

Évaluation *ex ante* de l'irrigation de complément dans un contexte sahélien : couplage d'un modèle biophysique à un modèle économique d'exploitation agricole

Bétéo Zongo^(1,2,3), Abdoulaye Diarra⁽⁴⁾, Bruno Barbier⁽⁵⁾, Malicki Zorom⁽²⁾, Harouna Karambiri⁽²⁾, Souleymane Ouédraogo⁽⁶⁾, Patrice Toé⁽⁷⁾, Yacouba Hama⁽²⁾, Thomas Dogot⁽³⁾

⁽¹⁾ Université de Dédougou, 03 BP, 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso. E-mail : beteozongo@yahoo.fr

⁽²⁾ Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 01 BP 594, Ouagadougou 01, Burkina Faso.

⁽³⁾ Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, Unité d'Économie et Développement Rural, Passage des Déportés, 2, 5030 Gembloux, Belgique.

⁽⁴⁾ International Fund for Agricultural Development (IFAD), 01 BP, 594 Ouagadougou 01, Burkina Faso.

⁽⁵⁾ Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), BP 6189, Dakar, Sénégal.

⁽⁶⁾ Institut National de l'Environnement et de Recherches Agronomiques (INERA), 01 BP 476, Ouagadougou 01, Burkina Faso.

⁽⁷⁾ Université Nazi Boni de Bobo-Dioulasso, Laboratoire d'Études Rurales sur l'Environnement et le Développement Économique et Social (LERE/DES), 01 BP 1091, Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso.

Reçu le 26 juin 2018, accepté le 23 juillet 2019, mis en ligne le 2 septembre 2019.

Cet article est distribué suivant les termes et les conditions de la licence CC-BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>)

Description du sujet. Dans les pays sahéliens, la répartition spatio-temporelle hautement variable des précipitations demeure une menace pour l'agriculture pluviale, malgré le grand nombre de techniques diffusées pour la conservation des eaux et des sols.

Objectifs. Analyser plusieurs stratégies d'irrigation des cultures pluviales et évaluer l'impact probable des mesures économiques incitatives en vue de faciliter l'adoption de l'irrigation de complément à partir des petits bassins individuels de collecte des eaux de ruissellement face aux poches de sécheresse.

Méthode. Les stratégies possibles d'irrigation de complément et les simulations des mesures économiques incitatives ont été analysées à partir d'un modèle bio-économique appliqué à une exploitation agricole type.

Résultats. Les simulations montrent que l'irrigation de complément permet d'accroître le revenu espéré des agriculteurs, comparativement à la situation sans irrigation. La culture du maïs, du sorgho et du mil sous l'irrigation de complément en année sèche augmente le revenu espéré de 26,49 % (133 030 francs CFA, équivalent à 202,80 euros) comparativement à la situation sans irrigation. Les simulations visant à promouvoir l'irrigation de complément à partir des petits bassins individuels sont axées sur quatre modalités de subventions et un système d'octroi de crédit aux ménages agricoles.

Conclusions. Parmi les mesures incitatives, la subvention sous forme de travail contre nourriture pour mobiliser la main-d'œuvre en vue de construire les bassins semble particulièrement adaptée pour la mise à l'échelle de la pratique de l'irrigation de complément à partir des petits bassins individuels.

Mots-clés. Stockage d'eau, adoption de l'innovation, modèle bioéconomique, subvention, crédit, Burkina Faso.

***Ex ante* evaluation of supplemental irrigation in a Sahelian context: coupling biophysical and economic models**

Description of the subject. In Sahelian countries, irregular spatial and temporal rainfall distribution remains a threat for rainfed agriculture despite the use of a wide range of techniques for soil conservation.

Objectives. To analyze several irrigation strategies for rainfed crops and to assess the likely economic incentives to support the adoption of supplemental irrigation from farm ponds in response to dry spells.

Method. The supplemental irrigation strategies and economic incentives were analyzed using an applied bio-economic model in a typical farm.

Results. The simulations showed that supplemental irrigation from small individual ponds would increase farmers' income compared to the situation without irrigation. Maize, sorghum and millet production under supplemental irrigation in a dry year would increase expected income by 26.49% (133,030 CFA francs equivalent to 202.80 euros) compared to the situation without irrigation. Simulations with incentives to promote supplemental irrigation focused on four subsidy modalities and the introduction of a credit system for agricultural households.

Conclusions. Of the incentives studied, the food-for-work subsidy to mobilize labor for basin building seems particularly suitable for scaling-up supplemental irrigation.

Keywords. Water storage, innovation adoption, bioeconomic model, subsidies, credit, Burkina Faso.

1. INTRODUCTION

Dans les pays sahéliens et en particulier au Burkina Faso, la grande variabilité dans la répartition spatio-temporelle des précipitations continue de fragiliser la production agricole, même si la pluviométrie totale a augmenté depuis le début des années 1990 (Nicholson, 2005 ; Hountondji et al., 2009). Les producteurs ont bien essayé de s'adapter à cette variabilité après les sècheresses des années 1970 et 1980 (Nkonya et al., 2011 ; Zorom et al., 2013) en adoptant des techniques de conservation des eaux (zaï, demi-lunes, bandes enherbées, cordons pierreux, etc.) qui permettent une meilleure infiltration des eaux de ruissellement et améliorent les réserves en eau disponibles pour les cultures (Barbier et al., 2009 ; Ouédraogo et al., 2010 ; Zorom et al., 2013). Ces techniques accroissent les rendements agricoles (Kabore et al., 1993), mais elles sont peu efficaces en cas de sècheresses prolongées de deux à trois semaines (Roose et al., 1993), se traduisant par un déficit pluviométrique marqué pouvant entraîner une réduction significative de la production agricole (Wilhite & Glantz, 1985).

L'utilisation des prévisions saisonnières climatiques fondées sur les savoirs endogènes compte également parmi les stratégies traditionnelles des agriculteurs d'adaptation au risque climatique (Roncoli, 2006). Toutefois, la majorité des agriculteurs considèrent que les prévisions traditionnelles des précipitations basées sur des signes visibles dans le paysage (phénologie de certains arbres, comportement de certains animaux, observation des étoiles et de la lune, etc.) sont devenues moins fiables pour la planification des activités agricoles à cause d'un certain changement dans le déroulement des saisons (Roncoli et al., 2001 ; Ingram et al., 2002). Plusieurs modèles climatiques ont été développés pour prévoir le type de saison pluvieuse à venir (Roudier et al., 2014). Les agriculteurs sont surtout intéressés par les informations sur le début de l'hivernage, la durée de la saison des pluies et la fin de l'hivernage (Zongo et al., 2016). Ces prévisions sont souvent en déphasage avec les observations au cours de la saison agricole

en raison des importants biais dans les simulations (Oettli et al., 2011 ; Agali et al., 2013). La prise en compte de ces informations climatiques par les agriculteurs reste marginale (Sultan et al., 2008).

Pour relever ce défi de l'adaptation de l'agriculture pluviale à la variabilité climatique, il convient de réduire le déficit hydrique des cultures en pratiquant l'irrigation de complément pendant les séquences sèches de l'hivernage. Les expérimentations et calculs théoriques montrent que la pratique de l'irrigation de complément à partir des petits bassins individuels (ICBI) permet d'accroître significativement les revenus des agriculteurs (Carsky et al., 1995 ; Fox & Rockström, 2003). Dans la zone sahélienne du Burkina Faso, les deux tiers des agriculteurs interrogés sont intéressés par l'irrigation de complément et sont même prêts à contribuer financièrement pour l'acquérir (Zongo et al., 2015). Une question centrale est d'affiner la stratégie d'irrigation pour satisfaire les besoins en eau des cultures pendant les séquences sèches de la saison des pluies. Ensuite, nous avons réalisé des simulations portant sur d'éventuelles incitations économiques, comme les subventions ou un crédit orienté vers l'adoption de cette innovation par les agriculteurs.

Cet article vise à évaluer des stratégies d'irrigation et quelques mesures économiques incitatives en vue de contribuer à faciliter l'adoption de l'ICBI par les agriculteurs du Burkina Faso. Spécifiquement, il analyse les doses d'irrigation et les périodes d'irrigation des cultures, les rendements prévus en fonction des types d'années (sèche, normale, humide) et des modes possibles de financement du dispositif. L'approche adoptée est basée sur des simulations générées à partir d'un modèle bioéconomique appliqué à une exploitation agricole type dans la zone sahélienne du Burkina Faso. Cette zone se caractérise par une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 300 et 600 mm et concentrée sur trois à quatre mois (SP/CONEDD, 2007). L'agriculture, essentiellement pluviale, est la principale source d'alimentation et de revenu pour plus de 80 % de la population (INSD, 2009).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Dispositif de l'irrigation de complément

L'irrigation de complément consiste à apporter de l'eau aux cultures durant les longues poches de sécheresse observées pendant la saison pluvieuse, grâce à l'eau de ruissellement stockée dans des petits bassins construits à proximité des champs (Fox & Rockström, 2000). Elle permet d'irriguer une portion de terre sur laquelle sera pratiquée une culture intensive. Elle est basée sur quatre principes :

- la construction du bassin par l'agriculteur et sa famille avec l'appui éventuel des voisins ;
- la collecte des eaux de ruissellement en début de saison des pluies ;
- le choix de la culture ;
- la pratique de l'irrigation pendant les séquences sèches de la saison des pluies.

Le moyen d'exhaure proposé ici est la pompe à pédale.

2.2. Caractéristiques de l'exploitation agricole type

Lors d'une enquête réalisée en 2014, environ 90 % des agriculteurs enquêtés dans la zone sahélienne du Burkina Faso ont indiqué que les cultures pluviales les plus appropriées à l'irrigation de complément sont les céréales – c'est-à-dire le maïs, le sorgho et le mil – puisqu'elles constituent la base de leur alimentation (Zongo et al., 2015). La satisfaction des besoins en eau de ces cultures dépend de la régularité des pluies. Pour évaluer les stratégies d'irrigation de ces cultures, nous avons sélectionné une exploitation type de la zone, c'est-à-dire orientée vers la céréaliculture extensive (Zorom et al., 2013). Cette exploitation type, qui présente des caractéristiques moyennes en termes de superficie des cultures, de capital et de main-d'œuvre des exploitations agricoles, est localisée dans le terroir villageois de Tougou situé à 25 km de la ville de Ouahigouya dans la province de Yatenga en zone sahélienne. Elle dispose d'une superficie de terre arable de 3,94 ha répartie entre le maïs (0,3 ha), le mil

(1,72 ha) et le sorgho (1,92 ha) et d'un capital financier de 110 000 francs CFA¹ (équivalent à 167,76 euros) pour les dépenses relatives aux achats de céréales en période de soudure, intrants et équipements agricoles. Elle est composée de 11 membres, dont 6 actifs. Le nombre de jours de travail disponibles par actif pour les activités de l'exploitation est de 26 jours par mois, si l'on tient compte des jours de repos et des aléas climatiques (quatre jours par mois). L'ensemble des données a été collecté au cours d'une enquête qui s'est déroulée pendant la campagne agricole 2014.

2.3. Modèle biophysique pour la prise en compte des possibilités d'irrigation

Le modèle CROPWAT a été employé pour simuler la croissance et le rendement des cultures. CROPWAT est un outil d'aide à la décision pour la planification et la gestion de l'irrigation, développé par la FAO (Smith, 1992). Il utilise les données climatiques, pédologiques et culturales pour simuler à un pas de temps journalier le bilan hydrique dans le sol, les besoins en irrigation, la production de biomasse et le rendement.

Caractéristiques agro-pédo-climatiques. La croissance et le rendement du sorgho, du mil et du maïs ont été simulés avec le modèle CROPWAT dans la mesure où les agriculteurs ont estimé que ces cultures sont mieux indiquées pour l'irrigation de complément (Zongo et al., 2015). Le cycle végétatif de chaque culture se caractérise par quatre phases distinctes (**Tableau 1**). Les variétés semées dans la zone sont de type précoce.

Les sols cultivés de la zone sont à tendance argilo-limoneuse (CILSS, 2001a). Ces sols se distinguent par une réserve utile supérieure et une infiltration réduite comparativement à celles des sols sablo-limoneux et sableux (Dembele & Some, 1991). Pour des raisons de simplification, ils ont été les seuls considérés dans le modèle de croissance de plante.

Les variables climatiques utilisées par CROPWAT sont la température (maximum, minimum), la vitesse du vent, le taux d'humidité du sol, l'insolation et la pluviométrie. Elles varient d'une année à l'autre, témoignant de la grande variabilité du climat sahélien. Pour tenir compte de cette variabilité, les indices pluviométriques annuels ont été calculés suivant la formule proposée par Lamb (1982) :

¹655,957 francs CFA = 1 euro

Tableau 1. Durée du cycle végétatif des cultures — *Duration of the vegetative cycle of crops.*

Phase du cycle végétatif (jours)	Initial (P ₁)	Croissance (P ₂)	Mi-saison (P ₃)	Arrière-saison (P ₄)	Total
Maïs	15	20	30	20	85
Sorgho	20	30	35	30	115
Mil	20	30	35	25	110

Source : adapté de l'INERA — *adapted from INERA (1998 ; 2007).*

$$I_s = \frac{P_s - \bar{P}}{\sigma_s} \quad (1)$$

Dans cette expression, P_s est la hauteur de pluie totale en millimètre pour une année s , \bar{P} la moyenne annuelle de pluie et σ_s l'écart-type de la série pluviométrique annuelle.

Les années ont été classées en années sèches, normales et humides en fonction de la valeur de l'indice pluviométrique (Araya & Stroosnijder, 2011). L'année normale se caractérise par un indice pluviométrique compris entre -0,5 et 0,5 associé à une durée de la saison des pluies comprise entre deux mois et demi et trois mois sans période de sécheresse de deux semaines au minimum. Lorsque l'indice est inférieur à -0,5, l'année est sèche et se caractérise par au moins une poche de sécheresse d'une durée supérieure ou égale à deux semaines au cours d'une saison des pluies inférieure à deux mois et demi. Lorsque l'indice est supérieur à 0,5, l'année est humide, c'est-à-dire une saison des pluies de quatre mois sans poche de sécheresse de deux semaines au minimum. Soit $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ l'ensemble des types d'années.

Caractérisation des stratégies d'irrigation possibles.

Soit J l'ensemble de ces cultures : $J = \{\text{maïs, mil, sorgho}\}$. La campagne agricole d'hivernage s'étale de juin à septembre. Nous l'avons découpée en quatre phases du cycle de développement d'une culture $j \in J$. Il s'agit de la phase initiale (P_{j1}), la croissance (P_{j2}), la mi-saison (P_{j3}) et l'arrière-saison (P_{j4}) (**Tableau 1**). Soit P_{jk} l'ensemble des phases de croissance, $P_{jk} = \{P_{j1}, P_{j2}, P_{j3}, P_{j4}\}$.

La question est de déterminer pour chaque culture j , les stratégies d'irrigation qui devront être utilisées en fonction de l'avènement des poches de sécheresse. Par définition, une stratégie d'irrigation est un vecteur R^P d'apports en eau à chaque phase du cycle végétatif d'une campagne agricole (Reynaud, 2008). La stratégie d'irrigation i au cours de la campagne agricole est telle que $i \in \{1, \dots, I\}$ où I représente le nombre de stratégies d'irrigation possibles (**Tableau 2**).

Pour une année donnée $s \in S$, la dose d'eau optimale apportée à la culture $j \in J$ à la phase $p \in P$, si l'agriculteur opte pour la stratégie d'irrigation i , est notée $EAU_{s,j,i,p}$. Le nombre de dates possibles d'apports d'eau au cours d'une campagne a été limité

Tableau 2. Schématisation des stratégies d'irrigation et rendements associés — *Schematization of irrigation strategies and associated yields.*

Stratégies	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	Y _{s,j,i} (kg·ha ⁻¹)
i ₁	EAU _{s,j,i1,p1}	EAU _{s,j,i1,p2}	EAU _{s,j,i1,p3}	EAU _{s,j,i1,p4}	Y _{s,j,i1}
i ₂	EAU _{s,j,i2,p1}	0	EAU _{s,j,i2,p3}	EAU _{s,j,i2,p4}	Y _{s,j,i2}
i ₃	EAU _{s,j,i3,p1}	0	0	EAU _{s,j,i3,p4}	Y _{s,j,i3}
i ₄	EAU _{s,j,i4,p1}	0	0	0	Y _{s,j,i4}
i ₅	EAU _{s,j,i5,p1}	EAU _{s,j,i5,p2}	0	0	Y _{s,j,i5}
i ₆	EAU _{s,j,i6,p1}	EAU _{s,j,i6,p2}	EAU _{s,j,i6,p3}	0	Y _{s,j,i6}
i ₇	EAU _{s,j,i7,p1}	0	EAU _{s,j,i7,p3}	0	Y _{s,j,i7}
i ₈	0	EAU _{s,j,i8,p2}	EAU _{s,j,i8,p3}	EAU _{s,j,i8,p4}	Y _{s,j,i8}
i ₉	0	EAU _{s,j,i9,p2}	0	EAU _{s,j,i9,p4}	Y _{s,j,i9}
i ₁₀	0	EAU _{s,j,i10,p2}	0	0	Y _{s,j,i10}
i ₁₁	0	0	EAU _{s,j,i11,p3}	EAU _{s,j,i11,p4}	Y _{s,j,i11}
i ₁₂	0	0	EAU _{s,j,i12,p3}	0	Y _{s,j,i12}
i ₁₃	0	EAU _{s,j,i13,p2}	EAU _{s,j,i13,p3}	0	Y _{s,j,i13}
i ₁₄	0	0	0	EAU _{s,j,i14,p4}	Y _{s,j,i14}
i ₁₅	EAU _{s,j,i15,p1}	EAU _{s,j,i15,p2}	0	EAU _{s,j,i15,p4}	Y _{s,j,i15}
i ₁₆	0	0	0	0	Y _{s,j,i16}

Source : adapté de Reynaud — *adapted from Reynaud (2008)*. P₁, P₂, P₃, P₄ : cycles végétatifs voir **Tableau 1** — *vegetative cycles see Table 1*; EAU_{s,j,i,p} : dose d'eau optimale apportée en année s à la culture j pendant la phase du cycle végétatif p pour la stratégie i — *optimum water dose given in year s to crop j during the vegetative cycle phase p for the strategy i* ; Y_{s,j,i} : rendement de la culture j en année s pour la stratégie d'irrigation i — *crop yield j in year s for the irrigation strategy i* .

à quatre, conformément aux différentes phases du cycle de développement d'une culture j : une dose prédéfinie par phase en fonction de la saison. L'apport d'eau en quantité suffisante à chaque phase permet de combler le déficit en eau de la culture pour une sécheresse de deux semaines avant la phase suivante. La quantité totale d'eau ($TEAU_{s,j,i,p}$) apportée à la culture j pendant la campagne agricole s est la somme des doses d'eau apportées à chaque phase de la culture lorsque l'agriculteur opte pour la stratégie d'irrigation i .

$$TEAU_{s,j,i,p} = \sum_p EAU_{s,j,i,p} \quad (2)$$

Le modèle a le choix d'apporter la dose ou non. L'ensemble des stratégies d'irrigation par culture et par type d'année égale 16 (16 correspond à une fonction de puissance entre 4 – effectif de P – et 2 – apports ou non de dose d'eau) et chacune d'elle est associée à un rendement $Y_{s,j,i}$.

Calibrage et validation du modèle biophysique. Les itinéraires de chaque culture ont été introduits dans le modèle ainsi que les rendements observés. Les rendements simulés avec le modèle ont été ensuite comparés avec les rendements observés par le Ministère en charge de l'agriculture (MAH, 2012) en utilisant différents critères, à savoir le coefficient de corrélation de Pearson, l'Efficiencia et la Déviation Normalisée. L'estimation du coefficient de corrélation de Pearson indique une relation linéaire entre les rendements simulés et observés, mais ne signifie pas qu'ils soient similaires (Dumont et al., 2012). Pour combler cette lacune, Brisson et al. (2002) et Beaudoin et al. (2008) recommandent de compléter l'analyse dudit coefficient par celle de l'Efficiencia (EF) proposée par Nash & Sutcliffe (1970) et la Déviation Normalisée (ND), parfois dénommée biais moyen. Les auteurs considèrent que la validation est adéquate si $EF \geq 0,5$ et $INDI \leq 0,1$. Toutefois, le modèle ne peut être validé que lorsque le coefficient de détermination (R^2) est supérieur à 70 % selon les travaux de Bharati et al. (2008) et Bellocchi et al. (2009). L'ensemble de ces critères a été utilisé pour valider le modèle.

2.4. Modélisation du comportement d'optimisation de l'agriculteur

Afin d'appréhender les décisions de production des agriculteurs ainsi que leurs stratégies d'adaptation à la variabilité climatique, nous avons introduit les résultats des simulations du modèle de croissance des cultures dans un modèle économique de programmation mathématique à l'échelle d'une exploitation agricole. L'objectif du modèle économique est de simuler le comportement probable des agriculteurs en incorporant les données relatives aux ressources disponibles et aux besoins céréaliers.

Disponibilité et allocation des ressources. Les ressources de l'exploitation agricole sont la terre, la main-d'œuvre, le capital et l'eau des bassins. La disponibilité en eau pour irriguer les cultures céréaliers correspond à la quantité d'eau stockée dans chaque type de bassin à une période p de la campagne agricole. La superficie en hectare de la culture j inhérente à la stratégie i adoptée par l'exploitant est représentée par la variable $X_{s,j,i}$. Le volume des besoins en eau des superficies de l'ensemble des cultures (maïs, sorgho, mil) à une période p sont $\sum_{(c)} EAU_{s,j,i,p} * X_{s,j,i,p}$.

Le stock d'eau ($QEAU_{s,p}$) dans le bassin à une période p dépend de l'eau stockée au terme de la période précédente ($QEAU_{s,p-1}$), des apports par ruissellement ($RUIS_{s,p}$), de l'évaporation (EVA_p), des précipitations directes dans le bassin (PRE_p) et de la pratique de l'ICBI ($\sum_{(c)} EAU_{s,j,i,p} * X_{s,j,i,p}$) (Bharati et al., 2008 ; Roy et al., 2009). Les écoulements hypodermiques et l'infiltration ($EINF$) sont négligeables pour un bassin idéal. Formellement, le stock d'eau dans le bassin est :

$$QEAU_{s,p} = QEAU_{s,p-1} + RUIS_{s,p} + PRE_p - EVA_p - EINF - \sum_{(s,p)} EAU_{s,j,i,p} * X_{s,j,i,p} \quad (3)$$

L'évaporation (EVA_p) en volume est obtenue à partir de la multiplication de la quantité d'eau évaporée (EV_p) à la période p par la superficie occupée par le bassin de stockage ($supbassin$) :

$$EVA_p = EV_p * supbassin \quad (4)$$

Les précipitations directes ($PRE_{s,p}$) dans le bassin sont déterminées par le produit de la hauteur d'eau de pluie tombée ($PL_{s,p}$) et la superficie du bassin de stockage :

$$PRE_{s,p} = PL_{s,p} * supbassin \quad (5)$$

Les ruissellements ($RUIS_{s,p}$) sont obtenus en multipliant la hauteur d'eau de pluie tombée ($PL_{p,s}$), le coefficient de ruissellement (cof) estimé en moyenne à 30 % dans la zone d'étude, c'est-à-dire le terroir villageois de Tougou (Mounirou et al., 2012) et la superficie du sous-bassin versant ($supb$).

$$RUIS_{s,p} = PL_{p,s} * supb * cof \quad (6)$$

La contrainte liée au volume maximum de stockage ($bass$) est identique pour chaque type de bassin. Elle est exprimée selon l'équation suivante :

$$\sum_{(c,o)} EAU_{s,j,i,p} * X_{s,j,i,p} + QEAU_{s,p} \leq bass \quad (7)$$

La contrainte terre, exprimée en hectare et établie à partir de la superficie totale disponible (stc) moins celle occupée par le bassin ($supbassin$), est donnée par l'équation suivante :

$$\sum_j x_j \leq stc - supbassin \quad (8)$$

La contrainte en main-d'œuvre pour l'ensemble des cultures équilibre le besoin en travail des cultures et la disponibilité en main-d'œuvre par période. Le besoin en main-d'œuvre par hectare des cultures ($bmo_{j,i,p}$) varie selon la stratégie adoptée par l'exploitant. La main-d'œuvre familiale disponible (en homme-jour) dans une exploitation est le produit du nombre d'actifs disponibles (mof) et du nombre de jours ($nbjr$) de travail de la période. La demande de la main-d'œuvre salariée est déterminée par le produit du nombre d'actifs salariés (mos) disponibles en moyenne et du nombre de jours de travail (njr) réalisés pendant l'hivernage :

$$\sum_j bmo_{j,i,p} * X_{s,j,i,p} \leq mof * nbjr + mos * njr \quad (9)$$

Le besoin en capital standard de l'exploitation concerne les achats de céréales en période de soudure ($acer$) et les intrants agricoles (cti). En outre, il y a les charges liées au dispositif d'ICBI, c'est-à-dire les charges relatives à l'acquisition de la pompe à pédale ($cexh$), du matériel de clôture ($cpro$), du matériel d'imperméabilisation ($CIMP_b$), celles liées à la main-d'œuvre salariée ($mosa$) et à la construction du bassin (C_b).

On distingue quatre types de bassins en fonction des couts :

- bassin 1 : bassin à fond imperméabilisé avec de l'argile et parois non imperméabilisées ;
- bassin 2 : bassin à fond imperméabilisé avec de l'argile et parois cimentées ;
- bassin 3 : bassin à fond bûché et parois cimentées ;
- bassin 4 : bassin à fond et parois bûchés.

soit B l'ensemble des types de bassins ; $b \in B = \{bassin\ 1, bassin\ 2, bassin\ 3, bassin\ 4\}$.

Au regard de la disponibilité du capital financier de l'exploitation (cap), la contrainte de financement de chaque type de bassin est formulée par l'équation :

$$acer + mosa + cti + cexh + cpro + CIMP_b + C_b \leq cap \quad (10)$$

Les dépenses de l'exploitation sont couvertes par les revenus générés par la vente des animaux, la vente des produits agricoles et par les activités non agricoles. Dans nos simulations, l'agriculteur peut

bénéficier d'une subvention accordée par le ministère en charge de l'Agriculture ou d'un crédit auprès des institutions de micro-finances locales comme l'Union des BOARE – tradition d'épargne et de crédit dans la zone d'étude – à un taux d'intérêt de 10 % pour la construction du type de bassin souhaité, lorsque le capital financier de l'exploitation ne permet pas de couvrir le besoin de capital standard et les charges liées au dispositif d'ICBI.

Besoins céréaliers. Les besoins céréaliers ($bcer$) par individu et par an sont estimés à 190 kg (CILSS, 2001b). La contrainte de consommation annuelle prend en compte tous les membres de l'exploitation agricole (pop), les quantités de production achetées ($ACHA_j$), le rendement ($Y_{s,j,i}$) et la superficie de chaque culture ($X_{s,j}$). Elle est formulée dans l'équation suivante :

$$\sum_j Y_{s,j,i} * X_{s,j} + \sum_j ACHA_j \geq bcer * pop \quad (11)$$

Spécification de la fonction d'utilité de l'agriculteur.

L'approche utilisée pour décrire le comportement des agriculteurs est le modèle espérance-variance. Il s'agit d'une application directe des travaux de Bernoulli (1738), Von Neumann & Morgenstern (1947) ainsi que Friedman & Savage (1948) sur la maximisation de l'utilité espérée. Une valeur approchée de la fonction d'utilité espérée est obtenue par son développement limité à l'ordre 2 en série de Taylor (Freund, 1956) qui peut s'écrire en termes d'équivalent certain (EC) par la formule :

$$EC(R) = E(R) - \frac{1}{2} * A * \sigma_R^2 \quad (12)$$

Cette équation donne une valeur approchée de la prime de risque égale à la moitié de l'aversion absolue liée au risque (A), multiplié par la variance de toutes les possibilités de revenu final (σ_R^2) : les préférences (coefficient d'aversion au risque) et la variabilité (variance des revenus) sont les principaux déterminants des couts associés au risque du consentement maximum à payer pour un certain résultat. L'agriculteur va donc chercher à maximiser l'utilité de la richesse espérée représentée par ($U(\Pi)$).

$$Max\ U(\Pi) = E(\Pi) - \frac{1}{2} * A * \sigma_{\Pi}^2 \quad (13)$$

$$(14)$$

$$U(\Pi) = \left[\sum_{(s,j,i)} X_{s,j,i} * Y_{s,j,i} * prx_j * Prob_s - (cti - mosa + acer + cexh + cpro + CIMP_b + C_b) \right] - \frac{1}{2} A \left[\sum_{(s,j,i)} (\sigma_{j,i} * prx_j * X_{s,j,i})^2 \right]$$

où $E(\Pi)$ est le revenu espéré, σ_{Π}^2 la variance du revenu, $Prob_s$ la probabilité du type d'année et $\sigma_{j,i}$ le risque associé à la culture j selon la stratégie d'irrigation i et prx_j le prix de vente de la production de la culture j . Les prix de vente sont de 150 francs CFA·kg⁻¹, 100 francs CFA·kg⁻¹ et 90 francs CFA·kg⁻¹ respectivement pour le maïs, le sorgho et le mil. Nous faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas de lien entre les rendements des différentes cultures et donc que la covariance est nulle.

Validation du modèle économique. La validation du modèle économique consiste d'abord à vérifier que les théories et simplifications sont correctes ou justifiables, et que la structure et les relations entre les composantes du système correspondent à la réalité (Rykiel, 1996). Cette méthode de validation dite conceptuelle doit être complétée par une validation des données qui permet de certifier qu'elle rend bien compte du système réel. Le coefficient d'aversion absolue au risque A a été utilisé pour paramétrer le modèle, c'est-à-dire que nous avons utilisé différentes valeurs du coefficient d'aversion au

risque pour déterminer celle qui propose un assolement proche de l'assolement observé (Pannell et al., 2000). Cette démarche s'inspire des travaux de Simmons & Pomareda (1975) ainsi que de Hazell & Norton (1986).

3. RÉSULTATS

3.1. Validation du modèle bioéconomique et caractérisation des années

Le **tableau 3** présente les rendements de référence et simulés des différentes cultures (maïs, mil et sorgho) ainsi que les valeurs estimées des critères utilisés pour calibrer le modèle biophysique. L'analyse des EF (> 0,5), des ND (< 0,1) et des R² (> 90 %) indique une bonne validation du modèle pour chacune des cultures.

Le **tableau 4** indique les résultats simulés par le modèle économique selon différents niveaux d'aversion absolue au risque et les résultats de la situation de référence. Les superficies des cultures correspondant aux valeurs des niveaux d'aversion au

Tableau 3. Validation du modèle biophysique — *Biophysical model validation.*

Année	Maïs (en kg·ha ⁻¹)		Mil (en kg·ha ⁻¹)		Sorgho (en kg·ha ⁻¹)	
	Rendement de référence	Rendement simulé	Rendement de référence	Rendement simulé	Rendement de référence	Rendement simulé
2005-2006	1 246	1 243	951	962	817	894
2006-2007	644	646	413	456	844	765
2007-2008	928	952	648	605	811	895
2008-2009	959	954	750	715	783	748
2009-2010	813	815	989	962	984	926
2010-2011	715	718	880	816	1070	1039
2011-2012	340	316	511	605	348	394
2012-2013	876	874	743	758	704	695
Moyenne	815	815	736	735	795	795
EF	0,9975		0,9356		0,9164	
ND	0,0005		0,0010		0,0008	
R ²	0,9977		0,9463		0,9183	

Tableau 4. Superficies des cultures en fonction de différents niveaux d'aversion au risque — *Crops areas according to different levels of risk aversion.*

Superficie (ha)	Valeur du coefficient au risque				Situation de référence
	0,01	0,0001	0,0004	0,000053	
Maïs	0,005	0,248	0,336	0,30	0,30
Mil	0,043	1,713	1,745	1,73	1,72
Sorgho	0,052	1,989	1,868	1,92	1,92

risque sont comparées à celles de l'exploitation type. Cette comparaison montre que le niveau d'aversion au risque de 0,000053 donne des résultats plus proches de la réalité.

De 1980 à 2010, les indices pluviométriques montrent que les années humides ont été 1981, 1994, 1996, 2001, 2003 et 2007 à 2010 (**Figure 1**). Les années sèches ont été 1982 à 1985, 1988 et 1990. Les autres années sont considérées comme normales.

3.2. Pilotage de l'irrigation de complément et rendements prévus

Doses d'eau apportées aux cultures. Les hauteurs d'eau d'irrigation cumulée par stratégie sont obtenues par la somme des doses d'eau apportées à chaque phase du cycle végétatif des cultures (**Figure 2**). Elles varient en fonction des cultures et des types d'années. Les doses cumulées d'eau d'irrigation apportées en année sèche sont supérieures à celles des années normales et humides. L'adoption de la stratégie i_1 nécessite plus d'eau d'irrigation que les autres. Les doses d'irrigation du sorgho sont de 59,3 mm en année sèche, 57,3 mm en année normale et 53,9 mm en année humide. Pour le mil, elles sont estimées à 54,6 mm en année sèche, 51 mm en année normale et 47,5 mm en année humide. Les doses d'eau d'irrigation cumulées du maïs sont évaluées à 107,2 mm en année sèche, 96,5 mm en année normale et 74,6 mm en année humide.

Rendements agricoles prévus. Les rendements des cultures varient en fonction des types d'années (**Figure 3**) et des différentes stratégies d'irrigation. Les rendements élevés du sorgho sont obtenus par l'adoption des stratégies i_1 , i_2 , i_3 , i_4 et i_5 . Ils sont évalués à 1 000 kg·ha⁻¹ en année humide, 860 kg·ha⁻¹ en année normale et 820 kg·ha⁻¹ en saison sèche. Au regard de la quantité d'eau d'irrigation, la stratégie i_5 paraît plus

efficace que les autres puisqu'elle consomme moins d'eau durant le cycle végétatif. Pour la culture du mil, l'adoption des stratégies i_3 et i_4 fournit les meilleurs rendements. Ces derniers sont estimés à 1006 kg·ha⁻¹ en année humide, 864 kg·ha⁻¹ en année normale et 712 kg·ha⁻¹ en année sèche. Compte tenu de la quantité apportée, la stratégie i_4 est la plus efficace. Quant au maïs, le rendement optimal est évalué à 1 794 kg·ha⁻¹ en année humide, 1 407 kg·ha⁻¹ en année normale et 928 kg·ha⁻¹ en année sèche. Ce rendement est obtenu lorsque la stratégie i_2 est adoptée.

3.3. Analyse du comportement d'optimisation de l'agriculteur par la simulation

Plan de production en année sèche. L'année sèche est assimilée à une probabilité égale à 1 contre 0 pour les années normales et humides. On fait ainsi l'hypothèse que l'agriculteur est informé que l'année sera sèche. Étant informé que l'année risque d'être sèche, l'agriculteur diminue la superficie du mil (1,72 à 1,20 ha) au profit du sorgho (1,93 à 2,74 ha) (**Tableau 5**). La superficie du maïs est totalement réallouée au sorgho. L'eau stockée dans le bassin n'est pas suffisante pour satisfaire les besoins hydriques du maïs à chaque phase de son cycle cultural. L'agriculteur n'irrigue pas le mil. Par contre, il choisit d'irriguer 1,29 ha de sorgho à la phase initiale et celle de mi-saison (i_7), 1,42 ha seulement à la phase de mi-saison (i_{12}) et 0,03 ha à la phase initiale, de mi-saison et d'arrière-saison (i_{15}).

Le revenu espéré par l'agriculteur est évalué à 570 180 francs CFA avec la pratique de l'ICBI contre 502 210 francs CFA sans irrigation. Pour une prévision saisonnière sèche, la pratique de l'ICBI induit une augmentation du revenu espéré de 13,53 %.

Plan de production agricole en année myope. Le scénario « myope » traduit l'année où l'agriculteur n'est

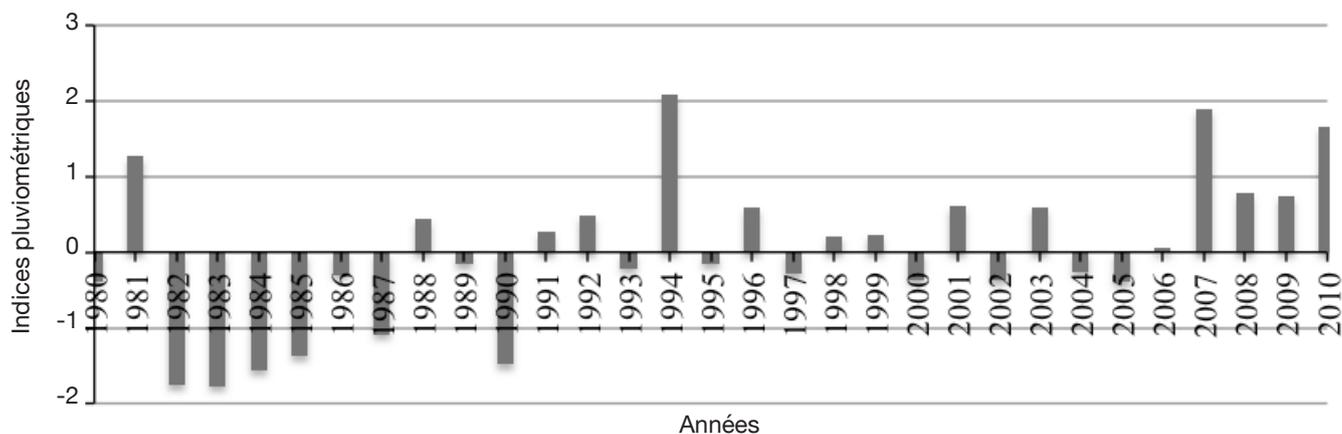


Figure 1. Variations des indices pluviométriques dans le Yatenga de 1980 à 2010 — *Rainfall index variations in the Yatenga from 1980 to 2010.*

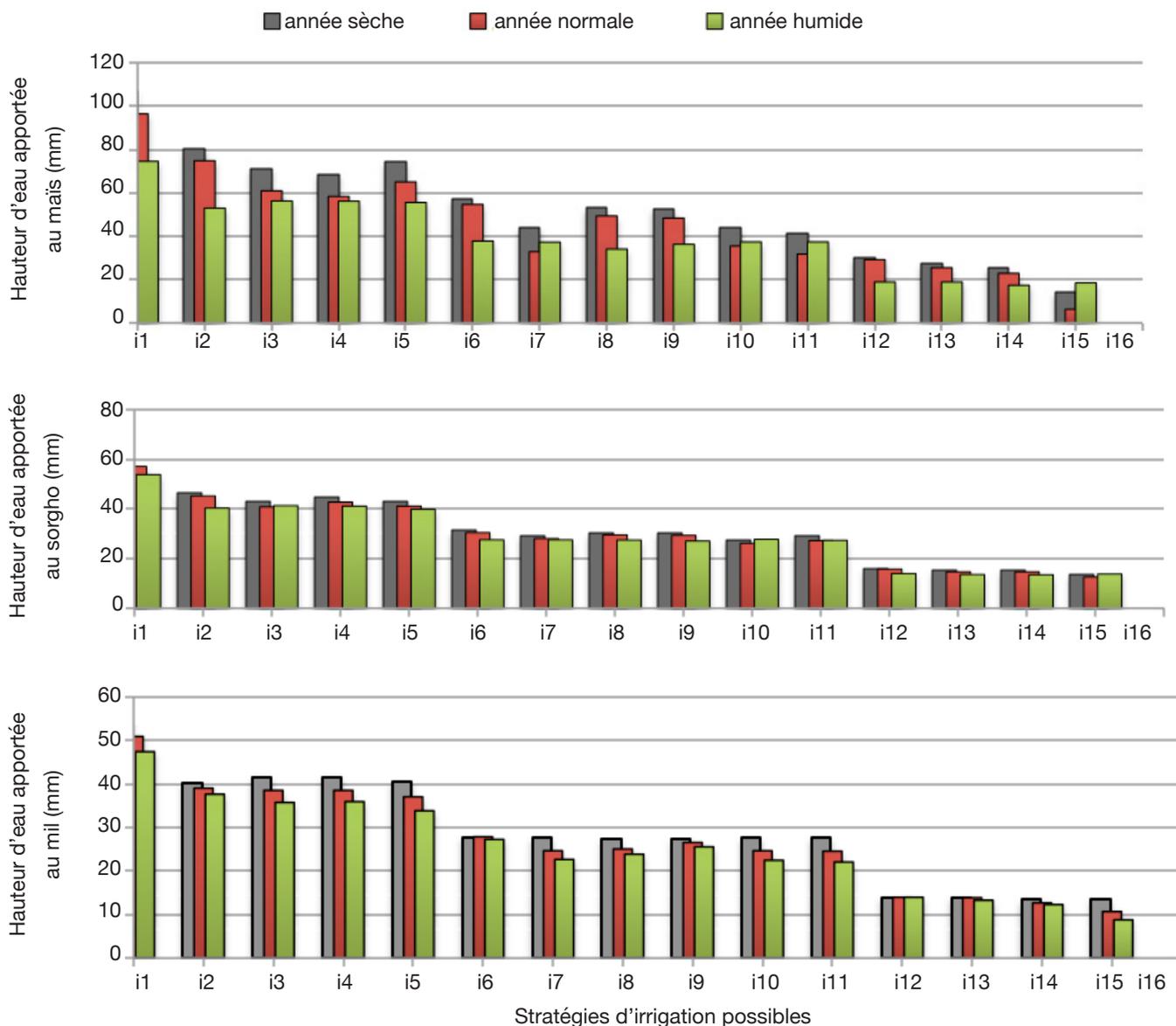


Figure 2. Stratégies d'irrigation du maïs, sorgho et mil — *Irrigation strategies for maize, sorghum and millet.*

pas informé à l'avance si l'année sera sèche, normale ou humide. Elle est traduite par une équiprobabilité de l'occurrence des trois types d'années. Avec l'irrigation de complément, l'agriculteur alloue 1,18 ha au maïs, 0,85 ha au mil et 1,64 ha au sorgho (**Tableau 6**), soit une augmentation de la superficie du maïs (de 0,3 à 1,18 ha) au détriment de celles du mil (1,72 à 0,85 ha) et du sorgho (1,93 à 1,64 ha). L'agriculteur n'adopte pas la stratégie i_1 qui consiste à irriguer chaque culture pendant toutes les phases de son cycle de développement. Les autres stratégies adoptées sont cependant différentes selon les cultures. Le revenu espéré à partir de la pratique de l'ICBI est évalué à 635 240 francs CFA contre 502 210 francs CFA sans irrigation, soit un gain de 26,49 %.

3.4. Mesures incitatives à l'adoption de la pratique de l'irrigation de complément

Subvention de la construction des bassins. Le taux de subvention déterminé à partir du cout du dispositif d'ICBI et de la subvention accordée aux agriculteurs par le ministère en charge de l'Agriculture dépend du type de bassin (**Tableau 7**). Il est estimé à 71 % pour le bassin à fond et parois non imperméabilisés, 67 % pour le bassin à fond imperméabilisé en argile et parois cimentées, 39 % pour le bassin à fond bûché et parois cimentées et 28 % pour le bassin à fond et parois bûchés. Ces taux montrent que les agriculteurs investissent moins pour acquérir le bassin à fond et parois non imperméabilisés comparativement aux autres.

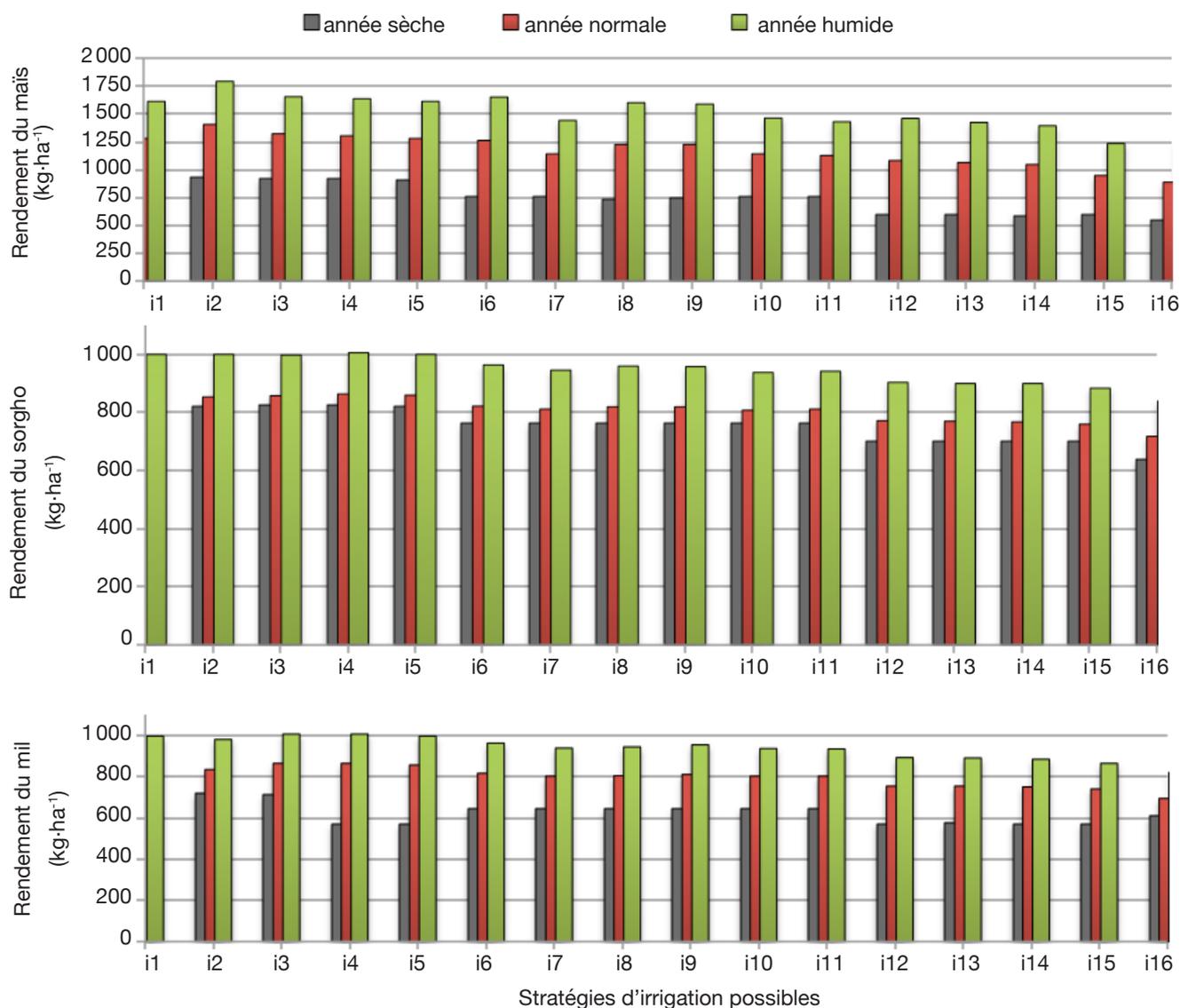


Figure 3. Rendements du maïs, sorgho et mil en fonction des stratégies d'irrigation — *Yields of maize, sorghum and millet according to irrigation strategies.*

Tableau 5. Superficies allouées aux différentes cultures (ha) en année sèche — *Allocated areas to different crops (ha) in dry years.*

Stratégies d'irrigation et revenu espéré	Sans irrigation de complément			Avec irrigation de complément		
	Maïs	Mil	Sorgho	Maïs	Mil	Sorgho
i_7				0	0	1,29
i_{12}				0	0	1,42
i_{15}				0	0	0,03
i_{16}	0,3	1,72	1,93	0	1,20	0
Revenu espéré (F CFA)		502 210			570 180	

Tableau 6. Superficies allouées aux différentes cultures (ha) pour la simulation myope — *Allocated areas to different crops (ha) for blind simulation.*

Stratégies d'irrigation possibles et revenu espéré	Sans irrigation			Avec irrigation		
	Maïs	Mil	Sorgho	Maïs	Mil	Sorgho
i_1				0	0	0
i_2				0,03	0	0
i_3				0,03	0	0
i_4				0,04	0	0
i_5				0,08	0	0
i_6				0,14	0	0,51
i_7				0,10	0	0,24
i_8				0,10	0	0,19
i_9				0,03	0	0
i_{10}				0,10	0,05	0
i_{11}				0,03	0	0
i_{12}				0,12	0,03	0,02
i_{13}				0,02	0	0
i_{14}				0,03	0	0
i_{15}				0,13	0,04	0
i_{16}	0,30	1,72	1,93	0,19	0,73	0,69
Revenu espéré (F CFA)		502 210			635 240	

Tableau 7. Subvention de la construction des bassins — *Subsidy for basins construction.*

Type de bassins	Cout du dispositif (F CFA)	Subvention de la construction du bassin (F CFA)	Taux de subvention (%)	Revenu espéré Avec irrigation	Sans irrigation
Bassin 1	924 376	654 458	71	608 250	502 210
Bassin 2	1 062 376	714 448	67	600 450	502 210
Bassin 3	1 850 376	724 422	39	524 560	502 210
Bassin 4	2 318 376	652 159	28	505 880	502 210

Le revenu espéré est évalué à 608 250 francs CFA pour le bassin à parois et fond non imperméabilisés, 600 450 francs CFA pour le bassin à fond en argile et parois cimentées, 522 650 francs CFA pour le bassin à fond bâché et parois cimentées et 505 580 francs CFA pour le bassin à fond et parois bâchés. Les gains de l'irrigation sont de 21,11 % pour le bassin à parois et fond non imperméabilisés, 19,56 % pour le bassin à fond en argile et parois cimentées, 4,45 % pour le bassin à fond bâché et parois cimentées et 0,73 % pour le bassin à fond et parois bâchés.

Crédit par type de bassin. Pour établir les modalités d'octroi du crédit par les institutions de micro-finances locales, le cout d'acquisition du dispositif d'ICBI a été ramené au m³ de bassin construit ; le volume utile

maximum a été fixé à 200 m³ et un taux d'intérêt de 10 % a été retenu. La durée de remboursement du crédit a été fixée à 10 ans, quel que soit le type de bassin (**Tableau 8**). En appliquant ce taux d'intérêt, les agriculteurs devront rembourser 5 084 francs CFA·m⁻³ pour le bassin à fond et parois non imperméabilisés, 5 843 francs CFA·m⁻³ pour le bassin à fond en argile et parois cimentées, 10 177 francs CFA·m⁻³ pour le bassin à fond bâché et parois cimentées et 12 751 francs CFA·m⁻³ pour le bassin à fond et parois bâchés.

Le revenu espéré est évalué à 535 610 francs CFA pour le bassin à fond et parois non imperméabilisés, 523 780 francs CFA pour le bassin à fond imperméabilisé en argile et parois cimentées, 504 380 francs CFA pour le bassin à fond bâché et

Tableau 8. Impact du crédit sur le revenu espéré des agriculteurs — *Credit impact on expected income of farmers.*

Type de bassin	Cout du dispositif (franc CFA)	Cout par m ³ (franc CFA)	Intérêt par m ³		Remboursement par m ³ (franc CFA)	Revenu espéré (franc CFA)	
			Taux (%)	Montant (F CFA)		Avec irrigation	Sans irrigation
Bassin 1	924376	4622	10	462	5084	535610	502210
Bassin 2	1062376	5312	10	531	5843	523780	502210
Bassin 3	1850376	9252	10	925	10177	504380	502210
Bassin 4	2318376	11592	10	1159	12751	504130	502210

parois cimentées, et 504 130 francs CFA pour le bassin à fond et parois bâchés. L'accroissement du revenu espéré atteint 6,65 % par rapport à la situation sans irrigation pour le bassin à fond et parois non imperméabilisés.

4. DISCUSSION

Les simulations ont permis de comparer diverses stratégies d'irrigation de complément capables de faire face aux poches de sécheresse. Ces stratégies varient en fonction des types de saisons des pluies. Les meilleures stratégies d'irrigation pour le sorgho, le mil et le maïs sont celles qui fournissent les rendements les plus élevés avec de faibles doses d'eau d'irrigation pendant les cycles végétatifs. Bien que l'ensemble des stratégies identifiées soient théoriques, elles peuvent servir à éclairer la prise de décision des agriculteurs. La précision des périodes et des volumes d'eau d'irrigation permet aux agriculteurs d'optimiser la gestion de l'eau stockée et de choisir d'irriguer différentes proportions de la superficie allouée à chaque culture en tenant compte du volume d'eau disponible dans le bassin au cours du cycle végétatif. La période critique d'apport d'eau aux cultures correspond à la mi-saison marquée par la floraison et la maturité des grains (Adekalu et al., 2009). Il est toutefois recommandé d'irriguer les cultures lorsqu'il advient une poche de sécheresse au cours des autres phases de développement (Fox & Rockström, 2003 ; Kar et al., 2006).

La pratique de l'ICBI des cultures améliore les revenus des agriculteurs. Selon les simulations, elle permet d'accroître le revenu espéré des agriculteurs de 26,49 % en année moyenne, comparativement à la situation sans irrigation. L'accroissement des revenus espérés confirme l'intérêt de la pratique de l'ICBI évoqué par les études antérieures (Ngigi et al., 2005 ; Oweis & Hachum, 2009). Cependant, l'adoption à grande échelle de cette pratique est entravée par diverses contraintes (He et al., 2007 ; Zongo et al., 2015), parmi lesquelles figure le manque de financement pour l'achat du petit matériel d'excavation, d'imperméabilisation

du bassin et de vivres afin de mobiliser la main-d'œuvre communautaire pour la construction des bassins.

Une politique de crédit peut faciliter le financement du dispositif d'ICBI dans les exploitations agricoles (He et al., 2007). Selon les simulations, l'octroi d'un crédit de 10 ans, à un taux d'intérêt de 10 %, permet d'accroître le revenu espéré des agriculteurs sahéliens comparativement à la situation sans irrigation. Les agriculteurs sahéliens ont un accès très limité aux prêts bancaires. En 2013, seuls 2,12 % des agriculteurs ont eu accès au crédit agricole (MASA, 2014). Dans le passé, des programmes de petites subventions ont facilité l'adoption de pratiques de conservation des eaux et des sols (Marchal, 1986 ; Botoni & Eij, 2009). Par exemple, les programmes de soutien alimentaire sous forme de nourriture contre travail pourraient stimuler la mise en place de petites infrastructures (Holden et al., 2003).

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a permis de comparer l'intérêt économique de différentes stratégies d'irrigation potentielles en vue d'optimiser le revenu espéré par les agriculteurs. Ces stratégies pourront contribuer à guider les décisions des agriculteurs en matière de choix et d'apport d'eau aux cultures selon différents types d'années. Les simulations montrent que la pratique de l'ICBI en année sèche et myope permet d'accroître le revenu espéré respectivement de 13,53 % et 26,49 %, comparativement à la situation sans irrigation. Les politiques de vulgarisation examinées concernent la subvention et l'instauration d'un système d'octroi de crédit pour le financement du dispositif de l'ICBI. Dans la réalité, les agriculteurs ont peu accès au crédit. Les expériences de soutien alimentaire au travail communautaire sont aujourd'hui fréquentes et permettent de mobiliser la main-d'œuvre pour la construction des petites infrastructures agricoles. La mise en œuvre d'une telle politique stimulerait l'adoption de l'ICBI à plus grande échelle et contribuerait à réduire l'insécurité alimentaire.

Bibliographie

- Adekalu K.O. et al., 2009. Runoff water harvesting for dry spell mitigation for cowpea in the savannah belt of Nigeria. *Agric. Water Manage.*, **96**(11), 1502-1508.
- Agali A. et al., 2013. Évolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. *Sécheresse*, **24**, 282-293.
- Araya A. & Stroosnijder L., 2011. Assessing drought risk and irrigation need in northern Ethiopia. *Agric. For. Meteorol.*, **151**(4), 425-436.
- Barbier B. et al., 2009. Human vulnerability to climate variability in the Sahel: farmers' adaptation strategies in Northern Burkina Faso. *Environ. Manage.*, **43**, 790-803.
- Beaudoin N. et al., 2008. Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyères catchment. *Eur. J. Agron.*, **29**(1), 46-57.
- Bellocchi G., Rivington M., Donatelli M. & Matthews K., 2009. Validation of biophysical models: issues and methodologies. *Sustainable Agric.*, **2**, 577-603.
- Bernoulli D., 1738. Specimen Theoriae Novae de Mensura Sortis. *Comentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitariae*. Trad. Sommer L., 1954. Exposition of a new theory on the measurement of risk. *Econometrica*, **22**, 23-36.
- Bharati L. et al., 2008. Integration of economic and hydrologic models: exploring conjunctive irrigation water use strategies in the Volta Basin. *Agric. Water Manage.*, **95**(8), 925-936.
- Botoni E. & Eij C., 2009. *La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes de production au Sahel : impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles*. Ouagadougou : CILSS.
- Brisson N. et al., 2002. Effects of drought stress on growth and yield of barley. *Agronomie*, **22**, 69-92.
- Carsky R.J., Ndikawa R., Singh L. & Rao M.R., 1995. Response of dry season sorghum to supplemental irrigation and fertilizer N and P on vertisols in northern Cameroon. *Agric. Water Manage.*, **28**(1), 1-8.
- CILSS (Comité Permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel), 2001a. *Les aptitudes agricoles et pastorales des sols dans les pays du CILSS*. Ouagadougou : CILSS.
- CILSS (Comité Permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel), 2001b. *Le contexte de la vulnérabilité structurelle par système de production dans les pays du CILSS. Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles (AP3A)*. Ouagadougou : CILSS.
- Dembele Y. & Some L., 1991. Propriétés hydrodynamiques des principaux types de sol du Burkina Faso. In: Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. & Giroux C., eds. *Proceedings of the international workshop Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone, 18-23 February 1991, Niamey, Niger*. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, 217-228.
- Dumont B. et al., 2012. Simulation de la croissance du blé à l'aide de modèles écophysologiques : synthèse bibliographique des méthodes, potentialités et limitations. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **16**(3), 382-392.
- Fox P. & Rockström J., 2000. Water-harvesting for supplementary irrigation of cereal crops to overcome intra-seasonal dry-spells in the Sahel. *Phys. Chem. Earth Part B*, **25**(3), 289-296.
- Fox P. & Rockström J., 2003. Supplemental irrigation for dry-spell mitigation of rainfed agriculture in the Sahel. *Agric. Water Manage.*, **61**(1), 29-50.
- Freund R.J., 1956. The introduction of risk into a programming model. *Econometrica*, **24**, 253-263.
- Friedman M. & Savage J.L., 1948. The utility analysis of choices involving risk. *J. Political Economy*, **56**(4), 279-304.
- Hazell P. & Norton R., 1986. *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. New York, NY, USA: Macmillan.
- He X.F., Cao H. & Li F.M., 2007. Econometric analysis of the determinants of adoption of rainwater harvesting and supplementary irrigation technology (RHSIT) in the semiarid Loess Plateau of China. *Agric. Water Manage.*, **89**(3), 243-250.
- Holden S., Benin S., Pender J. & Shiferaw B., 2003. Tree planting for poverty reduction in less-favoured areas of the Ethiopian highlands. *Small-Scale For. Econ. Manage. Policy*, **2**(1), 63-80.
- Hountondji Y., Sokpon N. & Nicolas J., 2009. Ongoing desertification processes in the Sahelian belt of West Africa: an evidence from the rain-use efficiency. In: Röder A. & Hill J., eds. *Recent advances in remote sensing and geoinformation processing for land degradation assessment*. London: Taylor Francis Group, 173-186.
- Ingram K.T., Roncoli M.C. & Kirshen P.H., 2002. Opportunities and constraints for farmers of west Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agric. Syst.*, **74**(3), 331-349.
- INERA, 1998. *Fiches techniques du sorgho et mil*. Ouagadougou : INERA.
- INERA, 2007. *Fiche technique du maïs*. Ouagadougou : INERA.
- INSD (Institut National de la Statistique et de la Démographie), 2009. *Annuaire statistique*. Ouagadougou : INSD.
- Kaboré P.D., Bertelsen M. & Lowenberg-Deboer J., 1993. *Économie de la construction des cordons pierreux sur le sorgho et le mil au Burkina Faso*. Ouagadougou : INERA.
- Kar G., Verma H.N. & Singh R., 2006. Effects of winter crop and supplemental irrigation on crop yield, water use

- efficiency and profitability in rainfed rice based cropping system of eastern India. *Agric. Water Manage.*, **79**(3), 280-292.
- Lamb P.J., 1982. Persistence of subsaharan drought. *Nature*, **299**, 46-48.
- MAH (Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources halieutiques), 2012. *Résultats définitifs de la campagne agricole et de la situation alimentaire et nutritionnelle 2011/2012*. Ouagadougou : MAH.
- Marchal J., 1986. Vingt ans de lutte antiérosive au nord du Burkina Faso. *Cah. Orstom Sér. Pédol.*, **XXII**(2), 173-180.
- MASA (Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité Alimentaire), 2014. *Annuaire des statistiques agricoles*. Ouagadougou.
- Mounirou L.A. et al., 2012. Measuring runoff by plots at different scales: understanding and analysing the sources of variation. *C.R. Geosci.*, **344**(9), 441-448.
- Nash J.E. & Sutcliffe V.J., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. *J. Hydrol.*, **10**(3), 282-290.
- Ngigi S.N. et al., 2005. Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya. *Agric. Water Manage.*, **73**(1), 21-41.
- Nicholson S., 2005. On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel. *J. Arid Environ.*, **63**(3), 615-641.
- Nkonya E. et al., 2011. *Climate risk management through sustainable land management in Sub-Saharan Africa (sustainable solutions for ending hunger and poverty)*. Washington, DC: IFPRI.
- Oettli P., Sultan B., Baron C. & Vrac M., 2011. Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? *Environ. Res. Lett.*, **6**(1), 14008.
- Ouédraogo M., Dembelé Y. & Somé L., 2010. Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements des précipitations : cas des paysans du Burkina Faso. *Sécheresse*, **21**(2), 87-96.
- Oweis T. & Hachum A., 2009. Optimizing supplemental irrigation: tradeoffs between profitability and sustainability. *Agric. Water Manage.*, **96**(3), 511-516.
- Pannell J.D., Malcolm B. & Kingwell S.R., 2000. Are we risking too much? Perspectives on risk in farm modelling. *Agric. Econ.*, **23**(1), 69-78.
- Reynaud A., 2008. Adaptation à court et à long terme de l'agriculture au risque de sécheresse : une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques. *Rev. Etudes Agric. Environ.*, **90**(2), 121-154.
- Roncoli C., 2006. Ethnographic and participatory approaches to research on farmers' responses to climate predictions. *Clim. Res.*, **33**, 81-99.
- Roncoli C., Ingram K. & Kirshen P., 2001. The costs and risks of coping with drought: livelihood impacts and farmers' responses in Burkina Faso. *Clim. Res.*, **19**, 119-132.
- Roose E., Kabore V. & Guenat C., 1993. Le zaï. Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, **28**(2), 159-173.
- Roudier P. et al., 2014. The role of climate forecasts in smallholder agriculture: lessons from participatory research in two communities in Senegal. *Clim. Risk Manage.*, **2**, 42-55.
- Roy D., Panda S.N. & Panigrahi B., 2009. Water balance simulation model for optimal sizing of on-farm reservoir in rainfed farming system. *Comput. Electron. Agric.*, **65**(1), 114-124.
- Rykiel E.J., 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecol. Modell.*, **90**(3), 229-244.
- Simmons R.L. & Pomareda C., 1975. Equilibrium quantity and timing of Mexican vegetable exports. *Am. J. Agric. Econ.*, **57**, 472-479.
- Smith M., 1992. *CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management*. Irrigation and Drainage. Roma: FAO.
- SP/CONEDD, 2007. *Programme d'action national d'adaptation à la variabilité et aux changements climatiques (PANA du Burkina Faso)*. Ouagadougou : Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie.
- Sultan B. et al., 2008. Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse*, **19**(1), 29-37.
- Von Neumann J. & Morgenstern O., 1947. *Theory of games and economic behavior*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press.
- Wilhite D.A. & Glantz M.H., 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.*, **10**(3), 111-120.
- Zongo B. et al., 2015. Farmers' practices and willingness to adopt supplemental irrigation in Burkina Faso. *Int. J. Food Agric. Econ.*, **3**(1), 101-117.
- Zongo B. et al., 2016. Farmers' perception and willingness to pay for climate information in Burkina Faso. *J. Agric. Sci.*, **8**(1), 175-187.
- Zorom M., Barbier B., Mertz O. & Servat E., 2013. Diversification and adaptation strategies to climate variability: a farm typology for the Sahel. *Agric. Syst.*, **116**, 7-15.