

# *Potentiel De Compensation Carbone Des Systemes D'Irrigation Solaire Des Petites Exploitations Agricoles Au Togo*

## *[Carbon Offset Potential Of Solar Irrigation Systems On Small Farms In Togo]*

Tagbi Kossi A.<sup>1</sup>, Arouna Alfassassi<sup>2\*</sup>, Stephane Lako<sup>3</sup>, Soedji Kokouvi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institut National de Formation Agricole de Tové

Kpalimé- Togo

BP 401, tagbikossi@yahoo.fr

<sup>2</sup>Equipe de Recherche sur la Mécanisation Agricole et le génie des Procédés, Ecole Supérieure d'Agronomie,

Université de Lomé

Lomé -Togo

01 BP 1515 Lomé 01 – Togo, arounafazaz@yahoo.fr

<sup>3</sup>GIZ, Programme Sun4Water

Coordination Afrique de l'Ouest, Côte d'Ivoire

stephane.lako@giz.de

<sup>4</sup>Institut National de Formation Agricole de Tové

Kpalimé- Togo

BP 401, kokouvisoedji@yahoo.fr

\*Correspondance: arounafazaz@yahoo.fr; Tel.: (+228) 90957405



**Résumé** - La promotion des énergies renouvelables en agriculture est un facteur clé pour une croissance verte. C'est dans cette logique que cette étude vise à estimer les émissions carbonées de différents systèmes d'irrigation communautaire, puis le gain carbone associé à la migration de l'énergie thermique/électrique vers le photovoltaïque dans les petites exploitations agricoles communautaires réparties dans trois régions du Togo. La méthodologie a été basée sur la collecte des données primaires via des entretiens directs auprès de dix-neuf exploitations agricoles irriguées et l'analyse statistique a été effectuée avec le logiciel R. Les résultats ont montré que les émissions des systèmes d'irrigation solaire liées au fonctionnement étaient nulles et celles liées à l'installation des systèmes étaient estimées à  $0,265 \pm 0,025$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha/an. Les émissions en irrigation à énergie thermique étaient évaluées à  $1,686 \pm 0,13$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha/an pour une consommation d'énergie de  $6\,009,2 \pm 573,46$  KWH/ha/an et celles engendrées par l'irrigation à énergie électriques s'élevaient à  $0,224 \pm 0,072$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha/an contre une consommation moyenne d'énergie de  $1\,494,61 \pm 231,2$  KWH/ha/an. L'économie de carbone correspondant à une migration des systèmes d'irrigation à énergies thermiques et électriques vers des systèmes photovoltaïques était estimée à  $1,559 \pm 0,15$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha/an et  $0,045 \pm 0,01$  tonne de CO<sub>2</sub> eq/ha/an respectivement. Par ailleurs, les études supplémentaires devraient être menées sur plus de sites couvrant tout le pays en vue d'évaluer avec précision la contribution de l'énergie solaire dans la réduction des gaz à effet de serre au Togo.

**Mots-clés** - Energies Renouvelables ; Carburant ; Réseau Electrique ; Efficacité Energétique ; Irrigation Durable.

**Abstract - Renewable energy in agriculture is a key factor for green growth. It is with this in mind that this study aims to estimate the carbon emissions of different collective irrigation systems, then the carbon gain resulting from the migration from thermal/electrical energy to photovoltaics in small-scale collective farms in three regions of Togo. The research methodology was based on primary data collection via direct interviews with nineteen irrigated farms, and statistical analysis was carried out using R software. Findings showed that emissions from solar irrigation systems related to operation were zero, and those related to system installation were estimated at  $0.265 \pm 0.025$  tonnes eqCO<sub>2</sub>/ha/year. Emissions from thermal energy irrigation were estimated at  $1.686 \pm 0.13$  tonnes eqCO<sub>2</sub>/ha/year for an average energy consumption of  $6,009.2 \pm 573.46$  KWH/ha/year, and those from electric energy irrigation at  $0.224 \pm 0.072$  tonnes eqCO<sub>2</sub>/ha/year for an average energy consumption of  $1,494.61 \pm 231.2$  KWH/ha/year. Carbon savings corresponding to a migration from thermal- and electric-powered irrigation systems to photovoltaic systems were estimated at  $1.559 \pm 0.15$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha/year and  $0.045 \pm 0.01$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha/year respectively. In addition, further studies should be carried out on more sites covering the whole country in order to accurately assess the contribution of solar energy in reducing greenhouse gases in Togo.**

**Keywords - Renewable Energy; Fuel; Electric Grid; Energy Efficiency; Sustainable Irrigation.**

## 1. Introduction

L'agriculture joue un rôle stratégique dans l'amélioration de la disponibilité alimentaire pour les pays en développement [1]. En Afrique subsaharienne menacée par l'insécurité alimentaire, le secteur agricole est caractérisé par de petits exploitants emblavant moins d'un hectare et produisant environ 80 % des denrées alimentaires [2, 3]. Au Togo, le secteur agricole contribue à environ 40% du produit intérieur brut (PIB), emploie plus de 60% de la population active et constitue une source de revenus pour les communautés rurales [4, 5].

Comparés au reste du monde, les rendements agricoles en Afrique subsaharienne sont faibles en raison de plusieurs facteurs dont les variations climatiques [6-8]. Au Togo, ce secteur est confronté à de nombreux défis, parmi lesquels la variabilité climatique, la dégradation de la fertilité des sols, la disponibilité limitée des ressources en eau et la très faible productivité [9, 10]. L'analyse des données la période de 1961-2012 révèle une augmentation de la température contre une diminution de la pluviométrie et du nombre de jours de pluie bouleversant ainsi les calendriers culturels [11]. Ainsi, le renforcement de la résilience alimentaire des ménages passe par l'amélioration des rendements [2]. Plusieurs auteurs [3, 6, 12, 13] recommandent comme stratégie d'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques l'adoption des pratiques durables, l'utilisation accrue d'intrants verts, les investissements agricoles innovants.

Pour lever ces contraintes en vue de rendre résiliente l'agriculture et par conséquent accroître les rendements, le gouvernement togolais a fait du secteur agricole une priorité dans sa feuille de route gouvernementale 2020- 2025 dont les actions stratégiques sont entre autres : la réalisation des infrastructures modernes de production, l'utilisation des intrants de qualité (semences améliorées, fertilisants, pesticides), la formation des agriculteurs, l'accès au financement agricole, vulgarisation des pratiques agricoles durables, la maîtrise de l'eau, la mécanisation agricole. Dans cette même logique, le Schéma Directeur de l'Agriculture Irriguée (SDAI) 2023-2040 adopté en 2021 consacre l'exploitation durable des ressources « eau-sol-énergie » et le développement du potentiel hydroagricole du Togo pour le développement agricole. Au Togo, les parcelles irriguées couvrent une superficie totale de 6 200 hectares de terres agricoles, représentant un taux de 0,3 % de la superficie totale des terres cultivées et plus de 3,75% du potentiel de terres irrigables [14]. Ainsi, l'extension des périmètres irrigués serait une source importante de consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre (GES) ; surtout lorsque les combustibles fossiles (diesel, essence, etc.) sont utilisés pour le pompage de l'eau d'irrigation. En effet, l'état des lieux de l'irrigation au Togo a montré que sur une superficie globale de 443 ha que couvre l'irrigation sous-pression, l'énergie fossile est utilisée à près de 97% par les producteurs [14]. Selon les travaux précédents, les pompes à énergie thermique (essence, diesel) sont traditionnellement utilisées par les communautés rurales pour le l'irrigation, contribuant significativement aux émissions de GES [7, 15]. A cet effet, la transition, relative à l'abandon des pratiques agricoles non durables au profit de pratiques durables, est indispensable pour relever les défis de la décarbonisation de l'agriculture [13].

Selon les études antérieures, l'énergie solaire présente des avantages économique et écologique. En effet, malgré le coût d'investissement initial très élevé des composants du système de pompage solaire, 2,7 fois plus cher que le système de pompage à essence [16], les systèmes solaires photovoltaïques sont moins coûteux à l'exploitation. Le coût du système solaire représente 20 % du coût d'utilisation de l'énergie diesel [17]. En effet, Khan, Sarkar, Hossain, Ahmed and Pathik [18] a montré que l'irrigation à l'énergie solaire est très rentable par rapport à l'irrigation au diesel car il réduit les coûts d'exploitation selon Terang and Baruah [19]. Le coût du cycle de vie du système photovoltaïque est plus faible bien que l'investissement initial soit le plus élevé [20]. Sarkar, Sifat, Rahim and Reza [21] ont trouvé que le pompage et irrigation à énergie thermique n'est pas du tout rentable.

Shinde and Wandre [22] ont montré que l'énergie solaire est respectueuse de l'environnement pour l'irrigation des parcelles. Aussi, faut-il ajouter que la quantité d'eau/kWh par le système solaire est plus élevée que celle du générateur diesel. En conséquence, le système de pompage et d'irrigation solaire serait un outil d'irrigation vert pour une croissance verte ; le pompage d'irrigation solaire contribuerait à la réduction de 35 kg de CO<sub>2</sub>e par balle of coton, soit 2 665 t/CO<sub>2</sub>e [23]. Son adoption contribuerait alors à l'accès aux technologies financières (FinTech) et à l'atteinte des ODD.

Par ailleurs, le Togo, en ratifiant l'Accord de Paris à la COP 21, s'est engagé sur la compensation carbone à travers la promotion des initiatives d'atténuation des émissions de gaz à effets de serre. Une politique de décarbonisation devrait être ainsi inspirée de données probantes pour une prise de décision basée sur les évidences et les données. La migration vers des solutions de pompage solaire représenterait une contribution significative à la compensation carbone du Togo. Toutefois très peu d'information existe sur les émissions carbonées des systèmes d'irrigation et les gains carbonés potentiels au Togo. Il s'est donc avéré nécessaire de quantifier les émissions de CO<sub>2</sub> des systèmes d'irrigation à différentes sources d'énergie.

Ainsi, le but de cette étude est d'analyser la compensation carbone grâce à l'utilisation de systèmes d'irrigation solaire au Togo comparé aux sources d'énergie thermique et électrique pour le pompage d'irrigation dans les exploitations communautaires de petite échelle. Ce travail permettrait de disposer des données sur le gain potentiel du carbone des systèmes irrigués.

## 2. Matériels et méthodes

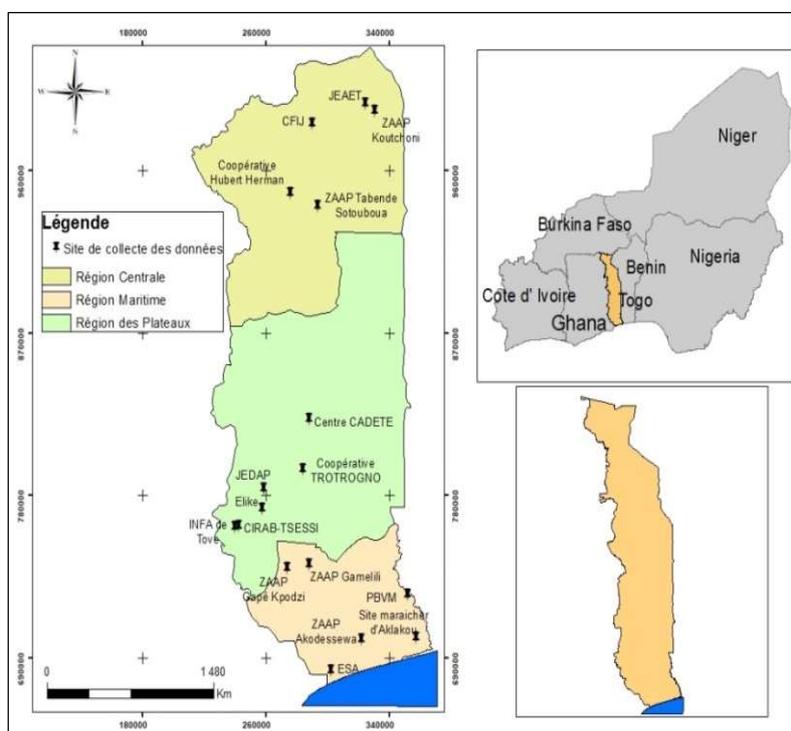
### 2.1. Zone d'étude

L'étude a été menée sur dix-neuf périmètres irrigués communautaires répartis dans trois zones agroécologiques à savoir le littoral, les savanes humides et la zone forestière (Figure 1). Chaque zone présente des caractéristiques biophysiques distinctes influençant l'agriculture, l'habitat, le gisement solaire et les ressources naturelles. La zone littorale (région maritime) se caractérise par un climat tropical humide, avec une grande saison des pluies (mars à juillet) et une petite saison des pluies (septembre à octobre). Les températures moyennes varient entre 26°C et 30°C, avec une humidité relative élevée due à la proximité de l'océan Atlantique [24]. La végétation est dominée par des savanes côtières et des mangroves le long des estuaires avec une présence remarquée de *Cocos nucifera* et de *Elaeis guineensis* [25]. Les sols sont principalement sablonneux près des côtes et alluvionnaires le long des rivières, propices à la culture de manioc, de maïs, et d'autres cultures vivrières [26]. On note dans cette région la présence de nombreux cours d'eau et plans d'eau, tels que la lagune de Togo ville et le lac Togo, propices pour la pêche locale et l'agriculture irriguée [9].

La zone forestière bénéficie d'un climat tropical humide avec une pluviométrie annuelle allant de 1 200 à 1 500 mm et des températures variant entre 22°C et 28°C [27]. Cette région est riche en forêts tropicales denses, savanes arborées et plantations. Les essences d'arbres courantes incluent le teck (*Tectona grandis*), l'iroko (*Milicia excelsa*) et le caoutchouc [28]. Les sols ferrallitiques de la région sont riches en matière organique, ce qui les rend favorables à l'agriculture. On y cultive principalement du cacao, du café, et autres cultures de rente. Cette zone correspond au territoire de la région des plateaux, sont drainés par le fleuve Mono et ses affluents. Les chutes d'eau, telles que les chutes de Kpimé sont des sites touristiques importants et des sources d'énergie hydroélectrique [29].

Le climat de savanes humides est de type savane, avec des saisons sèche et humide bien définies. La saison des pluies s'étend de mai à octobre et les températures varient entre 24°C et 29°C [30]. La végétation comprend des savanes arbustives et des forêts galeries le long des cours d'eau. Des espèces comme le karité (*Vitellaria paradoxa*) et le baobab (*Adansonia digitata*) sont typiques de cette région. Les sols sont principalement ferrugineux tropicaux, adaptés à la culture de coton et des céréales telles que le maïs,

le mil, et le sorgho [26]. Cette zone correspond territorialement à la région centrale, qui est traversée par des cours d'eau comme la rivière Mono et ses affluents qui sont essentiels pour l'irrigation et l'eau potable [31].



**Figure 1: Localisation des sites des exploitations agricoles échantillonnées**

## 2.2. Collecte des données

Les données ont été collectées dans 19 exploitations agricoles irriguées utilisant différentes sources d'énergie pour l'irrigation et appartenant à diverses catégories d'exploitations communautaires au Togo : zones d'aménagement agricole planifié (ZAAP), centres de formation, sociétés coopératives simplifiées (SCOOPS) de production agricole. Les principales cultures sur lesquelles a porté cette étude comprennent les céréales (maïs, riz), les légumes (grande morelle, corètes, choux, gombo, tomate et piments) et les arbres fruitiers (papayer).

Les données collectées ont porté sur les systèmes d'irrigation (source d'énergie, type de pompe, type d'irrigation, durée de vie du système et des équipements, débit maximal), les données agronomiques (nom de l'exploitation agricole, superficie et types de cultures irriguées, durée du cycle de production, nombre de campagne agricole, nombre de jour d'irrigation par cycle et par culture, durée d'irrigation par jour) et les données du pompage (volume d'eau pompé, puissance consommée (KWH), consommation en énergie (litre de carburant,), temps d'utilisation d'énergie). L'étude concerne cinq systèmes d'irrigation (bande perforée, goutte à goutte, asperseur, tuyau flexible, bassin) et 03 sources d'énergie pour le pompage de l'eau (essence, électrique, et solaire). Ce qui a permis de répertorier 4 systèmes de pompage électrique, 6 systèmes de pompage thermique et 17 systèmes solaires pour l'irrigation.

## 2.3. Traitement et analyse des données

Les données collectées ont été saisies dans le tableur Excel et analysées dans l'environnement du logiciel R version 4.3.1. Les données ont ensuite été préparées au format exploitable par le logiciel. Cela inclut la gestion des valeurs manquantes, la normalisation des unités et la vérification de la cohérence des données. En dehors des packages de base, le principal package spécifique utilisé pour la visualisation des données et la construction des graphiques a été « ggplot2 ». Les analyses ont porté sur l'estimation des quantités d'énergie consommées, les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes et les gains de carbone.

### 2.3.1. Evaluation de l'énergie consommée par les systèmes d'irrigation

Pour chaque type de système d'irrigation (électrique, thermique), la consommation totale d'énergie ou de carburant a été calculée par l'équation (1) de ADEME [32] sur une période d'un an correspondant au nombre de campagnes d'irrigation réalisées pour chaque culture considérée. Pour la source d'énergie thermique, le facteur de conversion « 1 litre de carburant = 8,9 KWH » a été utilisé pour convertir les quantités de carburant consommées en (KWH).

$$E_{total} = (E_{quotidien} * N_{heures} * N_{jours} * N_{campagnes}) / S_{hectare} \quad (1)$$

Avec :

$E_{total}$  = Consommation totale d'énergie (KWH/ha/an) ;

$E_{quotidienne}$  = Consommation quotidienne d'énergie (KWH/ha) ;

$N_{heure}$  = Nombre d'heures d'utilisation du système par jour (heure) ;

$N_{jours}$  = Nombre de jours d'irrigation sur la période (jours) ;

$N_{campagnes}$  = Nombre de campagne agricole de la culture par an (jours) ;

$S_{hectare}$  = Superficie irriguée (hectare).

### 2.3.2. Estimation des émissions de CO<sub>2</sub> par les systèmes d'irrigation

Les facteurs d'émission spécifique à chaque source d'énergie tels que définis par ADEME [33], ont été utilisés pour le calcul des émissions de CO<sub>2</sub> des systèmes électrique et thermique, à partir de leurs consommations d'énergie. A l'émission liée à la consommation d'énergie a été ajouté les émissions de CO<sub>2</sub> issues de l'installation de chaque système. En effet, les composants des différents systèmes de pompage émettent du CO<sub>2</sub> qu'il convient de prendre en compte dans le bilan des émissions. Le calcul s'est fait à partir des équations (2) et (3).

#### – émissions de carbone associées aux systèmes thermiques à essence

$$CO2_{emis\ ther} = E_{total\_thermique} * F_{émission\ thermique} + \frac{E_{inst\_therm}}{20} \quad (2)$$

Avec :

$CO2_{ém\ ther}$  = Emission de CO<sub>2</sub> (kg/tonne eqCO<sub>2</sub>/ha/an) ;

$E_{total\_thermique}$  = Consommation totale d'énergie thermique (litre/h) ;

$F_{émission\ thermique}$  = Facteur d'émission (tonne CO<sub>2</sub> / litre) ;

$E_{inst\_therm}$  = émissions (génériques) relatives à l'installation d'un système d'irrigation thermique amortissable sur 20 ans.

#### – émissions de carbone associées aux systèmes électriques

$$CO2_{emis\ élect} = E_{total\_électrique} * F_{émission\ électrique} + \frac{E_{inst\_élect}}{20} \quad (3)$$

Avec:

$CO2_{ém\ élect}$  = Emission de CO<sub>2</sub> (kg/tonne eqCO<sub>2</sub>/ha/an) ;

$E_{total\_électrique}$  = Consommation totale d'énergie électrique (kwh) ;

$F_{\text{émission électrique}} = \text{Facteur d'émission du réseau électrique (kg/tonne CO}_2 \text{ / kwh)} ;$

$E_{\text{inst\_élect}} = \text{émissions (génériques) relatives à l'installation des équipements d'un système d'irrigation électrique amortissable sur toute la durée de vie des équipements (20 ans).}$

#### – émissions des systèmes solaires

Les systèmes solaires sont autonomes et n'émettent pas de CO<sub>2</sub> pendant leur fonctionnement selon Ould-Amrouche, Rekioua and Hamidat [34]. Les émissions considérées dans le cadre de cette étude, sont liées à la l'installation des panneaux photovoltaïques, soit :

$CO_{2\text{émis solaire}} = 311 \text{ kg équivalent de CO}_2 \text{ par hectare (amorti sur 20 ans) [35].}$

### 2.3.3. Analyse du bilan carbone

L'analyse du bilan carbone a porté sur le calcul de la quantité de CO<sub>2</sub> évitée ou séquestrée suite à une adoption du système d'irrigation solaire en comparaison aux systèmes d'irrigation thermique et électrique. Ce bilan porte essentiellement sur les équipements de pompage pour l'irrigation. Calculer le bilan carbone revient alors à calculer les émissions évitables en comparant les émissions des systèmes solaires avec les émissions des systèmes thermique et électrique pour une même superficie à installer et un même volume d'eau pompé. Les systèmes solaires, ne produisant pas directement de CO<sub>2</sub>, les émissions calculées sont celles que produiraient les systèmes électriques et thermiques étudiés. Les principaux calculs réalisés ont fait appel aux équations (4) et (5).

#### – Économies de CO<sub>2</sub> par rapport aux systèmes thermiques à essence

$$CO_{2\text{émis ther}} \text{ Evitée} = (CO_{2\text{émis ther}} - CO_{2\text{émis solaire}}) \quad (4)$$

Avec:  $CO_{2\text{émis ther}} \text{ Evitée} = \text{Emission thermique évitée (kg/tonne eqCO}_2 \text{/ha/durée de vie);}$

$CO_{2\text{ém ther}} = \text{Emission de CO}_2 \text{ (kg/tonne eqCO}_2 \text{/ha/an);}$

$CO_{2\text{émis solaire}} = \text{Emission solaire de CO}_2 \text{, (kg éq CO}_2 \text{/ha/durée de vie) ;}$

#### – Économies de CO<sub>2</sub> par rapport aux systèmes électriques

$$CO_{2\text{émis élect}} \text{ Evitée} = (CO_{2\text{émis élect}} - CO_{2\text{émis solaire}}) \quad (5)$$

Avec:  $CO_{2\text{émis élect}} \text{ Evitée} = \text{Emission électrique évitée (kg/tonne eqCO}_2 \text{/ha/durée de vie);}$

$CO_{2\text{ém élect}} = \text{Emission électrique de CO}_2 \text{ (kg/tonne eqCO}_2 \text{/ha/an);}$

$CO_{2\text{émis solaire}} = \text{Emission solaire de CO}_2 \text{, (kg éq CO}_2 \text{/ha/durée de vie)}$

$\text{Durée de vie} = 20 \text{ ans}$

### 2.3.4. Gain carbone associé à l'économie d'eau

L'analyse du gain carbone associé à l'économie de l'eau a été réalisée à partir des volumes d'eau pompés par chaque système d'irrigation en fonction des dépenses énergétiques. Les volumes pompés sur la durée totale d'irrigation dans l'année ont été estimés par l'équation (6) pour chacun des systèmes de pompage et le différentiel, représentant l'économie en eau, a été calculé à partir de l'équation (7). Pour ce volume d'eau pompé l'émission de CO<sub>2</sub> correspondante a été calculée à partir de l'équation (8).

$$V_{\text{eau pompé}} = Q * T \quad (6)$$

Avec:  $V_{\text{eau pompé}} = \text{Volume d'eau pompé par système ;}$

$Q$  = Débit de la pompe en litres par minute (L/min) ou mètres cubes par heure ( $m^3/h$ ) pour chaque système d'irrigation ;

$T$  = Temps de fonctionnement en nombre d'heures ou de minutes de fonctionnement quotidien de chaque système ;

$$V_{\text{eau économisé}} = Q_{t \text{ eau consom. syst. tradi}} - Q_{t \text{ eau consom. syst. solaire}} \quad (7)$$

Avec :

$V_{\text{eau économisé}}$  = Quantité d'eau économisée ( $m^3/an$ )

$Q_{t \text{ eau consom. Syst. tradi}}$  = Quantité d'eau consommée par le système traditionnel,

$Q_{t \text{ eau consom. Syst. solaire}}$  = Quantité d'eau consommée par le système solaire.

$$CO2_{\text{écono eau}} = (Q_{t \text{ énergie économisée}} (KWH / ha / an)) * (F_{\text{émission source d'énergie}} (KgCO2/KWh)) \quad (8)$$

Avec :

$CO2_{\text{écono eau}}$  = Economie de CO2 correspondant à l'économie d'eau réalisée

$Q_{t \text{ énergie économisée}}$  = Quantité d'énergie économisée par le système d'irrigation,

$F_{\text{émissions source d'énergie}}$  = Facteur d'émission correspondant à la source d'énergie.

### 3. Résultats

#### 3.1. Caractérisation des sites irrigués étudiés

##### 3.1.1. Caractéristiques hydrauliques et énergétiques des systèmes d'irrigation

Trois sources d'énergie ont été identifiées sur les sites irrigués à savoir : énergie solaire, énergie thermique et énergie électrique. Suivant les exploitations, ces énergies sont couplées à cinq méthodes d'irrigation : l'irrigation goutte – à – goutte, l'irrigation par bandes perforées, irrigation par aspersion, le semi – californien et l'irrigation par inondation ou submersion.

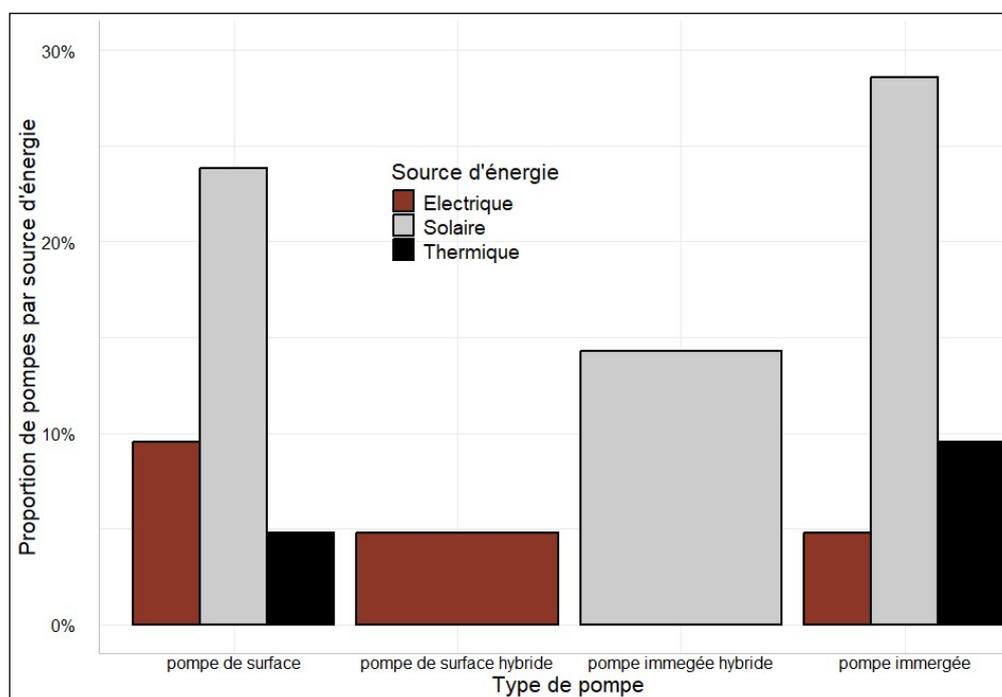
Les principales caractéristiques hydrauliques de ces systèmes sont présentées dans le Tableau 1. Les systèmes de pompage rencontrés au Togo ont des hauteurs manométriques qui varient de 30 à 40 m pour les systèmes de pompage sur ouvrage de surface et de 30 à 70 m pour les puits et forages.

Les débits d'eau pompés varient en fonction des méthodes d'irrigation et des cultures. Les systèmes d'irrigation sous pression débitent globalement moins de  $15 m^3/h$ . les systèmes goutte à goutte et par aspersion consomment près de 40 fois moins d'eau que les autres systèmes. La bande perforée produit en moyenne  $8995 \pm 2756,3 m^3/campagne$ , du fait du temps d'arrosage long et de l'absence de contrôle sur les doses d'irrigation ; elle est très souvent associée à une source d'eau de surface permanente. Le système d'irrigation par aspersion consomme par campagne la plus faible quantité d'eau par rapport aux autres systèmes, soit une valeur de  $190 \pm 75 m^3$  fonctionnant avec un débit moyen de  $37 m^3/heure$ .

**Tableau 1: Caractéristiques hydrauliques des différentes méthodes d'irrigation**

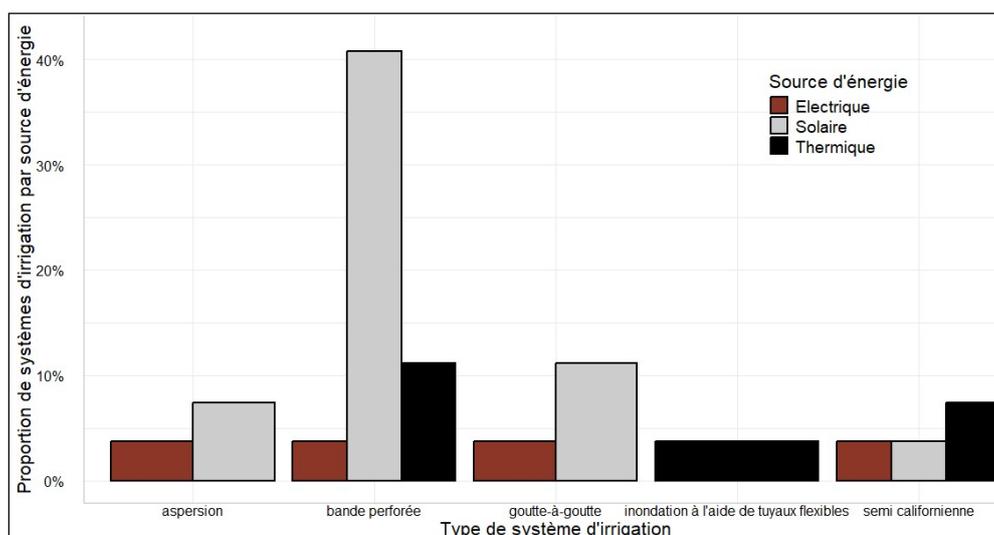
Méthodes d'irrigation	Hauteur Manométrique Totale <sub>max</sub> (m)	Débit m <sup>3</sup> /heure	Volume d'eau moyen (m <sup>3</sup> /campagne)
Goutte – à – Goutte	70 ± 30	6	220 ± 20
Bande perforée	70 ± 9	14 ± 6	8 995 ± 2 756,3
Aspersion	37 ± 13	24	190 ± 75
Submersion	30	14,4	7200
Semi californien	33 ± 3	51 ± 25	8 478,75 ± 3070

Les différents types de pompes utilisés dans les systèmes d'irrigation communautaire, en fonction des sources d'énergie sont présentés à la figure 2. Les pompes de surface sont utilisées avec les trois sources d'énergie. Cette prédominance obéit à l'historique de l'irrigation au Togo car l'introduction des pompes solaires est très récente. Les pompes immergées sont également fréquentes et il y a très peu de pompes hybrides installées tant en surface qu'immergée.



**Figure 2: Proportion de pompes d'irrigation par source d'énergie utilisées au Togo**

Cinq systèmes d'irrigation sont assez fréquents dans les exploitations communautaires au Togo. Elles se répartissent entre les systèmes sous pression économes en eau (goutte – à - goutte, bande perforée, aspersion) et les systèmes mixtes consommateurs en eau (tuyau souple et semi-californien). Au regard de la figure 3, les systèmes d'irrigation à bandes perforées sont assez fréquents (56%) et sont couramment associés au pompage solaire et au pompage thermique. Tandis que le tuyau flexible est essentiellement couplé au pompage thermique (4%). Il est observable que le pompage solaire est associé à une large gamme de système d'irrigation tant économe que consommateurs en eau.



**Figure 3 : Proportion des systèmes d’irrigation utilisés dans les exploitations agricoles communautaires au Togo**

### 3.1.2. Spéculation agricole exploitées et calendrier de culture

Les principales cultures irriguées et répertoriées dans la zone d’étude peuvent être regroupées en trois catégories suivant leurs types et leurs associations, notamment les légumes (corètes – grandes morelle ; haricot vert – piment – aubergine ; tomate ; gombo), les céréales (riz et maïs) et les arbres fruitiers (papayers). Parmi les facteurs pouvant influencer les rendements des cultures du point de vue de la quantité d’eau nécessaire, plusieurs paramètres liés à l’irrigation ont été explorés (Tableau 2) : la superficie irriguée, la durée moyenne de l’irrigation, la durée de la campagne d’irrigation et le nombre de campagnes. Ainsi, en dehors des céréales qui enregistrent des superficies moyennes supérieures à 1 ha, respectivement 1,5 et 43 hectares pour le maïs et le riz, toutes les autres spéculations sont cultivées sur de faibles superficies (généralement inférieures à 1 ha).

**Tableau 2: Etat des lieux des cultures irriguées**

Spéculation agricole	Superficie irriguée (ha)	Durée irrigations (heure/jour)	Nombre de campagnes par an	Durée campagne d’irrigation (jour/campagne)	Rendement (t/ha)
Tomate	0,86 ± 0,72	2,25 ± 0,60	1,5 ± 0,29	82,50 ± 2 2,50	4,5 ± 0,74
Gombo	0,92 ± 0,27	4,20 ± 0,90	2,12 ± 0,30	50 ± 4,49	5,78 ± 1,22
Corète, Aubergine, choux et grande morelle	0,54 ± 0,25	3,80 ± 1	2 ± 0,45	64,40 ± 6,60	3,27 ± 2
haricot vert – papayer–piment	0,25 ± 0,07	2,86 ± 0,70	2 ± 0,22	54,28 ± 12,46	2,94, ± 1,07
Riz	86	9,50 ± 0,50	1,50	30	4,75
Maïs	1,5	4	4	75	1,75

Pour les exploitations échantillonnées les durées des irrigations varient entre 2 à 5 heures par jour pour les cultures maraichères, avec en moyenne 02 campagnes l’année sur une période de 50 à 82 jours par campagne. La durée des irrigations pour les céréales est globalement plus longue (4 à 9 heures/jour) et sur une campagne moins longue (30 à 75 jours). En production irriguée les exploitations communautaires au Togo produisent entre 3,2 et 5,8 tonnes de produits frais à l’hectare, tandis que les productions de céréales fluctuent ente 1,75 et 4,75 tonnes à l’hectare.

### 3.2. Evaluation des émissions carbonées des différents systèmes d'irrigation

#### 3.2.1. Emissions de carbonées associées aux sources d'énergie

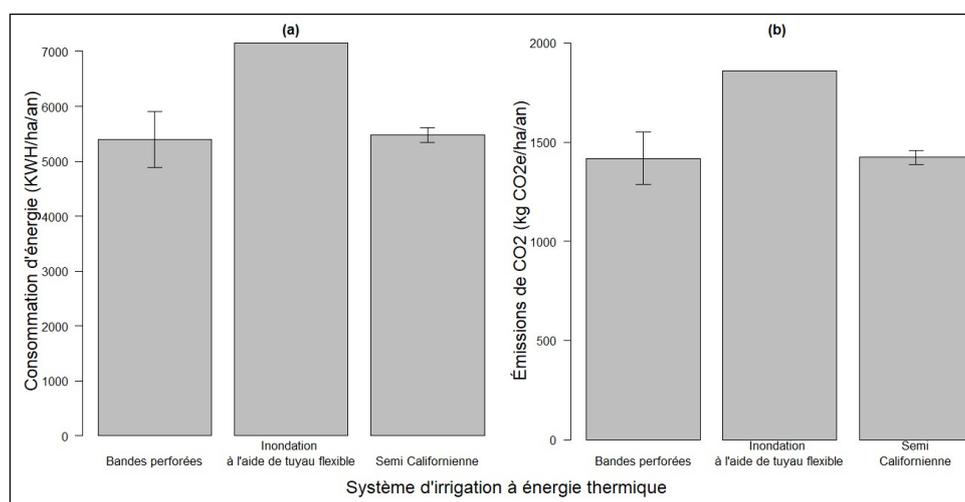
Les émissions de CO<sub>2</sub> estimées pour chacune des trois sources d'énergie en fonction des consommations d'énergie sont présentées dans le Tableau 3. Les systèmes d'irrigation solaire utilisent des panneaux photovoltaïques pour produire l'électricité nécessaire au fonctionnement des pompes. Les émissions de CO<sub>2</sub> liées à cette source d'énergie proviennent de l'installation du système et sont très faibles ( $0,00898 \pm 0,004$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha.an) avec une consommation énergétique moyenne de  $2\,135,19 \pm 708,3$  KWH/ha.an. Les émissions les plus élevées proviennent de la source d'énergie thermique qui consomme en moyenne une énergie estimée à  $6\,009,48 \pm 573,46$  KWH/ha.an, pour une émission de  $1,566 \pm 0,146$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha.an. Les systèmes d'irrigation électrique présentent la plus faible consommation d'énergie ( $1\,494,61 \pm 231,2$  KWH/ha.an) et une faible émission correspondante de CO<sub>2</sub> ( $0,054 \pm 0,005$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha.an).

**Tableau 3: Consommation énergétique et émissions de CO<sub>2</sub> par sources d'énergie**

Source d'énergie	Energie consommée (KWH/ha.an)	Emission de CO <sub>2</sub> (tonne eqCO <sub>2</sub> /ha.an)
Solaire	$2\,135,19 \pm 708,3$	$0,00898 \pm 0,004$
Electrique	$1\,494,61 \pm 231,2$	$0,054 \pm 0,005$
Thermique	$6\,009,48 \pm 573,46$	$1,566 \pm 0,146$

#### 3.2.2. Emissions de carbone associées aux systèmes d'irrigation thermique

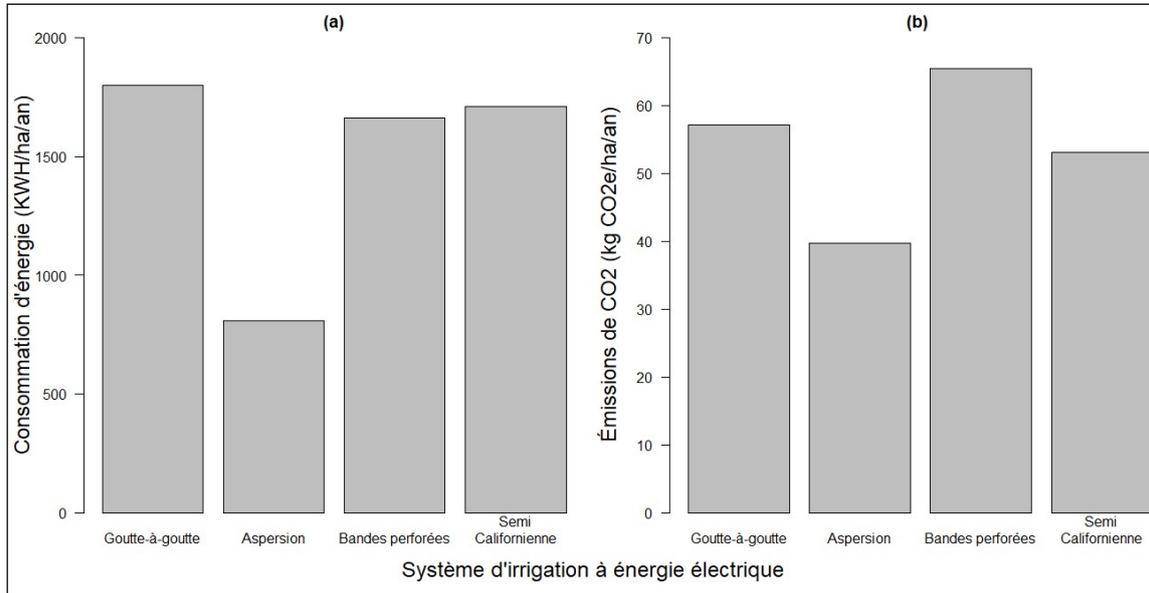
Les systèmes d'irrigation thermique sont généralement associés aux systèmes d'irrigation par bande perforée, tuyau flexible ou semi-californien. Les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes sont illustrées par la Figure 4. Il est observé que les systèmes thermiques consomment globalement plus de 5 300 KWh/ha.an avec le maximum enregistré pour le système d'irrigation à tuyau souple ( $7\,155,6$  KWH/ha.an). Pour ce dernier, les émissions de CO<sub>2</sub> s'élèvent à  $1,859$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha.an. Pour la méthode d'irrigation thermique à bandes perforées, l'énergie moyenne consommée est de  $5\,399,33 \pm 506,9$  KWH/ha.an pour une émission de  $1,417$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha.an. L'irrigation semi – californienne consomme  $5\,473,5 \pm 133,5$  KWH/ha/an et produit  $1,422$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha.an.



**Figure 4: Consommation (a) d'énergie et émission (b) de CO<sub>2</sub> des systèmes d'irrigation thermique**

### 3.2.3. Emissions de carbone associées aux systèmes d'irrigation électrique

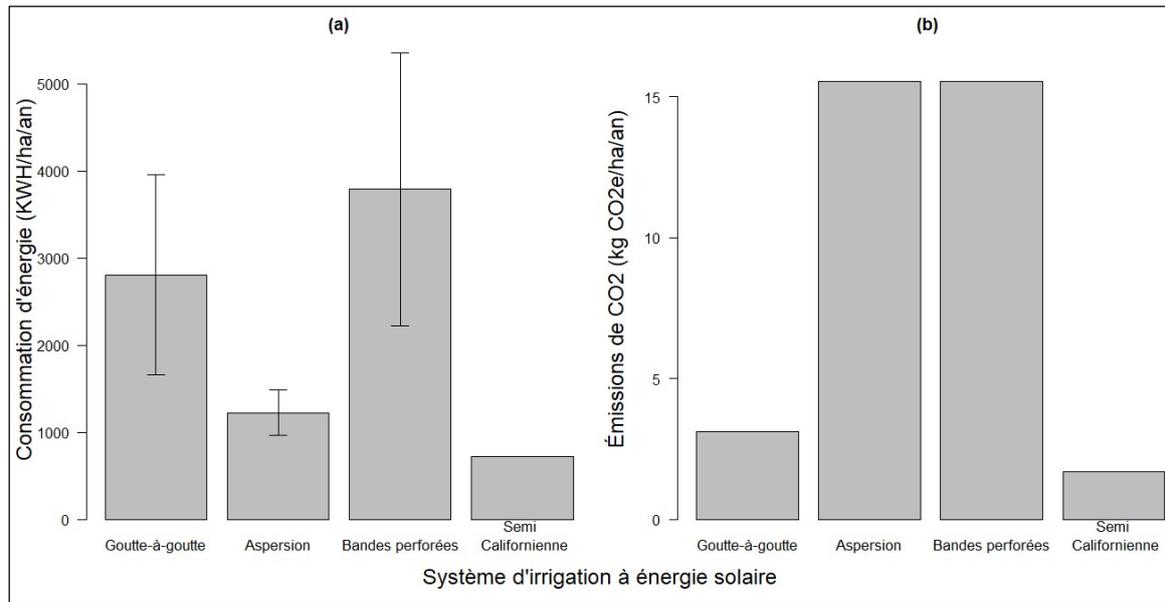
Les résultats obtenus (Figure 5) indiquent pour un système d'irrigation goutte – à- goutte fonctionnant à l'hydro – électricité, une consommation de 1 661 KWH/ha.an pour une émission de 65,38 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an. Les plus faibles consommations d'énergie (806,4 KWH/ha.an) et d'émission de CO<sub>2</sub> (39,74 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an) sont obtenues pour le système d'irrigation par aspersion.



**Figure 5: Consommation (a) d'énergie et émission (b) de CO<sub>2</sub> des systèmes d'irrigation électrique**

### 3.2.4. Emissions de carbone associées à l'installation des systèmes d'irrigation solaire

Les différents systèmes d'irrigation solaire, dans leur fonctionnement sont seulement consommatrices d'énergie et n'émettent pas de CO<sub>2</sub>. Les émissions estimées et présentées par la figure 6, sont celles dues à l'installation des systèmes. Ces émissions sont les plus faibles comparées aux émissions des systèmes thermiques et électriques, et sont inférieurs ou égale 15 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an pour une consommation maximale d'énergie de 3 700 KWH/ha.an.

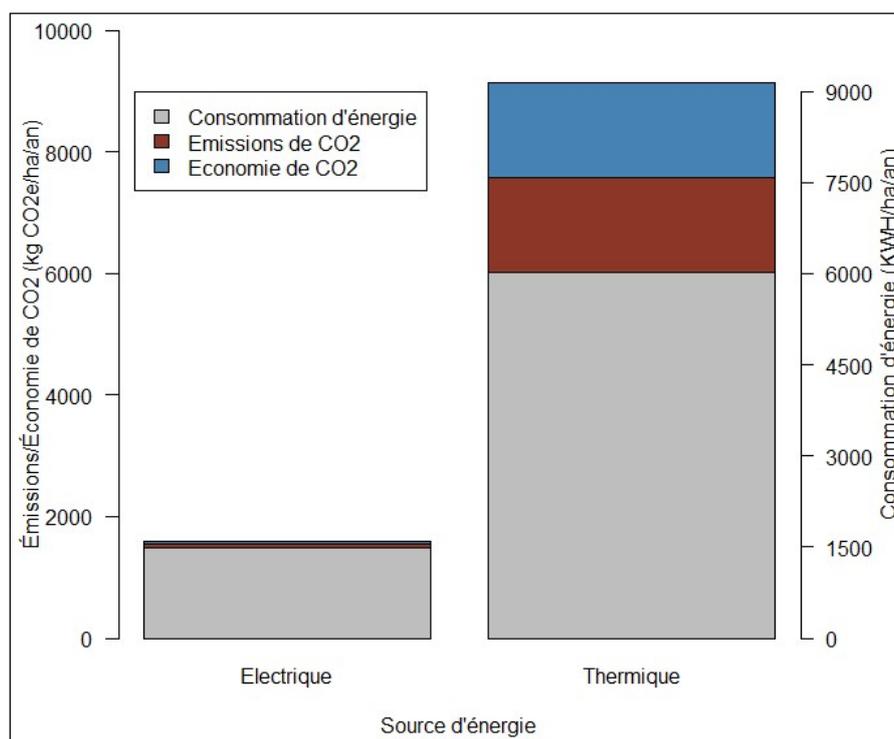


**Figure 6: Consommation (a) d'énergie et émission (b) de CO2 des systèmes d'irrigation solaire**

### 3.3. Evaluation du gain énergétique et carbone de la conversion au solaire des pompages thermique et hydro-électrique

#### 3.3.1. Gain énergétique et carbone par système de pompage

Au regard des émissions de CO2 estimées, les économies de carbone réalisées avec les systèmes solaires par rapport aux systèmes thermique et électrique sont respectivement estimées à  $1,559 \pm 0,15$  tonne eqCO2/ha.an et  $0,0448 \pm 0,00694$  kg eqCO2/ha.an. La figure 7 résume ce bilan carbone des principales sources d'énergie utilisées dans l'irrigation communautaire au Togo. L'économie énergétique correspondante associée à la migration vers le solaire représente 3 874,29 KWH/ha.an pour les systèmes d'irrigation thermique et -640,58 KWH/ha.an pour les systèmes d'irrigation électriques.



**Figure 7: Bilan de CO<sub>2</sub> de la conversion de l'irrigation thermique et électrique vers le solaire**

### 3.3.2. Bilan carbone de la conversion des systèmes d'irrigation thermique

Le bilan en termes de consommation énergétique, émission et économie de CO<sub>2</sub> estimée pour la source d'énergie thermique rapporté par système d'irrigation est présenté dans le tableau 4. Les économies de CO<sub>2</sub> réalisées par rapport à l'adoption du système d'irrigation solaire sont globalement supérieures à 1 400 kg. eqCO<sub>2</sub>/ha.an, avec 1 401, 4 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an pour l'irrigation par bande perforée, 1 857,24 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an pour l'irrigation par tuyau flexible et 1 420,65 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an pour le système semi – californienne. Ainsi, l'économie la plus importante est réalisée sur une conversion sur les systèmes de pompage thermique à tuyau flexible très couramment utilisé par les maraîchers au Togo.

**Tableau 4: Bilan de CO<sub>2</sub> pour les systèmes d'irrigation thermique**

Système d'irrigation	Energie consommée (KWH/ha.an)	Emission de CO <sub>2</sub> (kg eqCO <sub>2</sub> /ha.an)		Economie de CO <sub>2</sub> (kg eqCO <sub>2</sub> /ha.an)
		Pompage solaire	Pompage thermique	
<b>Bande perforée</b>	5 399,33	15,55	1 416,95	1 401,40
<b>Tuyau flexible</b>	7 155,60	1,70	1 858,94	1 857,24
<b>Semi-californien</b>	5 473,50	1,70	1 422,35	1 420,65

### 3.3.3. Bilan carbone de la conversion des systèmes d'irrigation thermique

Le Tableau 5 des résultats du bilan carbone des systèmes d'irrigation électrique indique une économie de 49,83 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an, pour l'irrigation au goutte – à goutte, contre 24,19 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an pour l'irrigation par bande perforée. Pour l'ensemble des

systèmes électriques l'économie carbone est globalement d'environ 50 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an. Dans l'ensemble l'économie carbone la plus importante est obtenue pour la migration des systèmes d'irrigation électrique par aspersion vers le solaire (54 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an).

**Tableau 5: Bilan de CO<sub>2</sub> pour les systèmes d'irrigation électrique**

Système d'irrigation	Energie consommée (KWH/ha/an)	Emission de CO <sub>2</sub> (kg eqCO <sub>2</sub> /ha/an)		Economie de CO <sub>2</sub> (kg eqCO <sub>2</sub> /ha/an)
		Pompage solaire	Pompage électrique	
Goutte-à-goutte	1 661	15,55	65,38	49,83
Aspersion	1 800	3,10	57,10	54, 00
Bande perforée	806,4	15,55	39,74	24,19
Semi californien	1 711,05	1,70	53,03	51,33

### 3.4. Evaluation du gain carbone associé à l'économie de l'eau sur la parcelle

L'économie d'eau et le gain carbone correspondant ont été calculés pour le système d'irrigation thermique dans le tableau 6. Dans l'ensemble, pour le même système d'irrigation, le pompage thermique consomme plus d'eau et émet plus de carbone. Les émissions économisées varient de 143,3 à 1 161 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an selon le système d'irrigation utilisé. Pour le système d'irrigation par bande perforée, l'économie d'eau s'élève à 1 356 m<sup>3</sup>/ha.an contre 4 005 m<sup>3</sup>/ha.an pour le système d'irrigation semi – californienne. Les gains de CO<sub>2</sub> correspondants sont estimés respectivement à 605 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an et 1 161 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an.

**Tableau 6: Gain carbone associé à l'économie d'eau avec une migration du thermique au solaire pour l'irrigation**

Système d'irrigation	Consommation en eau (m <sup>3</sup> /ha/an)		Consommation d'énergie (KWH/ha.an)	Economie d'eau (m <sup>3</sup> /ha.an)	Economie de CO <sub>2</sub> (kg eqCO <sub>2</sub> /ha.an)
	pompage solaire	pompage thermique			
Bande perforée	11 908	13 264	552	1 356	143,3
Semi californienne	5 400	9 405	2 331	4 005	605
Tuyau flexible	5 400	14 400	4472	9000	1 161

Ainsi, les systèmes d'irrigation solaires produisent de très faible émission de CO<sub>2</sub> (0,00898 ± 0,004 tonne eqCO<sub>2</sub>/ha.an) avec une consommation énergétique moyenne de 2 135,19 ± 708,3 KWH/ha.an. Les systèmes d'irrigation thermiques consomment globalement plus de 5 300 KWH/ha.an et émettent au moins 1,4 tonne eqCO<sub>2</sub>/ha/an au Togo. Par ailleurs, les systèmes d'irrigation électrique consomment plus de 1 600 KWH/ha.an et émettent au maximum 65,38 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an. Les émissions liées à l'installation des systèmes de pompage solaire sont inférieures à 15 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an pour une consommation maximale d'énergie de 3 700 KWH/ha.an.

## 4. Discussions

L'irrigation solaire commence à se développer au Togo grâce à des initiatives locales et des projets de développement durable. Les systèmes solaires offrent une alternative propre et efficace, surtout dans les zones rurales où l'accès à l'électricité est limité. Les installations solaires sont de plus en plus accessibles et permettent aux petits producteurs de gérer leurs ressources plus efficacement.

En effet, face aux défis de l'agriculture au Togo dans le contexte du changement climatique, l'adoption de l'irrigation solaire se présente comme une solution viable pour réduire l'empreinte carbone du secteur agricole et améliorer les rendements.

Une migration de l'essentiel des superficies irriguées pour le maraichage au Togo, 119 ha irrigué sur un total de 1 243 ha [14] représenterait une contribution intéressante à l'adaptation aux changements climatiques et à la réduction des gaz à effet de serre. En effet, selon Boussard, Dabat and Faure [36], en exploitant l'énergie solaire abondante de toutes les régions du Togo, ces systèmes peuvent réduire les émissions de carbone et les coûts opérationnels, tout en augmentant la résilience des cultures face au changement climatique. FAO [4] soutient également que l'adoption de l'irrigation solaire pourrait jouer un rôle crucial dans la compensation carbone, non seulement en réduisant les émissions de GES, mais aussi en séquestrant le carbone par le biais d'une consommation très faible, voire nulle d'énergie, et par une augmentation de la biomasse végétale. En outre, Afokpe, Phiri, Lamore, Toure, Traore and Kipkoge [37] indique que le recours à l'irrigation est l'une des mesures clés de l'adaptation des petites exploitations agricoles aux changements climatiques en Afrique subsaharienne.

De façon globale, l'étude présente les observations clés sur la consommation énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub> de divers systèmes de pompage associés à des systèmes d'irrigation ainsi que les économies carbone qui seraient réalisés à travers une migration des systèmes de pompage vers le solaire.

Dans un contexte mondial marqué par une transition énergétique urgente et nécessaire, les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, jouent un rôle crucial dans la réduction des émissions de GES. Une ouverture des politiques énergétiques vers les énergies propres apporterait d'importantes économies carbone et une économie des devises exportées pour l'achat des carburants. En effet, les résultats de cette étude montrent que la migration du pompage thermique pour le pompage solaire permet d'économiser  $1,559 \pm 0,15$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha.an. Ces résultats sont en cohérence avec ceux de Zhang and Chen [38], de Kumar, Szepesi, Čonka, Kolcun, Péter, Berényi and Szamosi [39] qui ont rapporté que les systèmes d'irrigation solaire peuvent réduire les émissions de CO<sub>2</sub> respectivement jusqu'à 1,8 tonne/ha.an et à 1,2 tonne/ha.an, dans certaines régions. d'après Koutou, Adom and Ayayi [40] l'adoption de ces systèmes pourrait ainsi réduire significativement les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur agricole, tout en améliorant la résilience climatique des exploitations.

Par rapport à la production et à l'utilisation d'eau par les systèmes d'irrigation thermiques, sur les exploitations agricoles communautaires étudiées, les résultats indiquent des économies d'énergie de l'ordre de  $0,5 \pm 0,05$  KWH/m<sup>3</sup>.ha.an et de  $128 \pm 0,13$  gramme eqCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.an de CO<sub>2</sub>. Ces résultats corroborent ceux de Schuh, Müller, Johnson, O'Connell, Kim, Wang and Delgado [41] qui ont montré que les systèmes d'irrigation thermique, en plus d'émettre plus de CO<sub>2</sub>, sont généralement moins efficaces dans l'utilisation de l'eau, ce qui se traduit par un gaspillage d'environ 20 à 30 % d'eau supplémentaire. Cette assertion justifie aussi les économies de CO<sub>2</sub> élevées obtenues par cette étude et inhérentes aux différents systèmes d'irrigation fonctionnant à l'énergie thermique. En effet, selon Durand, Martin, Sanchez, Lee, Nguyen, Ali, Gomez, Zhao, Smith, Chen, Lopez and Singh [42], les systèmes d'irrigation solaire, en plus de leur contribution à la réduction des émissions, offrent un potentiel d'optimisation dans la gestion de l'eau, entraînant des économies supplémentaires en termes de ressources hydriques et énergétiques. Dans le cadre de cette étude, une économie de l'eau estimée à 4 787 m<sup>3</sup>/ha/an a été obtenue. Ces résultats montrent un potentiel important pour les technologies d'irrigation bas-carbone, avec une réduction nette des émissions de CO<sub>2</sub>. Cependant, une analyse plus complète est nécessaire, en augmentant l'échantillon et en tenant compte des coûts, de la disponibilité des technologies et des conditions locales afin de maximiser les économies carbone.

L'intégration de systèmes solaires à grande échelle dans le secteur agricole pourrait permettre au Togo de compenser plusieurs millions de tonnes de CO<sub>2</sub> sur une décennie. Selon Bettles [43], l'adoption de ces technologies peut non seulement améliorer l'accès à l'eau pour l'agriculture, mais également contribuer à la compensation carbone en réduisant la dépendance aux sources d'énergie fossiles. En effet, une migration de l'essentiel des superficies irriguées privées de petite échelle pour le maraichage du thermique au solaire (1 124 ha), représenterait une économie carbone moyenne de 1 899,56 tonne eqCO<sub>2</sub>/an (0,072% des émissions nationales) et une économie moyenne de carburant de 758 924 l/an. En prenant en compte la croissance démographique et l'augmentation de la demande énergétique, cette transition vers le solaire pourrait éviter un accroissement des émissions de 20 à 30 % d'ici 2030 [44].

## 5. Conclusion

Le potentiel de compensation carbone des systèmes solaires au Togo est considérable, grâce à l'ensoleillement favorable, aux avancées technologiques et une politique agricole volontariste. Une adoption massive de l'énergie solaire pour la production agricole irriguée permettrait de réduire drastiquement les émissions de carbone et de contribuer à la transition énergétique mondiale, tout en stimulant l'économie locale. L'intégration de l'irrigation solaire dans les pratiques agricoles offre ainsi une opportunité pour les agriculteurs d'accroître leur résilience face aux changements climatiques et de stabiliser leur production tout au long de l'année.

L'étude a démontré que les systèmes solaires représentent une alternative viable et durable aux sources d'énergie conventionnelles pour la réduction des émissions de carbone au Togo. De ce fait, la migration vers le solaire représente une économie d'énergie de 3 874,29 KWH/ha.an pour les systèmes d'irrigation thermique et 640,58 KWH/ha.an pour les systèmes d'irrigation électriques, ce pour une économie d'émission respective de  $1,559 \pm 0,15$  tonne eqCO<sub>2</sub>/ha.an et  $0,0448 \pm 0,00694$  kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an. En outre les émissions économisées en lien avec l'économie de l'eau d'irrigation varient de 143,3 à 1 161 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an selon le système d'irrigation utilisé pour un pompage thermique. Tandis que les émissions économisées en lien avec l'économie de l'eau d'irrigation varient de 143,3 à 1 161 kg eqCO<sub>2</sub>/ha.an selon le système d'irrigation utilisé pour un pompage électrique. Par ailleurs, les systèmes d'irrigation thermique au tuyau souple et les systèmes d'irrigation électrique par aspersion sont ceux qui offrent le plus grand potentiel d'économie carbone de la migration vers le pompage solaire au Togo.

Les systèmes d'irrigation solaire sont une solution durable avec des émissions de CO<sub>2</sub> très faibles, principalement associées à la fabrication et au cycle de vie des panneaux solaires. Ces émissions sont largement compensées par l'absence d'émissions directes pendant l'utilisation. Aussi, une migration de l'essentiel des superficies irriguées privées de petite échelle pour le maraichage au Togo, du thermique au solaire représenterait-t-elle une économie carbone moyenne de 1 899,56 tonne eqCO<sub>2</sub>/an (0,078% des émissions nationales) et une économie moyenne de carburant de 758 924 l/an. Une contribution non négligeable à la réduction des gaz à effet de serre et à la résilience économique des producteurs au Togo.

## Financement

Les travaux de cette étude ont été financés par la GIZ, Programme Sun4Water

## Remerciements

Les auteurs présentent leurs remerciements à la GIZ pour le soutien technique et financier, les exploitants agricoles qui ont bien voulu partager les informations sur leurs exploitations, les collègues qui ont contribué à la relecture de ce papier et l'équipe Greening Africa Together qui ont inspirés la conduite de ces travaux. Les auteurs adressent également leur reconnaissance aux institutions partenaires impliquées notamment Institut National de Formation Agricole de Tové (INFA), Ecole Supérieure d'Agronomie/Université de Lomé (ESA/UL) et Institut de Conseil et d'Appui Technique (ICAT).

## Références

- [1] K. Pawlak, and M. Kołodziejczak, "The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production," *Sustainability*, vol. 12, no. 13, pp. 5488, 2020.
- [2] K. E. Giller, "The food security conundrum of sub-Saharan Africa," *Global Food Security*, vol. 26, pp. 100431, 2020.
- [3] N. P. Jellason, E. J. Robinson, and C. C. Ogbaga, "Agriculture 4.0: Is sub-saharan africa ready?," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 12, pp. 5750, 2021.
- [4] FAO, *Togo Country Programming Framework (CPF) 2018-2022*, Food and Agriculture Organization of the United Nations. , Rome, Italy, 2018.
- [5] B. Mondiale, "Indicateurs de développement mondial," 2023.
- [6] O. Mapanje, S. Karuaihe, C. Machethe, and M. Amis, "Financing sustainable agriculture in sub-saharan africa: a review of the role of financial technologies," *Sustainability*, vol. 15, no. 5, pp. 4587, 2023.
- [7] V. Bjornlund, H. Bjornlund, and A. F. Van Rooyen, "Why agricultural production in sub-Saharan Africa remains low compared to the rest of the world—a historical perspective," *International Journal of Water Resources Development*, vol. 36, no. sup1, pp. S20-S53, 2020.
- [8] A. Gadedjisso-Tossou, "Impact of Climate and Soil Variability on Crop Water Productivity and Food Security of Irrigated Agriculture in Northern Togo (West Africa)," 2020.
- [9] E. Komlan, and A. Kouassi, "Innovative Approaches to Water Management in Togolese Agriculture.," *Journal of Rural Development*, vol. 22, no. 3, pp. 45-60, 2019.
- [10] K. Amouzou, M. Agbokou, and C. Gaba, "Irrigation and Agricultural Challenges in Togo: A Review," *African Journal of Agricultural Research*, vol. 14, no. 3, pp. 195-206, 2019.
- [11] PNACC-Togo, *Plan National d'Adaption aux Changements Climatiques du Togo*, Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières, 2018.
- [12] T. S. Jayne, L. Fox, K. Fuglie, and A. Adelaja, "Agricultural productivity growth, resilience, and economic transformation in sub-Saharan Africa," *Association of Public and Land-grant Universities (APLU)*, 2021.
- [13] E. M. Mungai, S. W. Ndiritu, and I. Da Silva, "Unlocking Climate Finance Potential for Climate Adaptation: Case of Climate Smart Agricultural Financing in Sub Saharan Africa," *African Handbook of Climate Change Adaptation*, pp. 2063-2083: Springer, 2021.
- [14] SDAI, *Etudes et prospection des ressources en eau en vue de leur mobilisation pour la promotion de l'agriculture irriguée au Togo*, Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et du Développement Rural, 2022.
- [15] M. M. Mekonnen, and W. Gerbens-Leenes, "The water footprint of global food production," *Water*, vol. 12, no. 10, pp. 2696, 2020.
- [16] H.-A. Samah, and G. J.-P. Tevi, "The contribution of solar energy to environmental protection and poverty reduction." pp. 17-23.
- [17] M. Abo-Habaga, E. El-Banna, and A. Silim, "Diesel and solar energies costs assessment under drip irrigation system," *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, vol. 12, no. 11, pp. 819-822, 2021.
- [18] M. T.-A.-I. Khan, S. Sarkar, S. Hossain, A. U. Ahmed, and B. B. Pathik, "The feasibility study of solar irrigation: Economical comparison between diesel and photovoltaic water pumping systems for different crops." pp. 1-5.

- [19] B. Terang, and D. C. Baruah, "Techno-economic and environmental assessment of solar photovoltaic, diesel, and electric water pumps for irrigation in Assam, India," *Energy Policy*, vol. 183, pp. 113807, 2023.
- [20] A. M. García, J. Gallagher, A. McNabola, E. C. Poyato, P. M. Barrios, and J. R. Díaz, "Comparing the environmental and economic impacts of on-or off-grid solar photovoltaics with traditional energy sources for rural irrigation systems," *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 895-904, 2019.
- [21] N. I. Sarkar, A. I. Sifat, N. Rahim, and S. S. Reza, "Replacing diesel irrigation pumps with solar photovoltaic pumps for sustainable irrigation in Bangladesh: A feasibility study with HOMER." pp. 498-503.
- [22] V. Shinde, and S. Wandre, "Solar photovoltaic water pumping system for irrigation: A review," *African journal of agricultural research*, vol. 10, no. 22, pp. 2267-2273, 2015.
- [23] J. Powell, J. Welsh, and R. Farquharson, "Investment analysis of solar energy in a hybrid diesel irrigation pumping system in New South Wales, Australia," *Journal of Cleaner Production*, vol. 224, pp. 444-454, 2019.
- [24] K. Gnandi, and G. Tchangbedji, "Impact des activités humaines sur les écosystèmes lagunaires du sud du Togo," *Journal of Environmental Science*, 2020.
- [25] F. A. Komlan, and E. Kouassi, "Évolution des mangroves du Togo face aux changements climatiques," *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021.
- [26] W. Atakpama, K. Kokou Kouami, and K. Batawila, "Sols et agriculture dans le sud du Togo," *African Journal of Agricultural Research*, 2019.
- [27] M. Dourma, and M. K. Savi, "Biodiversité et conservation des forêts des plateaux du Togo," *African Journal of Ecology*, 2022.
- [28] K. Akpagana, and K. Guelly, "État de la faune et flore dans les réserves naturelles du Togo," *Journal of Tropical Ecology*, 2023.
- [29] D. Bokobana, and A. Koukou, "Hydrographie et ressources en eau dans les plateaux du Togo," *Water Science and Technology*, 2022.
- [30] G. Lawson, and M. Balogoun, "Étude des écosystèmes de savane dans le centre du Togo," *Journal of Savanna Ecology*, 2024.
- [31] K. Koudouvo, and S. Johnson, "Les défis de la gestion de l'eau dans la région centrale du Togo," *Water Resources Management*, 2023.
- [32] ADEME, *Les émissions de CO2 et les facteurs d'émission. Agence de la transition écologique*, 2024.
- [33] ADEME, *Bilan Carbone, Guide des facteurs d'émission*, Version 11.0. ed.: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, 2017.
- [34] S. Ould-Amrouche, D. Rekioua, and A. Hamidat, "Modelling photovoltaic water pumping systems and evaluation of their CO2 emissions mitigation potential," *Applied energy*, vol. 87, no. 11, pp. 3451-3459, 2010.
- [35] FAO, *EX-Ante Carbon-balance Tool (EX-ACT): Guide technique* Version 3 ed., Rome, Italy: FAO, 2015.
- [36] J.-M. Boussard, M.-H. Dabat, and G. Faure, "Agriculture et changements climatiques en Afrique de l'Ouest. ," 2021.
- [37] P. M. Afokpe, A. T. Phiri, A. A. Lamore, H. M. Toure, R. Traore, and O. Kipkogei, "Progress in climate change adaptation and mitigation actions in sub-Saharan Africa farming systems," *Cahiers Agricultures*, vol. 31, pp. 4, 2022.
- [38] Q. Zhang, and W. Chen, "Modeling China's interprovincial electricity transmission under low carbon transition," *Applied Energy*, vol. 279, pp. 115571, 2020.

- [39] B. Kumar, G. Szepesi, Z. Čonka, M. Kolcun, Z. Péter, L. Berényi, and Z. Szamosi, “Trendline assessment of solar energy potential in hungary and current scenario of renewable energy in the visegrád countries for future sustainability,” *Sustainability*, vol. 13, no. 10, pp. 5462, 2021.
- [40] M. Koutou, B. Adom, and N. Ayayi, “L’irrigation solaire au Togo : un levier pour la compensation carbone agricole ” *Revue de l’Agriculture Durable*, vol. 12, no. 3, pp. 75-89., 2023.
- [41] A. Schuh, L. Müller, P. Johnson, R. O’Connell, S. Kim, T. Wang, and J. Delgado, “Contributive Analysis of Solar and Thermal Irrigation Systems: Environmental and Water Impact. , , ,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 345, pp. 130567, 2022.
- [42] P. Durand, L. Martin, A. Sanchez, K. Lee, T. Nguyen, S. Ali, R. Gomez, H. Zhao, J. Smith, X. Chen, M. Lopez, and P. Singh, “Hydraulic and Environmental Performance of Solar, Electric, and Thermal Irrigation Systems in Community Agriculture,” *Journal of Agricultural Engineering and Water Management*, vol. 16, no. 1, pp. 123-145, 2024.
- [43] C. Bettles, McCarthy, A., & Barnes, A., “ Solar Irrigation Systems and Carbon Mitigation: Opportunities for Sustainable Agriculture,” *Renewable Energy Journal*, vol. 160, pp. 543-556, 2022.
- [44] W. Africa, “Green from the Ground Up: A path towards Sustainable Development in Africa,” 2024.