



HAL
open science

Chapitre 4. Aider à la décision avec le numérique via la modélisation, la simulation et l'intégration de données

Frédéric Garcia, Olivier Naud, Ivana Aleksovskaja, Bachar Tarraf, Sébastien Roux, François Brun, Laure Raynaud, Mathilde Chen, Olivier Gauriau, Luis Galarraga, et al.

► To cite this version:

Frédéric Garcia, Olivier Naud, Ivana Aleksovskaja, Bachar Tarraf, Sébastien Roux, et al.. Chapitre 4. Aider à la décision avec le numérique via la modélisation, la simulation et l'intégration de données. Bellon-Maurel Véronique (ed.); Gauche Karine (ed.); Enriquez Martha-Lucia (ed.); Lyon-Caen Nathalie (ed.). Appréhender l'agriculture numérique. 10 ans de recherche interdisciplinaire au sein de l'Institut #DigitAg, Ed. Quae, pp.63-75, 2026, 978-2-7592-4255-9. <hal-05592002>

HAL Id: hal-05592002

<https://hal.science/hal-05592002v1>

Submitted on 15 Apr 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



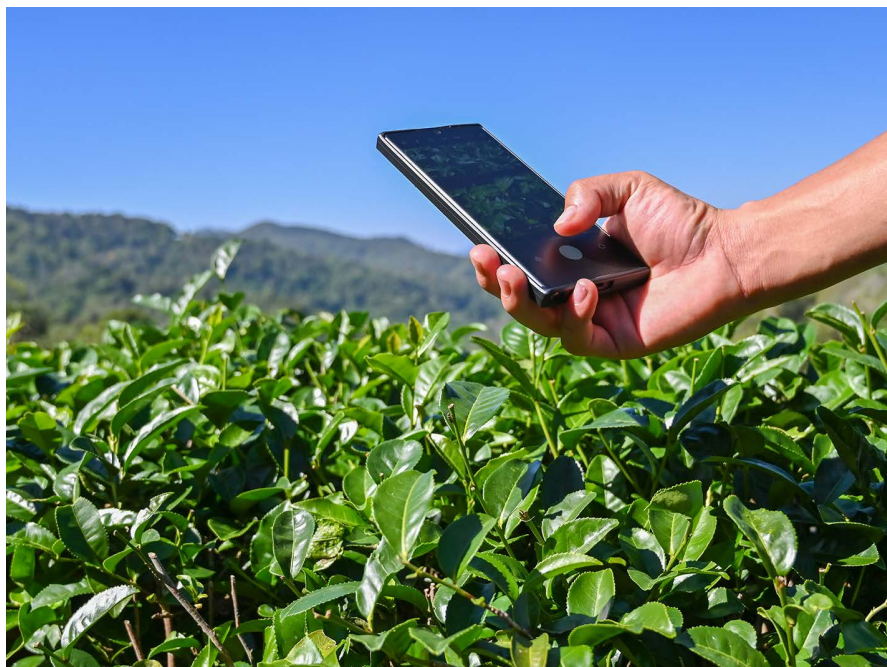
Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

APPRÉHENDER L'AGRICULTURE NUMÉRIQUE

10 ans de recherche interdisciplinaire
au sein de l'Institut #DigitAg

Véronique Bellon-Maurel, Karine Gauche,
Martha-Lucia Enriquez, Nathalie Lyon-Caen, coord.

Préface de Vincent Martin



Appréhender l'agriculture numérique

10 ans de recherche interdisciplinaire
au sein de l'Institut #DigitAg

Sous la direction de Véronique Bellon-Maurel,
Karine Gauche, Martha Lucia Enriquez,
Nathalie Lyon-Caen

Éditions Quæ

Collection Update Sciences & Technologies

Futurs de l'élevage dans les systèmes agri-alimentaires. Perspectives et évaluation multicritère de scénarios

Wilfart A., Vayssières J., coord.
2025, 220 p.

Remote Sensing and Spatial Modelling. Applications to the surveillance and control of mosquito-borne diseases

Tran A., Daudé E., Catry T., coord.
2025, 148 p.

Pour citer cet ouvrage

Bellon-Maurel V., Gauche K., Enriquez M.L., Lyon-Caen N., 2026. *Appréhender l'agriculture numérique. 10 ans de recherche interdisciplinaire au sein de l'Institut #DigitAg*, Versailles, éditions Quæ, 224 p., <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4255-9>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication dont la procédure est décrite ici :

<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par intelligence artificielle.

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par l'Institut Convergences #DigitAg (ANR-16-CONV-0004).

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex
www.quae.com – www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2026

ISBN (imprimé) : 978-2-7592-4254-2
ISBN (ePub) : 978-2-7592-4256-6

ISBN (pdf) : 978-2-7592-4255-9
ISSN : 1773-7923

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Chapitre 4

Aider à la décision avec le numérique *via* la modélisation, la simulation et l'intégration de données

*Frédéric Garcia, Olivier Naud, Ivana Aleksovska, Bachar Tarraf, Sébastien Roux,
François Brun, Laure Raynaud, Mathilde Chen, Olivier Gauriau, Luis Galarraga,
Alexandre Termier, David Makowski, Léo Pichon, Yulin Zhang, Bruno Tisseyre, Julien Sarron,
Émile Faye, Éric Malézieux, Anice Cheraiet, Sébastien Codis, Léa Courteille, Léa Tardieu,
Hazaël Jones, Patrice Loisel, Marie Gosme, Gabriel Volte, Rodolphe Giroudeau, Éric Bourreau,
Alain Rapaport, Bruno Cheviron, Ruben Chenevat, Nesrine Kalboussi, Patrick Taillandier,
Ellen Laclef, Amandine Lurette, Arthur Scriban, Étienne Delay, Jonathan Vayssières,
Paulo Salgado, Larisa Lee-Cruz, Eve Miguel, Annelise Tran*

Cela a été montré dans les trois premiers chapitres de cette partie, les données, qui se diversifient et se massifient, sont un nouvel intrant, transformateur de l'agriculture. Pour que ces données constituent un apport valorisable sur le plan agronomique et pour la transition écologique, il est nécessaire de les structurer et de les transformer en informations mobilisables pour l'action. Le chapitre précédent concernait principalement les systèmes d'information pour les données, les connaissances et le support décisionnel. Le présent chapitre aborde résolument la modélisation, que l'on énonce au singulier en tant qu'activité, mais qui recouvre un ensemble très varié de méthodes et d'objectifs. Ces modélisations, donc, sont élaborées pour répondre aux différentes fonctions cognitives, décisionnelles et opérationnelles qui relèvent de l'aide à la décision.

Ce chapitre abordera les différentes étapes et les différents acteurs de la décision, depuis le diagnostic et le conseil agricole jusqu'à la mise en œuvre au champ. Le choix a été fait ici de regrouper les questions scientifiques abordées dans #DigitAg autour de l'usage de la modélisation, de la simulation et de l'optimisation pour l'aide à la décision en différentes parties portant sur (1) le suivi de l'état des cultures et des agroécosystèmes en général, (2) la prédiction et la gestion des risques, (3) l'optimisation des systèmes au stade de la conception comme au stade de la conduite de production, et enfin (4) l'évaluation du fonctionnement de ces systèmes.

►► Suivre l'état des cultures

Le suivi des dynamiques de l'état d'une culture est un des éléments essentiels de la prise de décision agricole. Ce thème est abordé à travers plusieurs principes d'acquisition des données, de l'observation humaine collaborative soutenue par des modèles, à l'analyse automatisée d'images prises au sol ou par des drones.

Le *crowdsourcing* pour le suivi de l'état hydrique de la vigne

Une approche prometteuse pour suivre le stress hydrique est la collecte collaborative d'observations par les acteurs de la filière viticole, appelée *crowdsourcing*. Au cours de travaux de #DigitAg, il a été montré qu'elle permet de collecter un volume de données important (Pichon *et al.*, 2021), en particulier à travers l'application mobile ApeX-Vigne (voir chapitre 1). Cette application utilise une méthode simple et accessible d'évaluation visuelle de la croissance des rameaux (Pichon *et al.*, 2023), données ensuite utilisées pour prédire l'état hydrique de la vigne en s'appuyant sur une modélisation prédictive et un rééchantillonnage bayésien (Zhang *et al.*, 2024). Cette nouvelle source de données offre des opportunités pour estimer des variables difficiles d'accès à l'échelle régionale, comme la réserve utile des sols (Zhang *et al.*, 2025). L'un des enjeux majeurs pour que cette approche de *crowdsourcing* se démocratise est le développement de méthodes d'estimation – et d'amélioration – de la qualité des données collectées. Des approches automatiques s'appuyant sur la saisonnalité et les dynamiques spatiales connues des phénomènes étudiés ont été explorées dans le cadre de la thèse de Léo Pichon afin d'identifier des observations au comportement surprenant qui peuvent être à éliminer (aberrants) ou au contraire à étudier plus en détail (cépage résistant, itinéraire cultural résilient, etc.)

Estimation spatialisée multiéchelle des rendements du manguiier par analyse d'images

Dans les pays du Sud, l'estimation des rendements des cultures fruitières est un enjeu majeur, rendu complexe par le contexte socio-économique et agronomique de production dans de petites parcelles diversifiées et hétérogènes, contexte auquel les outils numériques généralement disponibles sont inadaptés. En prenant comme cas d'étude la filière de la mangue en Afrique de l'Ouest, différentes approches basées sur l'agriculture numérique ont été mises en œuvre pour estimer et spatialiser les rendements du manguiier aux échelles de l'arbre et des vergers, à travers deux thèses soutenues par #DigitAg (voir chapitre 1).

À l'échelle de l'arbre, il s'agit de comptabiliser les fruits par analyse d'image. Il a été montré que la production individuelle du manguiier peut être estimée en prenant deux photos de chaque arbre avec un smartphone (Sarron *et al.*, 2023). Ces photos sont traitées par des algorithmes d'apprentissage profond entraînés sur les principales variétés de mangue d'Afrique de l'Ouest (Borianne *et al.*, 2023).

À l'échelle du verger, l'imagerie de drone permet d'extraire des variables 3D des arbres et de les relier avec leur production individuelle (Sarron *et al.*, 2018), pour obtenir des cartes de rendements spatialisés. En parallèle, des modèles d'extrapolation ont été développés. Implantés au cœur de l'outil PixFruit®, ils permettent d'estimer le rendement du verger uniquement à partir des images acquises sur un échantillon d'arbres (voir encadré 11.3, chapitre 11).

► Prédire et gérer les risques

L'agriculture est une activité humaine de production dont une des caractéristiques est la dimension hautement incertaine de plusieurs des facteurs sur lesquels elle repose, dont en particulier le climat. Mieux maîtriser cette incertitude passe par la mise au point de modèles prédictifs de grande qualité.

Améliorer les prévisions météo avec les prévisions d'ensemble

De nombreux outils d'aide à la décision (OAD) en agriculture s'appuient sur des prévisions météorologiques qui peuvent être très incertaines. Pour quantifier ces incertitudes de prévision, les centres météorologiques, dont Météo-France, ont développé des systèmes de prévision probabilistes, reposant sur des prévisions d'ensemble, qui permettent de représenter la variabilité possible de l'atmosphère. Plusieurs actions ont été menées dans ce cadre au sein de #DigitAg, à travers des collaborations entre l'Acta, Météo-France et INRAE, visant à explorer l'utilisation opérationnelle de ces prévisions d'ensemble dans les OAD agricoles.

La thèse d'Ivana Aleksovska (2020) a montré l'intérêt des prévisions d'ensemble pour aider les agriculteurs à anticiper l'application de produits phytosanitaires en considérant deux OAD opérationnels : EVA pour le ver de la grappe en viticulture et Septo-LIS pour la septoriose du blé. Le bénéfice potentiel des prévisions d'ensemble pour ces modèles a été établi par comparaison à une approche courante en agriculture qui consiste à utiliser des séries historiques d'observations météorologiques (Aleksovska *et al.*, 2018). Les OAD nécessitent des prévisions de haute résolution spatiale à court terme et aussi des prévisions à plus long terme (jusqu'à deux semaines), disponibles à une résolution plus faible. Une méthode a été proposée pour tirer parti de ces complémentarités entre modèles de prévisions aux caractéristiques variées (résolutions spatiales et temporelles, échéances, etc.) (Aleksovska *et al.*, 2021).

Dans la suite des travaux de Léo Pichon sur le suivi de l'état hydrique du vignoble à l'échelle régionale, le stage de Yulin Zhang puis le postdoctorat de Bachar Tarraf (Tarraf *et al.*, 2024) ont porté sur un OAD de prévision du stress hydrique en vigne associé au modèle de culture WaLIS et aux prévisions météorologiques d'ensemble. L'amélioration des prévisions de stress hydrique a été évaluée en s'appuyant sur des scores de performance appropriés aux prévisions probabilistes. Les résultats montrent une amélioration significative avec l'utilisation des prévisions d'ensemble par rapport aux ensembles d'observations historiques, prévisions pouvant encore être améliorées par un ajustement à l'aide de données locales provenant de stations météorologiques installées par des agriculteurs. Une analyse de sensibilité, visant à comparer l'impact de différentes sources d'incertitude, a également été conduite. Les résultats montrent que toutes les sources d'incertitude sont importantes, et que l'importance de chaque source varie en fonction du délai d'anticipation (figure 4.1).

Pour finir, ces travaux ont permis de proposer l'outil AléaPluie, service entièrement gratuit de prévisions probabilistes de cumul de précipitations pour l'agriculture. Il fournit les probabilités d'atteindre un certain seuil de cumul de précipitation sur deux semaines, sous forme de cartes. Les agriculteurs et conseillers l'utilisent dans leur région sur différentes thématiques, notamment pour les semis de colza (Brun *et al.*, 2023).

Prévision du risque de maladie avec le machine learning

Le choix raisonné de produits phytosanitaires, ou de solutions comme celles de biocontrôle, et de leurs moments d'application nécessite de disposer pendant la saison culturale d'informations précises sur les risques épidémiques concernant les bioagresseurs. Dans sa thèse portant sur le mildiou de la vigne, maladie à l'origine de nombreux traitements fongicides, Mathilde Chen (2019) a évalué sur le plan statistique l'intérêt de déclencher

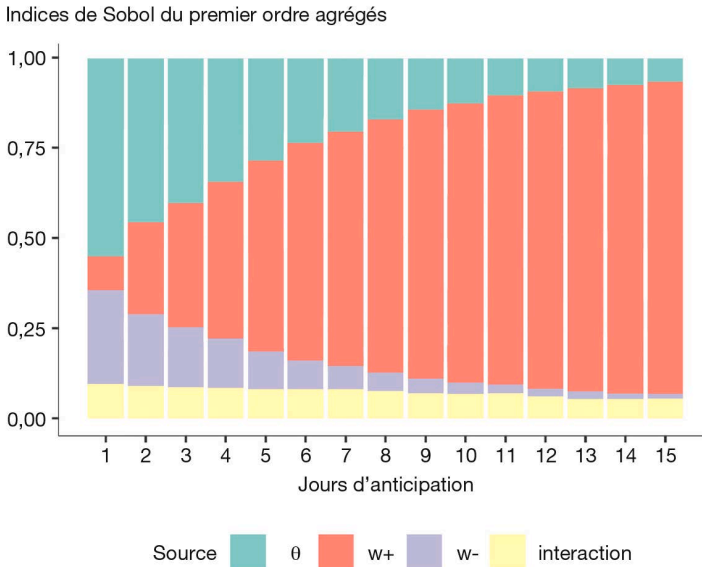


Figure 4.1. Sources d'incertitude sur les sorties du modèle de stress hydrique viticole WaLIS : en vert, les paramètres du modèle; en violet, les observations météorologiques antérieures; en rouge, les prévisions météorologiques. L'abscisse du graphe représente le nombre de jours d'anticipation et l'ordonnée, une mesure d'impact de l'incertitude. Source : Taraf *et al.* (2025).

la lutte à partir de la date d'apparition des symptômes de la maladie. Des observations épidémiologiques collectées dans tout le Bordelais ont été analysées à l'aide de modèles de survie (Chen *et al.*, 2019a), et l'expertise locale a été étudiée (Chen *et al.*, 2019b). Il apparaît que les premiers traitements sont réalisés dans la région de Bordeaux en moyenne trois semaines avant l'apparition des premiers symptômes. Avec l'hypothèse d'un démarrage des premiers traitements à l'apparition des premiers symptômes, il serait théoriquement possible, avec un rythme d'application bihebdomadaire, de réduire de 56% en moyenne les traitements par rapport aux pratiques actuelles de cette région (Chen *et al.*, 2020a). À l'aide de méthodes de machine learning, Chen *et al.* (2020b) ont montré que la précocité et la gravité des épidémies de mildiou étaient fortement liées.

La thèse d'Olivier Gauriau (2024) présentée au chapitre 2 étend ces approches de machine learning pour deux maladies (mildiou de la vigne et cercosporiose de la betterave), en ouvrant la question de l'interprétabilité des modèles appris. La prédiction porte sur la date d'apparition des premiers symptômes et sur l'intensité de la maladie en fin de campagne, en se basant sur des indicateurs météorologiques et agronomiques. Pour trouver un compromis entre la performance des approches de machine learning et la complexité des modèles appris (estimée par leur taille), des approches dites *pattern-based* ont été mobilisées et comparées à des méthodes couramment utilisées (Gauriau *et al.*, 2024). Ces modèles ont alors été utilisés dans la mise au point d'un prototype pour l'exploration et la visualisation de modèles prédictifs à destination des experts en protection des cultures (Anemone¹³ : cartographie pour la prédiction des agents pathogènes, dans la vitrine numérique de #DigitAg).

13. <https://anemone.hdigitag.fr>

► Aider à la conception et à la décision, optimiser la conduite

Les modèles, dans des formalismes diversifiés, accompagnent toutes les étapes de la gestion d'un système cultural, de sa conception à sa conduite. On abordera dans un premier temps la modélisation pour l'analyse et la simulation, avant de se pencher sur l'optimisation par l'analyse combinatoire et par la commande.

Modéliser, simuler et visualiser pour agir

Cette section aborde, au travers de la réalité augmentée, de la cartographie et du zonage, et enfin de la conduite d'une culture, l'utilisation de la modélisation pour se faire une idée des possibles, afin de faire les bons choix de conception ou de conduite.

La réalité augmentée pour faciliter la conception de systèmes agroforestiers

L'agroforesterie est une voie prometteuse pour une agriculture durable, résiliente et adaptée au changement climatique. Toutefois, la grande diversité des possibilités d'implantation et des modes de gestion, et le temps long caractéristique de la croissance des arbres rendent difficile la transition vers ces systèmes. Un accompagnement des agriculteurs s'avère alors particulièrement utile, par exemple sous la forme d'ateliers de conception réunissant plusieurs agriculteurs, des experts ou des spécialistes de plusieurs domaines. Dans la thèse de Laetitia Lemiere (2023), des techniques de « réalité augmentée » ont été développées pour animer ces ateliers. Cela a permis d'allier, en simulant la conversion vers l'agroforesterie de parcelles, les avantages de la convivialité d'une maquette physique (ici, avec des jetons colorés, dont la nature et la position sont identifiées par analyse d'image) et la puissance de visualisation et de projection d'une modélisation informatique (intégrant l'évolution tridimensionnelle des objets, plantes et arbres, figurés sur la maquette ponctuels, linéaires et surfaciques, et leur évolution et leurs interactions dans le temps). Cette modélisation, basée sur le formalisme des cartes combinatoires (un type de graphe multidimensionnel; Lemiere *et al.*, 2023), est compatible avec les représentations utilisées dans les outils agroforestiers existants, facilitant ainsi leur couplage (comme les modèles de performance économique et environnementale). Les utilisateurs peuvent visualiser des données en réalité augmentée, soit sur la maquette soit directement sur une parcelle, pour se projeter dans leur futur système. Les différents modules de cette chaîne de traitement ont été testés auprès de conseillers agricoles. Un démonstrateur grand public, AgroforestAR¹⁴, pour visualiser des systèmes agroforestiers au champ a été développé sous la forme d'une application gratuite pour iOS et Android, dans le cadre des vitrines numériques de #DigitAg.

Conception de cartes de qualité des sols facilitant la prise en compte de l'incertitude dans la prise de décision

Les cartes d'indicateurs environnementaux comme les services écosystémiques, la qualité des sols, les indicateurs de biodiversité sont essentielles pour appuyer les décisions d'aménagement du territoire. Cependant, les décideurs ont tendance à ignorer les incertitudes généralement élevées qui leur sont associées, en dépit de leur importance pour percevoir les limites des données et pour identifier les zones où les décisions

14. Application APK à télécharger sur PlayStore et AppStore.

doivent être prises avec précaution. Bien que les cartographes, des sols notamment, aient entrepris divers efforts pour mieux communiquer sur ces incertitudes, les décideurs publics peinent encore à appréhender cette information et ses implications.

La thèse de Léa Courteille (2025) porte sur cet enjeu de visualisation de l'incertitude, dans des cartes de qualité des sols. Étudiant tout leur cycle de vie, de la spatialisation initiale de l'indice de qualité à l'utilisation de la carte pour la prise de décision territoriale, elle développe des méthodes pour faciliter l'intégration de l'incertitude dans le processus décisionnel (Courteille *et al.*, 2024) et impliquer des utilisateurs pour évaluer l'opérationnalité des cartes produites (Courteille *et al.*, 2025). Elle montre que la représentation conventionnelle des cartes environnementales n'est pas optimale pour appuyer les décisions, et formule des recommandations à destination des cartographes, pour qu'ils fournissent un meilleur appui aux décisions d'aménagement du territoire.

Zonage de parcelles agricoles et cartes de rendement

Dans une démarche d'agriculture de précision, basée sur une gestion différenciée au sein de la parcelle (*site-specific management*), le zonage intraparcellaire consiste à diviser les parcelles agricoles en zones de gestion cohérentes, interprétables du point de vue de l'agriculteur, et compatibles avec le matériel agricole (largeur de travail des outils, temps de réponse pour changer une consigne telle qu'une quantité d'intrants). Une recherche #DigitAg a permis de définir un critère numérique pour évaluer la qualité du zonage (Loisel *et al.*, 2019); il prend en compte à la fois l'homogénéité interne des zones et la différence entre les zones voisines, et peut intégrer un modèle de performance d'itinéraire technique. Une procédure d'optimisation utilise ce critère pour affiner les contours des zones en se basant sur la distribution statistique des données, représentée par un découpage en quantiles. La méthodologie a été testée avec succès sur des données simulées et réelles, démontrant sa capacité à produire un ensemble de zonages pertinents pour les praticiens. Le choix final de la carte la plus appropriée dépend de l'utilisateur ou de l'expert, en tenant compte du contexte spécifique et de la granularité souhaitée. La méthode a été implémentée dans un package R appelé *geozoning*. Ce package a été traduit en Python, et la performance d'itinéraires techniques (en matière de rendement sous contrainte d'irrigation) y a été intégrée.

Pulvérisation de précision viticole : raisonner les apports au plus près du végétal et des besoins

Le doctorat d'Anice Cheraïet (2020) propose une démarche inédite pour une pulvérisation viticole de précision. Elle s'appuie sur un objectif fonctionnel de dose rapportée au végétal, exprimé sous la forme d'une distribution statistique des dépôts de produits obtenus (Cheraïet *et al.*, 2021). Celle-ci dépend des caractéristiques morphologiques du végétal, de son stade de croissance et de l'efficacité du pulvérisateur. Le cadre d'aide à la décision combine capteurs, modélisation statistique et évaluation multicritère. Une chaîne de traitement automatisée de données issues d'un LiDAR terrestre mobile permet de construire trois indicateurs structuraux complémentaires : hauteur, épaisseur, porosité optique du feuillage (Cheraïet *et al.*, 2020). Lors de plusieurs campagnes, ces indicateurs ont été croisés avec les distributions de dépôts mesurés dans le couvert pour différents pulvérisateurs. Des modèles prédictifs des distributions des dépôts ont été élaborés sur la base de ces données. Ces prédictions ont été intégrées dans un cadre de simulation et d'évaluation de scénarios technologiques pour évaluer l'impact

de l'échelle spatiale de décision et des hypothèses de gestion du risque. Ce qui est appelé précision ici ne repose pas seulement sur la technologie embarquée, mais aussi sur la mise en évidence des compromis possibles pour l'agriculteur entre réduction des intrants, qualité de la protection et contraintes opérationnelles.

L'optimisation pour la décision et la commande

La modélisation offre l'opportunité d'optimiser la gestion des opérations techniques en fonction des situations différenciées qui se présentent à l'agriculteur. Deux exemples illustrent des approches adaptées à des opérations innovantes en agriculture : l'optimisation combinatoire pour la vendange sélective et la commande optimale pour l'irrigation.

La recherche opérationnelle pour optimiser la récolte sélective en agriculture

En identifiant les actions différenciées opportunes, l'agriculture de précision crée des besoins d'optimisation de la coordination entre ces actions, besoins pour lesquels la recherche opérationnelle dispose de méthodes scientifiques adaptées. C'est ainsi que la thèse de Gabriel Volte (2021) a porté sur l'optimisation du parcours d'une vendangeuse pour la vendange sélective, avec une machine disposant de deux trémies pouvant récolter deux qualités de raisin différenciées. Tous les trajets parmi les rangs d'une parcelle à récolter ne sont pas équivalents car, d'une part, chaque fois qu'une trémie est pleine, il est nécessaire de vidanger celle-ci dans une remorque et, d'autre part, les différents rangs ne contiennent pas la même quantité de raisin de chaque qualité. Le problème, identifié dans Briot *et al.* (2015), avait été étudié avec des méthodes de propagation de contraintes, puis modélisé selon le paradigme des systèmes à événements pour une résolution par analyse d'accessibilité à coût optimal (Saddem-Yagoubi *et al.*, 2020). Dans ces travaux, du fait du nombre très élevé de possibilités à évaluer (phénomène dit d'explosion combinatoire), la résolution exacte n'était effective que pour un nombre limité de rangs dans la parcelle récoltée (quatorze rangs dans Saddem-Yagoubi *et al.*, 2020). Dans #DigitAg, cette question a été abordée par une approche de recherche opérationnelle. La qualité des raisins est préalablement classifiée et cartographiée grâce à une observation satellite et à une prédiction heuristique. Le problème a été traité en utilisant l'outil VRPSolver, particulièrement performant en temps de calcul pour la résolution de problèmes de transport. Les contraintes très particulières, et notamment la contrainte d'ergonomie de conduite qui impose d'alterner le sens de parcours à chaque nouveau rang récolté, rendent le problème beaucoup plus complexe qu'une optimisation de tournées de véhicules en présence d'une capacité de charge limitée. Plusieurs combinaisons d'algorithmes ont été proposées. Elles permettent de résoudre des cas réalistes en nombre de rangs (24 dans le cas d'étude), et réalistes pour le paramétrage de la quantité minimale de raisin de la meilleure qualité à trier. Les temps de résolution pour ces cas réalistes sont inférieurs à la minute, performance très supérieure aux travaux précédents (Volte *et al.*, 2023).

Deux autres thèses (unité mixte de recherche MISTEA) se sont attachées à assister les agriculteurs dans la planification de leurs cultures. Elles concernent les systèmes maraîchers agroécologiques, caractérisés par des rotations culturales courtes et une grande diversité. Baptiste Darnala propose deux approches – une approche sémantique basée sur la construction et la publication d'une ontologie de domaine (C3PO) (Darnala *et al.*, 2023) et une approche d'apprentissage pour prédire la culture suivante, à la suite d'une séquence de données historiques – et démontre l'intérêt de leur

complémentarité. Avec le même objectif de planification des rotations maraîchères, Margot Challand combine la programmation sous contraintes avec des approches participatives impliquant des maraîchers dans une démarche très fortement interdisciplinaire (Challand *et al.*, 2025).

Commande optimale de l'irrigation : double modélisation agronomique et mathématique, application au modèle Optirrig

Dans un contexte de changement climatique et de nécessaire préservation des ressources en eau, la conception de stratégies d'irrigation permettant aux agriculteurs de minimiser les quantités d'eau apportées représente un enjeu important. À la suite du postdoctorat #DigitAg de Nesrine Kalboussi (Kalboussi *et al.*, 2022), les stratégies d'irrigation ont été analysées comme des lois de commande optimale associées à des modèles simplifiés de culture dans les travaux de thèse de Ruben Chenevat (Chenevat *et al.*, 2024). Cette approche a permis de faire émerger des structures de politiques optimales « à seuils », très cohérentes avec celles couramment utilisées par les exploitants (figure 4.2). Ces stratégies tactiques par « rétroaction » sont adaptées aux grandeurs accessibles sur le terrain et leurs propriétés peuvent être étudiées par des explorations numériques qui seraient trop lourdes à conduire sur des modèles plus détaillés. Ces stratégies peuvent ensuite être affinées avec des modèles plus complexes, comme le modèle Optirrig (dans une approche de « double modélisation », entre analyse mathématique et simulation numérique). Ce travail a donné lieu à des contributions en théorie mathématique de la commande optimale et en gestion de l'eau.

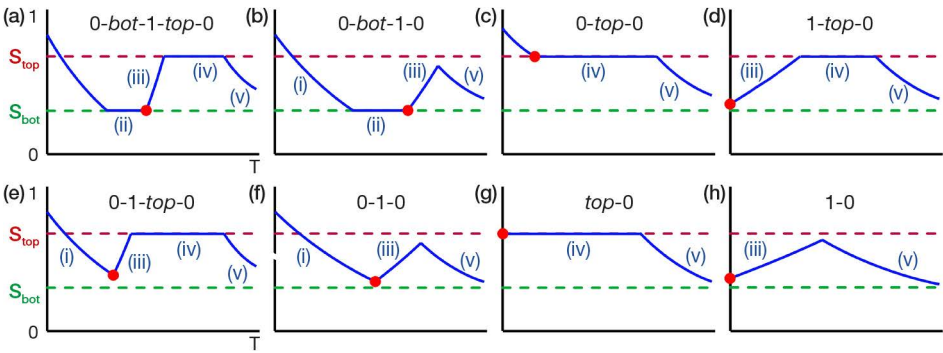


Figure 4.2. Huit scénarios d'évolution de l'humidité, de (a) à (h), selon 8 séquences optimales de commande constituées de successions d'arcs décroissants (pas d'irrigation), croissants (irrigation maximale) ou constants (irrigation ajustée pour maintenir un niveau d'humidité constant). Ces séquences sont calculées selon la théorie de la commande optimale en fonction des caractéristiques du système sol-culture, des conditions initiales et du budget en eau disponible. S_{top} et S_{bot} sont des seuils. En ordonnée, évolution de l'humidité du sol; en abscisse, le temps. Source : Chenevat *et al.* (2025).

►► Éclairer la décision collective via la modélisation et la simulation

La transformation de l'agriculture passe aussi par des décisions collectives et des politiques publiques. La modélisation à des échelles qui dépassent l'exploitation aide à comprendre les mécanismes et à orienter ces politiques. Même si cet enjeu n'est pas au

cœur de #DigitAg, orienté vers l'accompagnement des agriculteurs et des conseillers, il a donné lieu à plusieurs recherches décrites ci-dessous et dans d'autres chapitres (voir chapitre 10).

Évaluation territoriale du rôle de l'intégration agriculture-élevage dans la séquestration du carbone par les sols cultivés en Afrique de l'Ouest

Dans la région semi-aride du Sahel, l'élevage pastoral mobile permet au troupeau d'exploiter efficacement les ressources naturelles et contribue ainsi aux transferts de fertilité vers les zones cultivées. Pour suivre ces transferts de fertilité, un système multiagent (SMA) a été développé (Scriban, 2024). Ce modèle spatialement explicite formalise les pratiques agricoles et propose une représentation dynamique de leur fonctionnement biophysique. Son développement a nécessité la mobilisation de dispositifs expérimentaux et de méthodologies de diverses disciplines, en particulier le suivi GPS de bétail et l'entraînement de modèles de machine learning sur les données obtenues pour caractériser les échanges des troupeaux avec leur environnement (Scriban *et al.*, 2024). Par ailleurs, une analyse de cycle de vie comparative de systèmes d'élevage sénégalais a permis d'identifier les facteurs d'émission critique.

Le modèle de simulation a ainsi permis de montrer que les systèmes agraires intégrant agriculture et élevage, plus efficaces, permettent aussi de séquestrer du carbone organique dans les sols cultivés. Cette séquestration réduit la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère tout en contribuant à une meilleure fertilité des sols. Le modèle, le script de machine learning et leurs documentations sont disponibles en sources ouvertes¹⁵.

Intégration de données hétérogènes pour la simulation des contacts entre bétail et faune sauvage

Les contacts, directs ou indirects, entre herbivores sauvages et domestiques peuvent entraîner la transmission d'agents pathogènes, avec des impacts négatifs sur la sécurité alimentaire et sur les revenus des populations humaines, la conservation des espèces sauvages et la santé humaine dans le cadre de maladies zoonotiques. La modélisation de ces contacts entre espèces est un outil puissant pour identifier les zones et les saisons où ces contacts sont les plus probables, pour appréhender différents scénarios de changement climatique ou de pratiques agricoles et d'élevage, pour éclairer le cas échéant des décisions d'aménagement.

Un modèle dynamique spatialement explicite a été élaboré pour simuler les mouvements des buffles sauvages et des bovins domestiques dans les zones d'interface entre zones protégées et zones communales à proximité du parc national de Hwange, au Zimbabwe (Rumiano *et al.*, 2024). Le modèle (figure 4.3) prend en compte des données hétérogènes décrivant les ressources disponibles pour les animaux (pâturages et points d'eau) ainsi que leur évolution dans le temps, et l'utilisation des zones protégées et communales pour les activités agricoles et la conduite du bétail (Lee-Cruz *et al.*, 2025). L'utilisation de ce modèle, validé par des données de télémétrie sur les mouvements des buffles et du bétail, permettrait aux différents acteurs (agriculteurs, gestionnaires des zones protégées, opérateurs touristiques, organismes de conservation de la faune sauvage) une prise de décision concertée pour une gestion durable des ressources partagées telles que l'eau et les zones de pâturages.

15. <https://gitlab.cirad.fr/selmet/hamac>

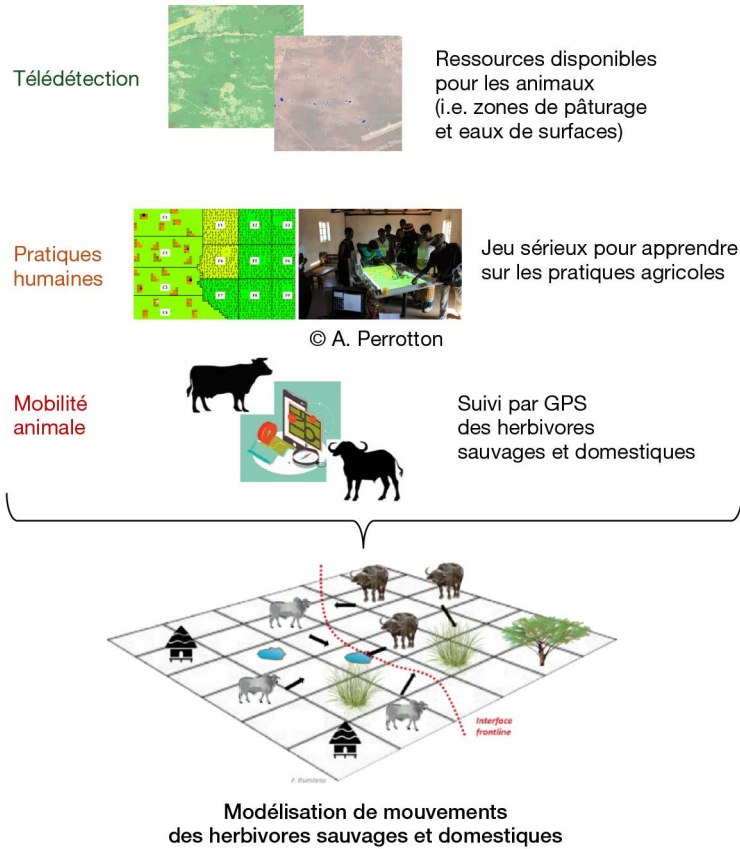


Figure 4.3. Intégration de données hétérogènes pour la modélisation de contacts entre herbivores sauvages et domestiques.

D'autres systèmes de modélisation en élevage, en particulier des systèmes à événements, des modèles individus-centrés, sont décrits au chapitre 9.

Simulation et évaluation de scénarios de pratiques alternatives pour une reproduction sans hormones dans les exploitations ovines laitières

Face aux controverses sur les conditions de production de l'hormone eCG (*equine chorionic gonadotropin*) utilisée pour induire et synchroniser les chaleurs des brebis en élevage ovin laitier, la filière explore des alternatives de gestion de la reproduction pour maintenir l'insémination animale et les schémas de sélection génétique, tout en assurant la régularité de la production. Le simulateur REPRIN'OV, basé sur une modélisation multiagent, a été développé pour simuler le fonctionnement d'exploitations ovines laitières intégrant une reproduction sans traitements hormonaux. Il modélise les processus individuels de reproduction et de lactation, les interactions entre animaux, éleveur et environnement, ainsi que les conséquences sur les performances techniques, économiques, environnementales et organisationnelles des exploitations (Laclef, 2022). Calibré sur quatre exploitations types des bassins de production des AOP Roquefort et Ossau-Iraty, l'outil a permis d'évaluer *ex ante* les impacts de

pratiques alternatives, notamment l'utilisation de « l'effet mâle » (introduction d'un bélier dans le troupeau pour induire et synchroniser les chaleurs). Les résultats, qui varient selon les contextes – baisse de la fertilité, étalement des agnelages, diminution de la production laitière –, ont servi de base à la coconstruction de scénarios d'adaptation avec les acteurs (Lurette *et al.*, 2024), illustrant l'utilité du simulateur pour accompagner la transition vers des systèmes d'élevage durables.

Modéliser la diffusion et l'appropriation de la technologie des compteurs d'eau communicants en agriculture

Les approches de modélisation et de simulation offrent également une perspective précieuse pour analyser les freins à l'adoption des outils numériques agricoles. C'est l'objectif des travaux interdisciplinaires menés par Loïc Sadou, doctorant #DigitAg, qui ont conduit au développement d'un outil de simulation original, le modèle Midao (*model of innovation diffusion with argumentative opinion*). Ce modèle, fondé sur une approche de modélisation à base d'agents, s'appuie sur la théorie du comportement planifié et l'argumentation formelle pour représenter de manière fine les processus de décision des acteurs et leur évolution au fil des échanges argumentatifs (figure 4.4). Le modèle est alimenté par des données empiriques collectées auprès des parties prenantes (entretiens, questionnaires, données statistiques). Midao a été appliqué au cas des compteurs d'eau communicants, une technologie introduite chez les irrigants dans un contexte de forte pression sur la ressource en eau. Il permet de simuler différents scénarios de diffusion de ces compteurs et d'explorer l'impact de dispositifs publics ou de la propagation de fausses informations sur les dynamiques d'adoption. Grâce à son ancrage empirique, sa capacité à saisir la complexité des décisions individuelles et son ouverture à l'interdisciplinarité, Midao illustre pleinement la manière dont le numérique peut contribuer à la compréhension des transitions agricoles et à l'accompagnement des politiques d'innovation.

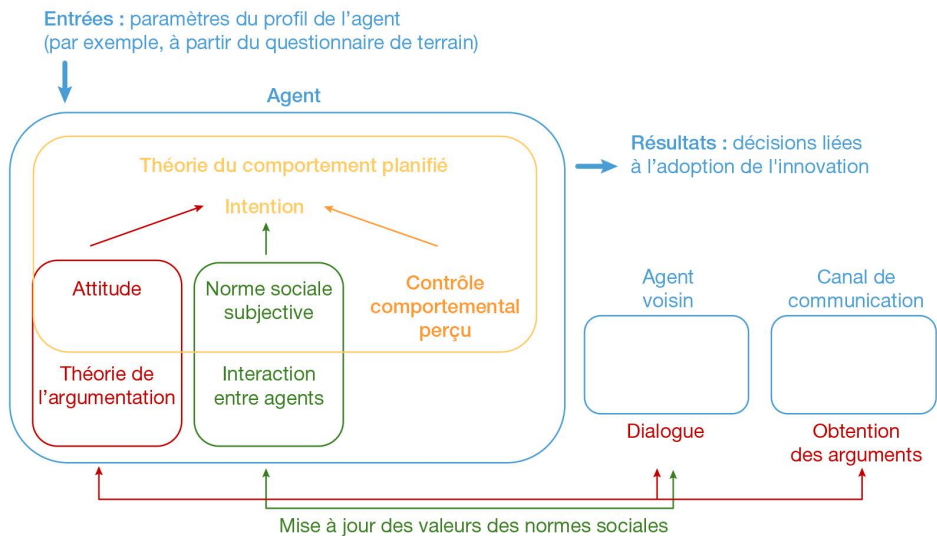


Figure 4.4. Architecture générale des agents Midao.

► Perspectives et conclusions

Simulation de processus, simulation individus-centrée, modélisation prédictive à base de données – qu'elle résulte d'approches statistiques ou d'apprentissages profonds –, modélisation des processus spatiaux, modélisation stochastique, modélisation des données issues du *crowdsourcing*, visualisations cartographiques, réalité augmentée, optimisation ou synthèse de commande optimale, intégration de données hétérogènes, la diversité de ce qu'on appelle « modélisation au service de l'agriculture numérique » a été présentée ci. Ces méthodes sont employées à toutes les étapes d'une conception agronomique – par exemple dans le cas de la transition d'une exploitation à l'agroécologie (aide à la décision stratégique) – ou d'une décision opérationnelle de production. Elles concernent des échelles d'analyse très différentes suivant le contexte et les entités et personnes responsables des décisions, de la plante au territoire.

Un défi majeur est d'œuvrer dans un même mouvement à l'opérationnalisation et à la validation en contexte de production de ces méthodes, tout en donnant aux acteurs le maximum d'autonomie dans leur développement et dans la validation des modèles. Une agriculture durable n'est probablement pas une agriculture dont les processus seraient optimaux et conçus par quelques acteurs en position de les imposer. Elle pourra plus probablement résulter d'équilibres entre acteurs et avec les milieux, ce qui suppose une bonne appropriation des modèles par la diversité de ces acteurs ainsi qu'un mouvement continu d'améliorations et d'adaptations aux contextes. L'ouverture et la disponibilité, tant des données et des référentiels que des modèles, joueront un rôle essentiel.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 4

Aleksovska I., 2020.	Améliorer les prévisions à court et moyen termes des modèles agronomiques en prenant mieux en compte l'incertitude des prévisions météorologiques, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020TOU30270
Allo M., 2019*.	Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de la Réunion, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019NSAM0051
Challand M., 2024.	Combiner les approches participatives et la modélisation sous contraintes pour concevoir des dispositifs de design agroécologique, thèse de doctorat. https://theses.fr/s308114
Chen M., 2019.	Analyse du risque de mildiou de la vigne dans le Bordelais à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019SACLA031
Cheraïet A., 2020.	Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation : application à l'agriculture de précision, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020AGRO0036
Courteille L., 2025.	Impact de la représentation cartographique de l'incertitude pour la prise de décision : le cas de la prise en compte de la qualité des sols dans l'aménagement du territoire, thèse de doctorat. https://theses.fr/s355531

Darnala B., 2024.	Vers une hybridation des méthodes sémantiques et d'apprentissage pour l'optimisation et la planification de cultures maraichères en agroécologie, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024UMONS068
Gauriau O., 2024.	Fouille de règles numériques pour la prédiction de la dynamique des maladies des plantes, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024URENS036
Gautron R., 2022*.	Apprentissage par renforcement pour l'aide à la conduite des cultures des petits agriculteurs des pays du Sud : vers la maîtrise des risques, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0039
Gnanguenon Guesse G., 2021*.	Modélisation et visualisation des liens entre cinétiques de variables agro-environnementales et qualité des produits dans une approche parcimonieuse et structurée, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021MONT139
Kleinpeter V., 2023*.	Modélisation spatialement explicite et analyse des interactions entre projets de valorisation de biomasses pour favoriser une économie circulaire à l'échelle de l'île de La Réunion, thèse de doctorat. https://theses.fr/s234012
Laclef E., 2022.	Simulation et évaluation de scénarios de pratiques alternatives pour une reproduction sans hormones dans les exploitations ovines laitières, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0051
Lamour J., 2019*.	Analyse de données spatialisées issues de la production pour améliorer le diagnostic agronomique en bananeraie – Prise en compte de l'asynchronisme de la culture, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019NSAM0017
Laurent C., 2021*.	Valorisation des données agricoles pour la recherche agronomique et à des fins opérationnelles : exemple de la prévision du rendement en viticulture, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AGRO0037
Lemiere L., 2023.	La réalité augmentée pour faciliter la conception de systèmes agroforestiers, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0024
Leroux C., 2018*.	Traitement et valorisation d'informations spatialisées en Agriculture de Précision : application aux données de rendement intra-parcellaires, thèse de doctorat. https://hal.inrae.fr/tel-02609456v1
Mahmoud R., 2023*.	Modéliser la performance de cultures associées céréale-légumineuse annuelles : une approche combinant écologie des communautés et science des données, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023UMONS018
Pasquel D., 2023*.	Méthodes de spatialisation des modèles de culture et métriques d'évaluation des performances des modèles de culture spatialisés dans un contexte d'agriculture de précision, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0027
Pichon L., 2021.	Développement d'une approche de crowdsourcing adaptée aux spécificités de l'agriculture : le cas du suivi de l'état hydrique de la vigne avec la méthode des apex, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AGRO0025
Sadou L., 2024.	Utilisation de la simulation à base d'agents et de la théorie de l'argumentation pour mieux appréhender la diffusion et l'appropriation des outils numériques en agriculture, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024TLSES092