

NEXUS EAU-ÉNERGIE-ALIMENTATION : ÉVALUATION PILOTE TECHNO-ÉCONOMIQUE D'UN SYSTÈME D'IRRIGATION INTELLIGENT IOT ALIMENTÉ PAR ÉNERGIE SOLAIRE À KABARE (SUD-KIVU, RDC)

Water-Energy-Food Nexus: Pilot Techno-Economic Assessment of a Solar-Powered IoT Smart Irrigation System in Kabare, South Kivu, Democratic Republic of the Congo

Chadrack BAHATI NZIBONERA, Université de Développement Durable en Afrique Centrale, Sciences appliquées/Électronique, Bukavu, RDC

Gentil CIZA NFUNDIKO, Université de Développement Durable en Afrique Centrale, Sciences économiques/Marketing, Bukavu, RDC

Résumé

L'agriculture familiale du Sud-Kivu reste très dépendante des pluies et demeure confrontée à une gestion souvent peu efficiente de l'eau, dans un contexte où l'accès à une énergie fiable est limité. Nous avons évalué, à l'échelle pilote, un système d'irrigation intelligente associant capteurs, microcontrôleur ESP32, commande locale, communication Wi-Fi/GSM et alimentation photovoltaïque. L'étude distingue clairement les essais fonctionnels du prototype, les scénarios hydriques établis pour quatre cultures, les calculs de dimensionnement énergétique et les projections économiques. Les synthèses expérimentales conservées font état de 120 cycles répartis sur 30 jours. La latence locale après acquisition est de 1,60 s, tandis que la chaîne incluant la télémétrie atteint $3,60 \pm 0,16$ s. Les scénarios hydriques conduisent à une économie potentielle moyenne de 19,6 % par rapport aux volumes de référence manuels, avec une valeur maximale de 21,2 % pour la tomate. Pour un panneau de 100 Wc, la production photovoltaïque est estimée à 400 Wh/jour, contre une charge de dimensionnement de 42,4 Wh/jour. L'autonomie théorique atteint 4,53 jours sous l'hypothèse de 80 % d'énergie batterie utilisable. Deux pertes momentanées de signal GSM sont consignées, sans interruption de la commande locale. Dans le scénario économique de base, l'investissement initial est estimé à 400 USD et l'amortissement simple à 1,67 an; l'analyse de sensibilité situe cet amortissement entre 1,09 et 2,58 ans. Ces résultats soutiennent la faisabilité technique du prototype et l'intérêt d'une validation plus large. Ils ne constituent cependant pas une preuve d'amélioration du rendement, de la sécurité alimentaire ou de la résilience climatique, qui devront être évalués au cours d'essais agronomiques multi-saison.

Mots-clés: agriculture intelligente; Internet des Objets; irrigation de précision; humidité du sol; énergie solaire; Nexus Eau-Énergie-Alimentation; Sud-Kivu

Abstract

Smallholder farming in South Kivu remains highly dependent on rainfall and is often constrained by inefficient water management and limited access to reliable energy. This pilot study assessed a smart-irrigation system combining sensors, an ESP32 microcontroller, local control, Wi-Fi/GSM communication, and photovoltaic power. The study clearly separates prototype functional testing, crop-specific water-use scenarios, energy-sizing calculations, and economic projections. The retained experimental summaries report 120 irrigation cycles over 30 days. Post-acquisition local latency was 1.60 s, while the extended chain including telemetry reached 3.60 ± 0.16 s. Water-use scenarios suggested a potential average saving of 19.6% relative to manual reference volumes, with the highest value (21.2%) for tomato. For a 100 Wp photovoltaic panel, daily production was estimated at 400 Wh/day against a design load of 42.4 Wh/day. Theoretical battery autonomy was 4.53 days under an assumption of 80% usable battery energy. Two temporary GSM signal losses were recorded in the retained summaries without interruption of local irrigation control. Under the baseline economic scenario, initial investment was estimated at USD 400 and simple payback at 1.67 years; sensitivity analysis yielded a range of 1.09–2.58 years. These findings support the technical feasibility of the pilot prototype and justify broader validation. They do not, however, demonstrate improvements in crop yield, food security, or climate resilience, which require multi-season agronomic trials.

Keywords: smart agriculture; Internet of Things; precision irrigation; soil moisture; solar energy; Water–Energy–Food Nexus; South Kivu.

1. Introduction

Dans les exploitations familiales, l’eau et l’énergie conditionnent directement la possibilité de produire, en particulier lorsque les pluies deviennent irrégulières. Au Sud-Kivu, cette dépendance est renforcée par la dégradation des terres, la variabilité climatique et la faible disponibilité d’équipements adaptés aux petites exploitations. Dans ce contexte, améliorer l’efficacité de l’irrigation sans accroître fortement les besoins énergétiques constitue un enjeu à la fois agronomique et économique (FAO, 2020, 2021; IPCC, 2022). L’automatisation peut y contribuer lorsqu’elle reste simple, robuste et compatible avec les moyens des producteurs (FAO, 2022).

À Kabare, la gestion de l’eau ne peut pas être dissociée des caractéristiques des exploitations et des pratiques locales. Les travaux conduits dans le nord du territoire montrent que l’adoption des techniques de conservation du sol et de l’eau dépend notamment des connaissances des agriculteurs et de leur insertion dans des organisations paysannes (Chuma et al., 2022). D’autres études menées au Sud-Kivu soulignent que les pratiques dites climato-intelligentes n’ont pas les mêmes effets d’une zone agroécologique à l’autre (Chuma et al., 2025). Ces constats plaident pour des solutions techniques conçues à partir du terrain plutôt que pour l’application de réglages uniformes.

L’irrigation de précision s’inscrit dans cette logique. En mesurant l’état hydrique du sol, un système automatisé peut décider d’irriguer au moment où cela devient nécessaire et arrêter l’apport lorsque le seuil supérieur est atteint. Les capteurs d’humidité, les microcontrôleurs et les réseaux de communication rendent ce pilotage possible à faible coût (Tzounis et al., 2017; Ayaz et al., 2019; Obaideen et al., 2022). Sur le maïs, le suivi de l’humidité du sol a déjà montré son intérêt pour ajuster la programmation de l’irrigation (Camporese et al., 2021). Des dispositifs comparables ont également été testés sur tomate avec des capteurs et des électrovannes pilotées par IoT (Seyar & Ahamed, 2023).

Dans les zones mal desservies par le réseau électrique, l’énergie solaire offre une solution complémentaire. Elle permet d’alimenter les capteurs, le contrôleur et les organes de commande sans recourir en permanence au carburant ou au réseau. Son intérêt dépend toutefois du dimensionnement, de la maintenance et du coût d’investissement (Mohammed Wazed et al., 2018; Raza et al., 2022). Cette articulation entre gestion de l’eau, énergie et production rejoint l’approche du Nexus Eau–Énergie–Alimentation, qui invite à analyser ces ressources de manière intégrée (Hoff, 2011; Biggs et al., 2015; Rasul & Sharma, 2016).

La présente étude se situe à l’intersection de ces deux enjeux. Elle ne cherche pas à présenter l’irrigation IoT comme une innovation en soi, mais à examiner la faisabilité d’une architecture simple et relativement peu coûteuse dans un environnement rural de l’Est de la République démocratique du Congo. Le prototype associe un traitement local sur ESP32, une communication Wi-Fi/GSM, une commande indépendante du Cloud et une alimentation photovoltaïque. L’évaluation porte d’abord sur son fonctionnement technique et sur son dimensionnement; les effets agronomiques et socio-économiques à long terme restent à confirmer.

L’objectif général est donc de concevoir et d’évaluer un prototype pilote d’irrigation intelligente adapté au contexte de Kabare. Plus précisément, l’étude vise à caractériser la réactivité de la commande locale, à estimer le potentiel d’économie d’eau à partir de scénarios comparatifs, à vérifier la cohérence du dimensionnement photovoltaïque et à examiner la plausibilité économique du dispositif. L’hypothèse de travail est qu’une architecture locale, autonome et peu énergivore peut constituer une base crédible pour l’irrigation de précision, à condition d’être ensuite validée dans des essais agronomiques de plus longue durée.

2. Cadre théorique et état de l’art

2.1 Agriculture intelligente et irrigation de précision

L’agriculture intelligente regroupe les outils qui mobilisent les données pour mieux ajuster les interventions au champ. Dans le cas de l’irrigation, l’objectif n’est pas seulement d’automatiser l’ouverture d’une vanne, mais de rapprocher l’apport d’eau du besoin réel de la culture. Les systèmes actuels combinent généralement un ou plusieurs capteurs, un contrôleur, un actionneur et une

interface de supervision (Gebbers & Adamchuk, 2010; Wolfert et al., 2017; Obaideen et al., 2022).

Parmi les variables disponibles, l'humidité du sol est particulièrement utile pour déclencher ou interrompre l'irrigation. Son interprétation exige néanmoins de la prudence. La valeur fournie par un capteur capacitif dépend du sol, de la profondeur d'installation et de la calibration; elle ne peut pas être assimilée automatiquement à une teneur en eau volumique. Une programmation plus avancée, notamment prédictive, devient possible lorsque des données locales suffisamment nombreuses et bien documentées sont disponibles (Adeyemi et al., 2018).

2.2 Architecture IoT, traitement local et communication

Une architecture IoT agricole peut être décrite simplement comme une chaîne allant de la mesure à la décision, puis à la transmission de l'information. Les capteurs enregistrent les variables physiques, le microcontrôleur applique les règles de commande, le réseau transmet les données et l'interface permet à l'utilisateur de suivre le système (Gubbi et al., 2013; Al-Fuqaha et al., 2015). Pour une application rurale, l'intérêt du traitement local est majeur: l'action critique peut continuer même lorsque la connexion au Cloud est momentanément indisponible (Zamora-Izquierdo et al., 2019).

Dans le prototype étudié, l'ESP32 assure directement l'acquisition des données, leur comparaison aux seuils et la commande du relais. Le Wi-Fi est intégré au microcontrôleur, tandis qu'un module GSM/GPRS est prévu comme voie de secours pour la télémétrie. Le modèle exact de ce module n'a pas pu être confirmé dans les archives techniques conservées. Ce point n'affecte pas la logique de commande elle-même, puisque l'ouverture et la fermeture de l'électrovanne sont exécutées localement.

2.3 Énergie solaire, Nexus Eau-Énergie-Alimentation et portée de la résilience

L'alimentation photovoltaïque convient bien aux dispositifs électroniques de faible puissance, mais son dimensionnement doit rester cohérent avec la charge réelle. Il faut notamment tenir compte de l'énergie consommée chaque jour, du nombre d'heures solaires utiles, des pertes de conversion et de la technologie de stockage. Une marge de sécurité améliore la continuité du service, mais un surdimensionnement excessif augmente inutilement le coût d'investissement (Mohammed Wazed et al., 2018).

Le cadre du Nexus Eau-Énergie-Alimentation permet de relier ces différentes dimensions: l'eau soutient la production, sa distribution nécessite de l'énergie, et les choix énergétiques influencent le coût et la durabilité du système (Hoff, 2011; Biggs et al., 2015). La résilience climatique suppose toutefois davantage qu'un prototype fonctionnel sur une courte période. Elle devrait être appréciée à travers la continuité de service, la stabilité de la production, la capacité de maintenance, les coûts supportés par les utilisateurs et l'adoption de la technologie (Klerkx et al., 2019; Rose et al., 2021). Dans ce travail, elle constitue donc une perspective à tester et non un résultat déjà démontré.

3. Matériels et methods

3.1 Conception de l'étude, site d'application et périmètre de validation

L'étude relève d'une démarche de recherche-développement. Le prototype a été évalué pendant 30 jours sur une surface pilote déclarée de 100 m². Les tableaux de synthèse établis au terme de l'essai font état de 120 cycles d'irrigation. Quatre cultures dont le maïs, le haricot, la tomate et la pomme de terre qui ont été utilisées pour construire des scénarios comparatifs de demande en eau. Il ne s'agit pas de quatre essais culturels indépendants: aucun rendement, biomasse, qualité de récolte ou revenu agricole n'a été mesuré dans ce pilote.

Kabare a été retenu en raison de l'importance de l'agriculture familiale et des contraintes d'accès à l'énergie dans plusieurs zones rurales. Pour le dimensionnement, le protocole a retenu une température moyenne de 24 ± 2 °C, une humidité relative de 65 à 85 % et cinq heures solaires de pointe par jour. Ces valeurs sont utilisées comme hypothèses de calcul et ne sont pas présentées comme une série climatique issue d'une station météorologique locale.

Les données pédologiques disponibles pour Kabare décrivent fréquemment des sols à forte teneur en argile. À Bushumba, par exemple, Balume Kayani et al. (2021) rapportent des Nitisols contenant 48 à 69 % d'argile et 25 à 27 % de sable. Cette référence situe le contexte régional, mais elle

ne remplace pas une analyse de la parcelle pilote. Elle n'a donc pas été utilisée pour convertir les lectures des capteurs en teneur en eau volumique.

3.2 Traçabilité des données et limites de reproductibilité du pilote

La présente analyse repose sur les tableaux de synthèse et les paramètres techniques qui ont été conservés après le pilote. Les journaux bruts correspondant aux 120 cycles ainsi que le fichier source du firmware ont été perdus et ne sont plus disponibles. Aucune donnée individuelle n'a été reconstruite a posteriori. De même, certaines informations comme texture exacte de la parcelle, capacité au champ, point de flétrissement, profondeur précise des capteurs, pression hydraulique, chimie de la batterie et détail de la charge électrique par composant n'avaient pas été consignées de manière suffisamment complète. Pour cette raison, les résultats sont distingués selon leur nature: valeurs fonctionnelles consignées, scénarios, calculs de dimensionnement ou projections économiques.

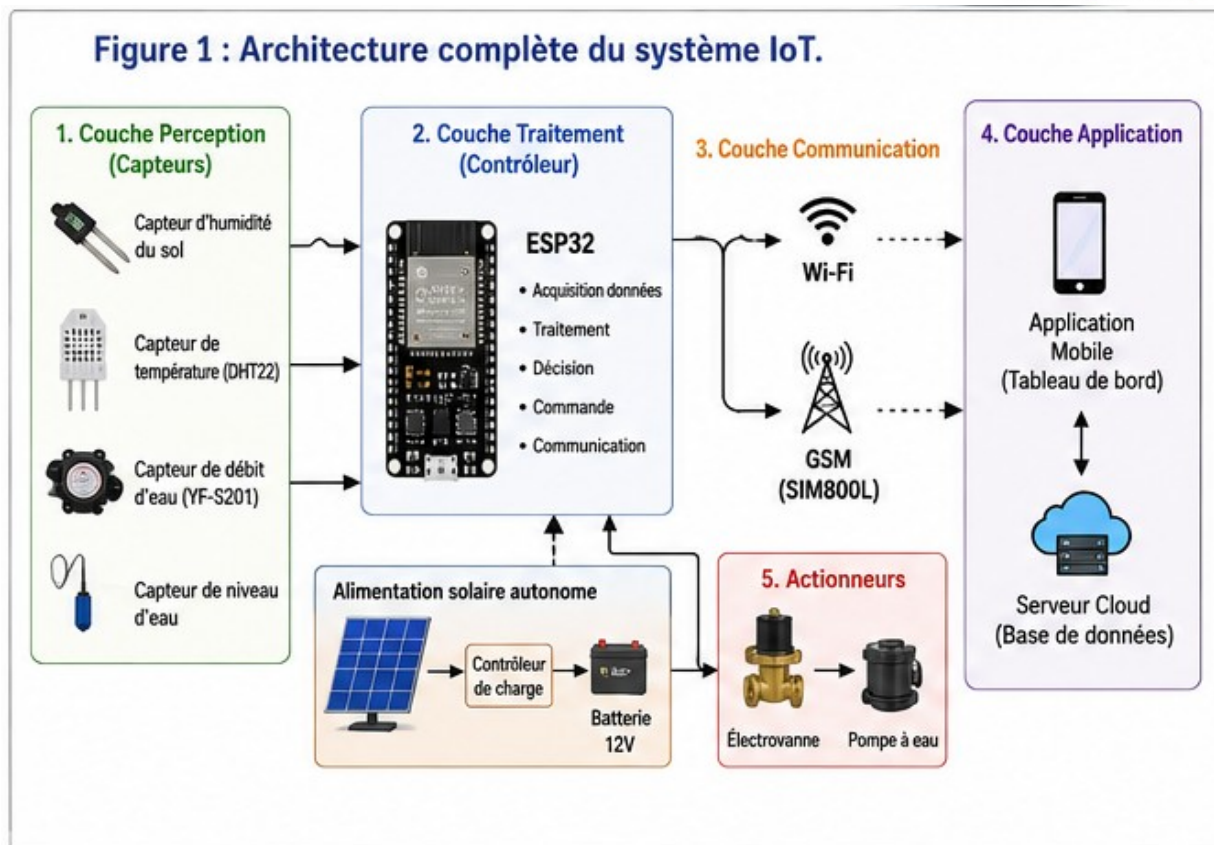
Tableau 1. Statut scientifique des principales données utilisées dans l'étude

Élément	Statut	Interprétation autorisée
120 cycles sur 30 jours	Consigné dans les tableaux de synthèse du pilote	Performance fonctionnelle agrégée ; journaux bruts perdus après la phase pilote
Latences par étape	Rapporté comme mesuré lors des essais fonctionnels	Réactivité électronique selon les synthèses disponibles
Volumes par culture	Scénarisé	Comparaison de référence, sans inférence agronomique
Production PV, marge et autonomie	Calculé	Dimensionnement sous hypothèses explicites
Économies annuelles et amortissement	Projeté	Scénario économique, à confirmer par comptabilité réelle
Résilience climatique / sécurité alimentaire	Non mesuré	Perspective de recherche, pas un résultat de l'étude

Source: auteurs, clarification méthodologique à partir du protocole pilote.

3.3 Architecture matérielle et logicielle

Le montage documenté est organisé autour d'un ESP32 DevKit V1. Deux capteurs capacitifs suivent l'état hydrique du sol; un DS18B20 mesure la température; un YF-S201 mesure le débit et un capteur distinct suit le niveau d'eau. L'actionnement repose sur un relais et une électrovanne 12 V. Le Wi-Fi de l'ESP32 assure la communication principale et un module GSM/GPRS fournit une voie de secours. Le modèle exact de ce module n'a pas pu être confirmé. Aucune pompe n'est incluse dans l'architecture évaluée, car le système de pompage n'a pas été documenté comme composant du prototype testé.



Architecture fonctionnelle documentée du prototype IoT

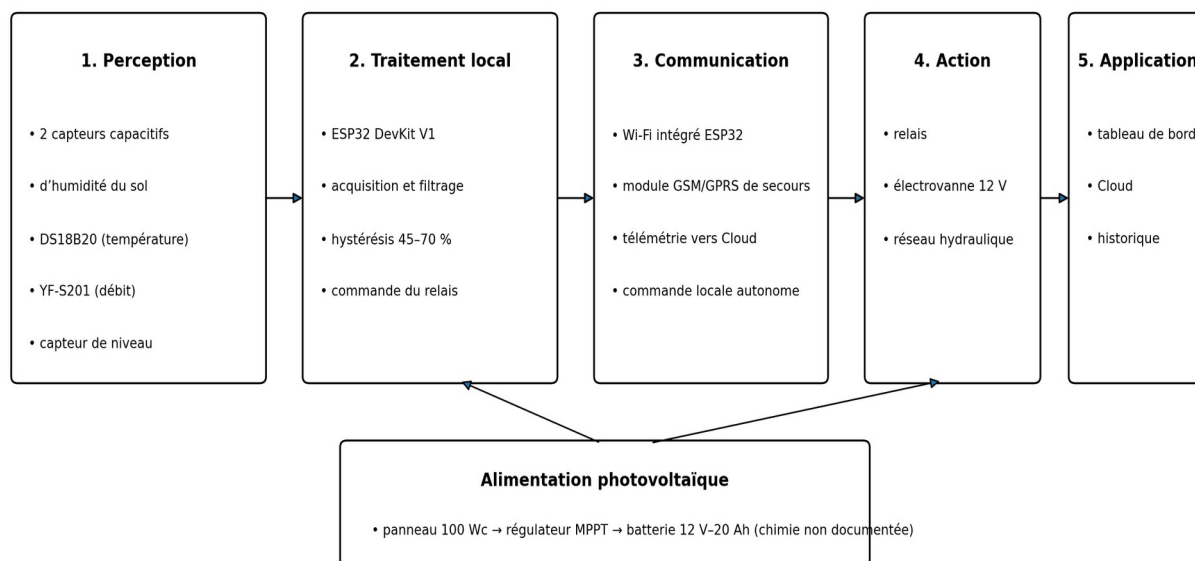


Figure 1. Architecture fonctionnelle

Source: auteurs.

Tableau 2. Principaux composants du prototype et fonction associée

Composant	Fonction principale	Coût estimé (USD)
ESP32 DevKit V1	Traitement local, décision et Wi-Fi intégré	10
2 capteurs d'humidité capacitifs	Mesure relative de l'état hydrique du sol	16
DS18B20	Mesure de la température	6

Composant	Fonction principale	Coût estimé (USD)
YF-S201 + capteur de niveau	Débit distribué et stock d'eau	27
Module GSM/GPRS de secours	Télémétrie de secours ; modèle exact non confirmé dans les archives disponibles	18
Relais + électrovanne 12 V	Commande locale de l'irrigation	25
Panneau 100 Wc + batterie 12 V-20 Ah + MPPT	Alimentation et stockage	160
Tuyauterie, boîtier, câblage et installation	Distribution, protection et montage	138

Source: données économiques du prototype. Total estimé: 400 USD.

3.4 Logique de décision et interprétation du pourcentage d'humidité

La logique de commande consignée dans le protocole est fondée sur une lecture périodique de l'humidité du sol, de la température, du niveau d'eau et du débit. Lorsque l'indice relatif d'humidité descend sous 45 %, l'électrovanne s'ouvre, à condition que le niveau du réservoir reste supérieur à 20 %. Elle se ferme lorsque l'indice atteint 70 %. Les capteurs sont lus toutes les 60 secondes et la télémétrie est programmée toutes les cinq minutes.

Les seuils de 45 % et 70 % correspondent à l'échelle relative utilisée par le système de commande. Ils ne doivent pas être interprétés comme une teneur en eau volumique du sol. Aucune calibration gravimétrique spécifique à la parcelle n'a été retrouvée dans les archives de l'essai. Ces valeurs sont donc considérées comme des paramètres techniques du pilote. Une validation agronomique devra relier le signal du capteur aux propriétés du sol et définir des seuils adaptés à chaque culture, à la profondeur racinaire et au stade phénologique.

Tableau 3. Paramètres de commande et d'acquisition du pilote

Paramètre	Valeur	Interprétation / action
Indice relatif d'humidité – seuil bas	45 %	Ouverture de l'électrovanne
Indice relatif d'humidité – seuil haut	70 %	Fermeture de l'électrovanne
Niveau minimal du réservoir	20 %	Arrêt de sécurité et alerte
Niveau critique de la batterie	20 %	Alerte de maintenance
Intervalle d'acquisition	60 s	Nouvelle lecture des capteurs
Intervalle de télémétrie	5 min	Synchronisation programmée vers le Cloud

Source: paramètres de commande consignés dans le protocole pilote.

3.5 Dimensionnement photovoltaïque et budget énergétique

Le dimensionnement photovoltaïque repose sur trois éléments: la puissance du panneau, le nombre d'heures solaires de pointe et un rendement global de conversion. La charge journalière retenue est de 42,4 Wh/jour. Le relevé détaillé des puissances et des cycles de service de chaque composant n'ayant pas été conservé, cette valeur est traitée comme une charge agrégée de dimensionnement plutôt que comme une mesure électrique vérifiable composant par composant.

$$E_{\text{cons}} = \Sigma(P_i \times t_i) = 42,4 \text{ Wh/jour (valeur agrégée de dimensionnement)} \quad (1)$$

$$E_{\text{prod}} = P_{\text{pv}} \times \text{HSP} \times \eta = 100 \times 5 \times 0,80 = 400 \text{ Wh/jour} \quad (2)$$

$$E_{\text{batt,utile}} = 12 \times 20 \times 0,80 = 192 \text{ Wh} ; \text{ Autonomie} = 192 / 42,4 = 4,53 \text{ jours} \quad (3)$$

Pour le calcul d'autonomie, 80 % de la capacité nominale de la batterie ont été considérés comme utilisables. La chimie de la batterie n'a pas pu être confirmée dans les archives disponibles; ce facteur doit donc être compris comme une hypothèse de dimensionnement et non comme une recommandation de profondeur de décharge. À titre indicatif, une fraction utilisable de 50 %

ramènerait l'autonomie théorique à environ 2,83 jours, contre 4,53 jours avec l'hypothèse de 80 %.

Tableau 4. Traçabilité du bilan énergétique

Indicateur	Valeur	Statut / hypothèse
Panneau photovoltaïque	100 Wc	Caractéristique du prototype
Heures solaires de pointe	5 h/jour	Hypothèse de dimensionnement
Rendement global	0,80	Hypothèse de calcul
Production journalière	400 Wh/jour	Calculée
Charge journalière	42,4 Wh/jour	Valeur agrégée de dimensionnement
Énergie batterie utile	192 Wh	Calculée sous hypothèse de 80 % utilisable ; chimie de batterie non confirmée
Autonomie théorique	4,53 jours	4,53 j à 80 % utilisable ; 2,83 j à 50 % utilisable

Source: calculs de dimensionnement du pilote.

3.6 Indicateurs fonctionnels et stratégie d'analyse

Trois temps doivent être distingués. La latence locale post-acquisition correspond à l'acquisition, au traitement et à l'actionnement. La latence de télémétrie concerne uniquement l'envoi des données. Enfin, le délai opérationnel réel dépend aussi de l'intervalle de lecture fixé à 60 s. Ainsi, lorsqu'un seuil est franchi juste après une acquisition, l'action peut intervenir jusqu'à environ une minute plus tard, à laquelle s'ajoute la latence locale.

Le volume d'eau est estimé à partir du débit et du temps d'ouverture de l'électrovanne. Les valeurs associées aux quatre cultures sont des scénarios agrégés; elles ne constituent pas des répétitions expérimentales. Les tests t et l'ANOVA qui figuraient dans une version antérieure de l'analyse ne sont donc pas retenus ici, car les observations individuelles nécessaires à leur vérification ne sont plus disponibles. L'interprétation repose sur des statistiques descriptives et sur les écarts entre scénarios.

La fiabilité est examinée séparément pour la commande locale et pour la communication. Une perte de signal GSM n'est considérée comme un échec d'irrigation que si elle empêche l'action locale, ce qui n'est pas le cas dans l'architecture retenue. Le taux global de réussite des transmissions programmées toutes les cinq minutes ne peut pas être calculé, car le nombre total de paquets effectivement émis et reçus n'a pas été conservé.

Tableau 5. Conditions et dimensions de l'évaluation pilote

Paramètre	Valeur	Statut
Durée de l'évaluation	30 jours	Mesuré
Nombre de cycles	120	Consigné dans les tableaux de synthèse du pilote
Surface pilote	100 m ²	Déclaré dans le protocole

Paramètre	Valeur	Statut
Cultures	Maïs, haricot, tomate, pomme de terre	Scénarios hydriques
Température	24 ± 2 °C	Hypothèse/condition moyenne déclarée
Humidité relative	65–85 %	Hypothèse/condition déclarée
Heures solaires de pointe	5 h/jour	Hypothèse de dimensionnement
Réservoir	500 L	Caractéristique du prototype

Source: protocole pilote et tableaux de synthèse conservés.

3.7 Évaluation économique et analyse de sensibilité

L'analyse économique est volontairement présentée comme un scénario de faisabilité. L'investissement initial est estimé à 400 USD. Les économies annuelles brutes retenues dans le scénario de base sont de 270 USD: 110 USD pour l'eau, 65 USD pour l'énergie, 75 USD pour la main-d'œuvre et 20 USD pour la maintenance évitée. Les pièces permettant de reconstituer les prix unitaires et les temps de travail d'origine n'ont pas été conservées; ces montants sont donc des projections et non des économies observées sur une exploitation. La maintenance annuelle du prototype est estimée à 30 USD. Une analyse de sensibilité permet d'apprécier l'effet d'une variation des coûts et des économies attendues.

$$\text{Bénéfice net annuel} = \text{économies brutes} - \text{maintenance} \quad (4)$$

$$\text{Rendement net simple (\%)} = [(\text{économies brutes} - \text{maintenance}) / \text{investissement}] \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Amortissement simple} = \text{investissement} / \text{bénéfice net annuel} \quad (6)$$

Une analyse de sensibilité fait varier de ±20 % l'investissement et/ou les économies brutes afin d'illustrer l'incertitude du scénario économique.

4. Résultats

4.1 Latence locale, télémétrie et écarts de lecture

Les synthèses d'essai indiquent un temps moyen de 0,80 s pour l'acquisition, 0,30 s pour le traitement par l'ESP32 et 0,50 s pour l'activation de l'électrovanne. La latence locale post-acquisition est donc de 1,60 s. Lorsque la télémétrie est prise en compte, environ 2,00 s supplémentaires sont ajoutées, ce qui porte la chaîne étendue à 3,60 ± 0,16 s. Cette dernière valeur ne représente pas le temps de commande locale. Avec une lecture toutes les 60 s, le délai entre le franchissement réel d'un seuil et l'action peut, dans le cas le plus défavorable, approcher 61,6 s.

Les écarts moyens consignés dans les tableaux de synthèse sont de + 0,40 point pour l'indice d'humidité, +0,60 °C pour la température, +0,30 cm pour le niveau d'eau et +0,20 L/min pour le débit. En l'absence du protocole métrologique complet et des journaux bruts, ces valeurs sont interprétées comme des différences de lecture observées pendant le pilote, et non comme une certification de précision des capteurs.

Tableau 6. Décomposition de la latence mesurée

Étape	Temps moyen ± écart-type (s)	Rôle dans la réponse
Acquisition des capteurs	0,80 ± 0,05	Local
Traitement ESP32	0,30 ± 0,02	Local
Activation électrovanne	0,50 ± 0,04	Local
Sous-total local post-acquisition	1,60	Commande locale

Étape	Temps moyen ± écart-type (s)	Rôle dans la réponse
Communication Wi-Fi/GSM	2,00 ± 0,12	Télémétrie
Chaîne étendue	3,60 ± 0,16	Local + communication

Source: données fonctionnelles du prototype; sous-total local calculé à partir des moyennes.

4.2 Scénarios de consommation d'eau

Les scénarios comparatifs donnent un volume journalier moyen de 111,8 L/jour pour la référence manuelle et de 89,8 L/jour pour le scénario IoT, soit une économie potentielle moyenne de 19,6 %. Par culture, les écarts correspondent à 20,0 % pour le maïs, 18,8 % pour le haricot, 21,2 % pour la tomate et 18,2 % pour la pomme de terre. Ces valeurs illustrent ce que peut apporter l'arrêt automatique de l'irrigation lorsque le seuil supérieur est atteint; elles ne représentent pas quatre essais agronomiques indépendants.

Tableau 7. Scénarios comparatifs de consommation d'eau par culture

Culture	Référence manuelle (L/jour)	Scénario IoT (L/jour)	Économie potentielle (%)
Maïs	120,0	96,0	20,0
Haricot	85,0	69,0	18,8
Tomate	132,0	104,0	21,2
Pomme de terre	110,0	90,0	18,2
Moyenne	111,8	89,8	19,6

Source: scénarios hydriques du pilote. Les valeurs sont descriptives et ne font pas l'objet d'une inférence statistique.

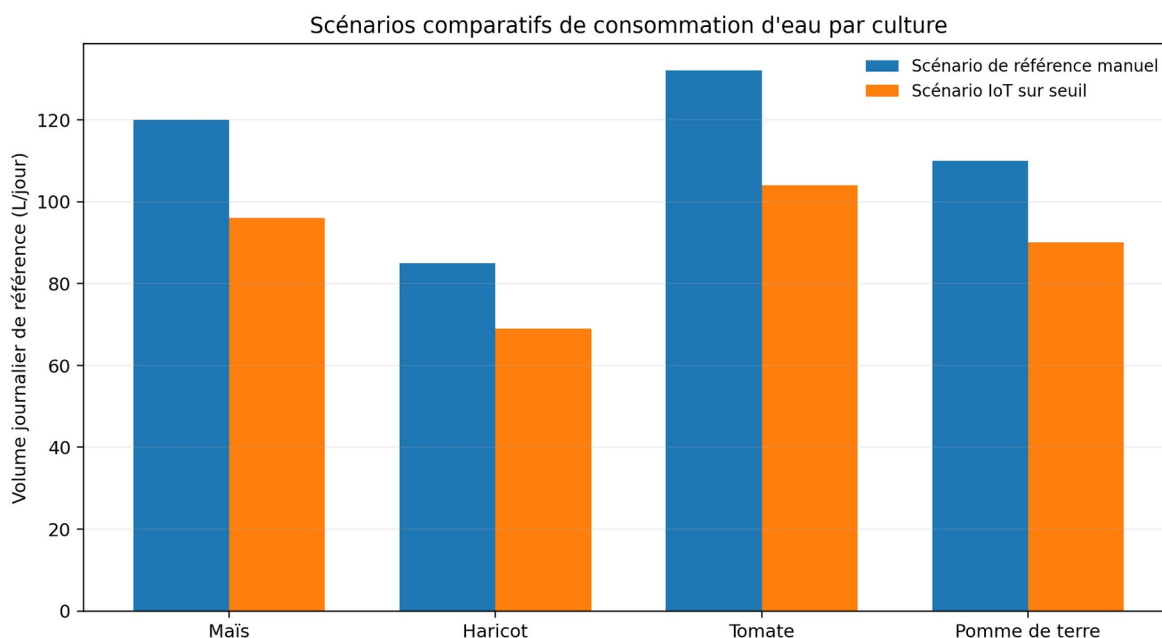


Figure 2. Scénarios comparatifs de consommation d'eau.

Source: auteurs, à partir des valeurs scénarisées du Tableau 7.

4.3 Performance énergétique calculée

Avec les hypothèses retenues, un panneau de 100 Wc, cinq heures solaires de pointe et un rendement global de 0,80 conduisent à une production calculée de 400 Wh/jour. La charge agrégée de 42,4 Wh/jour représente environ 10,6 % de cette production, laissant une marge théorique de 357,6

Wh/jour. L'autonomie calculée est de 4,53 jours avec 192 Wh considérés comme utilisables dans la batterie. Cette marge est favorable à la continuité de service, mais elle suggère aussi qu'un dimensionnement plus fin pourrait réduire le coût du système.

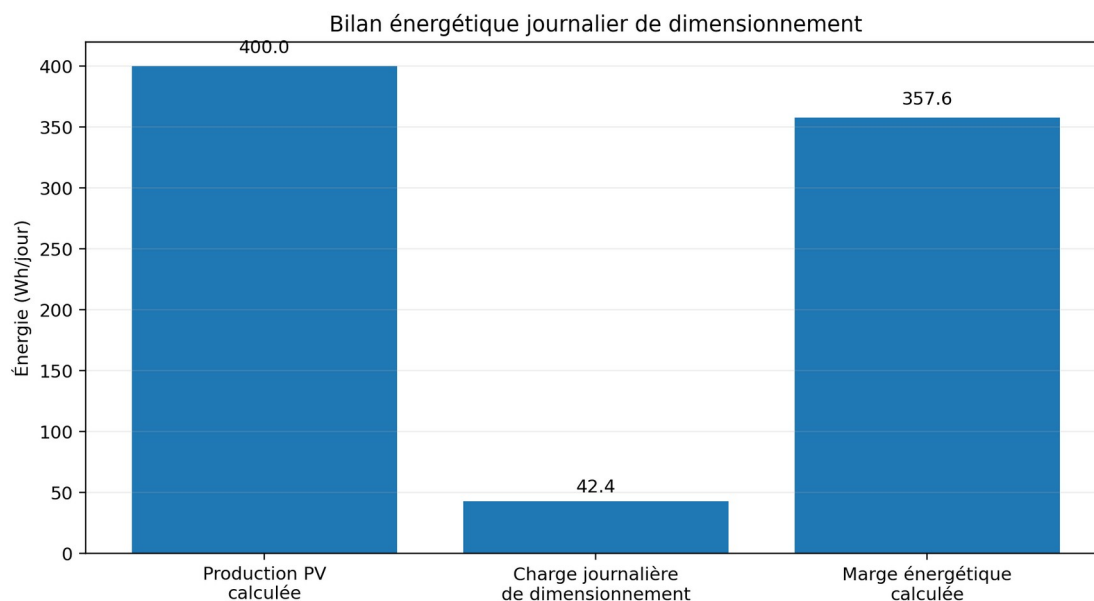


Figure 3. Bilan énergétique journalier de dimensionnement.

Source: calculs à partir des hypothèses du Tableau 4.

4.4 Fiabilité de commande et incidents de communication

D'après les tableaux de synthèse conservés, les 120 cycles programmés ont été exécutés par la commande locale. Deux pertes momentanées de signal GSM ont été signalées sans interruption de l'irrigation. La disponibilité globale consignée est de 717 h sur 720 h, soit 99,58 %. Ces éléments décrivent le comportement général du pilote, mais ils ne peuvent plus être réaudités cycle par cycle puisque les journaux bruts ont été perdus. Le taux global de réussite des transmissions toutes les cinq minutes ne peut pas être établi.

Tableau 8. Indicateurs de fiabilité clarifiés

Indicateur	Résultat	Interprétation
Cycles d'irrigation exécutés localement	120/120 (100 %) consignés	Exécution locale rapportée dans les synthèses ; journaux bruts perdus après le pilote
Cycles sans incident de communication signalé	118/120 (98,33 %)	Indicateur associé aux cycles, pas à toutes les télémetries

Indicateur	Résultat	Interprétation
Incidents réseau	2	Pertes momentanées de signal GSM
Disponibilité globale enregistrée	717/720 h (99,58 %)	Indicateur pilote à distinguer de la commande locale
Intervalle moyen entre incidents réseau	≈ 360 h	Calcul indicatif : 720 h / 2 incidents
Réussite globale des transmissions 5 min	Non déterminable	Nombre total de paquets émis/reçus non documenté

Source: données fonctionnelles réinterprétées selon la distinction commande/télémétrie.

4.5 Évaluation économique projetée et sensibilité

Dans le scénario de base, l'investissement initial s'élève à 400 USD, les économies brutes annuelles projetées à 270 USD et la maintenance à 30 USD/an. Le bénéfice net théorique est donc de 240 USD/an, ce qui correspond à un rendement simple de 60 % et à un amortissement d'environ 1,67 an, soit près de 20 mois. Ces résultats décrivent un scénario de faisabilité et non une performance financière observée sur une exploitation agricole.

Tableau 9. Scénario économique de base

Indicateur	Valeur	Statut
Investissement initial	400 USD	Estimation du prototype
Économies annuelles brutes	270 USD/an	Projection
Maintenance annuelle	30 USD/an	Estimation
Bénéfice net annuel	240 USD/an	Calculé
Économies brutes / investissement	67,5 %	Calculé
Rendement net simple	60,0 %	Calculé
Amortissement simple net	1,67 an (~20 mois)	Calculé

Source: scénario économique du pilote.

Tableau 10. Analyse de sensibilité de la période d'amortissement

Scénario	Investissement	Économies brutes	Bénéfice net annuel	Amortissement
Pessimiste : coût +20 %, économies -20 %	480 USD	216 USD/an	186 USD/an	2,58 ans
Économies -20 %	400 USD	216 USD/an	186 USD/an	2,15 ans
Base	400 USD	270 USD/an	240 USD/an	1,67 an
Économies +20 %	400 USD	324 USD/an	294 USD/an	1,36 an
Optimiste : coût -20 %, économies +20 %	320 USD	324 USD/an	294 USD/an	1,09 an

Source: calculs de sensibilité autour du scénario de base, maintenance maintenue à 30 USD/an.

5. Discussion

Le premier enseignement du pilote concerne la commande locale. Une latence post-acquisition de 1,60 s est courte au regard des variations de l'humidité du sol et confirme l'intérêt d'exécuter la décision directement sur l'ESP32 plutôt que d'attendre une réponse du Cloud. La communication peut ainsi être réservée à la supervision. En pratique, le délai le plus important vient surtout de l'intervalle d'échantillonnage de 60 s, qui devra être ajusté lors de futurs essais en fonction du compromis recherché entre réactivité et consommation énergétique.

Les scénarios hydriques conduisent à une économie potentielle moyenne de 19,6 %. Cette valeur se situe dans la logique des systèmes d'irrigation pilotés par l'état du sol, dont l'objectif est d'éviter les apports systématiques lorsque la réserve hydrique reste suffisante (Obaideen et al., 2022). Les travaux de Camporese et al. (2021) sur le maïs et de Seyar et Ahamed (2023) sur la tomate montrent l'intérêt de cette approche lorsqu'elle est correctement calibrée. La comparaison doit néanmoins rester mesurée : dans la présente étude, les valeurs par culture proviennent de scénarios et ne sont pas associées à des rendements mesurés ni à une efficience de l'eau exprimée en kg/m³.

La question de la calibration est probablement la principale limite technique du pilote. Un seuil exprimé en pourcentage sur un capteur capacitif n'a de sens agronomique que s'il est relié à la teneur réelle en eau du sol et à des repères tels que la capacité au champ ou le point de flétrissement. Les seuils 45–70 % utilisés ici ne peuvent donc pas être généralisés. Une prochaine expérimentation devra documenter la texture du sol, la profondeur d'installation et établir une courbe de calibration avant de définir des seuils propres à chaque culture.

Le bilan énergétique est, lui aussi, encourageant mais doit être interprété avec prudence. La charge agrégée de 42,4 Wh/jour ne représente qu'environ 10,6 % de la production photovoltaïque calculée. Cette marge peut sécuriser le fonctionnement lors de journées moins favorables, mais elle peut aussi traduire un surdimensionnement. Une future campagne devrait mesurer directement le courant, la tension et l'énergie consommée par chaque sous-système. La chimie de la batterie devra également être documentée et, si une pompe est intégrée, sa consommation devra être comptabilisée séparément.

Les incidents de communication mettent en évidence un autre point important: dans une architecture Edge, une perte de réseau n'implique pas nécessairement une interruption du service. Les deux incidents GSM consignés n'ont pas empêché la commande locale de fonctionner. En revanche, les données conservées ne permettent pas d'évaluer la qualité de la télémétrie sur l'ensemble des transmissions prévues. Un protocole ultérieur devrait donc enregistrer automatiquement chaque paquet, son horodatage et son état de réception.

Sur le plan économique, l'amortissement de 1,67 an obtenu dans le scénario de base paraît attractif, mais il dépend directement d'hypothèses qui n'ont pas pu être reconstituées à partir de pièces comptables. L'analyse de sensibilité, qui situe l'amortissement entre 1,09 et 2,58 ans, donne une image plus réaliste de cette incertitude. Avant toute recommandation aux producteurs, il faudra relever localement les prix, mesurer le temps de travail réellement économisé et quantifier les coûts d'eau et d'énergie évités. Pour une petite exploitation, un investissement de 400 USD peut rester élevé; une utilisation partagée au niveau d'une coopérative constitue une piste possible, mais elle mérite une évaluation socio-économique propre (Klerkx et al., 2019; Rose et al., 2021).

Le prototype apporte ainsi une première lecture du Nexus Eau–Énergie–Alimentation à l'échelle technique: il relie une décision d'irrigation fondée sur l'état du sol à une alimentation photovoltaïque et à une supervision numérique. Il serait toutefois excessif d'en déduire, à ce stade, un effet sur la sécurité alimentaire ou la résilience climatique. Ces dimensions supposent des mesures de rendement, de stabilité de production, de revenu et d'adoption sur plusieurs saisons. Les travaux conduits au Sud-Kivu montrent d'ailleurs que l'efficacité des pratiques climato-intelligentes dépend fortement du contexte agroécologique et des capacités des producteurs à les maintenir dans le temps (Chuma et al., 2025).

6. Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer, à l'échelle pilote, une architecture d'irrigation intelligente associant ESP32, capteurs environnementaux, commande locale, communication Wi-Fi/GSM et alimentation photovoltaïque. Les données disponibles montrent une latence locale post-acquisition de 1,60 s; la chaîne incluant la télémétrie atteint $3,60 \pm 0,16$ s. Les scénarios hydriques indiquent une économie potentielle moyenne de 19,6 %, sans constituer pour autant une mesure agronomique directe sur les quatre cultures considérées.

Le dimensionnement photovoltaïque conduit à une production calculée de 400 Wh/jour pour une charge agrégée de 42,4 Wh/jour. L'autonomie théorique est de 4,53 jours avec l'hypothèse de 80 % d'énergie batterie utilisable. Les synthèses conservées indiquent que les 120 cycles programmés ont

été exécutés localement et que deux incidents GSM n'ont pas interrompu l'irrigation. Le scénario économique de base donne un amortissement de 1,67 an, avec une plage de 1,09 à 2,58 ans lorsque les principales hypothèses varient.

Le prototype constitue ainsi une base technique intéressante pour poursuivre les travaux sur l'irrigation de précision à Kabare. Les résultats ne permettent pas encore d'affirmer un gain de rendement, une amélioration de la sécurité alimentaire ou un renforcement de la résilience climatique. Une validation multi-saison, avec données brutes archivées, calibration des capteurs et coûts réellement observés, est nécessaire avant d'envisager une diffusion à plus grande échelle.

Références bibliographiques

- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., Domun, Y., & Norton, T. (2018). Dynamic neural network modelling of soil moisture content for predictive irrigation scheduling. *Sensors*, 18(10), 3408. <https://doi.org/10.3390/s18103408>
- Al-Ali, A. R., Rehman, S., Al-Agili, S., Al-Omari, M. H., & Al-Fayezi, M. (2001). Usage of photovoltaics in an automated irrigation system. *Renewable Energy*, 23(1), 17–26. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00110-5)
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376.
- Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E. H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access*, 7, 129551–129583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>
- Balume Kayani, I., Agumas, B., Musyoki, M., Nziguheba, G., Marohn, C., Benz, M., Vanlauwe, B., Cadisch, G., & Rasche, F. (2021). Market access and resource endowment define the soil fertility status of smallholder farming systems of South-Kivu, DR Congo. *Soil Use and Management*, 37(2), 353–366. <https://doi.org/10.1111/sum.12691>
- Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J. M. A., Horsley, J., Pauli, N., et al. (2015). Sustainable development and the Water–Energy–Food Nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 54, 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>
- Camporese, M., Gumiere, S. J., Putti, M., & Botter, G. (2021). Efficient irrigation of maize through soil moisture monitoring and modeling. *Frontiers in Water*, 3, 627551. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.627551>
- Chuma Basimine, G., Mondo, J. M., Ndeko, A. B., Bagula, E. M., Lucungu, P. B., Bora, S. F., Karume, K., Mushagalusa, G. N., Schmitz, S., & Biolders, C. L. (2022). Farmers' knowledge and practices of soil conservation techniques in smallholder farming systems of Northern Kabare, East of D.R. Congo. *Environmental Challenges*, 7, 100516. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100516>
- Chuma, G. B., Kisombola, L., Mondo, J. M., Muliri, B., Majaliwa, J.-G. M., Kahindo, C., & Karume, K. (2025). Climate-smart agronomic practices and their appraisal among smallholder sorghum farmers in eastern Democratic Republic of Congo wetlands. *Sustainable Futures*, 9, 100606. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100606>
- FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2021). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Systems at breaking point*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2022). *The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>

- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
- Hoff, H. (2011). Understanding the Nexus: Background paper for the Bonn 2011 Conference—The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Mohammed Wazed, S., Hughes, B. R., O'Connor, D., & Kaiser Calautit, J. (2018). A review of sustainable solar irrigation systems for Sub-Saharan Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1206–1225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.039>
- Obaideen, K., Yousef, B. A. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>
- Rasul, G., & Sharma, B. (2016). The nexus approach to water–energy–food security: An option for adaptation to climate change. *Climate Policy*, 16(6), 682–702.
- Raza, F., Tamoor, M., Miran, S., Arif, W., Kiren, T., Amjad, W., et al. (2022). The socio-economic impact of using photovoltaic energy for high-efficiency irrigation systems: A case study. *Energies*, 15(3), 1198. <https://doi.org/10.3390/en15031198>
- Rose, D. C., Wheeler, R., Winter, M., Lobley, M., & Chivers, C.-A. (2021). Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*, 100, 104933. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104933>
- Seyar, M. H., & Ahamed, T. (2023). Development of an IoT-based precision irrigation system for tomato production from indoor seedling germination to outdoor field production. *Applied Sciences*, 13(9), 5556. <https://doi.org/10.3390/app13095556>
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in smart farming: A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Zamora-Izquierdo, M. A., Santa, J., Martínez, J. A., Martínez, V., & Skarmeta, A. F. (2019). Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. *Future Generation Computer Systems*, 99, 285–298.