PNUD Burundi, URL: <http://www.bi.undp.org/content/burundi/fr/home/countryinfo.html>
- [16] Banque Mondiale, '*Données de la banque mondiale sur le Burundi*', URL: <https://donnees.banquemondiale.org/pays/burundi?view=chart>
- [17] Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi, '*Rapport des projections démographiques 2008-2030*', URL : <http://www.isteebu.bi/>, 2013.
- [18] Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi, '*Projections démographiques 2010 - 2050 niveau national et provincial*', URL: <http://www.isteebu.bi/>, 2017.
- [19] Fonds monétaire international, '*Cadre stratégique de croissance et de lutte contre la pauvreté - Second rapport de mise en oeuvre*', URL: <http://www.imf.org>, Oct 2010
- [20] Fonds monétaire international, '*Les consultations de 2014 avec le Burundi au titre de l'article IV et sur la cinquième revue de l'accord triennal au titre de la facilité élargie de crédit et la demande de modification de critères*', URL : <http://www.imf.org>, Juil. 2014.
- [21] A. Nsengiyumva, '*Impact d'électrification des zones rurales, par des systèmes photovoltaïques autonomes, sur l'économie Burundaise*', Université de Liège. URL:<http://hdl.handle.net/2268/234954/>, Sep. 2017.
- [22] L. Gahiro, '*Compétitivité des filières rizicoles burundaises: le riz de l'Imbo et le riz des marais*', Université de Liège Gembloux, URL: <http://hdl.handle.net/2268/99335>, 2011.
- [23] R. Bourbonnais, '*Econométrie*', Dunod, Paris, 2002.
- [24] K. Yaya, '*Guide pratique d'introduction à l'Econométrie sous Eviews*', Ecole Nationale de Statistique et d'Economie Appliquée (ENSEA), Abidjan, 2008.
- [25] <http://www.statistiques-mondiales.com/continents.htm>,
- [26] <http://www.isteebu.bi>,
- [27] <http://www.regideso.bi>,