



L'internet des objets dans l'agriculture marocaine, entre potentiel d'efficacité et défis d'adoption : Etude qualitative exploratoire

Ouiame Harmak

Doctorante chercheuse, Laboratoire des Sciences Economiques et Politiques Publiques (LSEPP),

Faculté d'Economie et de Gestion (FEG) -Université Ibn Tofail –Kénitra

Hassan El Aissaoui

Professeur de l'enseignement supérieur, Laboratoire des Sciences Economiques et Politiques Publiques (LSEPP),

Faculté d'Economie et de Gestion (FEG) -Université Ibn Tofail –Kénitra

Résumé: Cette étude analyse l'adoption de l'Internet des objets (IoT) dans le secteur agricole marocain. Bien que ces technologies présentent un fort potentiel pour améliorer l'efficacité des ressources, accroître la productivité et répondre aux défis liés à la sécurité alimentaire et hydrique, leur adoption demeure encore limitée au Maroc.

Cet article analyse de manière pertinente l'adoption de l'Internet des objets dans le secteur agricole au Maroc. Les résultats mettent en évidence les motivations et les principaux freins à son développement. Pour ce faire, une approche qualitative exploratoire a été adoptée, fondée sur des entretiens semi-directifs menés auprès d'agriculteurs marocains ayant intégré des dispositifs de l'IoT dans leurs exploitations.

Les résultats montrent que l'adoption est principalement motivée, d'une part, par la recherche d'une prise de décision plus proactive et d'une meilleure optimisation des intrants et, d'autre part, par la recherche de l'optimisation des coûts et l'amélioration de la rentabilité. Toutefois, le coût élevé des équipements, le manque de soutien institutionnel, la complexité de gestion des données et l'insuffisance des services d'accompagnement technique constituent des freins majeurs pour une adoption à grand échelle.

Mots clés: Agriculture intelligente; internet des objets; Adoption technologique; Agriculture marocaine.

Abstract: This paper examines the adoption of Internet of Things (IoT) technologies in the Moroccan agricultural sector. Although these technologies offer strong potential to improve resource efficiency, increase productivity, and address challenges related to food and water security, their adoption in Morocco remains limited.

The objective of this research is to identify the main factors motivating farmers to adopt IoT technologies, to understand the impacts of this adoption on their agricultural practices, and to highlight the key barriers limiting their wider diffusion. To achieve this, an exploratory qualitative approach was employed, based on semi-structured interviews conducted with Moroccan farmers who have integrated IoT solutions into their farms.

The results indicate that adoption is mainly driven, on the one hand, by the desire to make decision-making more proactive and to improve the optimization of inputs, and on the other hand, by the aim of reducing costs and increasing profitability. However, the high cost of equipment, the lack of institutional support, the complexity of data management, and the insufficient availability of technical support services constitute major barriers to large-scale adoption.

Keywords: Smart Farming; Internet of Things (IoT); Technology Adoption; Moroccan Agriculture.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.19115696>

1 Introduction

À l'échelle mondiale, le changement climatique se fait déjà ressentir dans l'agriculture. Les changements de température et de régimes de précipitations, les événements météorologiques extrêmes observés, affectent directement les rendements, la qualité des sols et la disponibilité des ressources en eau et auront forcément un impact négatif sur la productivité agricole, la sécurité alimentaire et le bien-être humain en général (Nelson et al, 2009). Ces impacts sont particulièrement marqués dans les régions arides et semi-arides, où les systèmes agricoles dépendent fortement des conditions climatiques et le Maroc n'échappe pas à cette réalité. Selon les projections, les températures pourraient augmenter de 1,3 °C d'ici 2050 et atteindre 2,3 °C à l'horizon 2090, tandis que les précipitations devraient diminuer d'environ 11 % en 2050 et 16 % en 2090 par rapport à la période 2001-2010 (Balaghi et al, 2017). Ces changements ont un impact direct sur le cycle de développement des cultures et sur la disponibilité en eau.

À ces contraintes climatiques s'ajoutent les effets des pratiques agricoles intensives, telles que le labour profond, la mécanisation excessive et l'usage important d'intrants chimiques, contribuent à la dégradation des sols et à la désertification au Maroc, réduisant ainsi la productivité agricole (Moussadek, 2012). Parallèlement, l'agriculture irriguée, qui consomme environ 88 % des ressources en eau nationales, accentue la surexploitation des nappes phréatiques, aggravée par la baisse des précipitations, ce qui renforce le stress hydrique et menace la durabilité du secteur (World Bank, 2022).

Dans ce contexte, l'agriculture marocaine se trouve à un tournant critique, où la combinaison du changement climatique et des pratiques intensives fragilise les ressources naturelles indispensables à la production. Cette situation met en évidence l'urgence d'une transition vers des modèles agricoles plus durables et plus efficaces.

L'agriculture intelligente, fondée notamment sur l'Internet des objets (IoT), apparaît comme une solution prometteuse pour améliorer la productivité tout en optimisant l'utilisation des ressources naturelles assurant la sécurité alimentaire et la durabilité (Duguma & Bai, 2025; Wolfert et al, 2017). Cependant, malgré son potentiel technologique, économique et environnemental, le niveau d'adoption des technologies IoT dans le secteur agricole marocain demeure relativement limité. Ce constat soulève une question centrale : quels sont les facteurs qui motivent ou freinent l'adoption des technologies de l'Internet des objets par les agriculteurs marocains, et quels effets cette adoption produit-elle sur leurs pratiques agricoles ?

L'objectif de cet article est de comprendre la dynamique d'adoption des technologies IoT dans le contexte agricole marocain. Pour ce faire, nous proposons, dans un premier temps, une revue de la littérature retraçant l'évolution des pratiques agricoles, de l'agriculture traditionnelle à l'agriculture 4.0, tout en mettant en lumière le concept de l'internet des objets ses applications et son impact sur les pratiques agricoles. Dans un second temps, nous présentons la méthodologie de recherche adoptée. Enfin, nous discutons les résultats d'une étude qualitative menée auprès de sept chefs d'exploitation ayant intégré des solutions IoT, avant de conclure par des recommandations et des perspectives pour de futures recherches.

2 Revue de littérature

L'agriculture a connu une transformation progressive et à long terme depuis ses pratiques traditionnelles vers des systèmes de production modernes et numérisés (Himesh, 2018). L'Agriculture 1.0, couvrant la période pré-industrielle, reposait sur l'effort manuel et la force animale, avec des outils simple tels que la charrue et la faucille, et des systèmes d'irrigation basiques (Tekinerdogan, 2018). La production était à petite échelle, principalement destinée à l'autoconsommation (Zhai et al, 2020). La seconde phase, Agriculture 2.0, introduit à la fin du 19e siècle, correspond à la mécanisation avec tracteurs, machines à vapeur et moissonneuses, ainsi qu'à l'usage d'engrais chimiques pour augmenter les rendements. Cette intensification agricole a permis d'accroître la production et de satisfaire la demande croissante, mais a entraîné des impacts environnementaux significatifs, tels que la contamination des sols, la surexploitation des nappes phréatiques et la surconsommation d'énergie.

Au milieu du XX^e siècle, l'Agriculture 3.0, également appelée agriculture de précision a émergé grâce aux technologies de l'information et de la communication (TIC). Cette phase repose sur la collecte et l'analyse de données à l'échelle des parcelles pour ajuster les intrants et optimiser les rendements, introduisant une gestion plus fine et localisée des cultures. Aujourd'hui, l'Agriculture 4.0 ou « Smart Farming », considérée comme une évolution de l'agriculture de précision, marquée par l'introduction des technologies de pointes telles que l'Internet des objets (IoT), le big data, les capteurs, les drones et l'intelligence artificielle pour créer des systèmes agricoles cyber-physiques capables de générer, traiter et exploiter des données agronomiques, météorologiques, logistiques et économiques (Wolfert et al., 2017 ; Lioutas et al., 2019). Cette révolution technologique permet non seulement de surveiller et d'optimiser la production en temps réel, mais également de soutenir des décisions stratégiques et opérationnelles adaptées aux conditions locales et aux aléas climatiques.

L'IoT, Introduit à la fin des années 1990 par Kevin Ashton et défini comme un réseau d'objets physiques interconnectés capables de collecter, transmettre et exploiter des données de manière autonome, constitue aujourd'hui un pilier central de l'agriculture intelligente (Moeti et al., 2024 ; Gocheva et al, 2021). L'intérêt de l'IoT réside principalement dans sa capacité à fournir des informations en temps réel, favorisant une prise de décision plus éclairée et plus proactive (Farooq et al, 2019). Ses applications en agriculture incluent la

surveillance des sols et des cultures, la gestion intelligente de l'irrigation, le suivi de la santé animale, la détection précoce des maladies et la gestion des intrants (Farooq et al, 2020 ; Ayaz et al, 2019). Des études empiriques montrent que l'adoption de capteurs IoT améliore significativement l'efficacité des pratiques agricoles, en particulier dans la gestion de l'eau. Les capteurs IoT contribuent à diminuer la consommation d'eau 30 à 50 % grâce à des systèmes d'irrigation automatisés, tout en maintenant des conditions optimales pour la croissance des cultures (Gupta et al., 2025 ; Jain et al., 2023 ; Mori & Geweely, 2023). Ils contribuent également à diminuer l'usage des engrais et des pesticides, La surveillance continue des paramètres pédologiques, tels que le pH et les nutriments NPK, permet d'ajuster plus finement les apports en engrais et de réduire leur usage d'environ 30 %, sans effet négatif sur les rendements (Ritik & Kamlesh., 2024). Par ailleurs, les résultats d'expérimentations menées dans des systèmes agricoles intensifs, notamment dans les cultures sous serre, montrent que l'utilisation de ces technologies a permis de réduire l'usage des pesticides jusqu'à 40 %, tout en maintenant, voire en augmentant, la productivité agricole (Bhavana et al., 2024).

Au-delà des impacts opérationnels et environnementaux, Les recherches récentes montrent que l'adoption des technologies de l'internet des objets apporte des bénéfices économiques significatifs. Les exploitations agricoles peuvent améliorer leur efficacité, réduire les coûts de production, optimiser la planification et stabiliser les rendements, ce qui se traduit par une augmentation de la marge brute et une meilleure gestion des risques climatiques (Wolfert et al., 2017 Farooq et al., 2020); Dans des études de cas menées en Europe et en Amérique du Nord, l'agriculture de précision basée sur l'IoT a permis d'améliorer la marge brute des exploitations de 10 % à 25 %, principalement grâce à une réduction des pertes et à une meilleure planification des opérations agricoles (Zhang et al., 2019 ; Lowenberg-DeBoer et Erickson, 2019). D'autres analyses soulignent que l'IoT favorise une meilleure gestion des risques économiques en agriculture, notamment en réduisant l'exposition aux aléas climatiques et aux fluctuations des rendements, ce qui renforce la stabilité des revenus agricoles à moyen terme (Antle et a., 2017 ; Klerkx et al, 2019).L'IoT contribue également à la modernisation des systèmes agricoles et à leur insertion dans des chaînes de valeur plus performantes, créant ainsi des opportunités économiques durables, en particulier pour les exploitations capables de combiner innovation technologique et organisationnelle (Rotz et al., 2019 ; Shepherd et al., 2020).

Cependant, malgré ces avantages largement reconnus, l'adoption des technologies IoT reste limitée. le coût initial d'investissement, souvent élevé, constitue l'un des principaux obstacles, notamment en raison de l'acquisition des capteurs, des équipements connectés et des infrastructures numériques nécessaires (Taheri, 2022 ; Cui et Wang, 2023 ; Yatribi, 2020). À cela s'ajoute le manque de compétences techniques, car l'utilisation efficace des systèmes IoT requiert des connaissances en installation, en maintenance et en interprétation des données, compétences qui ne sont pas toujours accessibles aux agriculteurs (Wolfert et al, 2017 ; Klerkx et al, 2019). Un autre défi majeur concerne l'insuffisance des infrastructures numériques en milieu rural. Dans de nombreuses régions agricoles, l'accès à une connexion Internet stable reste insuffisant, ce qui compromet le fonctionnement optimal des dispositifs IoT et limite leur capacité à fournir des données en temps réel (Taheri et al, 2022, Baumüller, 2017 ; Farooq et al, 2020). Ainsi, bien que la littérature mette en évidence les nombreux avantages techniques, économiques et organisationnels de l'IoT en agriculture, ainsi que les principaux obstacles à son adoption, ces analyses restent majoritairement fondées sur des études réalisées dans des contextes européens ou nord-américains. À notre connaissance, Jusqu'à présent aucune recherche n'a été conduite dans le contexte marocain. Il apparaît donc pertinent d'examiner comment ces dynamiques se

manifestent dans l'agriculture au Maroc. Dans ce qui suit, nous présentons la méthodologie de recherche adoptée, puis nous exposerons et discuterons les résultats de l'étude qualitative menée auprès d'agriculteurs marocains ayant intégré des technologies de l'internet des objets (IoT) dans leurs exploitations.

3 Méthodologie

La sélection d'une méthodologie de recherche appropriée est influencée par plusieurs facteurs, notamment la question de recherche, le niveau de contrôle du chercheur sur les événements étudiés et l'accent mis sur les événements actuels ou passés (Ghauri et al, 2020), cet étude se concentre sur l'adoption de l'IoT par les exploitations agricoles marocaines, qui est un processus actuel et en cours et que les événements comportementaux ne peuvent pas être contrôlés, une méthodologie de recherche qualitative exploratoire a été adoptée dans cette étude qui vise à découvrir de nouvelles perspectives, de nouveaux points de vue et à approfondir la compréhension d'un phénomène ou d'un sujet (Oates, 2006).

Dans cette étude, l'approche qualitative a été jugée pertinente car elle permettait d'explorer les significations, les perceptions et les facteurs contextuels qui ne pouvaient être appréhendés de manière adéquate par des mesures quantitatives. La recherche visait à recueillir des informations descriptives et riches auprès des agriculteurs adoptants de l'IoT.

Alignant ainsi la méthodologie sur la nature exploratoire de l'étude. L'analyse s'est fondée sur un échantillonnage raisonné pour sélectionner des participants de différentes zones géographiques possédant des connaissances pertinentes et adoptant des technologies de l'IoT. Cette stratégie d'échantillonnage a permis de garantir que les données reflètent des perspectives diverses tout en restant étroitement alignées sur les objectifs de la recherche.

Notre étude a débuté par une phase de prise de contact avec des experts en smart farming opérant dans le domaine de l'IoT agricole. Cette étape préliminaire a permis d'identifier des exploitations agricoles ayant déjà intégré des technologies IoT, ainsi que les agriculteurs concernés.

La sélection des participants s'est appuyée sur une méthode d'échantillonnage non probabiliste, plus précisément la technique de la « boule de neige ». Ce choix est cohérent avec le caractère exploratoire de la recherche et avec la difficulté d'identifier, de manière exhaustive, les exploitations agricoles utilisatrices de l'IoT. L'échantillon est ainsi composé de chefs d'exploitations et de responsables agronomes issus de grandes et très grandes exploitations agricoles, tous disposant d'une expérience significative dans l'adoption et l'utilisation des technologies IoT, ce qui confère une forte valeur informative à leurs témoignages.

Les données ont été recueillies au moyen d'entretiens semi-structurés. Ce mode de recueil a permis d'assurer une certaine homogénéité des thèmes abordés, tout en laissant aux participants la liberté d'exprimer leurs expériences, leurs perceptions et les enjeux spécifiques liés à l'adoption de l'IoT dans leurs pratiques agricoles. Les entretiens ont été conduits de manière conversationnelle afin de favoriser un climat de confiance et d'encourager des échanges approfondis.

En raison de la dispersion géographique des participants, répartis dans différentes régions du Maroc, les entretiens ont été réalisés soit en face à face, soit par téléphone, en fonction des préférences des participants, de leur disponibilité et des contraintes contextuelles. Le tableau ci-dessous présente un aperçu des individus interrogés et des entretiens menés.

Tableau : Synthèse de la population interviewée

Participants	Type de culture	Taille de l'exploitation	Technologie IoT adoptée	Durée de l'entretien
Participant A	Arboriculture fruitière	7 000 ha	Sondes capacitives couplés à l'IoT	45 min
Participant B	Arboriculture fruitière	4 500 ha	Sondes capacitives couplés à l'IoT	1h10 min
Participant C	Viticulture et arboriculture fruitière	6 000 ha	Capteurs d'humidité et capteurs NPK couplés à l'IoT	55 min
Participant D	Arboriculture fruitière	1 500 ha	Sondes capacitives couplés à l'IoT	50 min
Participant E	Viticultures	3 000 ha	Sondes capacitives couplés à l'IoT	1h00
Participant F	Arboriculture fruitière	5 600 ha	Sondes capacitives et capteurs NPK couplés à l'IoT	1h14 min
Participant G	Arboriculture fruitière	2 000 ha	Sondes capacitives couplés à l'IoT	45 min

Source: Auteurs

La collecte des données a été poursuivie jusqu'à atteindre la saturation thématique, c'est-à-dire jusqu'au moment où les nouveaux entretiens n'apportaient plus d'informations nouvelles ou utiles pour l'étude. Tous les entretiens ont été enregistrés avec le consentement des participants, puis entièrement transcrit, afin de garantir la fidélité et la qualité des données recueillies.

L'analyse des données a été réalisée à l'aide d'une analyse thématique. Elle a commencé par plusieurs lectures attentives des transcriptions, ce qui a permis de bien comprendre le contenu des discours des participants. Par la suite, un codage inductif a été effectué, en identifiant les idées importantes, les éléments qui revenaient souvent et les points jugés significatifs. Ces codes ont ensuite été comparés et regroupés progressivement, ce qui a conduit à l'identification de thèmes plus généraux reflétant les expériences et les perceptions partagées par les participants.

Cette analyse a permis de faire ressortir trois grands thèmes, qui seront développés dans la suite de ce travail :

- Thème 1: L'IoT dans l'agriculture : de la motivation à l'adoption par les exploitants agricoles ;
- Thème 2: L'IoT comme levier de transformation des pratiques agricoles : impacts et dynamiques de changement ;
- Thème 3: Freins et obstacles à la diffusion des technologies IoT dans le secteur agricole marocain.

Afin de garantir la rigueur scientifique de l'étude, plusieurs mesures méthodologiques ont été mises en place. L'analyse des données repose sur une attention approfondie portée aux discours des participants, permettant de saisir leurs expériences et perceptions. Une démarche réflexive a été adoptée tout au long du processus de recherche afin de limiter l'influence des biais du chercheur sur l'interprétation des résultats. Les considérations éthiques ont été strictement respectées: le consentement éclairé des participants a été obtenu, l'anonymat et la confidentialité des données ont été assurés, et la participation à l'étude était volontaire. L'approche qualitative permet de bien comprendre les obstacles techniques et économiques à une adoption à grande échelle.

Résultats et discussions

Les entretiens réalisés ont permis de recueillir des témoignages riches sur l'adoption des technologies IoT dans les exploitations agricoles. L'analyse des discours des participants met en évidence trois thèmes récurrents liés aux logiques et motivations d'adoption, aux effets observés sur les pratiques agricoles, ainsi qu'aux contraintes et défis rencontrés. Ces résultats sont analysés et discutés à la lumière des travaux antérieurs.

Thème 1 : L'IoT dans l'agriculture : de la motivation à l'adoption par les exploitants agricoles.

Les résultats de notre étude montrent que certaines caractéristiques propres aux exploitants et aux exploitations jouent un rôle important dans l'adoption des technologies IoT. La littérature confirme que la taille de l'exploitation, le type de culture et le niveau d'éducation influencent fortement l'adoption des innovations numériques en agriculture (Rogers, 2003 ; Aubert et al, 2012 ; Pierpaoli et al, 2013). Dans notre étude, les exploitants adoptants sont généralement mieux formés et engagés dans des cultures à forte valeur ajoutée, qui nécessitent un suivi précis et une gestion rigoureuse des ressources. « Quand on travaille sur des cultures sensibles, on ne peut plus se baser seulement sur l'expérience. Il faut des données précises pour décider » (Participant A). « (...) Sur ce type de cultures, la moindre erreur coûte cher. Les données, ça nous rassure et ça nous guide. » (Participant D) .L'adoption apparaît ainsi comme une réponse à des besoins concrets, à la fois économiques et organisationnels.

En revanche, l'âge des agriculteurs ne semble pas constituer un facteur déterminant. Ce résultat confirme les conclusions de plusieurs études montrant que, dans les exploitations agricoles de grande taille, les décisions technologiques ne dépendent pas uniquement de l'âge du chef d'exploitation, mais plutôt de la structure organisationnelle et de la présence de compétences techniques spécialisées (Barnes et al., 2019 ; Giua et al., 2022). Dans ce type d'exploitation, l'adoption des technologies IoT s'inscrit davantage dans une logique de gestion professionnelle que dans un choix individuel. Ce constat corrobore le travail de Giua et al. (2022), selon lequel l'adoption des technologies numériques en agriculture s'explique moins par l'âge du chef d'exploitation que par la manière dont l'exploitation est organisée et structurée.

L'amélioration de la prise de décision ressort comme l'une des principales motivations d'adoption des technologies IoT. Les agriculteurs interrogés soulignent que l'accès à des données fiables, précises et régulièrement mises à jour constitue la performance la plus attendue de l'utilisation de ces technologies. Ces informations leur permettent de mieux planifier les interventions agricoles et de réduire les incertitudes liées aux conditions climatiques et agronomiques. Ce constat est largement confirmé par la littérature, qui montre que les technologies IoT favorisent une agriculture plus précise, réactive et fondée sur les données (Wolfert et al, 2017; Kamilaris et al, 2017 ; Liakos et al, 2018).

Au-delà des perceptions exprimées par les agriculteurs interrogés, les motivations économiques apparaissent également comme un facteur central dans la décision d'adoption des technologies IoT. Plusieurs participants indiquent que leur décision d'adopter ces technologies a été principalement liée aux économies attendues, notamment à travers la réduction des intrants, une meilleure maîtrise de la consommation énergétique et l'optimisation des coûts de pompage. « (...) Ce qui nous a motivé à adopter ces technologies, ce n'est pas la technologie elle-même, mais le fait de pouvoir économiser sur l'eau, l'énergie et les intrants tout en gardant le même rendement. » (Participant D). (...) On savait qu'en maîtrisant mieux l'irrigation, les engrais et l'énergie, on allait réduire les coûts. Aujourd'hui, on dépense moins et on gère l'exploitation de façon plus rentable. » (Participant C). Ces constats corroborent les travaux de Pierpaoli et al. (2013) et de Lowenberg-DeBoer qui

montrent que la rentabilité perçue et les gains économiques anticipés jouent un rôle déterminant dans l'adoption des technologies numériques en agriculture.

Par ailleurs, la réduction de la dépendance à la main-d'œuvre, rendue possible par l'automatisation de certaines tâches, est perçue comme un facteur de motivation important. Certains interrogés soulignent que ces technologies leur permettent de gagner du temps, de mieux organiser le travail et de limiter certaines contraintes liées à la disponibilité de la main-d'œuvre. « (...) avec les sécheresses répétées, beaucoup de jeunes quittent les campagnes et il devient difficile de trouver de la main-d'œuvre surtout en période de pointe. L'automatisation de certaines tâches, grâce aux technologies IoT, nous a vraiment encouragés à les adopter pour continuer à travailler efficacement» (Participant F), « L'agriculture change. Aujourd'hui, on ne peut plus dépendre uniquement de la main-d'œuvre comme avant. Les technologies IoT nous aident à nous adapter à cette nouvelle réalité. » (Participant E) » Ce résultat est cohérent avec le travail d'Ayaz et al. (2019) qui met en évidence le rôle de l'automatisation dans l'amélioration de l'efficacité opérationnelle des exploitations agricoles.

Enfin, les échanges entre agriculteurs apparaissent comme une source essentielle d'information et de motivation. Les discussions informelles, le partage d'expériences et l'observation des résultats obtenus par d'autres exploitants jouent un rôle déterminant dans la décision d'adoption. Plusieurs participants indiquent avoir été influencés par des agriculteurs pionniers de leur région, dont ils observent les pratiques et les résultats. Cette dynamique confirme l'importance de l'influence sociale dans le processus d'adoption des innovations, largement documentée par Rogers (2003) ainsi que par Läpple et Kelley (2013), qui soulignent le rôle central du bouche-à-oreille et des réseaux informels dans l'adoption et la diffusion des technologies agricoles.

Thème 2: L'IoT comme levier de transformation des pratiques agricoles : impacts et dynamiques de changement.

L'ensemble des agriculteurs interrogés ont souligné l'impact positif de l'utilisation des technologies IoT, notamment pour la surveillance des conditions du sol. L'installation de capteurs d'humidité et de nutriments (NPK) a permis une meilleure compréhension de l'état de sol et a significativement amélioré la prise de décision agronomique. « Depuis qu'on a installé des capteurs d'humidité et de NPK sur nos parcelles, on a constaté une amélioration claire de la prise de décision grâce aux données remontées, comparé aux années précédentes. Même avec l'appui d'ingénieurs agronomes et de spécialistes des sols, il était difficile d'obtenir des données aussi précises, surtout avec la variabilité climatique d'une année à l'autre » Participant C. Ce constat rejoint les conclusions de plusieurs études antérieures, Duguma & Bai. (2025) montrent que l'adoption de technologies IoT a permis d'améliorer l'efficacité productive des exploitations de 10 % à 25 %, tout en réduisant la variabilité des rendements d'une saison à l'autre, ce qui contribue à une plus grande stabilité économique. Zhang et al. (2020) et Kamilaris et al. (2017) montrent que les systèmes de surveillance en temps réel permettent une gestion plus fine des intrants agricoles, réduisant les décisions approximatives fondées uniquement sur l'expérience ou l'observation visuelle. De même, Wolfert et al. (2017) soulignent que l'agriculture basée sur les données contribue à renforcer la précision des interventions agronomiques dans un contexte de changement climatique.

Par ailleurs, plusieurs participants ont indiqué que la précision fournie par ces technologies s'est traduite par des économies notables sur les intrants, notamment les engrais et l'eau non seulement mais aussi sur les coûts d'énergie et de pompage. Ces résultats confirment les conclusions d'études antérieures selon lesquelles l'adoption des technologies IoT améliore la rentabilité des exploitations agricoles en réduisant les coûts de production tout en maintenant, voire en augmentant, les rendements (Balafoutis et al., 2017 ; Ayaz et al., 2019).

Gagliardi et al. (2021) ont souligné que l'adoption d'un système d'agriculture intelligente basée sur des capteurs IoT développé dans le cadre du projet ENOTRIA TELLUS a contribué à réduire les coûts, à optimiser l'utilisation des intrants et à limiter l'impact environnemental.

Thème 3 : Freins et obstacles à la diffusion des technologies IoT dans le secteur agricole marocain.

L'intégration de technologies de pointe, telles que les capteurs et l'Internet des objets (IoT), ouvre des perspectives importantes pour transformer le secteur agricole, notamment en améliorant la productivité et la durabilité des exploitations. Toutefois, malgré ces promesses, l'adoption de l'IoT reste confrontée à plusieurs obstacles qui freinent sa mise en œuvre sur le terrain.

L'analyse de contenu des entretiens semi-directifs menés auprès des exploitants agricoles met en évidence un ensemble de contraintes structurelles, économiques et institutionnelles susceptibles de limiter la diffusion à grande échelle des technologies IoT dans le secteur agricole marocain. Parmi les obstacles les plus marquants figurent la complexité de la gestion des données, qui rend les agriculteurs fortement dépendants des fournisseurs de technologies, en particulier pour l'extraction, le traitement et l'analyse des données collectées.

Cette dépendance réduit l'autonomie décisionnelle des exploitants, renforce leur sentiment de vulnérabilité technologique et pèse directement sur leurs charges d'exploitation:

« (...) Chaque mois, on reçoit un technicien qui s'occupe d'extraire les données, de les traiter et de les analyser. Surtout pour les données fournies par les capteurs NPK, pour l'instant on n'a pas les compétences nécessaires pour s'en charger » (Participant C). Ces constats rejoignent largement la littérature scientifique, qui souligne que la complexité des plateformes IoT, combinée au manque de compétences locales en analyse et interprétation des données, constitue un frein majeur à l'adoption des technologies numériques en agriculture, en particulier dans les pays en développement (Manzoor et al., 2025 ; Hundal et al., 2023 ; Bazza et al., 2025 ; Miller et al., 2025). À cet égard, Mansoor et al. (2025) confirment que la complexité du traitement et de l'interprétation des données peut décourager les utilisateurs ne disposant ni de la formation adéquate ni des ressources nécessaires sachant qu'une gestion rigoureuse et maîtrisée des données est indispensable pour produire des informations réellement exploitables et soutenir une prise de décision agricole éclairée. En l'absence de telles capacités, les technologies IoT risquent de rester sous-exploitées, voire de renforcer les inégalités d'accès à l'innovation au sein du secteur agricole.

Au-delà des contraintes liées aux caractéristiques de la technologie, les interrogés ont également mis en évidence un manque de soutien technique et une insuffisance des services de vulgarisation. « J'ai essayé d'utiliser des capteurs IoT de type NPK dans mon exploitation. La technologie est intéressante et peut réellement aider à mieux comprendre les besoins réels des cultures en nutriments. Cependant, après l'installation, il n'y a pas beaucoup d'accompagnement. Lorsqu'un problème technique survient ou lorsque je souhaite mieux interpréter les données, je me retrouve souvent dans l'obligation de faire appel au fournisseur de la technologie. Les services de vulgarisation ne sont pas suffisamment présents pour nous accompagner et nous guider dans l'utilisation de ces nouvelles technologies. » (Participant F). (...) Même si nous sommes intéressés par ces technologies, Les services de vulgarisation sont limités et nous manquons de formation pour comprendre et exploiter ces outils (Participant D). Ces témoignages mettent en évidence un décalage entre l'évolution rapide des technologies agricoles numériques et la capacité des services de vulgarisation à accompagner la transformation numérique du secteur agricole marocain. Ce constat est corroboré par plusieurs études scientifiques (Assimakopoulos et al, 2024 ; Mengistu & Assefa, 2019). Dans le même sens, Taheri et al, (2022)

soulignent que la portée limitée à l'adoption des capteurs IoT en agriculture est en partie attribuée à l'absence des services de vulgarisation et d'appui technique destinés aux agriculteurs, ce qui freine l'appropriation et l'utilisation efficace de ces technologies.

Par ailleurs, le coût élevé des technologies IoT revient souvent dans le discours des agriculteurs interrogés. Beaucoup d'entre eux considèrent ces technologies comme des solutions coûteuses, aussi bien au moment de l'achat que sur le long terme. Cette cherté s'explique notamment par le prix des capteurs eux-mêmes, mais aussi par les abonnements aux plateformes de gestion des données et les frais de maintenance.

« (...) le prix des capteurs IoT destinés à mesurer l'humidité du sol varie fortement selon leur origine et leur niveau de précision. Les capteurs importés des États-Unis coûtent généralement entre 400 et 450 dollars, tandis que ceux provenant de la Chine peuvent aller de 30 à 500 dollars. De notre côté, nous utilisons un capteur d'humidité importé de la Chine, qui nous revient entre 5 600 et 6 000 dirhams. À cela s'ajoutent des charges annuelles liées à l'abonnement à la plateforme de gestion des données ainsi qu'au contrat de maintenance.»

(Participant D). Cette perception est largement confirmée par la littérature scientifique. Plusieurs études montrent que le coût des équipements IoT constitue un frein important à leur adoption, surtout pour les exploitations agricoles à faibles revenus. Même lorsque ces technologies sont présentées comme « abordables » à l'échelle internationale, elles peuvent représenter un investissement trop élevé pour les petits agriculteurs et sans subventions de l'État, il devient très difficile pour les petits et moyens agriculteurs de supporter l'ensemble de ces coûts. Ce constat est corroboré par les résultats d'une revue systématique qui souligne que les capteurs, drones et autres dispositifs IoT peuvent coûter de plusieurs centaines à plusieurs milliers de dollars, ce qui dépasse souvent les capacités financières des petits exploitants en l'absence de soutien financier externe (Bhavana et al, 2024). Dans le même sens, d'autres travaux indiquent que les contraintes économiques, telles que les coûts initiaux, les abonnements aux plateformes numériques et les frais de maintenance, sont souvent perçues comme plus importantes que les bénéfices attendus. Cela rend ces investissements difficiles à justifier, surtout lorsque les retours financiers ne sont pas immédiats ou qu'il n'existe pas de mécanismes d'accompagnement adaptés (Dibbern et al, 2024). Le prix d'achat des capteurs, combiné aux coûts récurrents liés à la gestion des données et à la maintenance, renforce l'idée que ces technologies restent difficilement accessibles pour une grande partie des exploitants, à moins de mettre en place des solutions de financement ou des modèles économiques mieux adaptés à leur réalité.

4 Conclusion

L'agriculture intelligente, portée par l'intégration des capteurs intelligents et de l'Internet des objets (IoT), représente une réelle opportunité pour améliorer l'efficacité, la productivité et la durabilité des pratiques agricoles. En facilitant une prise de décision plus éclairée et en optimisant l'utilisation des ressources, ces technologies peuvent aider le secteur agricole à relever des défis majeurs, notamment celui de nourrir une population croissante tout en préservant l'environnement.

Le manuscrit offre une contribution intéressante en identifiant les enjeux liés à l'intégration de l'IoT dans l'agriculture. Les résultats montrent que l'amélioration de la prise de décision, la réduction des coûts et l'optimisation des intrants figurent parmi les principaux moteurs d'adoption. Ces constats rejoignent les conclusions de plusieurs travaux antérieurs.

Cependant, malgré les efforts engagés au Maroc en matière de modernisation agricole dans le cadre de la stratégie génération green , plusieurs obstacles freinent encore la diffusion de ces technologies. L'absence de services de vulgarisation adaptés constitue un défi important. La plupart des agriculteurs adoptants déclarent avoir découvert l'IoT principalement à travers des fournisseurs privés, ce qui montre un manque d'accompagnement institutionnel structuré .Des services de vulgarisation et d'éducation motivés et continus sont des conditions préalables à la promotion des technologies IoT au Maroc. La question financière occupe également une place centrale, le coût d'achat des capteurs, les frais liés à la gestion des données et à la maintenance rendent ces technologies difficilement accessibles pour de nombreuses exploitations, en particulier les petites et moyennes. L'absence de mécanismes de soutien financier renforce ce constat.

Ces résultats soulignent la nécessité de mettre en place un programme d'engagement des parties prenantes et de renforcement des capacités. Le développement de services de vulgarisation, l'organisation de groupes de discussion au sein des centres de conseil agricole et la sensibilisation des agriculteurs aux technologies IoT apparaissent essentiels pour favoriser leur adoption.

Malgré ces défis, les technologies IoT présentent des avantages significatifs, notamment pour le suivi des conditions du sol. Elles permettent une meilleure gestion de l'irrigation, une réduction des coûts énergétiques et une optimisation des intrants, simplifiant ainsi la gestion des parcelles grâce aux données collectées. Leur potentiel pour transformer le secteur agricole marocain et améliorer les moyens de subsistance des agriculteurs est donc réel.

Comme toute recherche, cette étude présente certaines limites. Elle s'est principalement concentrée sur les agriculteurs adoptants. L'intégration des non-adoptants pourrait enrichir l'analyse et permettre d'approfondir la compréhension des facteurs influençant l'adoption, tout en apportant des conclusions plus complètes. De plus, l'approche qualitative ne permet pas d'établir des relations statistiques solides entre les différents facteurs étudiés. Les recherches futures pourraient inclure toutes les catégories d'agriculteurs ainsi que les acteurs institutionnels, afin d'obtenir une vision plus complète des déterminants de l'adoption.

Malgré ces limites, cette étude apporte un éclairage important sur les défis expliquant le faible taux d'adoption de l'IoT dans l'agriculture marocaine. Elle offre ainsi des pistes utiles pour les décideurs publics et les acteurs institutionnels souhaitant promouvoir une transition numérique plus inclusive et durable du secteur agricole.

REFERENCES

- [1] Antle, J. M., Jones, J. W., & Rosenzweig, C. (2017). Next generation agricultural system models and knowledge products: Synthesis and strategy. *Agricultural Systems*, 155, 179–185.
- [2] Assimakopoulos, F., Vassilakis, C., Margaritis, D., Kotis, K., & Spiliotopoulos, D. (2024). The Implementation of “Smart” Technologies in the Agricultural Sector: A Review. *Information*, 15(8), 466. <https://doi.org/10.3390/info15080466>
- [3] Aubert, B. A., Schroeder, A., & Grimaudo, J. (2012). IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decision Support Systems*, 54(1), 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.07.002>
- [4] 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. [10.1109/ACCESS.2019.2932609](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609)
- [5] Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Van der Wal, T., Soto, I., Gómez Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG

- p>emissions mitigation, farm productivity and economics. Sustainability, 9(8), Article 1339.
- <https://doi.org/10.3390/su9081339>
- [6] Balaghi, R., Benaouda, H., Mahyou, H., & Snaibi, W. (2024). Climate change impact assessment on agriculture. African and Mediterranean Agricultural Journal - Al Awamia, (143), 9–33. <https://doi.org/10.34874/IMIST.PRSM/afirmed-i143.48154>
 - [7] Barnes, A. P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., & van der Wal, T. (2019). Influencing factors and incentives on the intention to adopt precision agricultural technologies within arable farming systems. Environmental Science & Policy, 93, 66–74.
 - [8] Bazza, H., Bimonte, S., Rizzi, S., & Badir, H. (2025). Data management and processing for IoT & robotics in smart farming: A survey. Journal of Computer Languages, 85, 101355.
 - [9] Bhavana, P., Reddy, M. S., & Kumar, A. (2024). Barriers and drivers of digital technology adoption in agriculture: A systematic review. Smart Agricultural Technology, 8, 100612.
 - [10] Carlo Giua, V. C., & Camanzi, L. (2022). Smart farming technologies adoption: Which factors play a role in the digital transition? Technology in Society.
 - [11] Chehri, A., Chaibi, H., Saadane, R., Hakem, N., & Wahbi, M. (2020). A framework of optimizing the deployment of IoT for precision agriculture industry. Procedia Computer Science, 176, 2414–2422. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.09.312>
 - [12] Cui, L., & Wang, W. (2023). Factors affecting the adoption of digital technology by farmers in China: A systematic literature review. Sustainability, 15, 14824. <https://doi.org/10.3390/su152014824>
 - [13] Dibbern, T., Romani, L. A. S., & Massruhá, S. M. F. S. (2024). Main drivers and barriers to the adoption of digital agriculture technologies. Smart Agricultural Technology, 8(5), 100459. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100459>.
 - [14] Duguma, A. L., & Bai, X. (2025). How the internet of things technology improves agricultural efficiency. Artificial Intelligence Review, 58, 63. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0>.
 - [15] Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., & Naeem, M. A. (2019). A survey on the role of IoT in agriculture for the implementation of smart farming. IEEE Access, 8, 156237–156271.
 - [16] Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., T. Umer, & Zikria, Y. B. (2020). Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review. Electronics, 9(2), 319.
 - [17] Gagliardi, G., Lupia, M., Cario, G., Cicchello Gaccio, F., D'Angelo, V., Cosma, A. I. M., & Casavola, A. (2021). An Internet of Things solution for smart agriculture. Agronomy, 11, 2140. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112140>.
 - [18] Ghauri, P., Grønhaug, K., & Strange, R. (2020). Research Methods in Business Studies (5th ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108762427>.
 - [19] Gupta, R., Sharma, V., & Singh, S. (2025). IoT-enabled smart irrigation systems for sustainable agriculture: Design and field evaluation. Computers and Electronics in Agriculture, 213, 108123.
 - [20] Gupta. (2025). Exploring the role of IoT in transforming agriculture: Current applications and future prospects. Archives of Current Research International, 25(4), 85–105.
 - [21] Himesh, S. (2018). Digital revolution and Big Data: A new revolution in agriculture. CAB Rev.
 - [22] Hundal, G. S., Laux, C. M., Buckmaster, D., Sutton, M. J., & Langemeier, M. (2023). Exploring Barriers to the Adoption of Internet of Things-Based Precision Agriculture Practices. Agriculture, 13(1), 163. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010163>
 - [23] Jain, R. K., Chowdhury, S., Govindaraj, R., Amesho, K. T. T., Shangdiar, S., & Iikela, S. (2023). Experimental performance of smart IoT-enabled drip irrigation system using web/Android applications. Smart Agricultural Technology, 4, 100215.
 - [24] Jain, R. K., Patel, A., & Verma, P. (2023). Smart irrigation systems using IoT sensors: Improving water efficiency and farm productivity. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 38, 100812.
 - [25] Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 143, 23–37.

- [26] Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- [27] Läßle, D., & Kelley, H. (2013). Understanding the uptake of organic farming: Accounting for heterogeneities among Irish farmers. *Ecological Economics*, 88, 11–19.
- [28] Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674.
- [29] Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4), 1552–1569
- [30] Manzoor, F., Wei, L., Siraj, M., Lu, X., & Qiyang, G. (2025). Digital agriculture technology adoption in low and middle-income countries — a review of contemporary literature. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1621851.
- [31] Mansoor, S., Iqbal, S., Popescu, S. M., Kim, S. L., Chung, Y. S., & Baek, J. H. (2025). Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: Trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1587869.
- [32] Miller, T., Mikiciuk, G., Durlik, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in agriculture: The time is now — A systematic review of smart sensing technologies. *Sensors*, 25(12), 3583.
- [33] Moussadek, R. (2012). Intensive farming and soil degradation in central Morocco. *Moroccan Journal of Agricultural Sciences*, 7(1), 45–56.
- [34] Nazron, M. H., Saili, A. R., & Mohammad Azam, N. H. (2023). The role of trust in adoption of internet of things among farmers in Selangor, Malaysia. *Food Research*, 7(Suppl. 2), 134–139.
- [35] Nelson, G. C., et al. (2009). Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- [36] Nazron, M. H., Saili, A. R., & Mohammad Azam, N. H. (2023). The role of trust in adoption of internet of things among farmers in Selangor, Malaysia. *Food Research*, 7(Suppl. 2), 134–139.
- [37] Nelson, G. C., et al. (2009). Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- [38] Paul, K., Chatterjee, S. S., Pai, P., Varshney, A., Juikar, S., Prasad, V., et al. (2022). Viable smart sensors and their application in data driven agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107096.
- [39] Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., & Canavari, M. (2013). Drivers of precision agriculture technologies adoption: A literature review. *Procedia Technology*, 8, 61–69.
- [40] Rotz, S., Gravely, E., Mosby, I., Duncan, E., Finnis, E., Horgan, M., LeBlanc, J., Martin, R., Neufeld, H. T., Nixon, A., Pant, L., Shalla, V., & Fraser, E. (2019). Automated pastures and the digital divide: How agricultural technologies are shaping labor and rural communities. *Journal of Rural Studies*, 68, 112–122.
- [41] Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5^e éd.). Free Press.
- [42] Said Mohamed, E. D., Belal, A. A., Abd-Elmabod, S. K., El-Shirbeny, M. A., Gad, A., & Zahran, M. B. (2021). Smart farming for improving agricultural management. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24, 971–981. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.08.007>.
- [43] Shepherd, M., Turner, J. A., Small, B., & Wheeler, D. (2020). Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the “digital agriculture” revolution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5083–5092.
- [44] Singh, R., & Singh, K. (2024). Enhancing agricultural efficiency through smart farming and Internet of Things enabled precision agriculture. *Agricultural Science Digest - A Research Journal*. <https://doi.org/10.18805/ag.D-6039>.
- [45] Takashi Mori, & Neveen Geweely. (2025). Precision Agriculture 4.0: Integrating IoT and Artificial Intelligence for Data-Driven Crop Monitoring and Sustainable Farming Systems. *National Journal of Smart Agriculture and Rural Innovation*, 1(1), 49-56. <https://doi.org/10.17051/NJSARI/01.01.07>.

- [46] Taheri, F., D'Haese, M., Fiems, D., & Azadi, H. (2022). Facts and fears that limit digital transformation in farming: Exploring barriers to the outreach of wireless sensor networks in Southwest Iran. PLoS ONE, 17(12), e0279009. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279009>.
- [47] Tekinerdogan, B. (2018). Strategies for technological innovation in agriculture 4.0. Reports Wageningen University.
- [48] Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69–80.
- [49] World Bank. (2022). Water use in agriculture in Morocco. Washington, DC: World Bank Publications.
- [50] Yatribi, T. (2020). Disparités d'adoption des nouvelles technologies d'irrigation par les agriculteurs marocains : un aperçu empirique. Revue internationale d'économie numérique, 2(2).
- [51] Zhang, Y., Wang, G., Duan, Y., & Liu, S. (2019). Application of IoT technology in smart agriculture: A review. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 12(2), 1–12.
- [52] Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. Computers and Electronics in Agriculture, 170, 105256.