

Intelligence Artificielle : un facteur de résilience du système agricole : Une revue systématique

Artificial Intelligence as a Factor of Agricultural System Resilience: A Systematic Review

Loubna MOULOUD

Équipe de recherche Économie du Territoire et des Organisation (ERETOR), Faculté des Sciences Juridiques Économiques et Sociales de Tanger, Université Abdelmalek Essaâdi, Tanger, Maroc.

Ridouane EJBARI

Équipe de recherche Économie du Territoire et des Organisation (ERETOR), Faculté des Sciences Juridiques Économiques et Sociales de Tanger, Université Abdelmalek Essaâdi, Tanger, Maroc.

Résumé. L'adoption des technologies innovantes dans le système agricole est devenue indispensable dont l'importance grandissante n'est plus à démontrer face aux transformations continues sous l'effet de plusieurs facteurs tels que la hausse des températures et la perturbation des régimes pluviométriques impacteront directement l'agriculture par l'approfondissement des déficits hydriques, des tendances qui poussent vigoureusement vers une transformation des formes et des pratiques traditionnels du système agricole. De nombreuses options d'adaptation permettant de limiter les impacts sur les entreprises agricoles dont la recherche et le développement des technologies agricoles, l'adoption des différentes technologies de l'IA comme solution pour réduire des coûts, gagner de temps, améliorer le service client, améliorer la compétitivité ou de gérer les risques qui en découle. L'objectif de cet article est de présenter une revue systématique sur les pratiques de l'intelligence artificielle, sa relation avec la résilience du système agricole, les difficultés qui résident dans l'adoption de ses pratiques au niveau international, ainsi que des recommandations éclairées afin de promouvoir une prise de conscience auprès des décideurs quant aux outils technologiques qui leur permettront de débattre des évolutions possibles de leurs entreprises et qui pourraient favoriser leur résilience.

Mots-clés : *Intelligence artificielle ; Déficit hydriques ; Entreprises agricoles ; Résilience ; Technologies.*

Abstract. Morocco, where agriculture is a crucial sector, has entered a critical phase after six consecutive years of unprecedented drought. Rising temperatures and the disruption of rainfall patterns will directly impact agriculture by deepening water deficits. Faced with challenges related to water scarcity in particular, Moroccan agriculture continues to demonstrate foolproof resilience, promising solid prospects for the agricultural system and affirming its role as a locomotive of national economic growth. Many adaptation options to limit the impacts on agricultural businesses including research and development of agricultural technologies, adoption of different AI technologies as a solution to improve their competitiveness, reduce costs, save time, improve customer service or manage the risks that result. The objective of this article is to present a systematic review on the practices of artificial intelligence, its relationship with the resilience of agricultural businesses, the difficulties that lie in the adoption of its practices at the international level, as well as informed recommendations to promote awareness among decision-makers of the technological tools that will enable them to discuss possible developments in their companies and that could foster their resilience.

Keywords: *Artificial intelligence; Water deficits; Agricultural businesses; Resilience; Technologies*

1. Introduction

Ces dernières années, le monde a connu de multiples périodes de turbulences mondiales politiques, économiques, sociales, , environnementales et sanitaires, telles que la crise sanitaire liée à la pandémie Covid 19 qui a perturbé les pays du monde entier, la récente crise liée à la guerre de la Russie contre l'Ukraine et dont les évolutions et leurs impacts sur la situation géopolitique, économique et sociales, et agroalimentaires restent encore imprévisible et l'inflation que connaît le monde entier, mais aussi le déficit hydrique qui a mis en danger le système agricole, ce qui incite les entreprises d'intégrer la technologie agricole pour le développement d'une agriculture durable et résiliente. La technologie agricole occupe une place prépondérante dans cette nouvelle stratégie du secteur agricole, et apparaît comme un outil pour atteindre ces objectifs.

En effet, les nouvelles technologies agricoles en général, et celles de l'agriculture de précision en particulier, permettent aux agriculteurs d'être plus performants et plus résilients, en appliquant un système d'irrigation automatisé, l'utilisation de données numériques intégrées et de systèmes basés sur des capteurs, irrigation par drones, Électrovanne, Pompage solaire, Pulvérisation, Utilisation des drones avec des capteurs (IoT), Utilisation des applications data pour la satisfaction client. Ces technologies modernes et innovantes semblent s'attaquer aux problèmes agricoles émergents tels que la modification des climats, les attaques de nuisibles et les maladies, la dégradation des sols et l'épuisement des ressources en eau, afin de proposer à la population des perspectives et des outils pour résoudre les différents problèmes qui se posent.

Malgré l'essor de ces innovations technologiques, peu d'études systématiques ont analysé de manière spécifique comment l'intelligence artificielle contribue au renforcement de la résilience du secteur agricole face aux crises. Si certaines recherches internationales examinent et explorent l'adoption des innovations technologiques dans les systèmes agroalimentaires en générales comme solution aux différents problèmes cités en-dessus, très peu d'entre elles qui abordent la contribution et l'impact direct de ces innovations sur la résilience et la durabilité des systèmes. Ce manque et cette lacune scientifique justifie l'intérêt et la pertinence de notre présente étude.

L'objectif de l'étude est donc de combiner des recherches récentes et de mettre en lumière l'ensemble des travaux qui analysent le lien entre ces deux concept pivots : l'intelligence artificielle et la résilience spécifiquement dans le secteur agricole, en adoptant une démarche méthodologique rigoureuse basées sur deux bases de données reconnues (Scopus et Web of Science).

Notre étude cherche ainsi à répondre à la problématique suivante : « Dans quelle mesure les pratiques de l'intelligence artificielle contribuent au renforcement de la résilience des entreprises agricoles ? »

Afin de répondre à notre problématique et de contribuer à la systématisation des connaissances dans ce domaine, cette recherche présente une revue systématique sur l'utilisation des outils de l'intelligence artificielle pour détecter et analyser les signaux entourant la survenance d'un événement donné qui menace la vulnérabilité des entreprises agricoles au Maroc. La méthodologie de l'examen systématique était l'énoncé PRISMA.

Pour décortiquer notre problématique, nous structurons cet article en trois axes : dans un premier temps présenter un fondement théorique sur les concepts pivots de notre sujet, ensuite décrire les méthodes et matériels utilisés pour entamer notre revue de littérature, et en dernier lieu nous présentons les résultats obtenus et nous appréhendons une discussion des résultats où les possibles futurs retombés sont traités.

2. Fondements théoriques

a. Résilience

Le concept de résilience a connu une évolution dans l'espace et le temps, son usage s'accroît dans de nombreuses disciplines scientifiques telles que la psychologie, l'écologie, l'économie, les sciences de l'information, les sciences politiques ou bien les sciences de gestion, à tel point qu'il est difficile de trouver une définition consensuelle.

Étymologiquement le terme « résilience » vient du latin, de re et salire « monter ». Ce terme est utilisé depuis le 19^e siècle pour désigner la résistance des matériaux aux chocs, puis vers la fin du 20^e en politique et en psychologie indiquant la capacité à réussir à vivre et à se développer de manière acceptable en dépit du stress ou de l'adversité qui comporte normalement le risque grave d'une issue négative (Boris Cyrulnik 2003). En écologie, la résilience est « la capacité d'un système écologique à absorber les chocs tout en enrichissant ses propriétés internes par apprentissage et auto-organisation, et donc à se préparer à affronter de nouvelles crises plus violentes » (Gunderson et Holling, 2001, cités par Rochet, 2008). Aussi employé en informatique, en biologie, en écologie et en sciences économiques et sociales (Trousselle, 2014).

Appliquée aux organisations, la résilience peut être considérée comme la capacité d'un groupe à éviter les chocs organisationnels en construisant des systèmes d'actions et d'interactions continus (Weick, 1993). Selon cet auteur, la résilience est basée sur trois dimensions, à savoir une capacité d'absorption qui permet à l'entreprise de faire face aux différents chocs potentiels, une capacité de renouvellement qui permet de s'adapter à une nouvelle situation et d'assurer sa pérennité, et une capacité d'appropriation qui lui permet d'apprendre des crises vécues afin de se renforcer et se développer. Mais d'autres points de vue sont possibles comme celui de Bégin et Chabaud (2010), qui voient la résilience comme « la capacité de rebondir face à l'inattendu ou le choc vu comme une discontinuité par rapport au cours normal des activités ».

En général, la résilience a été décrite comme une capacité de réaction aux crises, de retour à un état d'origine (résilience passive ou « rebond ») (Wildavsky, 1988 ; Holling 1973 ; Hoffer Gittell et al., 2006 ; Boin ; 2009 ; Scotti -Petrillo et Proserpi 2011 ; Show, 2012 ; Boin et Van Eeten, 2013), ou comme la capacité d'anticiper et de faire face à l'inattendu, rebondir en avant par le développement de nouvelles capacités et la création de nouvelles opportunités (Pickett et al. 2004 ; Gittell et al., 2006). Ces multiples définitions de la résilience font ressortir deux conceptions (Lengnick-Hall et al, 2011) :

- La première perspective, comprend les définitions qui considèrent la résilience organisationnelle comme une simple capacité des organisations à rebondir après des situations inattendues, stressantes et défavorables et à reprendre là où elles ont été laissées. Ce point de vue est similaire aux définitions de la résilience dans les sciences physiques dans lesquelles un matériau est résilient s'il est capable de retrouver sa forme et ses caractéristiques initiales après avoir subi un choc.
- Une deuxième perspective de la résilience organisationnelle va au-delà de la restauration et inclut le développement de nouvelles capacités telles que la capacité à suivre le rythme des changements de s'y adapter et de déceler les opportunités qui peuvent en ressortir.

b. Intelligence Artificielle

Selon Marvin Lee Minsky « L'IA est la science de programmer les ordinateurs pour qu'ils réalisent des tâches qui nécessitent de l'intelligence lorsqu'elles sont réalisées par des êtres humains ». L'Intelligence Artificielle peut être définie comme un domaine de l'informatique dont le but est de recréer un équivalent technologique à l'intelligence humaine. L'IA n'est pas une technologie à part entière mais un ensemble de technologies et d'outils.

Autrement dit, l'intelligence artificielle n'est rien d'autre qu'un programme informatique dédié d'apporter des réponses de façon automatisées et de réaliser des tâches répétitives. Pour y parvenir, deux programmes ont été développés et liés dans le développement de l'intelligence artificielle :

- **Le machine Learning** : Programmes informatiques permettant aux machines d'apprendre sans être spécifiquement programmés, afin d'évoluer d'elles-mêmes.
- **Le deep Learning** : Apprentissage de modèle de données qui fonctionne comme un réseau de neurones.

c. Principales technologies pour les systèmes agricoles intelligents

Les outils de l'intelligence artificielle dans le domaine agricole sont variés et visent à optimiser la production tout en préservant les ressources. Parmi eux, l'apprentissage automatique : qui permet l'élimination de haute précision des mauvaises herbes au laser et alimentation sélective des plantes. La vision par ordinateur permet, via des drones et des capteurs connectés, de détecter précocement les maladies des cultures et les infestations de parasites. Le machine learning est utilisé pour prédire les rendements, anticiper les besoins en intrants et analyser l'impact des conditions climatiques. L'irrigation automatisée: se fait avec des commandes et une surveillance électroniques qui utilise des méthodes d'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) économes en énergie pour le transfert de données. Les données fournies par les capteurs sont interprétées par un microcontrôleur et il allume à la fois le mélangeur et le moteur en fonction des besoins du sol. Quant à l'Internet des Objets (IoT), Dans le monde agricole, les solutions IoT prennent la forme de capteurs reliés à Internet pour collecter des mesures environnementales et mécaniques. Les robots agricoles facilitent la récolte, le désherbage et la plantation, réduisant ainsi la pénibilité du travail. Enfin, le cloud computing : Des capteurs sans fil connectés au cloud collectent des données sur le terrain, qui sont ensuite analysées en temps réel par des algorithmes d'apprentissage automatique pour donner aux agriculteurs et décideurs des informations stratégiques en temps réel, favorisant une agriculture de précision, durable et économiquement performante.

d. Relation intelligence artificielle/ résilience

En période de crise, le rôle de l'innovation technologique et de l'intelligence artificielle (IA) dans le renforcement de la résilience des entreprises s'avère incontestablement vital. Cette conjonction entre la capacité d'adaptation de la technologie et le potentiel d'apprentissage de l'IA ouvre de nouvelles voies pour les entreprises cherchant à se préparer, à s'adapter et à se rétablir efficacement face à l'adversité. À travers une analyse approfondie des diverses facettes de cette dynamique, il devient évident que l'innovation technologique, couplée à l'intelligence artificielle, offre des avantages tangibles pour les entreprises engagées dans la préservation de leur résilience en période de crise. L'intégration de technologies innovantes dans les opérations quotidiennes permet aux entreprises d'adopter une approche proactive dans leur quête de résilience. L'automatisation des processus, la gestion en temps réel des données, et l'analyse prédictive fournissent des informations cruciales pour la prise de décision éclairée. L'IA, avec sa capacité à traiter de vastes ensembles de données et à dégager des tendances, facilite la détection précoce des signes avant-coureurs de perturbations et la formulation de réponses appropriées. Les travaux de l'économiste J. Schumpeter (1939-1942) ont été largement utilisés pour développer l'idée que l'innovation technologique est l'un des principaux moteurs clés des processus d'adaptation favorisant la résilience et permettent aux entreprises de surmonter la crise.

3. Méthodologie

a. Méthodes et matériels

Notre question de recherche porte sur l'étude de l'impact d'adoption des différentes technologies de l'IA comme solution pour renforcer la résilience et la durabilité des entreprises agricoles, et ce en se basant sur

les revues de littérature et les études les plus pertinentes. Une revue systématique qui a été effectuée à l'aide de la méthodologie PRISMA Statement, définissant les mots-clés et leurs synonymes relatifs à notre recherche. Les mots-clés utilisés pour une première recherche ont été vérifiés dans "title" et dans "subject" figurant dans les bases de données Web Of Science et SCOPUS. Ces deux bases de données internationales ont été choisies pour leur rigueur et validité scientifique, elles permettent d'accéder à des articles scientifiques de haute qualité, évalués par les pairs, et couvrent une large gamme de disciplines pertinentes pour l'étude notamment (économie des affaires, agriculture, robotique, sciences agricoles et biologiques, sciences de la décision). L'analyse a porté sur la période entre 2019 et 2024, cette période qui a marquée l'avènement des crises sanitaires, climatiques et économiques, et qui a incité les acteurs du secteur à adopter des outils technologiques innovants pour renforcer la résilience et assurer la continuité des activités agricoles. Ce choix permet aussi de se concentrer sur les travaux les plus récents et les plus significatifs du domaine, tout en garantissant une revue systématique rigoureuse et méthodologiquement fiable.

Etant donné que notre objectif est d'explorer la relation entre les deux concepts (la résilience et de l'intelligence artificielle) dans les domaines du management et des affaires, n'ont été retenus pour analyse que les articles figurant dans les catégories « business economics, agriculture, robotics et food science technology » pour Web of Science, couvrant les dimensions économiques, organisationnelles et technologiques liées à l'adoption des innovations numériques. Quant au niveau de SCOPUS, seules les catégories de « sciences de la décision, sciences agricoles et biologiques, affaires gestion et comptabilité » ont été retenues pour la recherche permettent de rassembler les publications qui portent sur les dimensions décisionnelles, managériales et scientifiques de l'agriculture de précision et de l'intelligence artificielles. Ce choix assure ainsi une approche interdisciplinaire, ciblée et représentative des travaux pertinents pour notre revue systématique.

Les autres critères d'éligibilités sont les suivants :

- La langue de rédaction des articles : Français ou Anglais ;
- Les années de publication : Entre 2019 et 2024 ;
- Les documents de type article de journal ou 'Review' ;
- Les articles ne mentionnant pas le concept de résilience ;
- Précise que l'article n'est pas une revue de littérature, mais un article empirique (étude de cas, étude exploratoire, étude longitudinale, étude empirique...).
- Les documents dont la technologie est une variable explicative de la résilience.

Ont été exclus les documents ne répondant pas aux critères cités ci-dessus et également ceux qui portaient spécifiquement sur la résilience.

b. Processus de recherche et méthodes de sélection

Poursuivant le protocole PRISMA, le processus de recherche a été effectué dans l'objectif d'identifier les revues de littérature les plus pertinentes sur la résilience et l'intelligence artificielle, et ce en examinant deux bases de données comme annoncé précédemment : Scopus et Web of Science afin d'obtenir des revues de littérature pertinentes.

Des mots-clés multiples ont été utilisés pour trouver les revues de littérature pertinentes. Les combinaisons des mots-clés utilisées sont :

- **En français** : Résilience et intelligence artificielle, innovations technologiques agricoles et

durabilité, Agriculture intelligente et soutenabilité.

- **En anglais :** Artificial intelligence and agriculture, Digitalization and artificial knowledge, *Sustainability and Agricultur*, Smart agriculture and resilience.

Les termes ont été recherchés dans le titre, le résumé et les mots clés de chaque document. Les données ont été obtenues auprès de Web of Science et Scopus.

L'examen des résumés a eu pour objectif de vérifier la pertinence thématique des articles, en retenant ceux abordant l'intelligence artificielle appliquée à l'agriculture, aux systèmes agroalimentaires ou aux chaînes d'approvisionnement, soit comme concept central de l'article soit comme outil mobilisé pour expliquer la résilience, la durabilité ou la performance des exploitations agricoles.

Ensuite, nous avons procédé à une sélection par l'examen des textes intégraux des documents pour lesquels nous avons encore peu de visibilité sur leur objet de recherche, afin de préciser la nature des contributions (revues de littérature, articles conceptuels, études empiriques ou méthodologiques) et de vérifier leur conformité aux critères d'inclusion.

Cette analyse approfondie a montré que la majorité des articles retenus correspondent à des études empiriques, incluant des études de cas, des analyses quantitatives, des modèles basés sur l'intelligence artificielle ou des approches décisionnelles appliquées aux systèmes agricoles et agroalimentaires.

c. Extraction des données

Une fois la liste des articles éligibles à notre revue systématique de littérature arrêtée, les fichiers (textes intégraux inclus), chaque article a été lu attentivement afin d'en extraire les informations et variables recherchées par notre revue systématique de littérature afin de répondre à deux objectifs :

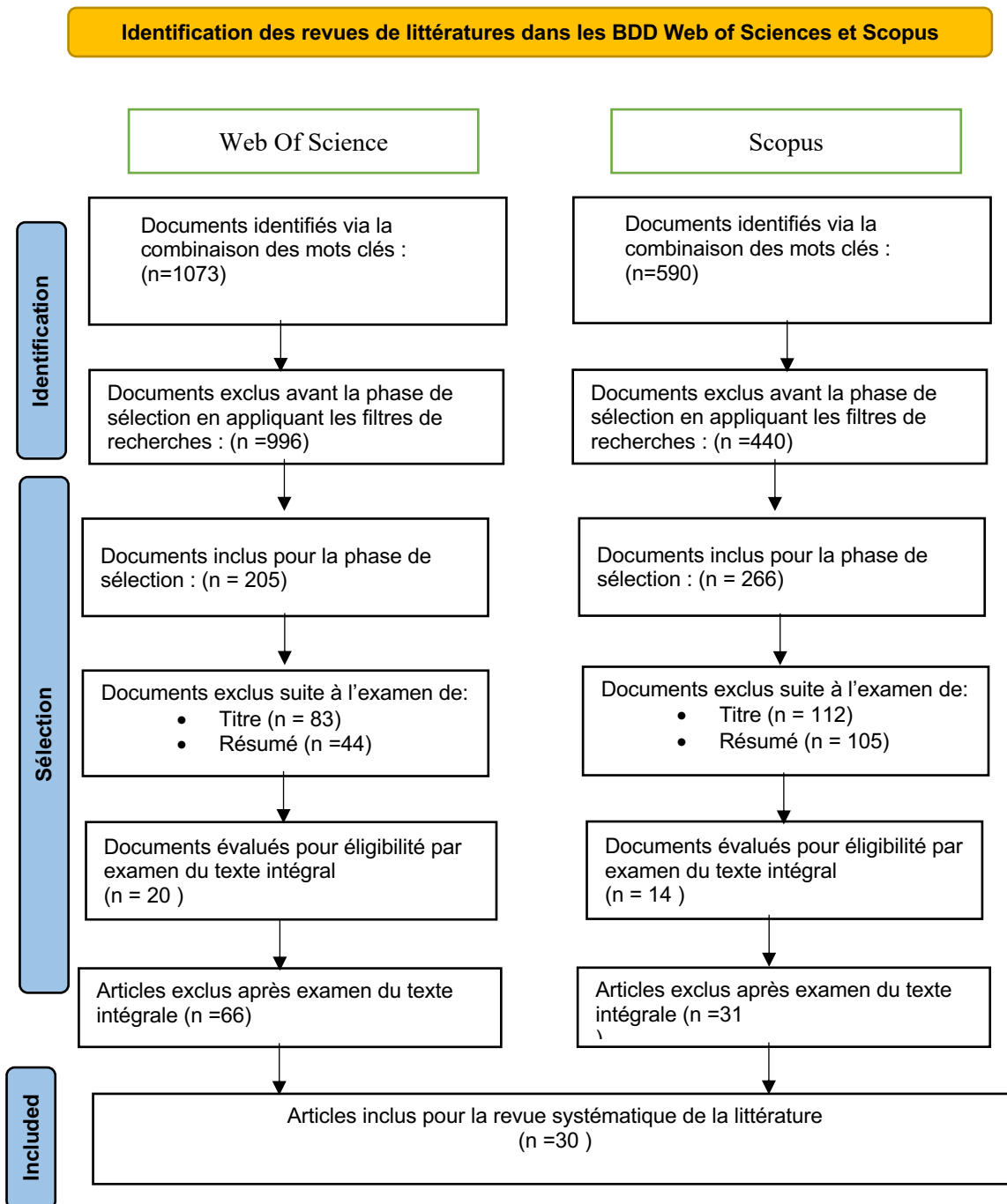
- * Examiner d'un côté comment les chercheurs qui se sont intéressés à l'intelligence artificielle dans le domaine agricole ont opérationnalisé leur revue de littérature.
- * Procéder à une analyse qualitative du contenu afin de synthétiser l'état de l'art sur le rôle de l'intelligence artificielle comme levier de renforcement de la résilience et de la durabilité des exploitations et des chaînes de valeur agricoles et de dégager les tendances émergentes, les apports théoriques, ainsi que les principaux défis et limites mis en évidence par la littérature récente.

4. Résultats et discussion

a. Résultats

La stratégie de recherche détaillée dans ce qui précède nous a permis d'extraire 30 articles éligibles à notre revue systématique de littérature, la figure 1 illustre le cadre PRISMA (BMJ, 2021) du processus de sélection suivi et qui a abouti à la sélection de 30 articles de revues de littérature sur l'intelligence artificielle dans le domaine agricole.

Figure 1 : Diagramme de flux PRISMA 2020 du processus de sélection des articles



Source : Les auteurs

30 articles sur un total de 1663 ont été jugés pertinents pour notre recherche. Ces articles proviennent de contextes géographiques variés, couvrant aussi bien des pays développés que des économies émergentes, ce qui permet d’appréhender la diversité des usages et des enjeux liés à l’intelligence artificielle dans le secteur agricole. L’ensemble des articles sélectionnés traite explicitement de la relation entre l’intelligence artificielle et la résilience, la durabilité ou la performance des systèmes agricoles et agroalimentaires.

L’analyse méthodologique des deux bases de données montre que la majorité des études retenues sont de nature empirique, reposant sur des études de terrain, des analyses quantitatives, des études de cas ou des

expérimentations. À côté de ces travaux empiriques, des articles limités adopte une approche conceptuelle, proposant des cadres analytiques ou des modèles explicatifs de l'intégration de l'intelligence artificielle dans l'agriculture. Enfin, seuls quelques articles relèvent d'une revue de littérature ou d'une méta-revue, visant principalement à synthétiser l'état de l'art et à identifier les tendances émergentes et les défis associés à l'adoption de technologies agricoles intelligentes dans différents contextes nationaux. En ce qui concerne les questions abordées, elles peuvent être classées dans les domaines suivants : Technologie de l'information et agriculture, Environnement développement et durabilité, Gestion agricole, Technologie agricole intelligente

La partie qui nous intéresse le plus et qui se rapporte aux 30 articles finaux sélectionnés est recueillie et citée à la fin de notre travail. Les résultats présentés permettent de conclure à la présence de validation, à la présence de simulation ou même à des échantillons expliqués.

i. Mots clés utilisés

L'ensemble des auteurs ont eu recours à des combinaisons de mots clés composés du concept majeur étudié à savoir la résilience (resilience, résilient, résilien) et de mots clés explicatifs du concept de la résilience dans le domaine de l'innovation des entreprises agricoles. (Agriculture de précision, IA, smart agricultural practices, transition digitale, etc.) Étant donné que c'est un concept multidisciplinaire. Les chercheurs adaptent leurs requêtes selon des axes spécifiques, que l'on peut regrouper en trois catégories principales.

- IA et Agriculture

C'est la première catégorie, la plus représentée par des auteurs comme Chavula, P et al. (2024), Fahid, M. F. et al. (2024), Sarkar, S., et al. (2024), Gebresenbet, G., Bosona, T., & al. (2023), ou Moza-Villalobos et al. (2023), Zhai, T. et al (2022), Kamath, P et al. (2021). L'IA est avant tout un outil de précision et de prédiction. La relation établie ici lie la technologie à l'optimisation technique : qu'il s'agisse de la classification des cultures (coton, oranges), de la prédiction des rendements par le "data mining" ou de l'aide à la décision pour l'élevage.

- IA et Résilience

La deuxième catégorie associe les deux termes "IA et Résilience". Des chercheurs tels que Gholipour, A., et al. (2024), Zhao, G., Ye, C., et al (2024), Battisti, R., et al (2024), Harfouche, A. L., et al. (2024), Hugo Storm, et al. (2024), Mu, W., et al. (2024), Usigbe, M. J., et al. (2024), et Niloofar, P., et al (2023) perçoivent l'IA comme un facteur de renforcement et de préparation. Dans ce contexte, l'IA n'est plus seulement un outil de production, mais un levier permettant d'assurer la continuité des activités et la robustesse des chaînes d'approvisionnement face aux crises mondiales actuelles, comme la pandémie de COVID-19.

- IA, Agriculture et Résilience

Enfin, une approche plus systémique émerge chez les auteurs combinant "IA, Agriculture et Résilience" (Sadegehih et al., 2022 ; Sonar et al., 2024). Selon ces auteurs l'IA ne sert pas seulement à produire mieux, mais à concevoir des modèles en boucle fermée et à surmonter les barrières logistiques pour garantir la sécurité alimentaire et la pérennité du secteur face aux aléas mondiaux. Patil et al. (2021). Kayusi et al. (2024). Sonar et al. (2024) quant à eux, ont cherché à définir l'influence stratégique de l'IA sur la résilience et la performance du système agricole et spécifiquement sur la prédiction des rendements. Ils ont développé leur requête de mots clés par les termes "renforcement", "impact" et "rôle". Sézer, D. et al (2024). Petcu, M. A. et al (2024). Stępień, S. (2023), Jung, J., et al (2020), Weiss, M., et al (2019). Ils ont également combiné les termes préalables avec des mots clés ciblés permettant d'identifier les études empiriques tels que : "rendement", "amélioration", "durabilité" ou encore "productivité".

Le tableau 1 présente exhaustivement les mots clés utilisés et leurs combinaisons pouvant servir de base pour tout chercheur, académicien souhaitant réaliser sa propre recherche sur la relation entre résilience et IA.

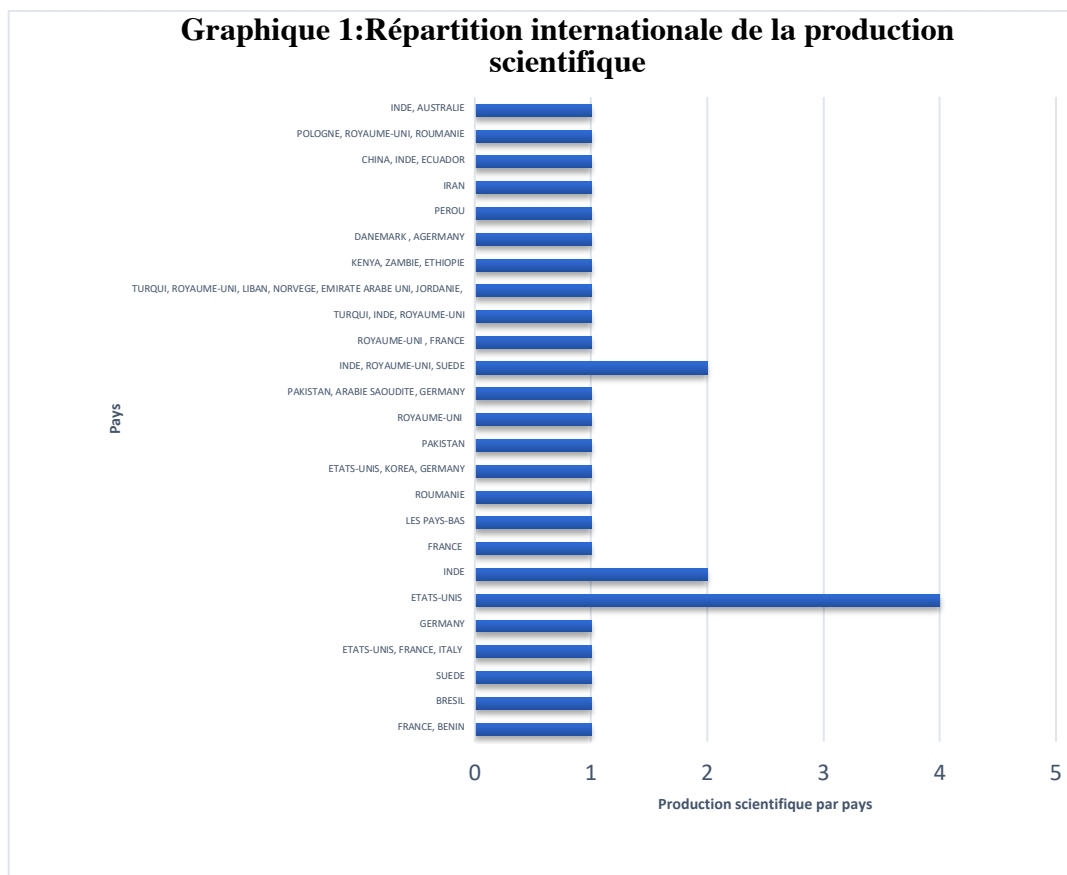
Tableau 1 : Les mots-clés et leurs combinaisons utilisées dans la recherche

Lettre	Mots clés	Synonyme'	Synonyme''	Combinaison
A	resilience	durabilité	survie	A+D'+B+
B	Intelligence artificielle	Innovation technologique	Transition digital	A+B'+E
C	agriculture de précision	Technologie Agricole intelligente	Innovations technologiques agricoles	A+B'+D+E
D	PME agricoles	Exploitations agricoles	Agriculteurs	C+D''+E''
E	Renforcer	Rebondir	Contribuer	B+C''+E''
			

Source: les auteurs

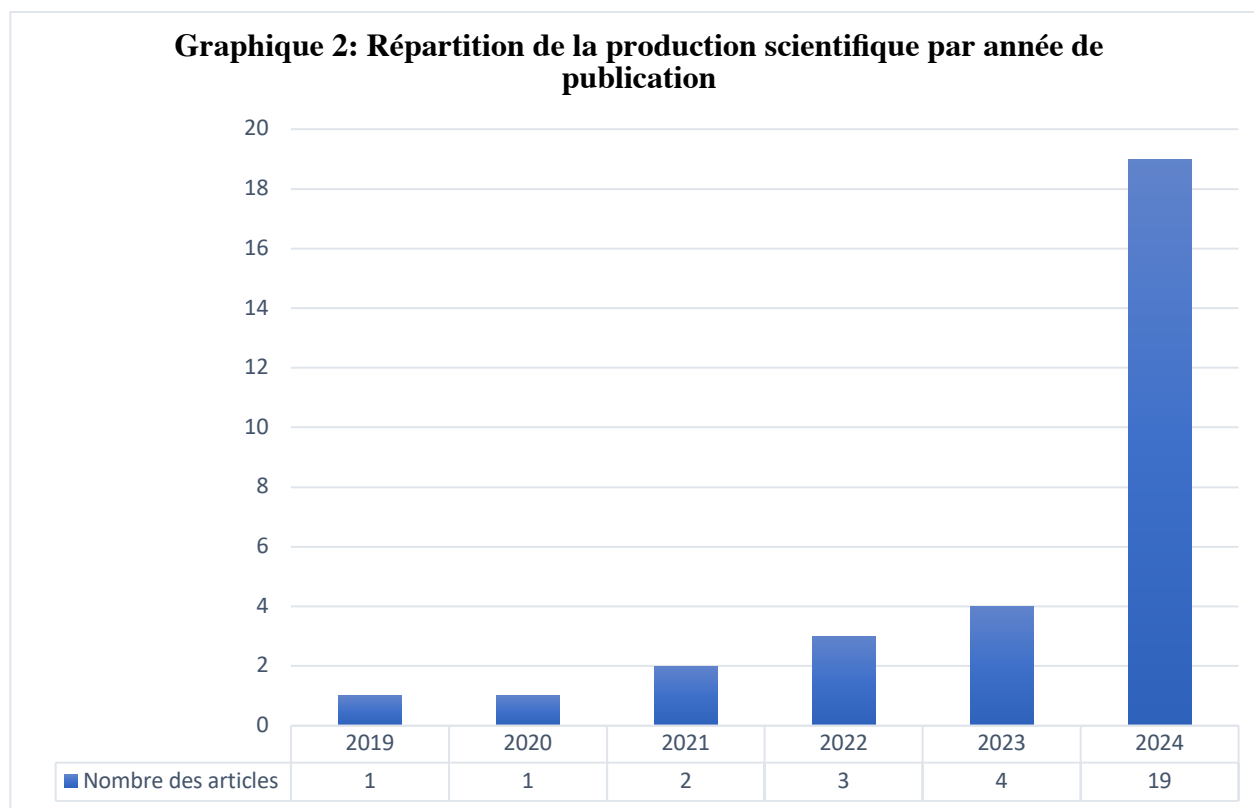
ii. Répartition internationale de la production scientifique

Le rôle de l'innovation technologique et de l'intelligence artificielle (IA) dans le renforcement de la résilience des entreprises agricoles a été le sujet commun dans ces multiples articles sélectionnés. En effet l'intégration de technologies innovantes dans les opérations quotidiennes permet aux entreprises d'adopter une approche proactive dans leur quête de résilience. L'automatisation des processus, la gestion en temps réel des données, et l'analyse prédictive fournissent des informations cruciales pour la prise de décision éclairée. L'IA, avec sa capacité à traiter de vastes ensembles de données et à dégager des tendances, facilite la détection précoce des signes avant-coureurs de perturbations et la formulation de réponses appropriées.



- **En Amérique**, Les États-Unis se distingue par ses 6 auteurs dont 2 qui collaborent avec des chercheurs d'Italie, de France, de Germany et de korée, ce qui donne lieu à un document commun pour chaque nation collaboratrice. Le Brésil et Pérou contribuent avec un article chacun.
- **En Océanie**, les efforts de collaboration d'Australie sont relativement limités, avec seulement 1 auteur copubliant avec des homologues de l'Inde.
- **En Europe**, Le Royaume-Uni est au sommet des auteurs qui ont contribué avec 7 article sur le sujet, dont un avec des chercheurs de la France et un avec ceux de Suède, 2 articles avec les chercheurs d'Inde et de Turquie, un article en commun avec les chercheurs de Turquie, Liban, Norvège, Emirats arabe uni, Jordanie, et un article en commun avec Pologne, Royaume-Uni, Roumanie. Cette dernière a contribué avec 1 article sur le sujet. La France se distingue par ses 2 auteurs, dont un qui collabore avec des chercheurs de Benin. Sur la même voie Germany qui se distingue par ses 2 auteurs, dont un qui collabore avec des chercheurs de Danemark. Il convient de noter que le Suède et les Pays-Bas ont contribué avec un article chacun.
- **En Asie**, L'Inde se distingue par ses 2 auteurs, avec des efforts de collaboration sont également notés entre des auteurs du L'Inde avec des pairs de Chine et Ecuador. Iran qui contribue avec un seul article, et Pakistan qui contribue à la publication de 2 articles dont un copubliant avec des homologues d'Arabie Saoudite et Germany.
- **En Afrique**, Un seul document commun entre les chercheurs de Kenya, Zambie, Éthiopie, qui examinent comment les espaces verts urbains peuvent être améliorés de manière à renforcer la biodiversité et les services écosystémiques en s'appuyant sur des analyses assistées par l'IA.

iii. Répartition de la production scientifique par année de publication



L'analyse du graphique nous permet de distinguer deux phases majeures :

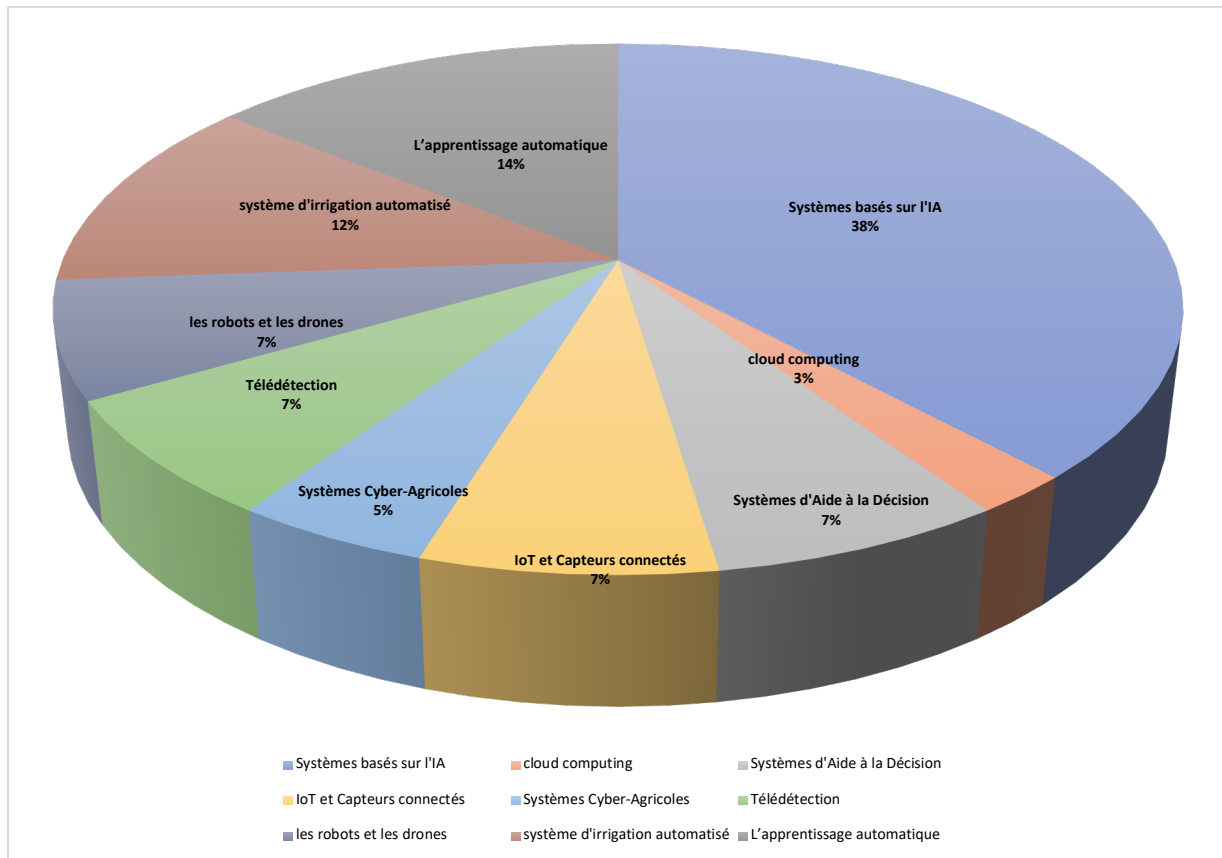
- **De 2019 à 2023** : Nous observons une croissance constante et graduelle de publication sur le sujet concerné. La production débute modestement avec 1 article par an en 2019 et 2020, avant de progresser à 2 articles en 2021, puis vers 3 articles en 2022 et 4 articles en 2023.
- **En 2024** : Le graphique révèle une explosion de la production scientifique. Le nombre d'articles bondit à 19 articles, Cette tendance indique un intérêt scientifique récent et massif pour le sujet étudié, faisant de l'année 2024 un véritable point de rupture déclenchant une phase de production scientifique particulièrement féconde.

Cette accélération dans la production scientifique (19 articles en 2024 contre 4 en 2023) s'explique par une convergence de facteurs technologiques, politiques et environnementaux qui ont fait de l'IA une priorité stratégique pour l'agriculture mondiale.

iv. Les pratiques de l'IA au sein des entreprises agricoles :

Le rôle de l'innovation technologique et de l'intelligence artificielle (IA) dans le renforcement de la résilience des entreprises agricoles a été le sujet commun dans ces multiples articles sélectionnés. Les données du graphique suivant révèlent une transition technologique majeure dans le secteur agricole, allant de la simple numérisation vers des systèmes autonomes et prédictifs.

Graphique 3 : Les pratiques de l'intelligence artificielles dans le secteur d'agriculture



L'analyse montre que l'Intelligence Artificielle (IA) est un concept pivot citée dans 16 articles comme un levier de renforcement de la résilience et de durabilité. Par ailleurs, l'apprentissage automatique (Machine Learning), mentionnée dans 6 articles, s'impose comme l'outil technologique dominant, permettant la transformation des données brutes en décisions concrètes, notamment pour soutenir la prise de décision, la prédiction des rendements ou des défaillances logistiques. Ensuite le système d'irrigation automatisés qui occupe une place stratégique avec 5 articles. LoT et les capteurs connectés (3 articles) permettent une collecte de données en temps réel sur l'état des sols et du climat. Les données collectées sont ensuite traitées par des Systèmes d'Aide à la Décision (3 articles) pour optimiser l'usage des ressources.

L'intégration de la télédétection (3 articles) et de la robotique aérienne (drones) (3 articles) souligne une exigence accrue en matière de précision géographique et temporelle dans le secteur agricole. Ces outils ne sont plus de simples instruments de collecte des données, mais sont des piliers de la phénomique numérique et de la sélection végétale moderne. Elles permettent d'assurer une surveillance à grande échelle surpassant largement les capacités de surveillance humaine conventionnelle.

Enfin, le Cloud Computing, mentionné dans un seul article, et les systèmes cyber-agricoles, identifiés dans deux contributions, ils constituent des infrastructures technologiques stratégiques pour l'intégration de l'ensemble des autres solutions numériques. Ils assurent la liaison entre le monde numérique (algorithmes) et le monde physique (tracteurs, vannes d'irrigation, drones), rendant ainsi possible une automatisation cohérente et en temps réel des processus agricoles.

b. Discussion

Girma Gebresenbet, Techane Bosona et al (2023) ont mené une revue de la littérature sur l'état de l'art en matière d'adoption d'une agriculture intelligente en mettant l'accent sur l'intégration des données

numériques, des systèmes basés sur des capteurs et des technologies digitales. Leur travail permet de dresser un état des lieux des solutions existantes et de mieux comprendre le rôle de l'innovation technologique dans l'évolution des systèmes agricoles vers des modèles plus performants et plus résilients.

Dans une perspective complémentaire, L'étude de Pal, T., Ganguly, K., & Chaudhuri, A. (2024) déplacent la focale vers la résilience opérationnelle des chaînes d'approvisionnement agroalimentaires., montrant comment la digitalisation et les cadres pilotés par l'IA protègent les chaînes d'approvisionnement contre les événements perturbateurs et les crises mondiales. Ils soulignent notamment que les systèmes basés sur l'IA, associés à des outils numériques tels que l'Internet des objets et le Big Data, sont mobilisés pour mettre en place des dispositifs d'alerte précoce et de gestion des risques. La conjonction entre la capacité d'adaptation de la technologie et le potentiel d'apprentissage de l'IA ouvre de nouvelles voies pour les entreprises qui cherchent à se préparer, à s'adapter et à se rétablir efficacement face à l'adversité, et offre des avantages tangibles pour les entreprises engagées dans la préservation de leur résilience en période de crise.

Plusieurs travaux abordent explicitement la relation entre l'intelligence artificielle et la résilience dans le secteur agricole et agroalimentaire. En effet, La littérature récente démontre le rôle transformateur de l'Intelligence Artificielle (IA) comme levier fondamental de la résilience dans le secteur agroalimentaire. Les études de Nawaz et Babar (2024) ainsi que de Battisti et al. (2024) montre que l'intelligence artificielle peut jouer un rôle clé dans la résilience des systèmes agricoles face au changement climatique en offrant des estimations automatisées et rapides de la demande en irrigation, une meilleure allocation des ressources hydriques, une anticipation des impacts climatiques sur la production fruitière. De même, Paget et al. (2022) ont essayé d'analyser et évaluer 21 solutions numériques utilisées en agriculture au Bénin, en les regroupant sur deux types : les solutions de collecte de données pour l'aide à la décision et le pilotage, et les plateformes d'échanges et de partage d'informations et de connaissances. Mais les principales contraintes au développement de ces innovations sont relatives au manque de matériel, d'infrastructures et de compétences. Tandis que Niloofar et al. (2023) mettent en évidence le rôle des systèmes d'aide à la décision basés sur l'IA dans le renforcement de la durabilité et de la résilience de l'élevage.

Par ailleurs, Harfouche et al. (2024) ainsi que Storm et al. (2024) mettent en évidence plusieurs outils d'intelligence artificielle (IA) et leur contribution à la résilience des systèmes agricoles à savoir Apprentissage automatique (Machine Learning), Systèmes d'aide à la décision basés sur l'IA, Robots autonomes et drones. Ces technologies renforcent la résilience des systèmes agricoles en améliorant la précision des interventions, en optimisant l'utilisation des ressources et en permettant une adaptation rapide aux conditions changeantes. Dans le même sens, Jung et al. (2020) soulignent que l'utilisation des drones offre de nouvelles possibilités d'analyse pour la gestion des systèmes agricoles, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité et la résilience des systèmes de production.

En ce qui concerne l'agriculture de précision. Cette dernière constitue un grand exemple pour les agriculteurs qui veulent intégrer des technologies numériques et de l'IA au service de la résilience agricole, afin d'optimiser leurs chaînes logistiques agroalimentaires et de collecter les données primaires sur l'activité principale en vue de réagir au bon moment, avec les bons moyens sans perdre le temps ou productivité, vu que ce secteur a entré dans une phase critique après des années consécutives de sécheresse et de pénurie d'eau qu'il faut aujourd'hui mieux gérer pour en optimiser l'usage et limiter les risques pour l'homme et l'environnement. Sarkar et al. (2024) aborde les systèmes cyber-agricoles comme l'évolution ultime de l'agriculture de précision, où le cycle "détection-décision-action" est entièrement automatisé pour une production durable. Quant à Fahid et al. (2024), tilise le Deep Learning pour la classification de précision des cultures (coton). La précision réside ici dans la capacité de l'IA à identifier l'état de la culture via l'imagerie, permettant des interventions localisées plutôt que globales.

5. Conclusion

La technologie s'installe comme un facteur primordial de l'amélioration de rendement dans le domaine agroalimentaire et s'attaque aux problèmes agricoles émergents tels que La rareté et l'augmentation des coûts de main-d'œuvre, l'augmentation des coûts de culture et des mauvaises récoltes associées à des rendements imprévisibles dus à des maladies, à l'insuffisance des précipitations, aux variations climatiques, à la perte de fertilité des sols, à la fluctuation des prix du marché des produits agricoles, etc.

L'IA ouvre de nouvelles voies pour les entreprises qui cherchent à se préparer, à s'adapter et à se rétablir efficacement face à l'adversité, et offre des avantages tangibles pour les entreprises engagées dans la préservation de leur résilience en période de crise. À l'aide des plateformes d'IA, il est également possible de recueillir une grande quantité de données à partir de sites web gouvernementaux et publics ou de surveiller en temps réel, diverses données à l'aide de l'Internet des objets (IoT), qui peuvent ensuite être analysées avec précision pour permettre aux agriculteurs de s'attaquer à tous les problèmes incertains auxquels sont confrontés pour aider les agriculteurs à faire face aux différents risque entravant leur développement et leur durabilité. L'agriculture de précision illustre cette dynamique pour les agriculteurs qui veulent passer vers la technologie afin d'optimiser leurs chaînes logistiques et pour collecter les données primaires sur l'activité principale en vue de réagir au bon moment, avec les moyens nécessaires sans perdre ni le temps ni la production. Cependant, Les revues de littératures et les études antérieurs confirment la présence de plusieurs contraintes économiques, sociales, et institutionnels liées à la diffusion des technologies de l'agriculture qu'il faut prévoir, surmonter et maîtriser avant et pendant la mise en place des plans d'action des acteurs publics et privés.

Cette démarche s'inscrit dans une perspective exploratoire visant à construire des connaissances solides sur l'intégration des technologies numériques dans les systèmes agricoles mondiaux. Dans ce cadre, il est nécessaire de mener des recherches futures afin d'évaluer empiriquement l'impact réel de l'intelligence artificielle sur la performance et la résilience des systèmes agroalimentaires, et ce à travers des entretiens avec des agriculteurs, des responsables d'organisations agricoles, des acteurs privés et publics dans le but d'élaborer un modèle conceptuel adapté aux spécificités territoriales. Ainsi que des études quantitatives confirmatoires utilisant des questionnaires dans le but de mesurer concrètement l'impact de l'IA et des technologies d'agriculture de précision sur la résilience et la durabilité du système agricole, et de proposer des recommandations opérationnelles aux acteurs publics et privés impliqués dans la transition numérique du secteur.

6. Références

- Adve, V. S., Wedow, J. M., Ainsworth, E. A., Chowdhary, G., Green-Miller, A., & Tucker, C. (2024). AIFARMS: Artificial intelligence for future agricultural resilience, management, and sustainability. *AI Magazine*, 45, 83–88. <https://doi.org/10.1002/aaai.12152>
- Battisti, R., da Silva Neto, W. A., da Costa, R. M., Dapper, F. P., & Elli, E. F. (2024). Irrigation demand for fruit trees under a climate change scenario using artificial intelligence. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 54, e77917. <https://doi.org/10.1590/1983-40632024v5477917>
- Bégin, L., & Chabaud, D. (2010). La résilience organisationnelle : Rebondir face à l'inattendu. *Revue française de gestion*, (201), 127–142. <https://doi.org/10.3166/rfg.201.127-142>
- Boin, A. (2009). The new world of crises and crisis management : Implications for policymaking and research. *Review of Policy Research*, 26(4), 367–377. <https://doi.org/10.1111/j.1541-1338.2009.00389.x>
- Boin, A., & Van Eeten, M. J. G. (2013). The resilient organization. *Public Management Review*, 15(3), 429–445. <https://doi.org/10.1080/14719037.2013.769856>

- Clay, D. E., Brugler, S., & Joshi, B. (2024). Will artificial intelligence and machine learning change agriculture: A special issue. *Agronomy Journal*, 116, 791–794. <https://doi.org/10.1002/agj2.21555>
- Cyrulnik, B. (2003). *Les vilains petits canards*. Éditions Odile Jacob.
- Fahid, M. F., Khanzada, T. J. S., & Aslam, M. A., et al. (2024). An ensemble deep learning models approach using image analysis for cotton crop classification in AI-enabled smart agriculture. *Plant Methods*, 20, 104. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01228-w>
- Gebresenbet, G., Bosona, T., & al. (2023). A concept for application of integrated digital technologies to enhance future smart agricultural systems. *Technologie agricole intelligente*, 5, 100255.
- Ghag, N., Sonar, H., Jagtap, S., & Trollman, H. (2024). Unlocking AI's potential in the food supply chain: A novel approach to overcoming barriers. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101349. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101349>
- Gholipour, A., Sadegheih, A., & Mostafaiepour, A., et al. (2024). Conception d'un modèle multi-objectifs optimal pour une chaîne d'approvisionnement durable en boucle fermée : Étude de cas de la grenade en Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 3993–4027. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02868-5>
- Gittell, J. H., Cameron, K., Lim, S., & Rivas, V. (2006). Relationships, layoffs, and organizational resilience. *Journal of Applied Behavioral Science*, 42(3), 300–329. <https://doi.org/10.1177/0021886306286466>
- Gunderson, L. H., & Holling, C. S. (2001). *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Island Press.
- Harfouche, A. L., et al. (2024). A primer on artificial intelligence in plant digital phenomics: Embarking on the data to insights journey. *Trends in Plant Science*, 28(2), 154–184.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Hugo Storm, et al. (2024). Research priorities to leverage smart digital technologies for sustainable crop production. *European Journal of Agronomy*, 156, 127178.
- Jung, J., Maeda, M., Chang, A., Bhandari, M., Ashapure, A., & Landivar-Bowles, J. (2020). Le potentiel de la télédétection et intelligence artificielle comme outils pour améliorer la résilience des systèmes de production agricole. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003>
- Kamath, P., Patil, P., Shrilatha, S., & Sowmya, S. (2021). Crop yield prediction using data mining. *Global Transitions Proceedings*, 2, 402–407.
- Kayusi, F., & Chavula, P. (2024). Enhancing urban green spaces: AI-driven insights for biodiversity conservation and ecosystem services. *LatIA*, 2, 87. <https://doi.org/10.62486/latia202587>
- Kumar, M., Raut, R. D., Sharma, M., et al. (2022). Facilitateurs de résilience et de préparation aux pandémies dans la chaîne d'approvisionnement alimentaire. *Operations Management Research*, 15, 1198–1223. <https://doi.org/10.1007/s12063-022-00272-w>
- Lengnick-Hall, C. A., Beck, T. E., & Lengnick-Hall, M. L. (2011). Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management. *Human Resource Management Review*, 21(3), 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2010.07.001>
- Minsky, M. (1968). *Semantic information processing*. MIT Press.
- Moza-Villalobos, F., Natividad-Villanueva, J., & Meneses-Claudio, B. (2023). Use of convolutional neural networks (CNN) to recognize the quality of oranges in Peru by 2023. *Data and Metadata*, 2, 175. <https://doi.org/10.56294/dm2023175>

- Mu, W., et al. (2024). Making food systems more resilient to food safety risks by including artificial intelligence, big data, and internet of things into food safety early warning and emerging risk identification tools. <https://orcid.org/0000-0001-8603-5965>
- Nawaz, M., & Babar, M. I. K. (2024). IoT and AI: A panacea for climate change-resilient smart agriculture. *Discover Applied Science*, 6, 517. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06228-y>
- Niloofar, P., Lazarova-Molnar, S., Thumba, D. A., & Shahin, K. I. (2023). A conceptual framework for holistic assessment of decision support systems for sustainable livestock farming. *Ecological Indicators*, 155, 111029. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111029>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Paget, N., Nacambo, I., Fournier, S., & Moumouni-Moussa, I. (2022). Traque des innovations numériques au service de la transition agroécologique au Bénin. *Cahiers Agricultures*, 31, Article 13.
- Pal, T., Ganguly, K., & Chaudhuri, A. (2024). Digitalisation in food supply chains to build resilience from disruptive events: A combined dynamic capabilities and knowledge-based view. *Supply Chain Management: An International Journal*, 29(6), 1042–1062. <https://doi.org/10.1108/SCM-02-2024-0108>
- Petcu, M. A., Sobolevschi-David, M.-I., Curea, S. C., & Moise, D. F. (2024). Integrating artificial intelligence in the sustainable development of agriculture: Applications and challenges in the resource-based theory approach. *Electronics*, 13(23), 4580. <https://doi.org/10.3390/electronics13234580>
- Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L., & Grove, J. M. (2004). Resilient cities: Meaning, models, and metaphor for integrating the ecological, socio-economic, and planning realms. *Landscape and Urban Planning*, 69(4), 369–384. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.10.035>
- Rochet, C. (2008). La résilience : Un nouveau paradigme pour la gouvernance publique. *Revue française d'administration publique*, (128), 699–711. <https://doi.org/10.3917/rfap.128.0699>
- Sarkar, S., et al. (2024). Cyber-agricultural systems for crop breeding and sustainable production. *Trends in Plant Science*, 29(2), 130–149.
- Schumpeter, J. A. (1939). *Business cycles: A theoretical, historical, and statistical analysis of the capitalist process* (Vols. 1–2). McGraw-Hill.
- Schumpeter, J. A. (1942). *Capitalism, socialism and democracy*. Harper & Brothers.
- Scotti-Petrillo, A., & Prospero, M. (2011). Organizational resilience and crisis management. *International Journal of Business Continuity and Risk Management*, 2(4), 301–318. <https://doi.org/10.1504/IJBCRM.2011.042148>
- Sézer, D., Kazancoglu, Y., Mangla, S. K., & Lafçı, Ç. (2024). Chaînes d'approvisionnement alimentaire intelligentes, durables et résilientes face aux événements perturbateurs. *Business Strategy and the Environment*, 33(7), 6156–6171. <https://doi.org/10.1002/bse.3801>
- Shaw, K. (2012). The rise of the resilient local authority? *Local Government Studies*, 38(3), 281–300. <https://doi.org/10.1080/03003930.2011.642869>
- Stępień, S., Smędzik-Ambroży, K., Polcyn, J., Kwiliński, A., & Maican, I. (2023). Are small farms sustainable and technologically smart? Evidence from Poland, Romania, and Lithuania. *Central European Economic Journal*. <https://doi.org/10.2478/ceej-2023-0007>

- TROLLMAN, H. (2024). Extraction de caractéristiques pour la prédiction des modes de défaillance de la chaîne d'approvisionnement alimentaire grâce à l'intelligence artificielle. *Discovery Food*, 4, 22. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00090-y>
- Trousselle, W. (2014). *Résilience et systèmes complexes : Approches interdisciplinaires*. Lavoisier.
- Usigbe, M. J., Asem-Hiablie, S., Uyeh, D. D., et al. (2024). Enhancing resilience in agricultural production systems with AI-based technologies. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 21955–21983. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03588-0>
- Wang, W., Chen, Y., Zhang, T., Deveci, M., & Kadry, S. (2024). The use of AI to uncover the supply chain dynamics of the primary sector: Building resilience in the food supply chain. *Structural Change and Economic Dynamics*, 70, 544–566. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2024.05.010>
- Wani, S. P. (2021). New paradigm for transforming Indian agriculture to climate-resilient and sustainable agriculture is a must. *Journal of Agricultural Management*. <https://doi.org/10.54386/jam.v25i1.2011>
- Weick, K. E. (1993). The collapse of sensemaking in organizations: The Mann Gulch disaster. *Administrative Science Quarterly*, 38(4), 628–652. <https://doi.org/10.2307/2393339>
- Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2019). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
- Wildavsky, A. (1988). *Searching for safety*. Transaction Publishers.
- Zhai, T., Wang, D., Zhang, Q., Saeidi, P., & Mishra, A. R. (2022). Assessment of the agriculture supply chain risks for investments of agricultural small and medium-sized enterprises (SMEs) using the decision support model. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 36(2). <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2126991>
- Zhao, G., Ye, C., Dennehy, D., Liu, S., Harfouche, A., & Olan, F. (2024). Analyse des obstacles à l'adoption de l'industrie 4.0 pour assurer la durabilité de la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire : Une approche hiérarchique analytique floue par groupe. *Business Strategy and the Environment*, 33(8), 8559–8586. <https://doi.org/10.1002/bse.3928>