



White paper N2 -2024-2025

Acknowledgements

This white paper, as well as the associated research work, was carried out with the financial support of the European PRIMA Med programme (Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area).

This document is published as open access. It may be used as a teaching resource in university education, as training material for professionals, as well as a reference document and state-of-the-art overview for Master's and PhD students.

The authors acknowledge and thank the PRIMA Med programme for its support, which enabled the conduct of this research and the open dissemination of its results for the benefit of the scientific, academic, and professional communities

Digital Twin pour la Surveillance Intelligente de l'Agriculture : Vers une Agriculture de Précision Durable

Gestion de Précision des Cultures Céréalières Méditerranéennes

POINTS FORTS

- Les jumeaux numériques agricoles reproduisent les exploitations réelles pour améliorer la prise de décision dans les contraintes climatiques méditerranéennes.
- Le jumeau numérique fait progresser l'automatisation agricole grâce à l'IdO, l'IA, la RA/RV et l'apprentissage fédéré, adaptés aux systèmes de production céréalière.
- De multiples domaines d'application du jumeau numérique dans l'agriculture céréalière méditerranéenne sont explorés, de la gestion sol-irrigation à la préservation post-récolte de la qualité.
- Les applications potentielles et les défis spécifiques aux systèmes céréaliers pluviaux et à irrigation complémentaire sont discutés.

Résumé

Face aux défis croissants liés au changement climatique, à la pression démographique et à la raréfaction des ressources naturelles, l'agriculture doit adopter des approches innovantes afin d'améliorer sa productivité tout en préservant l'environnement. Le Digital Twin, ou jumeau numérique, constitue une technologie émergente permettant de créer une représentation virtuelle dynamique d'un système agricole réel. Grâce à l'intégration de capteurs IoT, d'images satellitaires, de drones, de modèles agronomiques et d'algorithmes d'intelligence artificielle, le Digital Twin offre une surveillance en temps réel, une capacité de simulation avancée et une aide à la décision optimisée. Cet article présente les principes fondamentaux du Digital Twin agricole, son architecture, ses sources de données, ses applications ainsi que les défis liés à son déploiement dans le secteur agricole.

Mots-clés :

Digital Twin ; agriculture intelligente ; systèmes cyber-physiques ; IoT ; apprentissage fédéré ; intelligence artificielle ; simulation ; aide à la décision ; céréales méditerranéennes ; blé dur ; pénurie d'eau ; CERERE ; PRIMA Med

1. Introduction

Introduction

D'ici 2050, la population mondiale devrait dépasser 9,7 milliards d'habitants, impliquant une augmentation estimée à 60 % de la production céréalière par rapport aux niveaux de référence de 2005–2007. Ce défi est particulièrement critique dans le bassin méditerranéen, où les systèmes de culture dominants — notamment le blé dur (*Triticum durum*), le blé tendre (*Triticum aestivum*) et l'orge (*Hordeum vulgare*) — sont majoritairement pluviaux et fortement exposés à la variabilité climatique. Le climat méditerranéen, caractérisé par des précipitations hivernales concentrées, des sécheresses estivales prolongées et une variabilité interannuelle élevée des pluies, induit un stress hydrique terminal durant les phases clés du remplissage du grain, affectant directement la stabilité des rendements et la qualité des productions.

Face à ces contraintes, l'agriculture numérique s'est imposée comme un paradigme de transformation majeur, mobilisant les technologies de communication, l'analyse spatiale et l'intelligence artificielle afin de soutenir la prise de décision opérationnelle et stratégique tout au long des chaînes de valeur agricoles. L'agriculture intelligente repose notamment sur la surveillance en temps réel des paramètres environnementaux, des propriétés du sol, de la phénologie des cultures et de l'usage des intrants, dans l'objectif d'optimiser la productivité tout en réduisant l'empreinte environnementale. Toutefois, les approches conventionnelles demeurent largement fondées sur des flux de données unidirectionnels, du capteur vers l'utilisateur final, ce

qui limite la réactivité et l'adaptabilité des systèmes agricoles dans des contextes fortement stochastiques tels que ceux du bassin méditerranéen.

Dans ce contexte, le paradigme du **Jumeau Numérique (JN)** constitue une avancée conceptuelle et technologique majeure. Initialement développé dans les secteurs de l'aéronautique et de l'industrie pour le suivi du cycle de vie d'actifs complexes, le JN repose sur un couplage bidirectionnel et dynamique entre un système physique et sa réplique virtuelle. Appliqué à l'agriculture, ce paradigme s'inscrit dans une architecture de systèmes cyber-physiques intégrant des réseaux de capteurs IoT pour l'acquisition continue des données de terrain, des modèles de simulation capables d'assimiler des données multi-sources, ainsi que des mécanismes de rétroaction permettant d'optimiser les interventions agronomiques. Cette boucle fermée favorise une gestion anticipative des cultures, essentielle pour les céréales méditerranéennes où les marges de manœuvre agronomiques sont étroites et les effets du stress hydrique souvent irréversibles.

Le projet **CERERE**, financé dans le cadre du partenariat PRIMA Méditerranée pour la Recherche et l'Innovation, s'inscrit précisément dans cette perspective. Il vise à adapter et déployer des jumeaux numériques pour les systèmes céréaliers méditerranéens, en tenant compte de leurs contraintes spécifiques : régimes pluviométriques aléatoires, sols peu profonds et hétérogènes, et gouvernance collective des ressources en eau. Contrairement aux cadres génériques d'agriculture intelligente souvent développés pour des environnements contrôlés ou des systèmes à forts intrants, CERERE se concentre sur les réalités agro-écologiques et socio-techniques des cultures céréalières pluviales et à irrigation complémentaire.

Cette revue poursuit trois objectifs principaux. Premièrement, elle établit les fondements conceptuels et technologiques des jumeaux numériques agricoles, en distinguant clairement les modèles numériques, les ombres numériques et les jumeaux numériques pleinement intégrés. Deuxièmement, elle analyse les technologies habilitantes — telles que les architectures IoT, le calcul distribué (edge–fog–cloud), l'apprentissage fédéré et les modèles TinyML — au regard des exigences spécifiques de la production céréalière méditerranéenne. Troisièmement, elle synthétise les principaux domaines d'application des jumeaux numériques, incluant la gestion sol–eau sous contrainte hydrique, la surveillance des cultures, la détection des stress biotiques et abiotiques, les opérations post-récolte et l'optimisation du machinisme agricole. Enfin, cette revue identifie les principaux verrous technologiques et organisationnels, et propose un agenda de recherche orienté vers l'interopérabilité, la résilience climatique et la conception centrée sur l'agriculteur.

3. Méthodologie

La méthodologie adoptée repose sur une revue systématique et rigoureuse de la littérature scientifique consacrée aux jumeaux numériques en agriculture intelligente. Trois bases de données majeures — Scopus, Web of Science et PubMed — ont été sélectionnées en raison de leur couverture étendue de publications évaluées par les pairs. Une stratégie de recherche structurée, fondée sur des mots-clés spécifiques relatifs aux jumeaux numériques et à l'agriculture, a permis d'identifier un corpus initial de 294 articles publiés entre 2014 et 2024.

Un premier filtrage a été réalisé afin d'évaluer la pertinence des articles au regard du périmètre de l'étude, de leur alignement avec les objectifs de la revue et de la présence de résultats exploitables. Les publications ne satisfaisant pas à ces critères ont été exclues. Une seconde phase d'évaluation approfondie a ensuite porté sur la rigueur méthodologique, la pertinence scientifique et la contribution effective des études retenues. Les doublons et les articles ne répondant pas aux critères d'inclusion ont été éliminés.

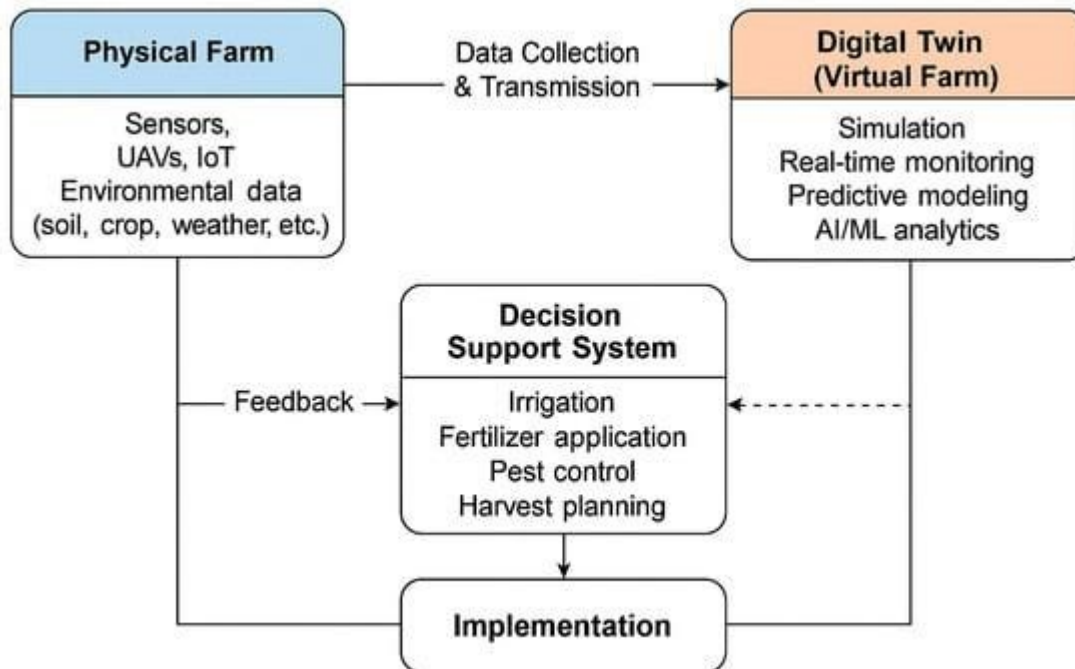
À l'issue de ce processus, 48 articles ont été sélectionnés pour constituer le corpus final de la revue. Ces travaux fournissent une base solide pour analyser l'état de l'art, les avancées récentes et les perspectives futures des jumeaux numériques en agriculture intelligente, en particulier dans le contexte des systèmes céréaliers méditerranéens.

4. Technologie des jumeaux numériques

Depuis les débuts de l'informatique, les modèles numériques de systèmes réels jouent un rôle central dans de nombreuses applications. En agriculture, ces modèles peuvent prendre la forme de représentations statiques, telles que des dessins CAO de machines agricoles, ou de modèles dynamiques simulant la croissance des cultures et le fonctionnement des systèmes de production.

Le concept de jumeau numérique dépasse ces approches traditionnelles en intégrant des flux de données en temps réel et des mécanismes de rétroaction continue entre le monde physique et le monde virtuel. De nombreuses études ont mis en évidence le potentiel des jumeaux numériques pour améliorer l'aide à la décision, optimiser l'utilisation des ressources et renforcer la surveillance des systèmes agricoles. Toutefois, la majorité des travaux existants adoptent une approche principalement applicative, avec une attention encore limitée portée aux fondements technologiques avancés nécessaires à des implémentations robustes et scalables.

Dans ce contexte, la présente revue se distingue par une analyse approfondie des technologies habilitantes et des tendances émergentes — telles que l'apprentissage fédéré, le edge computing et les modèles embarqués à faible consommation — qui conditionnent le déploiement efficace et durable des jumeaux numériques dans l'agriculture intelligente, en particulier pour les systèmes céréaliers méditerranéens.



5. Concept du Digital Twin Agricole

5.1. Modèle numérique, ombre numérique et jumeau numérique

Les concepts de **modèle numérique**, **ombre numérique** et **jumeau numérique** représentent les différentes étapes de l'évolution de la représentation numérique du monde physique [31]. Ces notions sont fondamentales dans le cadre de la transformation numérique. Kritzinger et al. [59] ont proposé une distinction claire entre ces trois concepts, présentée ci-dessous.

- Modèle numérique (Digital Model) :**
 Un modèle numérique est une représentation numérique statique d'un objet physique existant ou planifié. Il n'existe pas de transmission automatique des données entre les entités physiques et numériques. Le modèle numérique offre une représentation enrichie de l'objet physique, pouvant prendre la forme de modèles informatiques de ressources envisagées, de modèles mathématiques de produits ou d'autres types de représentations. Les données issues du système physique peuvent être utilisées pour mettre à jour le modèle numérique, mais tout transfert de données est manuel. Toute modification apportée à l'objet physique n'est pas automatiquement répercutée sur le modèle numérique, et inversement.
- Ombre numérique (Digital Shadow) :**
 L'ombre numérique correspond à une étape intermédiaire caractérisée par un transfert automatique et unidirectionnel des données de l'objet physique vers l'objet numérique. Dans cette configuration, les changements survenant dans l'objet physique entraînent des mises à jour correspondantes dans l'objet numérique. En revanche, les modifications effectuées sur l'objet numérique n'ont aucun impact sur l'objet physique. L'ombre numérique permet ainsi une surveillance et une analyse en temps réel, sans capacité de contrôle direct.

- **Jumeau numérique (Digital Twin) :**
Le jumeau numérique repose sur un échange de données bidirectionnel et entièrement intégré entre les objets physiques et numériques. Cette relation permet une mise à jour et une surveillance en temps réel, tout en autorisant le modèle numérique à influencer et contrôler l'objet physique. Toute modification de l'un des deux objets est immédiatement reflétée dans l'autre. Les jumeaux numériques permettent la réalisation de simulations avancées, de prédictions et d'optimisations sophistiquées.

Cette approche structurée met en évidence la progression allant de modèles statiques vers des systèmes dynamiques et interactifs (Fig. 3).

5.2. Technologies habilitantes

Le jumeau numérique (JN) ne doit pas être considéré comme une technologie indépendante, mais plutôt comme un **système de systèmes** intégrant un large éventail de technologies habilitantes [60,61]. Il constitue une représentation virtuelle intelligente d'une entité physique, facilitant un échange d'informations continu et bidirectionnel entre les environnements physiques et numériques [62]. Les technologies impliquées dans un jumeau numérique varient considérablement selon le cas d'usage envisagé.

Elles incluent notamment des mécanismes de génération de données basés sur l'Internet des objets (IoT), tels que des capteurs permettant la collecte de données en temps réel et des actionneurs chargés de l'exécution des actions de contrôle, ainsi que des technologies de connectivité assurant une transmission fluide des données [63]. La technologie blockchain renforce le système en garantissant l'intégrité, la sécurité et l'inviolabilité des données dans des environnements distribués [64].

Les infrastructures de communication, incluant l'informatique en périphérie (*edge computing*), le *fog computing* et le *cloud computing*, soutiennent des échanges de données fiables, à faible latence et évolutifs entre les différents composants du système [65]. Les outils de modélisation, de simulation et de contrôle des produits virtuels — tels que la modélisation 3D, les environnements de simulation, la réalité virtuelle (VR) et la réalité augmentée (AR) — permettent une reproduction détaillée et une interaction étroite avec l'actif physique [66].

Par ailleurs, les traitements intelligents basés sur l'intelligence artificielle (IA) jouent un rôle central en permettant des analyses avancées et une prise de décision autonome [67]. Ces traitements incluent l'apprentissage automatique, l'apprentissage profond, le traitement du langage naturel, la logique floue et la vision par ordinateur [68,69]. L'apprentissage fédéré favorise l'entraînement collaboratif de modèles sur des dispositifs décentralisés tout en préservant la confidentialité des données [70], tandis que TinyML permet l'exécution de modèles d'IA légers directement sur des dispositifs embarqués à ressources limitées [71–73], facilitant ainsi l'inférence en temps réel. Les principales technologies habilitantes des jumeaux numériques sont synthétisées dans la Fig. 4.

5.2.1. Internet des objets (IoT)

L'Internet des objets joue un rôle fondamental dans la mise en œuvre et l'efficacité opérationnelle des systèmes de jumeaux numériques, en particulier dans le contexte de l'agriculture intelligente [74,75]. L'IoT regroupe un vaste réseau de dispositifs physiques interconnectés, comprenant des capteurs, des actionneurs, des systèmes embarqués et des interfaces de communication, qui capturent, transmettent et, dans certains cas, exploitent les données issues de l'environnement physique [76,77].

En agriculture, cette infrastructure interconnectée constitue le lien essentiel entre les conditions réelles du terrain et leurs représentations virtuelles. Les données collectées par les dispositifs IoT servent de base à la création de répliques numériques de machines agricoles, de serres, de parcelles, de systèmes d'élevage et d'autres composantes de l'exploitation [54,78]. Ces représentations numériques ne sont pas statiques, mais dynamiques et continuellement mises à jour, reflétant en temps réel l'évolution du système physique [79,80].

L'acquisition continue de données en temps réel permet aux jumeaux numériques de fournir une vision globale et de haute fidélité de l'écosystème agricole [81,82]. Les capteurs déployés sur les différents actifs physiques fournissent des données environnementales, biologiques et opérationnelles alimentant le jumeau numérique. Les actionneurs jouent un rôle tout aussi crucial en assurant l'interface entre les décisions numériques et les actions physiques. Leur intégration dans la boucle IoT-JN favorise l'automatisation et permet aux systèmes intelligents de réagir rapidement aux conditions agricoles changeantes, sans intervention humaine constante [38].

Le bon fonctionnement de cet écosystème repose sur des technologies de communication robustes et fiables. Le choix des protocoles dépend de critères tels que la bande passante, la couverture géographique, la consommation énergétique et la disponibilité du réseau. Dans les environnements localisés (serres, élevages), des protocoles sans fil à courte portée peuvent être utilisés, tandis que les réseaux longue portée à faible consommation sont privilégiés pour les environnements agricoles étendus [83,84]. Les communications satellitaires jouent également un rôle clé dans les zones rurales isolées [85,86].

L'informatique en périphérie est de plus en plus intégrée afin de traiter les données au plus près de leur source, réduisant ainsi la latence et la consommation de bande passante. La sécurité, l'intégrité et la fiabilité des données sont essentielles au succès des jumeaux numériques basés sur l'IoT [87]. À cet égard, la blockchain apparaît comme une solution prometteuse pour renforcer la transparence, la traçabilité et la confiance dans les systèmes agricoles distribués [88,89].

5.2.2. Blockchain

La technologie blockchain est de plus en plus reconnue comme un élément fondamental pour garantir la sécurité, la transparence et la fiabilité des systèmes de jumeaux numériques [90]. À mesure que ces systèmes évoluent vers des écosystèmes complexes intégrant la génération de données, la synchronisation des modèles et la prise de décision autonome, le besoin de mécanismes décentralisés fiables devient crucial [91,92].

Dans de nombreuses applications des jumeaux numériques, notamment celles intégrant l'IoT, de grandes quantités de données sont générées en continu par des capteurs et des actionneurs distribués. Garantir l'authenticité, la traçabilité et l'immutabilité de ces données est essentiel pour assurer la fidélité et la robustesse opérationnelle du jumeau numérique. La blockchain fournit une solution robuste en s'appuyant sur un registre distribué dans lequel chaque transaction est sécurisée cryptographiquement, horodatée et enregistrée de manière permanente.

Au-delà de la sécurité des données, la blockchain contribue également à la gouvernance et à la coordination des environnements complexes de jumeaux numériques. Elle permet la mise en place de contrôles d'accès décentralisés via des contrats intelligents, attribuant des rôles et des permissions spécifiques aux différents acteurs du système. Elle joue également un rôle clé dans la gestion des versions et la traçabilité du cycle de vie des jumeaux numériques [93–95], en enregistrant les mises à jour de modèles, les résultats de simulations et les décisions prises, garantissant ainsi la reproductibilité scientifique et l'auditabilité réglementaire [96,97].

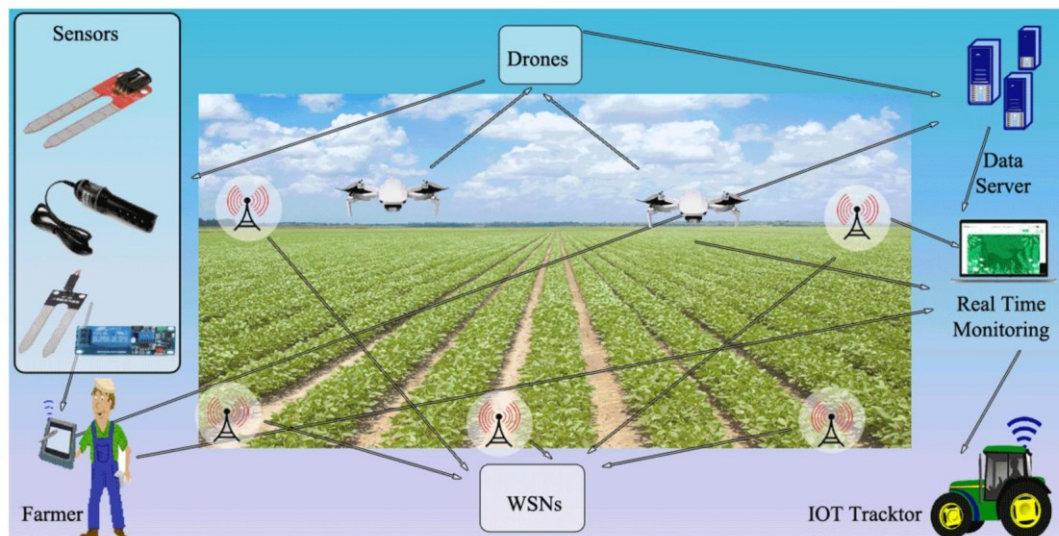
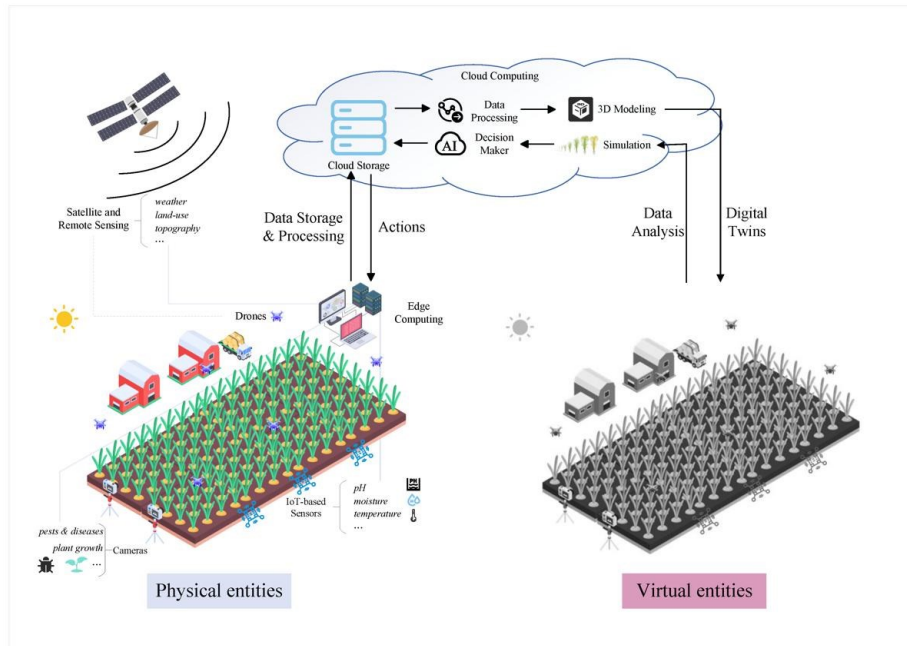
5.2.3. Intelligence artificielle et paradigmes émergents

L'intelligence artificielle joue un rôle central dans le déploiement des jumeaux numériques en renforçant leurs capacités, leur adaptabilité et leur champ d'application [99,100]. Elle englobe des sous-domaines tels que l'apprentissage automatique, l'apprentissage profond, le traitement du langage naturel, la vision par ordinateur, la logique floue, ainsi que des paradigmes émergents comme TinyML et l'apprentissage fédéré.

Les modèles d'apprentissage automatique permettent l'analyse automatisée des données, la détection d'anomalies et la prédiction de comportements à partir de jeux de données massifs et en temps réel [48,107]. L'apprentissage profond enrichit ces capacités en exploitant des réseaux neuronaux profonds pour analyser des données complexes et non structurées telles que des images, des vidéos ou des séries temporelles [108]. La vision par ordinateur permet, par exemple, la surveillance de la santé des cultures, la détection de maladies ou l'évaluation de la maturité des récoltes à partir d'images satellitaires ou de drones [51,109].

Le traitement du langage naturel améliore l'interaction homme-machine en permettant aux utilisateurs de dialoguer avec le jumeau numérique via un langage naturel [110,111]. La logique floue introduit une capacité de raisonnement humain dans des environnements incertains ou imprécis, particulièrement pertinents pour les systèmes agricoles et biologiques [106].

TinyML permet le déploiement de modèles d'IA légers sur des dispositifs embarqués à faibles ressources, favorisant l'analyse et la prise de décision en temps réel au niveau du terrain [114–117]. L'apprentissage fédéré, quant à lui, facilite l'entraînement collaboratif de modèles sur des dispositifs distribués sans partage des données brutes, garantissant la confidentialité tout en améliorant la robustesse et la généralisation des modèles [119–122].



5.3. Architecture d'un Digital Twin Agricole

L'architecture d'un Digital Twin agricole repose généralement sur quatre couches interconnectées :

5.3.1 Couche physique

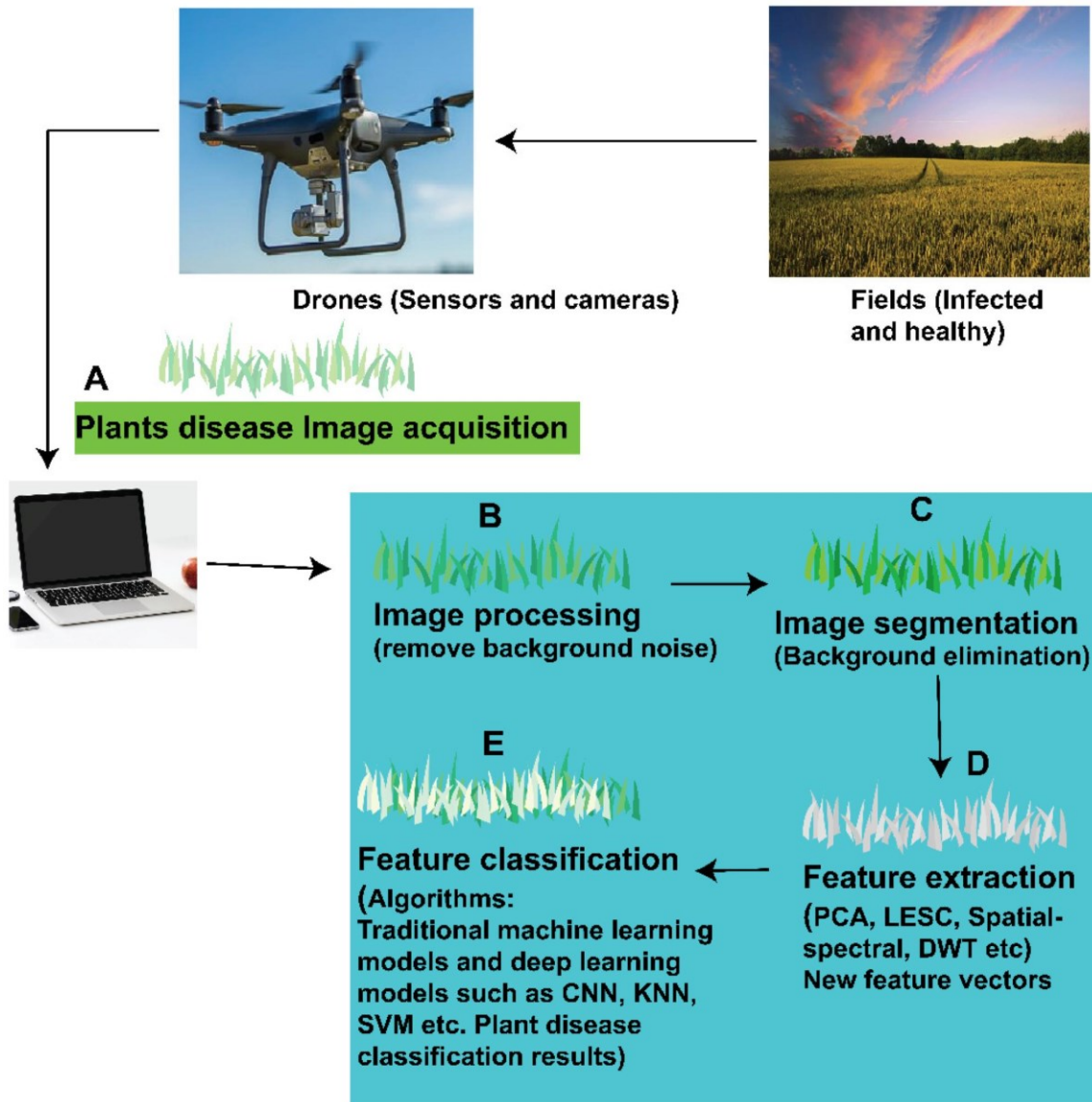
Cette couche comprend les cultures, le sol, les systèmes d'irrigation, les équipements agricoles ainsi que les paramètres climatiques. Elle constitue la source principale des données observées sur le terrain.

5.3.2 Couche d'acquisition des données

Les données sont collectées à travers différents dispositifs :

- Capteurs d'humidité du sol ;
- Stations météorologiques ;
- Capteurs de température ;
- Drones équipés de caméras multispectrales ;
- Imagerie satellitaire.

Cette couche garantit une surveillance continue de l'environnement agricole.

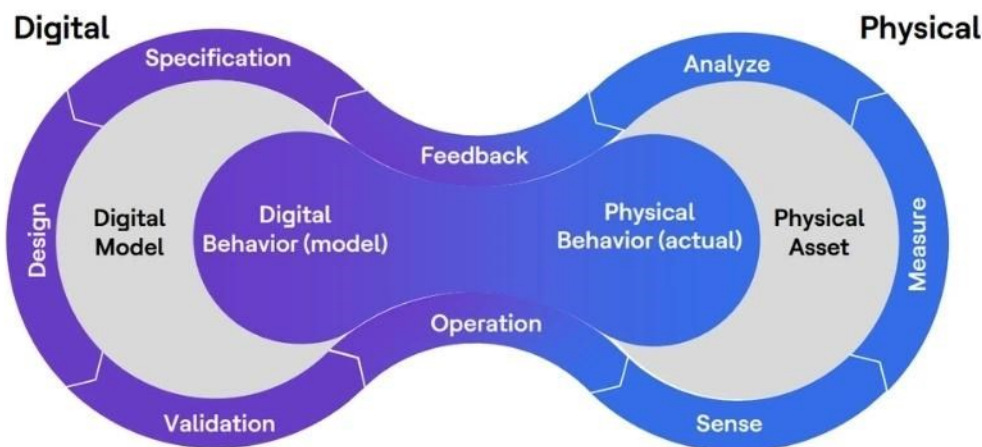
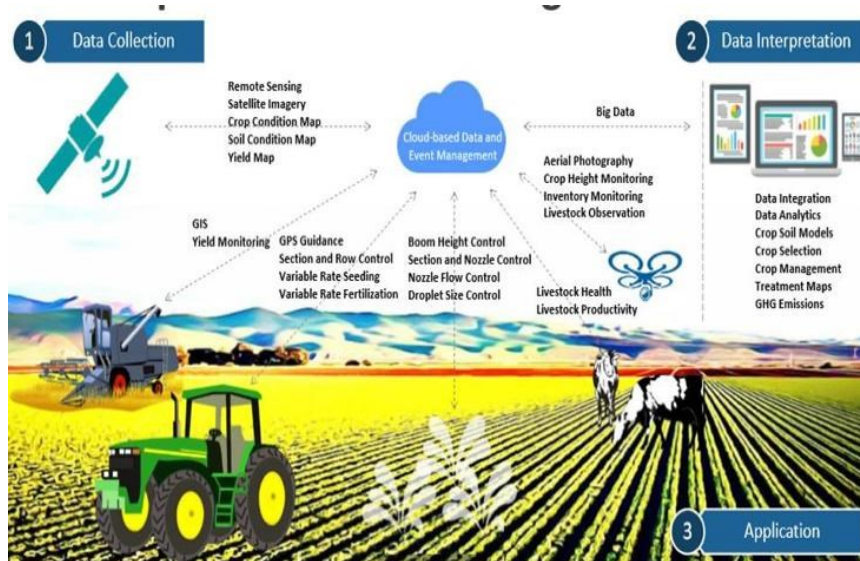


5.3.3 Couche de modélisation numérique

Les données collectées alimentent plusieurs modèles :

- Modèles de croissance des cultures ;
- Modèles hydrologiques ;
- Modèles de bilan hydrique ;
- Algorithmes d'apprentissage automatique ;
- Systèmes de prédiction des maladies.

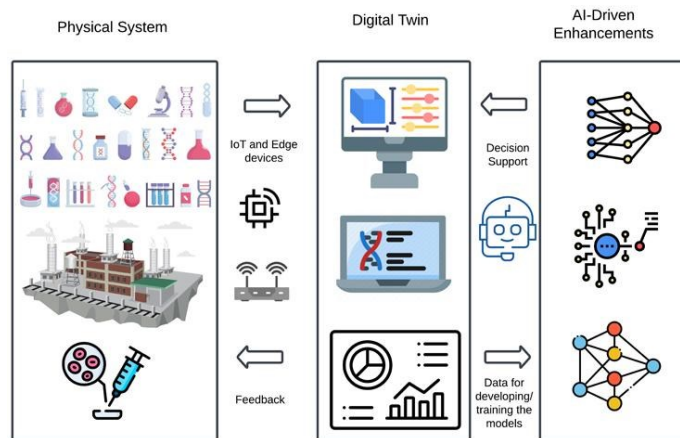
Cette couche permet de reproduire virtuellement le comportement des cultures et d'anticiper leur évolution.



5.3.4 Couche d'aide à la décision

Les résultats des simulations sont transformés en recommandations opérationnelles concernant :

- L'irrigation ;
- La fertilisation ;
- La lutte contre les maladies ;
- La planification des récoltes ;
- L'estimation des rendements.



5.4. Acquisition et Synchronisation des Données

La performance d'un Digital Twin dépend fortement de la qualité des données disponibles. Les exploitations agricoles modernes génèrent des flux importants d'informations provenant de multiples sources.

Les données collectées subissent généralement plusieurs étapes :

1. Acquisition sur le terrain ;
2. Prétraitement local via des systèmes Edge Computing ;
3. Transmission vers une plateforme Cloud ;
4. Intégration dans les modèles numériques ;
5. Génération de recommandations en temps réel.

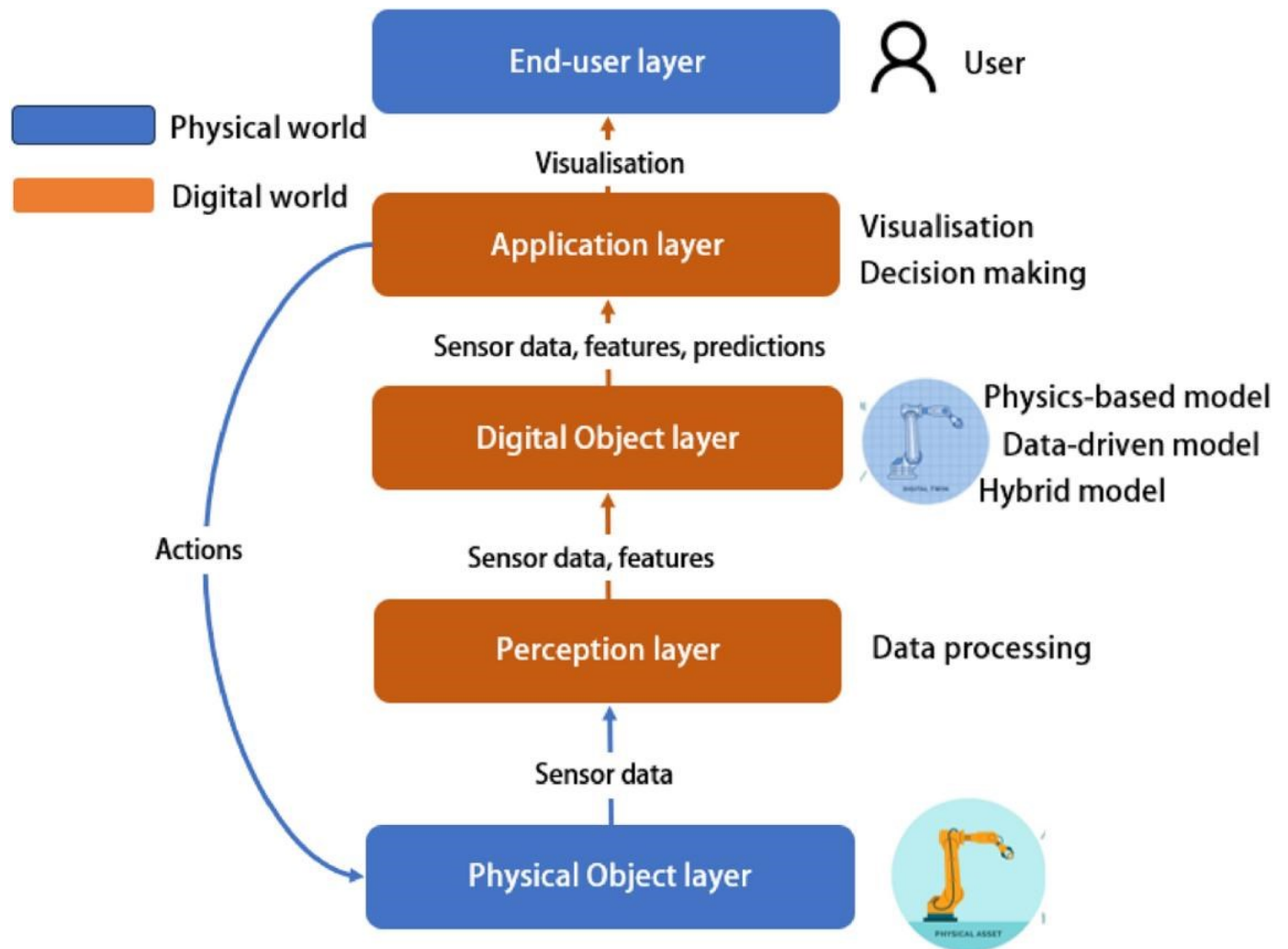
Cette boucle de rétroaction permet une adaptation continue du modèle numérique aux conditions réelles observées sur le terrain.

5.5. Sources de Données Agricoles

Les principales sources de données utilisées dans un Digital Twin agricole sont :

Source	Type de données	Usage principal
Capteurs IoT	Humidité, température, nutriments	Surveillance du sol
Stations météo	Température, pluie, vent	Prévision climatique
Drones	Images multispectrales	Détection du stress des cultures
Satellites	NDVI, LAI	Analyse à grande échelle
Données historiques	Rendements, pratiques agricoles	Calibration des modèles

La combinaison de ces sources permet d'obtenir une vision globale et précise des systèmes agricoles.



5.6. Intelligence Artificielle et Analyse Prédicative

L'intelligence artificielle constitue un composant essentiel des Digital Twins agricoles. Les algorithmes de Machine Learning exploitent les données historiques et en temps réel afin de :

- Prévoir les rendements ;
- Détecter les maladies des cultures ;
- Identifier les déficiences nutritionnelles ;
- Estimer les besoins en eau ;
- Optimiser les interventions agricoles.

Les approches hybrides combinant modèles agronomiques et intelligence artificielle offrent aujourd'hui les meilleurs résultats en matière de précision prédictive.

6. Applications du Digital Twin en Agriculture

6.1 Gestion intelligente de l'irrigation

Le Digital Twin permet de simuler différents scénarios d'irrigation et d'identifier la stratégie la plus efficace pour économiser l'eau tout en maintenant la productivité des cultures.

6.2 Fertilisation de précision

Grâce à la modélisation des besoins nutritionnels des plantes, il devient possible d'appliquer les fertilisants uniquement lorsque cela est nécessaire et dans les quantités optimales.

6.3 Surveillance sanitaire des cultures

L'analyse continue des données de terrain et des images aériennes facilite la détection précoce des maladies et des infestations parasitaires.

6.4 Prévion des rendements

Les modèles prédictifs permettent aux exploitants agricoles d'anticiper les récoltes et de mieux planifier les opérations logistiques et commerciales.

6.5 Agriculture durable

En optimisant l'utilisation de l'eau, des engrais et des produits phytosanitaires, les Digital Twins contribuent à réduire l'impact environnemental des activités agricoles.

7. Défis et Limites

Malgré ses nombreux avantages, le déploiement des Digital Twins agricoles demeure confronté à plusieurs défis :

- Variabilité importante des conditions environnementales ;
- Faible densité de capteurs dans certaines zones rurales ;
- Complexité d'intégration des données hétérogènes ;
- Besoin de calibration continue des modèles ;
- Coûts d'investissement pour les petites exploitations ;
- Questions de cybersécurité et de protection des données.

La résolution de ces problématiques représente un enjeu majeur pour une adoption à grande échelle.

8. Perspectives Futures

Les progrès récents dans les domaines de l'intelligence artificielle, de l'Internet des Objets, du Edge Computing et des communications 5G ouvrent de nouvelles perspectives pour les Digital Twins agricoles.

À l'avenir, ces systèmes pourront intégrer davantage de modèles biologiques, améliorer leur capacité d'auto-apprentissage et offrir une gestion totalement autonome de certaines opérations agricoles.

L'émergence de plateformes ouvertes et interopérables favorisera également leur adoption par un plus grand nombre d'acteurs du secteur agricole.

9. Conclusion

Le Digital Twin représente une innovation majeure pour l'agriculture de précision. En combinant données en temps réel, modélisation numérique et intelligence artificielle, il offre aux exploitants agricoles des outils puissants pour surveiller, comprendre et optimiser leurs systèmes de production.

Malgré les défis techniques et économiques encore présents, cette technologie constitue un levier stratégique pour construire une agriculture plus productive, plus durable et plus résiliente face aux enjeux futurs. Son développement continu devrait contribuer de manière significative à la transformation numérique du secteur agricole au cours des prochaines années.

Références

- Jones, J. W., et al. (2020). *Toward a New Generation of Agricultural System Models*. Agricultural Systems.
- Tao, F., et al. (2019). *Digital Twin-driven Smart Manufacturing*. IEEE Transactions on Industrial Informatics.
- Verdouw, C., Wolfert, S., Beulens, A., & Rialland, A. (2016). *Virtualization of Food Supply Chains with the Internet of Things*. Journal of Food Engineering.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). *Big Data in Smart Farming*. Agricultural Systems.
- Kritzinger, W., et al. (2018). *Digital Twin in Manufacturing and Beyond: A Classification Literature Review*.