Sciences Eaux & Territoires
INRAE

https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2026.52.10380

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, le numéro de l'article et le DOI..

La plateforme MAELIA : un jumeau numérique territorial pour accompagner la gestion quantitative de l'eau en agriculture

Renaud MISSLIN [1], Sébastien BODIN [1], Laurène CASAL [1], Audrey ETIENNE [1], Caroline FLISIAK [1]

[1] MAELAB, Colmar, France.

Correspondance : renaud.misslin@maelab.fr

Face aux tensions croissantes sur la ressource en eau, comment anticiper les évolutions des systèmes agricoles et éclairer les choix de gestion à l'échelle des territoires ? La plateforme numérique MAELIA permet de simuler les dynamiques agricoles et hydrologiques pour explorer différents scénarios climatiques et aider les acteurs locaux à construire des stratégies d'adaptation.

Sous l'effet du changement climatique, la gestion de l'eau en agriculture devient chaque année plus problématique. L'intensité des sécheresses augmente et les épisodes pluvieux, de plus en plus irréguliers et concentrés sur de courtes périodes, ne suffisent souvent pas à reconstituer les réserves des sols et des nappes.

En France, l'agriculture représente 12 % des prélèvements d'eau douce et 58 % de la consommation totale d'eau (SDES, 2023). Cette consommation intervient majoritairement au moment où la ressource est la plus contrainte : durant la période d'étiage, lorsque les niveaux des eaux de surface sont au plus bas. En 2023 par exemple, l'agriculture consommait 81 % des volumes d'eau durant les mois les plus secs dans le bassin Adour-Garonne (SDES, 2023). À l'échelle nationale, les observations montrent une tendance à la diminution de la ressource disponible. Entre les périodes 1990-2001 et 2002-2022, la ressource renouvelable en eau a diminué d'environ 14 % dans le pays, avec une baisse particulièrement marquée dans la moitié sud de la France (CGDD-SDES, 2022). Cette évolution résulte à la fois de modifications du régime des précipitations, d'une augmentation de l'évapotranspiration et d'une plus grande variabilité interannuelle [1].

La tendance générale à la baisse des ressources en eau françaises s'exprime de façon différente à travers le pays. D'une part, la disponibilité de la ressource est très hétérogène dans l'espace et dans le temps. La répartition temporelle des précipitations, les systèmes de culture, les capacités de stockage et les sols varient fortement d'un territoire à l'autre. D'autre part, l'organisation des systèmes agricoles est relativement rigide : les filières, les réseaux d'acteurs et les équipements en place ne peuvent pas changer d'une année sur l'autre pour s'adapter aux conditions climatiques. Ces disparités et cette dépendance aux choix passés se traduisent par des problématiques locales spécifiques. Celles-ci soulèvent des questions à traiter de façon simultanée : gestion des sécheresses et des inondations, stockage de l'eau, adaptation des pratiques agricoles, choix des cultures, évolution des systèmes de production et des filières, etc.

1. Entre les périodes 1990-2001 et 2002-2018, les précipitations totales annuelles ont diminué en moyenne de 6 % à l'échelle nationale, tandis que l'évapotranspiration augmentait de 3 %. Sur une période plus longue (1959-2018), la baisse des précipitations est surtout marquée dans le sud de la France et s'accompagne d'une hausse de l'évapotranspiration sur la quasi-totalité du territoire métropolitain, particulièrement prononcée au printemps (CGDD-SDES, 2022).

En outre, les questions posées par la gestion quantitative de l'eau s'inscrivent dans un contexte plus global d'enjeux environnementaux, sociaux et économiques auxquels l'agriculture est confrontée. Dans ce contexte, il nous paraît indispensable de dépasser les approches sectorielles ou disciplinaires. En effet, dans ces approches, les solutions envisagées pour réduire les prélèvements ou améliorer l'efficience de l'irrigation peuvent avoir des effets indirects sur d'autres composantes du système agricole. Certaines de ces conséquences sont aisément identifiables, comme les impacts sur les rendements et les revenus, tandis que d'autres sont plus diffuses, à l'image des effets sur les cycles du carbone et de l'azote. Inversement, des leviers mobilisés pour répondre à d'autres enjeux environnementaux ou économiques peuvent modifier les équilibres hydrologiques des territoires. L'évaluation de ces interactions croisées constitue un enjeu central pour éclairer les décisions publiques et accompagner les transitions agricoles et l'adaptation au changement climatique.

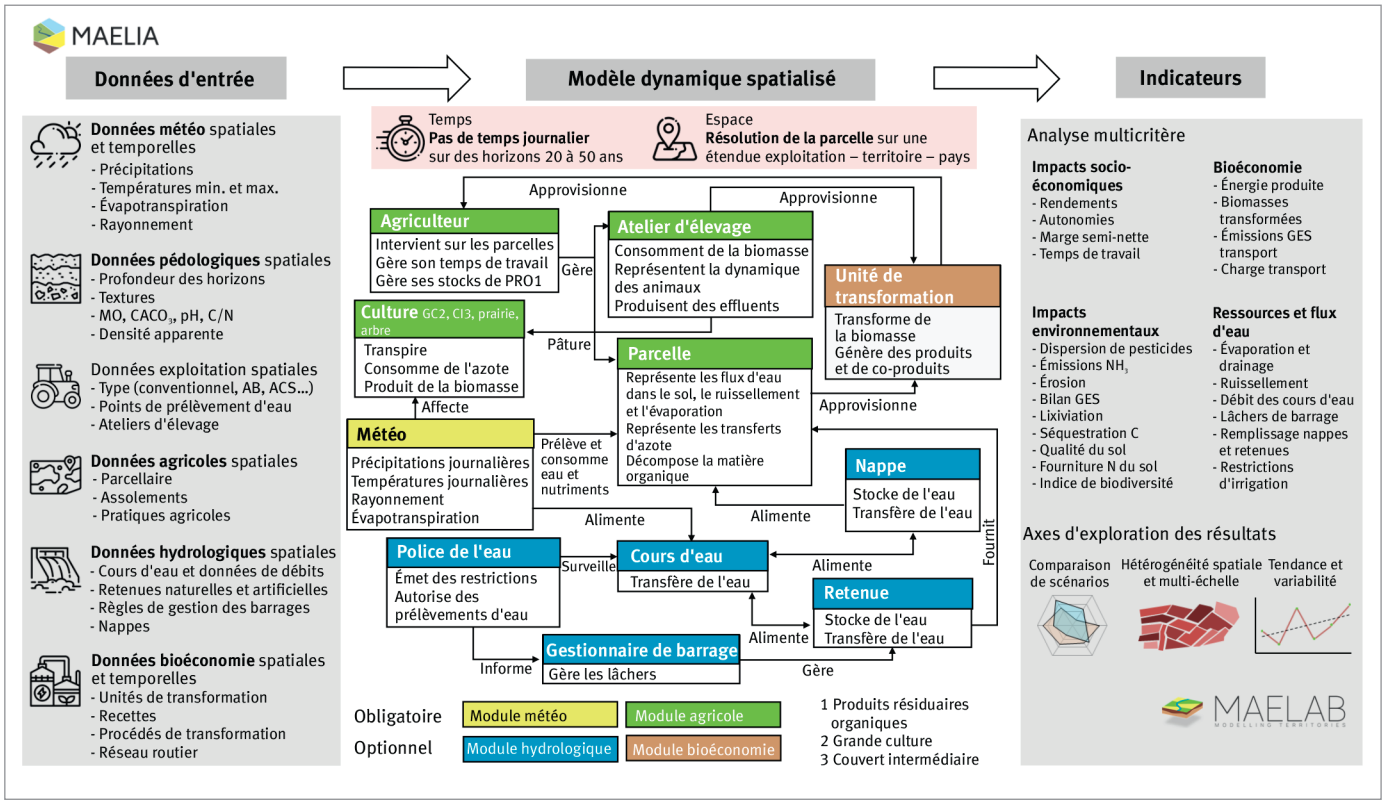
Une approche systémique pour un problème situé

Au niveau local, la répartition de l'eau est gérée en tenant compte d'une combinaison particulière de facteurs biophysiques, techniques et socio-économiques. Les conditions climatiques locales, la nature des sols, les systèmes de culture en place, les ressources disponibles et partagées, ainsi que l'organisation du système d'acteurs influencent conjointement les dynamiques de prélèvement, de restitution et de partage de l'eau. Cette spécificité territoriale fait de la gestion de l'eau un problème situé, dont les solutions mises en œuvre dans un bassin versant donné ne sont pas nécessairement transposables ailleurs.

En plus de dépendre du contexte local, les solutions sont difficiles à tester dans la réalité. Ces difficultés sont accentuées lorsqu'il s'agit d'explorer les effets combinés de plusieurs leviers, ou d'anticiper leur performance dans un contexte climatique futur incertain. Dans ce cadre, la modélisation et la simulation apparaissent comme une approche adaptée pour analyser *ex ante* les conséquences de trajectoires de transition (Gascuel-Odoux *et al.*, 2022).

Les jumeaux numériques territoriaux, définis comme des modèles numériques capables de reproduire le fonctionnement dynamique d'un territoire, sont ainsi de plus en plus considérés comme des outils pertinents pour répondre aux enjeux évoqués. En intégrant des représentations explicites des processus biophysiques, des comportements des acteurs et des interactions entre les différents processus, ils permettent d'explorer des scénarios alternatifs sans intervenir directement sur le système réel. Ces outils constituent ainsi un support privilégié pour analyser les compromis entre des objectifs parfois contradictoires, objectiver les effets de potentielles solutions, structurer le dialogue entre parties prenantes autour de bases quantitatives partagées et, finalement, accompagner les processus de décision.

Figure 1 – La plateforme MAELIA s'articule autour de trois composantes fondamentales, (1) des bases de données spatialisées, (2) un modèle à base d'agents modulaires et (3) un jeu d'indicateurs environnementaux, économiques et sociaux.



La plateforme MAELIA : un jumeau numérique pour simuler les dynamiques agricoles à l'échelle du territoire

La plateforme MAELIA repose sur une architecture modulaire permettant d'adapter la solution de modélisation et de simulation aux objectifs de l'étude. Au-delà de la représentation des dynamiques agricoles, l'hydrologie des différentes ressources en eau est représentée par le biais d'un module dédié, activable ou non, selon les questions posées. D'autres modules, portant par exemple sur l'élevage ou les filières biomasse, peuvent être combinés afin de construire une représentation cohérente et intégrée d'un territoire dans un contexte thématique plus ou moins large. Ces différents modules reposent sur des modèles issus de travaux scientifiques et reconnus pour leur robustesse, leur cohérence d'ensemble, leur transposabilité géographique et leur capacité à fonctionner à un pas de temps journalier (figure 1).

D'un point de vue spatial, l'élément le plus fin du système représenté est la parcelle agricole, ce qui permet de décrire précisément les différentes situations pédoclimatiques dans un territoire et les pratiques culturales associées. Les résultats peuvent ensuite être agrégés à des échelles supérieures – exploitation, commune, métropole, aire d'alimentation de captage, sous-bassin versant, etc. – en fonction des enjeux analysés. Cette capacité à articuler plusieurs niveaux spatiaux constitue un atout majeur pour traiter des problématiques de gestion collective de l'eau.

La plateforme MAELIA est mobilisée dans le cadre de nombreux projets de recherche-action et de territoire pour simuler et comparer des scénarios de transition. Ces scénarios sont coconstruits avec les acteurs du territoire dans le cadre d'ateliers participatifs, afin de traduire des visions et des hypothèses discutées collectivement en paramètres de modélisation. Ils sont ensuite simulés sous différentes trajectoires de réchauffement climatique afin de tenir compte des incertitudes associées aux projections futures.

Pour garantir la robustesse de ces simulations et assurer leur pertinence pour les acteurs du territoire, les résultats obtenus font l'objet d'un double processus de validation, combinant la confrontation à des données observées sur des périodes passées et une évaluation par expertise. Ces indicateurs couvrent des aspects environnementaux, sociaux et économiques, offrant ainsi une vision globale du système agricole. Ils permettent d'identifier les forces et les faiblesses relatives de chaque scénario au regard des objectifs de l'étude. Ces indicateurs sont calculés à l'échelle des parcelles, puis agrégés à celle des exploitations et du territoire. La combinaison de ces différents indicateurs permet aux utilisateurs et utilisatrices de MAELIA d'explorer un large éventail d'enjeux, tels que le soutien des étiages, la qualité de l'eau, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, ainsi que les performances économiques des exploitations agricoles.

La plateforme MAELIA constitue ainsi un outil d'aide à la décision prospectif et un support au dialogue territorial.

Agents, processus et interactions

La représentation du système agricole dans MAELIA (partie centrale de la figure 1) repose sur une description explicite des systèmes de culture et des principaux processus biophysiques associés. La croissance des cultures est simulée en tenant compte des conditions climatiques, des caractéristiques des sols et des pratiques agricoles mises en œuvre. Le petit cycle de l'eau y est représenté par le biais du ruissellement de surface, de la percolation vers les horizons profonds, de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes. Les cycles de l'azote et du carbone, ainsi que la décomposition de la matière organique dans les sols, sont simulés pour rendre compte des interactions entre fertilisation, rendements, émissions et stockage de carbone. Cette approche permet de relier directement les scénarios de gestion à leurs impacts sur les flux hydriques (eau verte et bleue[2]) ainsi que sur les performances agronomiques.

Les agriculteurs sont représentés comme des agents numériques dotés de règles de décision pour réaliser des opérations telles que le travail du sol, le semis, la fertilisation, l'irrigation ou la récolte. Ils déclenchent alors ces opérations en fonction de l'état des parcelles (sol et plantes), des conditions climatiques et de contraintes organisationnelles comme la disponibilité de la main-d'œuvre. Les gestionnaires de barrages constituent un autre type d'agent clé, pilotant les lâchers d'eau selon des consignes spécifiques et arbitrant entre différents usages, tels que le soutien d'étiage ou l'irrigation agricole.

La police de l'eau est représentée comme un acteur capable de déclencher des restrictions d'usage lorsque les débits observés aux points réglementaires franchissent des seuils prédéfinis. Ces mécanismes permettent de reproduire les situations d'alerte, de crise ou de coupure, ainsi que les règles associées, comme la limitation des tours d'eau ou la priorisation de certains usages lorsque les cours d'eau passent sous le débit objectif d'étiage.

Évaluer les leviers de transition : deux exemples d'application

La modularité de la plateforme MAELIA permet d'aborder la question de l'eau en territoire agricole selon différents enjeux et ensemble de solutions de scénarios. Les paragraphes suivants présentent deux projets ayant permis d'aborder la question de l'eau de façon différente.

Projet CA2-AGRI-GE, 2022-2024 (Therond *et al.*, 2024) Financements ADEME et Région Grand Est

Face aux attentes d'un groupe d'agriculteurs irrigants et non irrigants dans un bassin versant sous tension, le module agricole de MAELIA a été utilisé pour explorer les effets d'une large gamme de scénarios de systèmes de culture ayant été conçus notamment pour réduire les besoins d'irrigation. Les agriculteurs ont notamment souhaité simuler l'introduction de cultures à plus faible besoin d'intrants (ex. : chanvre, sorgho), d'une variété de betterave d'hiver et de la modification des assolements

2. L'eau bleue désigne les ressources en eau en transit dans le système hydrographique (cours d'eau, nappes phréatiques, réservoirs naturels et artificiels, etc). L'eau verte correspond à l'eau stockée et évaporée par les sols et ou absorbée et transpirée par les plantes.

en pomme de terre et betterave en fonction de l'eau disponible. L'objectif était de tester la capacité de ces systèmes de culture à horizon 2050 et 2070 à réduire les besoins d'irrigation tout en conservant les performances économiques. Les résultats ont montré qu'il existe des voies de passage pour concilier l'objectif de conservation des ressources en eau et celui du renforcement de la résilience économique des fermes. Ces résultats soulignent également l'intérêt de raisonner la performance agricole en termes de stabilité des revenus plutôt que de maximisation d'une potentielle production annuelle.

Projet SIMULTEAU, 2015-2018 (Allain *et al.*, 2018) Financement CASDAR

Dans le cadre d'un projet de recherche INRAE, le couplage des module agricoles, hydrologique et de gestion de l'eau de MAELIA a été utilisé pour explorer des scénarios coconstruits avec les acteurs du secteur agricole et de la gestion de l'eau d'un bassin versant du Sud-Ouest soumis à une très forte tension sur les ressources en eau. Les leviers de changement explorés étaient relatifs au changement des variétés et des dates de semis du maïs (stratégie d'évitement) ou des rotations, à la modification des zones d'irrigation, l'optimisation de l'irrigation et à la création de retenues de substitution accompagnées par l'effacement de retenues collinaires non utilisées. Les simulations ont mis en évidence que les effets de ces leviers sur les prélèvements, les lâchers de barrage et les restrictions d'irrigation étaient tous significatifs et qu'ils pouvaient être combinés pour atteindre des objectifs plus ou moins ambitieux vis-vis de l'eau et des filières agricoles.

Conclusion

L'utilisation de la plateforme MAELIA dans des dispositifs participatifs permet de déployer une approche systémique et intégrée originale pour aborder la question de l'eau en interaction avec les dimensions économiques et environnementales du système agricole. Les indicateurs multicritères qu'elle mobilise permettent d'éclairer les compromis entre des objectifs parfois divergents et de dépasser une approche strictement sectorielle. MAELIA peut être utilisée d'une part comme un outil prospectif, en permettant l'exploration de scénarios de transition dans des contextes climatiques incertains ; et d'autre part comme outil support au dialogue territorial, en contribuant à l'objectivation des débats et en permettant aux différentes parties prenantes de tester et de discuter leurs scénarios préférentiels sur une base scientifique partagée. Ces caractéristiques rendent la plateforme MAELIA particulièrement pertinente pour accompagner des démarches de gestion concertée de l'eau, tels que les Projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) ou les études liées aux volumes prélevables. ■

Références

Allain, S., Ndong, G. O., Lardy, R., & Leenhardt, D. (2018). Integrated assessment of four strategies for solving water imbalance in an agricultural landscape. *Computers and Electronics in Agriculture, 147*, 170-181. **https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.017**

CGDD-SDES. (2022). *Évolutions de la ressource en eau renouvelable en France métropolitaine de 1990 à 2018*. Datalab, juin. Service des données et études statistiques du ministère de la Transition écologique. **https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/evolutions-de-la-ressource-en-eau-renouvelable-en-france-metropolitaine-de-1990-2018**

Gascuel-Odoux, C., Lescourret, F., Dedieu, B., Détang-Dessendre, C., Faverdin, P., Hazard, L., Litrico-Chiarelli, I., Petit, S., Roques, L., Reboud, X., Tixier-Boichard, M., de Vries, H. & Caquet, T. (2022). A research agenda for scaling up agroecology in European countries. *Agronomy for Sustainable Development, 42*(3), 53. **https://doi.org/10.1007/s13593-022-00786-4**

SDES. (2023). *L'eau en France : ressource et utilisation – Synthèse des connaissances en 2023. Rapport thématique*. Service des données et études statistiques du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. **https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/leau-en-france-ressource-et-utilisation-synthese-des-connaissances-en-2023**

Therond, O., Lincker, M., Daghari, I., Schaub, A., van Dijk, P., Colas, F., Calame, A., Poillion, G., Poillion, M.-P., Dechaux, C., Bodin, S., Misslin, R., Belorgey, M. & Nuvoli, N. (2024). *Rapport final du projet CA2-AgriGE : objectifs, dispositif, résultats et bilan.* UMR LAE – INRAE, Réseau des Chambres d'Agriculture du Grand-Est & MAELAB. Projet financé par l'ADEME et la Région Grand Est, 96 p. **https://grandest.chambres-agriculture.fr/agritheque/les-projets/detail-du-projet/sadapter-sur-un-bassin-versant-aubois**

Voir aussi…

Dans le numéro « Animer un projet de territoire pour la gestion de l'eau : les défis de la prospective et de l'agroécologie » :

Les projets de territoire de gestion de l'eau : de leur principes et émergence à une appropriation différenciée selon les bassins hydrographiques. **https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2026.52.10296**

Comparer rapidement des scénarios de besoins en eau d'irrigation à l'échelle territoriale, une recette open source avec RADIS & CAWET. **https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2026.52.10379** *(à paraître)*