



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.

Contexte sur les approches quantitatives des besoins futurs en eau : intérêts, limites et perspectives

David DORCHIES¹, Gilles BELAUD¹

¹ G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

Correspondance : David DORCHIES, david.dorchies@inrae.fr

Anticiper les besoins futurs en eau est essentiel pour éclairer les choix de gestion de la ressource dans les territoires. Mais comment les quantifier de manière fiable alors que les données disponibles restent incomplètes et que les usages de l'eau dépendent de nombreux facteurs, à la fois hydrologiques, économiques et sociaux ? Cet article propose un état des lieux des principales approches quantitatives mobilisées dans les études prospectives, de l'exploitation des données d'observation aux modèles les plus intégrés. Il en analyse les apports et les limites et ouvre des perspectives pour mieux prendre en compte les incertitudes et renforcer l'utilité de ces outils pour les acteurs territoriaux.

Introduction

Les études de quantification de la ressource en eau et des usages sont maintenant devenues courantes dans le cadre de diagnostics de bassins versants, de définitions de volumes prélevables ou d'études prospectives diverses. Quelles qu'en soient leurs limites (plus ou moins reconnues¹), ces quantifications sont nécessaires pour de nombreuses études visant par exemple à attribuer des autorisations de prélèvement ou à analyser des scénarios d'évolution, comme dans le cas des projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE). D'une façon générale, la quantification des besoins en eau intervient dans les études s'intéressant à l'équilibre entre la ressource et les usages de l'eau, soit au sein d'un territoire de l'eau (bassin versant) comme dans le cadre des SAGE² et des PTGE, soit comme un outil plus large de pilotage des politiques publiques, comme avec le modèle STRATEAU³ utilisé dans l'étude France Stratégie (Arambourou et Ferrière, 2025) sur l'évolution des besoins en eau à l'horizon 2050.

Dans cette perspective, cet article vise moins à proposer un état de l'art exhaustif qu'à préciser, pour les acteurs des territoires, ce que ces approches permettent effectivement d'éclairer, les limites qu'elles imposent et les conditions de leur usage dans la décision.

Les prélèvements d'eau sont estimés à environ 30 milliards de mètres cubes (m³) en 2020 en France hexagonale et en Corse (Arambourou *et al.*, 2024), dont 47 % sont imputables au secteur énergétique. Il convient néanmoins de distinguer prélèvement et consommation : le « prélèvement » correspond au volume retiré du milieu, tandis que la « consommation », au sens de France Stratégie ou de l'Organisation des Nations-Unies⁴, désigne la part qui ne revient pas rapidement au système hydrologique sous une forme réutilisable à l'aval. Une eau est ainsi effectivement consommée lorsqu'elle est évapotranspirée, exportée hors bassin ou restituée avec un décalage temporel, une localisation ou une qualité incompatibles avec d'autres usages. Considérant les consommations, et, en fonction d'hypothèses sur les taux

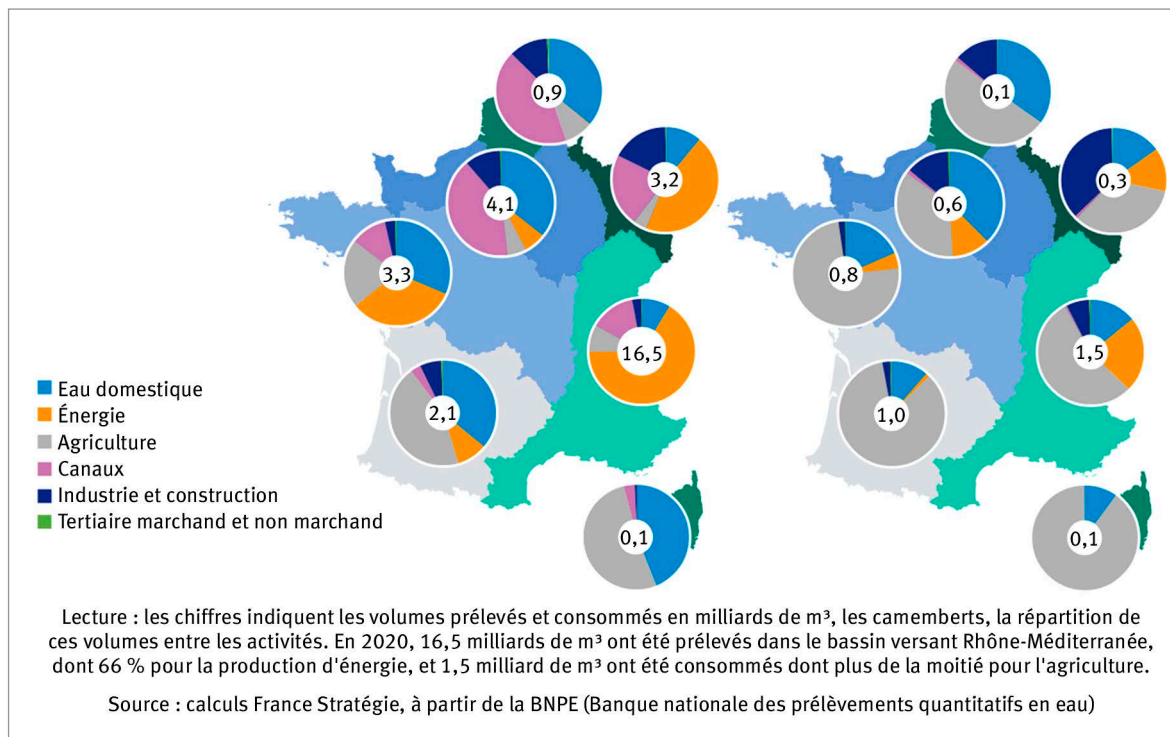
1. Voir l'analyse critique de François Molle (2023) sur la quantification de la ressource et des prélèvements, présentée lors du colloque 2023 de la Chaire partenariale Eau, Agriculture et Changement climatique.

2. Schéma d'aménagement et de gestion de l'eau.

3. Modèle prospectif estimant les usages de l'eau par commune et par mois sous différents scénarios socio-économiques et climatiques, et comparant ces besoins aux ressources disponibles pour produire des indicateurs de stress hydrique.

4. ONU (2009), *UN World Water Development Report 2009*.

Figure 1 – Prélèvements et consommations en eau à l'échelle des sept bassins versants de la France hexagonale et de la Corse.



moyens de retour au milieu des différents prélèvements, le secteur agricole arrive en tête des usages dans la plupart des grands bassins (figure 1).

La notion de « besoins en eau » est également fréquemment utilisée pour les volumes d'eau dédiés à l'agriculture, mais les prélèvements réels peuvent largement différer des besoins théoriques ou exprimés, par exemple lorsque la ressource est insuffisante (arrêts sécheresse ou impossibilité physique).

Les prélèvements agricoles peuvent représenter une part importante des volumes prélevés, comme le montre la banque nationale des données de prélèvement. Cet enjeu est d'autant plus marqué que les besoins agricoles sont généralement les plus élevés en période d'été. Or, chaque point de prélèvement peut couvrir plusieurs usages et certains ouvrages échappent à la déclaration lorsque leur volume ou leur débit autorisé reste inférieur aux seuils réglementaires. Dans ces conditions, les relevés annuels ne suffisent pas pour estimer les prélèvements dans les études prospectives consacrées au partage de l'eau.

Pour les études prospectives, ressources et prélèvements ne peuvent être considérés séparément. L'évolution de la ressource dépend en partie des prélèvements, tandis que ces derniers sont eux-mêmes contraints par la ressource effectivement disponible. Ces études doivent donc intégrer à la fois l'impact du changement climatique sur la répartition saisonnière et géographique de la ressource et l'évolution des usages en réponse à des changements globaux d'ordres sociaux, techniques, économiques et environnementaux.

Toute approche quantitative repose sur un modèle permettant de relier des données observées, ou issues de démarches prospectives, au prélèvement. Ces modèles peuvent relever d'approches statistiques ou viser à représenter des processus physiques ou socio-économiques. Dans le cas de la demande en eau pour l'irrigation, nombre d'approches quantitatives sont basées sur le fonctionnement hydrologique des couverts cultivés. Depuis la seconde moitié du vingtième siècle, d'importants efforts de quantification de l'évapotranspiration réelle (ETR) ont été entrepris. Cela a donné lieu à des modèles représentant le fonctionnement des cultures (modèles de culture), et notamment le bilan hydrique de l'ensemble sol-plante. Le document n° 56 de la FAO⁵ constitue une référence dans ce domaine. Cette synthèse publiée par la FAO⁶ (Allen *et al.*, 1998) présente différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration de référence, selon les données disponibles, ainsi qu'une description des concepts, modèles et paramètres, puis l'évapotranspiration réelle d'une culture grâce au coefficient cultural (donnant accès à l'évapotranspiration maximale de la culture) et aux coefficients d'ajustement (par exemple pour tenir compte du stress hydrique). Le système sol-plante y est décrit au moyen d'un nombre limité de paramètres, les conditions climatiques étant prises en compte par l'évapotranspiration de référence et les précipitations efficaces.

Si la force de cette approche réside dans sa simplicité et sa capacité à représenter tout type de culture (168 cultures référencées dans le document d'origine, pérennes ou annuelles), elle peut s'avérer limitée pour

5. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (en anglais, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*).

6. Près de cinquante mille citations selon Google Scholar.

représenter certains phénomènes comme la dépendance de la phénologie aux conditions climatiques, l'impact du stress hydrique sur le rendement ou l'impact du dioxyde de carbone sur la formation de biomasse.

Ce type d'approche est néanmoins séduisant pour appréhender la demande en eau totale d'un territoire, ou du moins pour en avoir un ordre de grandeur, à partir du moment où l'on dispose d'une bonne connaissance des descripteurs du système sol-plante-climat, de l'origine de l'eau pour chaque parcelle et des règles d'apport d'eau. C'est là un facteur limitant des approches de modélisation, quelles qu'elles soient, car ces informations sont souvent mal connues. Dès lors, quelles sont les données sur lesquelles s'appuyer ? Quel degré de complexité des modèles faut-il choisir ? Compte tenu des incertitudes, qu'elles soient issues des modèles ou des données, quel crédit apporter à l'exercice de modélisation ? Dans une étude prospective, la quantification s'inscrit dans une chaîne allant de la définition de trajectoires et de scénarios à la simulation, puis à la discussion d'options de gestion, d'aménagement ou d'adaptation. Elle ne vaut donc ni comme prédiction, ni comme réponse automatique, mais comme un outil d'exploration destiné à éclairer la décision. Dans certains cas, l'incertitude ne porte pas seulement sur quelques paramètres, mais aussi sur les trajectoires climatiques, économiques ou institutionnelles, sur les réponses des acteurs et sur certaines rétroactions du système. On se trouve alors en situation d'« incertitude profonde », où ni les futurs ni les critères d'évaluation ne peuvent être stabilisés de manière crédible (Walker *et al.*, 2013). Dans le cadre des PTGE ou d'autres démarches territoriales, l'intérêt de la quantification est alors moins de désigner une trajectoire probable que de comparer des options, d'en tester la robustesse et de préparer des décisions révisables au fil du temps. Dans cette perspective, cet article vise moins à proposer un état de l'art exhaustif qu'à préciser, pour les acteurs des territoires, ce que ces approches permettent effectivement d'éclairer, les limites qu'elles imposent et les conditions de leur usage dans la décision.

Les données existantes sur l'état quantitatif de la ressource en eau

Les limites des observations existantes

Les données disponibles sur les usages de l'eau sont le plus souvent lacunaires, imprécises et disponibles à des résolutions spatiales et temporelles peu adaptées à la quantification des besoins⁷.

La principale source d'information disponible en France est la Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE). Elle recense les volumes prélevés, mesurés ou estimés, puis déclarés par les usagers assujettis à la redevance pour prélèvement auprès des agences et offices de l'eau. Elle exclut les prélèvements inférieurs à 10 000 m³/an et ne donne aucune information sur la part des volumes consommés. La localisation des prélèvements dans la BNPE peut en outre être erronée, soit volontairement dans le cas des prélèvements d'alimentation en eau potable pour des raisons de sécurité, soit du fait d'une confusion entre le siège social et le point de captage. Le pas de temps annuel constitue une autre limite importante, en particulier pour les usages forte-

Encadré 1 – Définitions

Consommation d'eau : quantité d'eau prélevée sur une masse d'eau (en volume par période de temps) et non restituée au milieu. Volume correspondant à l'évaporation, la quantité d'eau contenue dans les produits, l'exportation vers d'autres masses d'eau la rendant non réutilisable pour d'autres usages. Tel que défini ainsi, ce terme ne représente qu'une partie des prélèvements, alors que dans le langage courant le terme de « consommation » (apparaissant sur les factures d'eau) correspond au « prélèvement ».

Évapotranspiration de référence ET_{ref} : évapotranspiration d'un couvert de référence (gazon ou luzerne) bien alimenté en eau. Cette notion est utilisée pour estimer l'évapotranspiration maximale ET_M d'une culture à partir de son coefficient cultural : $ET_M = K_c \times ET_{ref}$

Évapotranspiration potentielle : terme défini différemment selon les contextes, parfois confondu avec ET_{ref} , parfois défini comme l'évapotranspiration maximale d'un couvert, ou l'évaporation d'une surface d'eau libre. Compte tenu de ces ambiguïtés, son utilisation n'est pas recommandée.

ment saisonniers, comme les prélèvements agricoles, largement concomitants des périodes d'étiage. Pour évaluer leur impact et encadrer leur régulation, un débit décadaire, voire journalier, est beaucoup plus pertinent qu'un débit annuel moyen.»

D'autres acteurs gestionnaires de services d'eau effectuent des mesures et engrangent des observations pour leurs besoins de gestion opérationnelle. Dans un grand nombre de cas, ces données ne sont ni bancarisées ni structurées de manière à pouvoir être utilisées directement dans des études nécessitant une profondeur historique. De plus, soit la nature des données observées, soit les métadonnées associées, ne sont pas suffisamment précises pour rendre ces observations exploitables dans le cadre d'une quantification des besoins.

Les produits satellitaires sont une nouvelle source de données prometteuse. Ils peuvent désormais fournir la nature des cultures (ex. : recensement parcellaire généralisé – RPG – complété), voire des estimations de l'évapotranspiration des parcelles, mais peinent encore à identifier les parcelles irriguées, notamment pour l'arboriculture et la vigne.

Les angles morts de l'observation pour quantifier les besoins en eau

Deux phénomènes majeurs viennent compliquer l'estimation du besoin en eau et de son rapport à la ressource. D'une part, les pratiques d'irrigation, qui conditionnent l'efficacité de l'eau (i.e. le rapport entre l'eau prélevée et l'eau effectivement consommée par la plante), sont mal connues sur le territoire par absence d'observations bancarisées. Les parcelles pour lesquelles les itinéraires techniques sont connus sont principalement des parcelles expérimentales, et il n'existe pas de bases de données couvrant largement les pratiques à l'échelle d'un territoire.

D'autre part, la destination des flux considérés comme « perdus » (cas où l'efficacité d'utilisation de l'eau pour un certain usage est inférieure à 100 %) reste peu documentée. Les volumes non consommés ou non valorisés directement peuvent pourtant couvrir, de manière implicite, d'autres besoins ou soutenir des services associés à

⁷ Voir le rapport 2023 de la Cour des comptes sur la gestion quantitative de l'eau.

la présence d'eau. C'est le cas, par exemple, des surplus d'irrigation gravitaire qui s'infiltrant et contribuent à la recharge d'une nappe, des fuites des réseaux d'alimentation en eau potable, de certains rejets issus de carrières ou encore des rejets de stations de traitement. Or il n'existe généralement pas de données territoriales décrivant de manière conjointe les volumes, leur destination, les délais de transfert, les milieux ou usages bénéficiaires et les besoins ainsi couverts.

Ces informations manquantes ne relèvent pas seulement d'un déficit d'inventaire. Elles déterminent aussi le niveau de détail accessible et les hypothèses que les modèles devront formuler sur les flux de retour, leurs répercussions hydrologiques et les usages ou services qu'ils soutiennent.

Les modèles simulant les besoins en eau

La dynamique des besoins diffère selon les secteurs (alimentation en eau potable, industrie, énergie, agriculture, navigation) et requiert, pour chacun d'eux, des modèles spécifiques, avec des niveaux d'intégration variables selon les questions posées et les données disponibles. Les flux d'eau entre ces secteurs étant complexes, l'étude de l'équilibre entre ressources et usages suppose en outre de modéliser les interactions entre secteurs : un prélèvement ou un rejet dans un secteur modifie la ressource disponible pour les autres, *via* les retours au milieu, les transferts entre bassins ou la compétition pour un même volume. Ces dépendances hydrauliques et fonctionnelles doivent être représentées à un niveau de détail adapté aux questions posées.

Ces modèles sont d'abord élaborés ou calés pour représenter une situation passée dans le cadre de diagnostics, puis mobilisés pour simuler l'évolution des besoins dans des études prospectives. Selon les moyens disponibles et les objectifs de l'étude, cette représentation peut se limiter à un secteur isolé (par exemple l'irrigation seule), ou au contraire adopter une approche intégrée qui articule climat, socio-économie, pratiques et rétroactions entre secteurs. Pour l'action, la question n'est donc pas de disposer d'un modèle unique, mais de choisir un niveau de représentation adapté à la décision à instruire, aux données mobilisables et au degré d'incertitude acceptable. Une fois le niveau de représentation fixé, ces modèles sont alimentés par des scénarios d'évolution : un scénario de référence (ou « au fil de l'eau ») qui projette les tendances actuelles, et un ou plusieurs scénarios alternatifs explorant des hypothèses différentes sur le climat, la démographie, les pratiques agricoles ou les politiques publiques. Le choix de ces scénarios dépend des enjeux territoriaux, des incertitudes majeures à explorer et du niveau d'ambition fixé pour l'étude.

La modélisation des usages de l'eau hors irrigation

La modélisation des besoins en eau potable *via* des variables explicatives – telles que l'évolution de la population, du rendement du réseau, du niveau social, du prix de l'eau, des politiques de sensibilisation, entre autres – est éminemment complexe et nécessite encore des travaux et de l'acquisition de données *via* notamment des observatoires pour apporter une plus-value fiable dans le cadre d'études prospectives (Montginoul, 2013). À cela s'ajoute la difficulté de dissocier les prélèvements liés

aux usages non domestiques (industriels, commerciaux, tertiaires et services publics) des usages domestiques (prélèvements d'eau potable)..

Les usages industriels présentent en outre une forte spécificité sectorielle et territoriale. À l'échelle d'un territoire, un établissement industriel particulier peut à lui seul constituer un préleveur majeur, tandis que ses perspectives d'évolution dépendent de déterminants économiques, techniques ou réglementaires souvent difficiles à anticiper.

Les besoins en eau et les prélèvements associés, même s'ils ne se traduisent pas par une consommation, comme dans le cas du secteur de l'énergie, se traduisent par des contraintes sur des volumes (stockage de l'eau pour l'hydroélectricité) et des flux (débit minimum pour le refroidissement des centrales nucléaires) qui doivent être prises en compte.

Il en est de même pour les besoins pour la navigation qui transfère des volumes d'eau via les canaux à l'intérieur ou entre des bassins versants. Les prélèvements pour la navigation peuvent par ailleurs être en partie réutilisés par d'autres usages, notamment l'alimentation en eau potable et l'irrigation, *via* des prélèvements en canaux complexifiant la compréhension des usages.

Demande en eau pour l'irrigation agricole

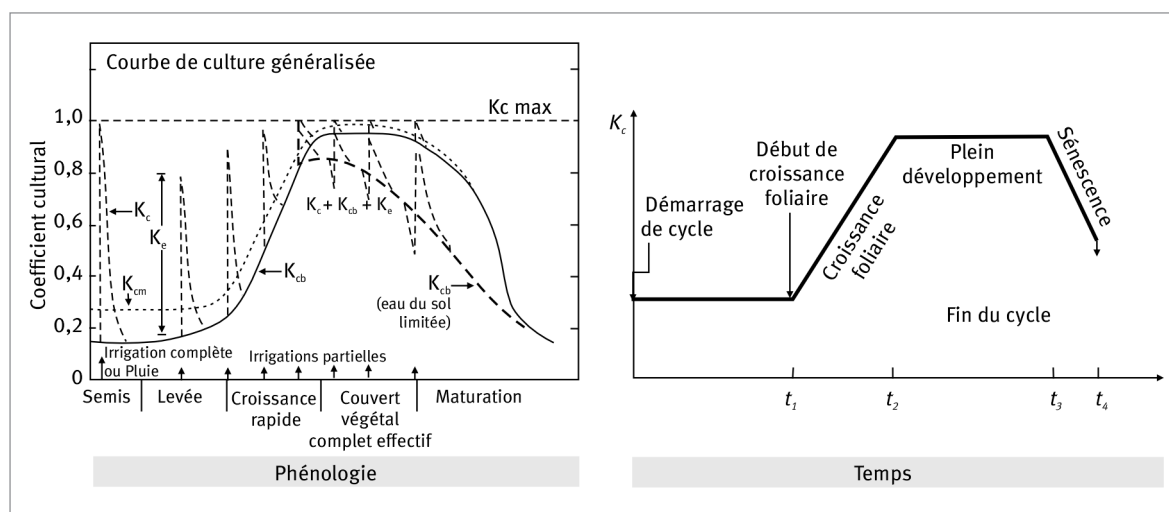
La demande en eau d'irrigation d'une culture, en l'absence de mesures, est souvent confondue avec les besoins en eau théoriques de cette culture, supposant que celle-ci est irriguée dès lors que le stress hydrique apparaît. C'est une hypothèse forte, discutée plus loin.

Plusieurs types de modèles existent : les approches simplifiées de type FAO/CropWat, qui estiment un besoin théorique de la culture ; les outils plus opérationnels qui traduisent ce besoin en volumes à distribuer ; les modèles plus détaillés qui représentent mieux le développement des cultures. Nous nous concentrons d'abord sur l'approche simplifiée FAO, largement diffusée et utilisée comme référence dans les études territoriales, avant d'évoquer ensuite les approches opérationnelles et les modèles plus détaillés.

Le besoin en eau théorique d'une culture s'établit généralement à partir d'un bilan hydrique permettant de calculer la quantité d'eau dans le sol. Celle-ci évolue avec l'évaporation, l'extraction racinaire (évaluée par la transpiration), les précipitations, l'irrigation, le drainage, la redistribution de l'eau dans le sol. Le stress hydrique est lié à la disponibilité de l'eau dans le sol : lorsque l'eau est en quantité suffisante, la transpiration peut être maximale (en l'absence d'autre stress). Celle-ci peut être évaluée à chaque moment à partir de la surface foliaire et des conditions climatiques.

Ces principes sont notamment décrits dans le modèle simplifié de la FAO (Allen *et al.*, 1998) synthétisant de nombreuses études sur le développement des cultures. La figure 2 présente l'évolution du coefficient cultural, rapport entre l'évapotranspiration de cette culture et l'évapotranspiration de référence, en fonction des stades phénologiques. Les travaux de synthèse de la FAO ont permis d'aboutir à une simplification de cette dynamique en identifiant, pour chaque culture, des durées de phases fixes, peu variables d'une année sur l'autre. Ainsi, pour une culture donnée, la connaissance de la date de semis, ou d'une autre date de démarrage du

Figure 2 – À gauche: évolution des coefficients culturaux en fonction de la phénologie; le trait continu représente la transpiration, le trait pointillé long ajoute l'évaporation, avec éventuellement une réduction liée au stress hydrique; le pointillé court résulte d'un lissage temporel. Source: *ASCE Environmental and Water Resources Institute, Evapotranspiration in Irrigation and Hydrology Committee* (2025). À droite: modèle simplifié (FAO, 1998, rapport n°56), décrivant le cycle à partir d'évolutions linéaires en fonction du temps.



cycle de végétation, permet de décrire, sur l'ensemble de l'année, l'évolution du coefficient cultural et de la profondeur racinaire, jour par jour (partie droite de la figure 2). Pour chaque culture, un seuil de stress est également précisé : si l'humidité dans le sol est inférieure à la limite de confort hydrique, la culture réduit sa transpiration de manière proportionnelle au déficit par rapport au seuil de confort.

Des irrigations peuvent alors être modélisées à partir du stock d'eau présent dans le sol. Une stratégie rationnelle est de déclencher un arrosage dès lors que le stress hydrique apparaît, par exemple en remplissant la réserve utile (pratique logique, par exemple, pour une grande culture irriguée par aspersion), ou en apportant une dose basée sur l'évapotranspiration journalière (stratégie possible en irrigation localisée). On peut tenir compte de l'efficacité d'application d'une dose d'irrigation, variable selon la technique d'apport d'eau.

Le passage du besoin de la plante au volume à prélever ajoute toutefois d'autres facteurs : le transport de l'eau par les réseaux, le mode d'application sur la parcelle (gravitaire, aspersion, goutte-à-goutte), ainsi que la gestion de la temporalité et des doses apportées. Tous ces éléments affectent l'efficacité de la quantité d'eau prélevée. Ils sont généralement mal connus et donc souvent estimés à partir de tables ou de « dires d'experts », avec des valeurs parfois très faibles et sujettes à controverse dans certaines situations.

À partir de données climatiques (précipitations, évapotranspiration de référence), on peut donc effectuer un calcul du bilan hydrique journalier, incluant d'éventuels apports d'eau par irrigation, selon les règles théoriques spécifiées. C'est le calcul que fait le logiciel Cropwat mis à disposition par la FAO, avec un paramétrage disponible pour tout type de culture. Les durées des phases, les coefficients culturaux et les seuils de stress peuvent être ajustés, de même que d'autres cultures peuvent être ajoutées. Un package sous R est maintenant disponible⁸ et est utilisé par l'outil CAWET pour calculer la demande en eau à l'échelle d'un territoire.

Ce type d'approche a aussi donné lieu à des outils plus directement orientés vers la planification opérationnelle. En Californie, le modèle SIMETAW est ainsi utilisé à l'échelle territoriale pour estimer la demande en eau agricole (Mancosu *et al.*, 2016). Comme Cropwat, il repose sur un bilan hydrique simplifié, mais il intègre en plus l'efficacité de l'irrigation dans le calcul des volumes à apporter, en tenant compte notamment de l'uniformité de distribution. Il permet ainsi de passer d'un besoin théorique de la plante à une estimation plus directement utile pour la gestion des volumes distribués. Des travaux récents montrent en outre l'intérêt d'y intégrer des données satellitaires (type Sentinel-2) pour mieux représenter la variabilité spatiale du développement des cultures et des besoins à l'échelle d'un bassin versant (Rouault *et al.*, 2025).

Pour autant, ces approches présentent aussi des limites. Dans la formulation simplifiée de la FAO, la durée des phases est fixe. Elle ne permet pas de nuancer les cycles selon les années et les dates de semis, et donc de considérer les évolutions de la phénologie résultant notamment des changements climatiques – jusqu'à plusieurs jours par décennie en Europe (Piao *et al.*, 2019).

D'autres approches de modélisation permettent de dépasser ces limites, au prix cependant d'un plus grand nombre de paramètres. En particulier, la phénologie est couramment mise en relation avec l'accumulation de temps thermique (durée effective au cours de laquelle la chaleur s'exerce sur la plante), ce qui donne lieu à toute une famille de modèles de culture représentant le développement de celle-ci à partir des « degrés-jours » (ou *growing-degree-days*) obtenus en sommant les écarts de température moyenne du jour avec une température de base spécifique à chaque culture (en dessous de ce seuil, la plante ne se développe pas), lorsque ceux-ci sont positifs. Le modèle Optirrig rentre dans cette catégorie, de même que d'autres modèles développés au sein de la communauté scientifique (AqYield et STICS, par exemple (Constantin *et al.*, 2015)). STICS, en particulier, a été paramétré pour divers types de cultures, y com-

8. Voir l'encadré « En savoir plus – Ressources complémentaires ».

pris la vigne (Valdés-Gómez *et al.*, 2009). Il permet aussi une représentation assez fine des processus, comme la dynamique de redistribution de l'eau dans le sol décrite couche par couche au centimètre près. Pour autant, cette échelle de représentation ne se justifie pas pour des évaluations à l'échelle territoriale pour lesquelles les incertitudes sur les données d'entrée sont telles que les sorties aux fines échelles spatiales n'ont pas de sens.

Pour dépasser une partie des limites de Cropwat, tout en gardant une philosophie de paramétrage parcimonieux, le modèle AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009) a été développé et diffusé par la FAO. Il considère le développement des cultures simulées *via* le taux de couverture de la canopée, calculé avec le temps thermique (figure 9), et *via* la linéarité de la relation entre biomasse produite et cumul de transpiration. Cette dernière est calculée à partir du taux de couverture de la canopée et de l'évapotranspiration de référence. Le stress thermique peut être considéré dans le calcul du développement de la canopée. Toutefois, seules des cultures annuelles sont disponibles dans la version standard.

Beaucoup de ces modèles ont été développés pour optimiser la valorisation des ressources, eau bleue ou eau verte, pour les grandes cultures. La relation entre rendement (agronomique ou économique) est beaucoup plus complexe pour des cultures comme la vigne ou les vergers, du fait de la taille, de l'implantation, de la gestion de l'interrang, du découplage entre biomasse et rendement... Peu de modèles sont ainsi disponibles pour les cultures pérennes. L'intégration du temps thermique dans Cropwat est à ce titre une perspective intéressante (Paredes *et al.*, 2025).

Quel que soit le type de modèle, les estimations des besoins théoriques à l'échelle territoriale nécessitent des données souvent imparfaites (comme l'occupation du sol) ou les caractéristiques du sol, voire généralement inconnues, comme le recours à l'irrigation, et le cas échéant le type de technique. Le recours à des modèles plus complexes ne comble pas les lacunes sur les données de base. Dans ce paysage, Cropwat reste en mesure

d'apporter des ordres de grandeur sur les besoins en eau théoriques d'un territoire comportant une grande diversité de cultures – et c'est là un de ses atouts – moyennant des hypothèses sur les pratiques d'irrigation et une confiance dans les données publiques utilisées dans le calcul.

Stocks et flux d'eau dans l'équilibre besoins-ressources

La représentation des stocks et flux d'eau, et de leur évolution, est évidemment une composante essentielle du diagnostic de l'adéquation besoin-ressource.

Quand les observations manquent, l'enjeu n'est plus seulement de quantifier des volumes, mais d'explicitier dans les modèles les hypothèses retenues sur le devenir de ces flux. Autrement dit, la question des données porte sur ce qui est observé ou non ; la question de la modélisation porte sur la manière de représenter les flux de retour, leurs délais, leurs répercussions hydrologiques et les usages ou services induits qu'ils soutiennent.

Une difficulté supplémentaire tient au changement d'échelle. Les données sont produites à des résolutions spatiales et temporelles qui ne coïncident pas nécessairement avec celles des processus hydrologiques, des usages ni des décisions de gestion. À cela s'ajoutent des boucles de rétroaction entre milieux, prélèvements et adaptations des acteurs, encore peu intégrées dans les approches sectorielles. Le rapprochement entre modèles hydrologiques et dynamiques socio-économiques constitue, de ce point de vue, une perspective majeure pour les études prospectives territoriales.

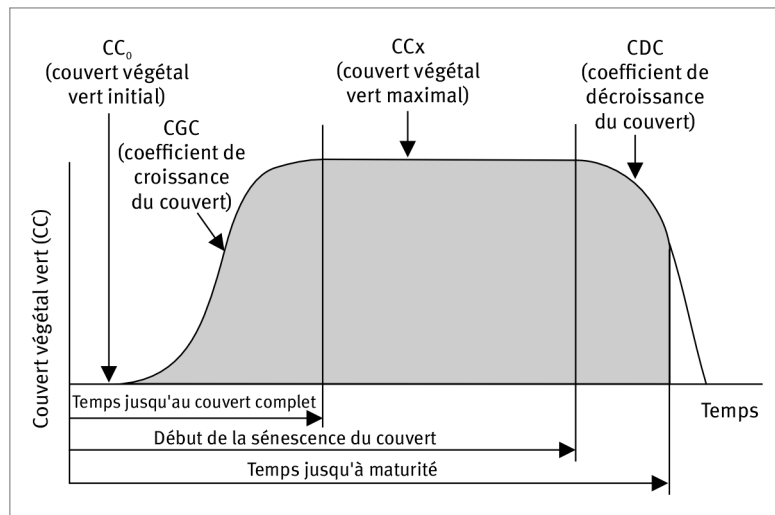
Sur ce point, l'étude Explore2⁹ a montré tout l'intérêt de mobiliser un nombre important de modèles de différentes natures pour simuler la ressource en eau. Deux grandes familles de modèles et leurs résultats correspondants ont été présentés : les modèles d'évolution des niveaux des nappes et les modèles d'évolution des débits des rivières. Cette dichotomie reste toutefois un verrou scientifique sur les territoires où les deux types de ressources sont utilisés, car il n'existe pas, à notre connaissance, de modèles très performants sur ces deux compartiments simultanément. Par exemple, la simulation de l'impact de prélèvements dans les eaux souterraines sur le débit des rivières reste un domaine de recherche largement ouvert.

Pour autant, représenter les flux d'eau retournant au milieu après usage reste difficile. Ces flux peuvent pourtant assurer, au-delà de l'usage direct, des usages et services induits de l'eau, avec un décalage spatial ou temporel. Ils peuvent alimenter une ressource mobilisable à l'aval, contribuer à la recharge des nappes, comme dans certaines zones d'irrigation gravitaire telles que la plaine de Crau, ou soutenir des services écosystémiques liés à la présence d'eau, notamment dans les zones humides.

Dans les modèles, l'enjeu n'est donc pas seulement de fermer un bilan d'eau, mais de représenter le devenir de ces flux, leurs temps de transfert et les besoins qu'ils couvrent implicitement. On peut citer le devenir des fuites des réseaux d'adduction d'eau potable, des eaux d'irrigation gravitaire infiltrées ou ruisselées à l'aval des parcelles, *via* ou non des réseaux de drainage, des rejets issus de carrières ou de stations de traitement.

9. Portée par INRAE et l'Office international de l'eau (OiEau), cette étude fait suite à Explore 2070 (2010-2012).

Figure 9 – Représentation du cycle de culture dans AquaCrop: le développement de la culture est associé au temps thermique (Steduto *et al.*, 2009).



La figure 4 illustre quelques-unes de ces circulations entre ressource, usages, eaux de surface et eaux souterraines à l'échelle d'un bassin versant.

Au-delà de l'impact direct des activités humaines sur les écoulements de surface et souterrains, les évolutions de l'aménagement du territoire modifient également l'évapotranspiration. Or, cette variable constitue une entrée majeure des modèles hydrologiques, de sorte que toute évolution de l'occupation ou de l'usage des sols est susceptible d'en affecter sensiblement les résultats. Des modèles à base physique¹⁰ comme le modèle J2000 (Krause, 2002), ou utilisant différents modèles hydrologiques en fonction de la nature du territoire comme le modèle Maelia (Gaudou *et al.*, 2014) qui mixe les modèles AqYield pour les parcelles agricoles et SWAT pour le reste du territoire, sont ainsi conçus pour intégrer ces différents processus et explorer des options d'aménagement. Dans le modèle J2000, le territoire est discrétisé en unités de réponse hydrologique à partir de la topographie, des sols, de l'occupation du sol et du réseau hydrographique, afin de représenter de manière explicite les principaux processus du cycle de l'eau et leurs variations spatiales. Le modèle Maelia pousse plus loin encore l'intégration entre dynamiques biophysiques et décisions humaines, en représentant les exploitations agricoles, leurs comportements et les actions menées sur les parcelles qui les composent au moyen d'un moteur de simulation multi-agent. Cette finesse de représentation a toutefois un coût. Elle exige, sur chaque territoire étudié, un travail d'implémentation long et techniquement exigeant, souvent fondé en partie sur des approximations rendues nécessaires par le manque d'information disponible. Elle complique également le calage des modèles, du fait du grand nombre de paramètres à renseigner, et peut conduire à un rapprochement moins précis entre sorties simulées et données observées que dans le cas de modèles plus sobres. En contrepartie, ces approches permettent de représenter des interactions, des trajectoires d'usage et des options d'aménagement qui échappent à des modèles plus simples. Leur intérêt dépend alors du niveau de détail réellement utile à la décision, au regard du coût d'implémentation, des données mobilisables et des possibilités de calage sur le territoire étudié.

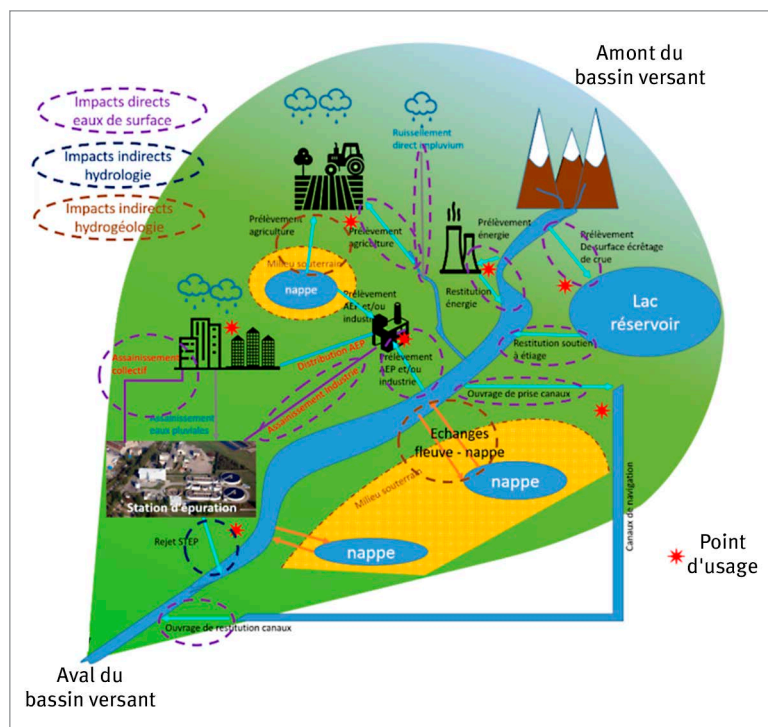
Perspectives pour améliorer l'aide à la décision en gestion de l'eau

Ouverture des données

La mise à disposition des données publiques en open data et la généralisation des API (interfaces de programmation d'application) facilitent désormais l'accès, pour les collectivités, gestionnaires et bureaux d'étude, à des sources utiles pour la quantification des besoins en eau. On peut citer les API mises en place par le BRGM (Hub'Eau), le service GeoDataInrae, la plateforme nationale des données publiques et l'entrepôt Recherche Data Gouv pour les données de la recherche.

Ces données disponibles en ligne permettent désormais d'intégrer la récupération des données dans des chaînes

Figure 4 – Exemple de flux d'eau possibles au sein du bassin versant.



de traitement automatique des modèles, comme l'illustre dans ce numéro l'outil RADIS, qui fournit les données pour l'outil CAWET.

Au-delà des données publiques, un enjeu majeur consiste à rendre plus accessibles les données produites par les gestionnaires de l'eau (associations syndicales de propriétaires, sociétés régionales d'aménagement, énergéticiens). Cela suppose des incitations, des moyens d'organisation et des services de données pérennes, afin de renforcer la transparence et la gestion stratégique des territoires de l'eau.

Appropriation des données par les acteurs

La quantification n'est utile que si elle produit des indicateurs lisibles et mobilisables pour la gestion. À chaque étape de ce processus, les acteurs doivent être impliqués pour valider les approches proposées, comprendre les apports et limites des modèles mobilisés et être en capacité de s'approprier les résultats de ces études. Le projet Explore2 a mis en place, dans les territoires, des groupes de travail réunissant gestionnaires de l'eau, collectivités et autres acteurs afin de partager les résultats de projections hydro-climatiques et d'en faciliter l'appropriation. Ce dispositif de concertation a permis de recueillir les besoins et priorités des utilisateurs, de discuter la forme la plus adaptée pour la restitution des résultats, et de co-construire des outils d'aide à la décision utiles et utilisables à l'échelle locale. Ce travail s'inscrit dans le second volet du projet, coordonné par l'OiEau, dédié à l'accompagnement des acteurs dans la compréhension et l'utilisation des résultats pour adapter les stratégies de gestion de la ressource en eau.

¹⁰. Fondés sur les lois de la physique pour simuler le cycle de l'eau — bilan hydrique, infiltration, écoulement — plutôt que sur des relations empiriques ou statistiques. Ils se distinguent souvent par une représentation spatiale fine du territoire et par la résolution explicite d'équations décrivant ces processus physiques.

Encadré 2 – En savoir plus – Ressources complémentaires.

Cet encadré regroupe les principaux modèles, projets et services de données mentionnés dans l'article, avec les références utiles pour aller plus loin.

Tableau 1 – Modèles et logiciels de quantification des besoins en eau.

Modèle	Description	Référence en ligne
STRATEAU	Modèle prospectif France Stratégie estimant les usages de l'eau par commune et par mois	https://hal.science/hal-02936740v1
Cropwat	Logiciel FAO pour le calcul simplifié du bilan hydrique des cultures	https://www.fao.org/sustainable-development-goals-helpdesk/champion/article-detail/cropwat/en
CropWat (package R)	Implémentation R de Cropwat, utilisé par CAWET	https://inrae.r-universe.dev/CropWat
CAWET	Outil de calcul de la demande en eau à l'échelle territoriale	https://inrae.r-universe.dev/CAWET
RADIS	Outil de récupération automatisée des données pour CAWET	https://inrae.r-universe.dev/RADIS
SIMETAW	Modèle californien pour l'estimation de la demande agricole territoriale	https://doi.org/10.1007/s11269-015-1176-7
Optirrig	Modèle de culture basé sur les degrés-jours	https://hal.science/hal-03405252
AqYield	Modèle de culture et d'irrigation (INRAE)	https://www.maelia-iam.fr/
STICS	Modèle détaillé de croissance des cultures (INRAE)	https://stics.inrae.fr/
AquaCrop	Modèle FAO basé sur la couverture de canopée et le temps thermique	https://www.fao.org/family-farmer/home/library/manuals/agronomy/crops/water-management/aquacrop/en/

Tableau 2 – Modèles hydrologiques et intégrés.

Modèle	Description	Référence en ligne
J2000	Modèle hydrologique à base physique (INRAE)	https://hybv.riverly.inrae.fr/outils-et-produits/modele-hydrologique-j2000
Maelia	Modèle intégré multi-agent couplant biophysique et décisions humaines (INRAE)	https://maelia.hub.inrae.fr/
SWAT	Modèle hydrologique de bassin versant (Soil and Water Assessment Tool)	https://swat.tamu.edu/

Tableau 3 – Projets et programmes.

Projet	Description	Référence en ligne
Explore2	Étude prospective INRAE/OiEau sur les futurs de l'eau (suite d'Explore 2070)	https://ofb.gouv.fr/explore2-des-futurs-de-eau
QUALYPSO	Méthode de partition des composantes d'incertitude	https://guillaumeevin.r-universe.dev/QUALYPSO
Chaire EACC	Chaire Eau, Agriculture et Changement Climatique	https://chaire-eacc.fr/
Défi INRAE – Outiller les territoires agricoles pour une gestion équilibrée de l'eau	Programme interdisciplinaire INRAE pour les outils de simulation	https://www.inrae.fr/actualites/priorites-inrae-2025-2030-lancement-15-defis-recherche-innovation
TRISHNA	Mission satellitaire indo-française thermique haute résolution	https://trishna.isro.gov.in/

Tableau 4 – Services et données ouvertes.

Service	Description	Référence en ligne
Hub'Eau (BRGM)	API de données hydrologiques du BRGM	https://hubeau.eaufrance.fr/
GeoDataInrae	Service de données géographiques INRAE	https://geodata.inrae.fr/
Recherche Data Gouv	Entrepôt de données ouvertes de la recherche française	https://recherche-data.gouv.fr/
Plateforme nationale des données publiques	Données publiques françaises	https://www.data.gouv.fr/

L'appropriation des outils repose également sur l'existence de services de données pérennes, documentés et interopérables, capables d'alimenter les modèles et de produire des indicateurs compréhensibles par les acteurs. Le passage d'un prototype de recherche à un outil mobilisable en gestion suppose ainsi des historiques consolidés, des métadonnées explicites, des API stables et, lorsque c'est pertinent, le recours à des standards d'échange, par exemple de type OGC API. Il suppose également de reconnaître l'expertise terrain, indispensable pour qualifier les données, interpréter les écarts entre simulations et observations et retenir les indicateurs réellement utiles à la décision.

Dans un contexte d'incertitude profonde, le traitement des incertitudes doit faire partie intégrante de la restitution des résultats. Il ne s'agit pas seulement de comparer plusieurs sorties, mais d'identifier ce qui relève des scénarios, des données d'entrée, des paramètres et de la structure même des modèles. Les approches multi-modèles, qu'il s'agisse des couples GCM-RCM pour le climat ou d'ensembles de modèles hydrologiques comme dans Explore2, permettent de mieux caractériser cette variabilité. Dans l'esprit des travaux sur la planification sous incertitude profonde, ces explorations servent aussi à repérer les configurations dans lesquelles une option de gestion cesse d'être satisfaisante et à comparer des stratégies plus ou moins robustes (Walker *et al.*, 2013). Pour l'aide à la décision, l'enjeu n'est donc pas seulement de produire des plages de résultats, mais de documenter des options, leurs vulnérabilités et les conditions de leur révision dans le temps.

Des travaux méthodologiques permettent aussi de décomposer plus finement les sources d'incertitude. La méthode QUALYPSO, fondée sur les travaux de Evin *et al.* (2019), a ainsi été mobilisée dans Explore2 pour caractériser l'incertitude des sorties de modèles hydrologiques pour la ressource, en tenant compte du caractère souvent incomplet des ensembles de projections climatiques. Elle aide à distinguer ce qui relève des scénarios, des modèles et de l'information manquante dans les chaînes de simulation. Son extension en cours aux usages de l'eau et à leur intégration dans des modèles couplés ressource-usages constitue une perspective importante pour mieux cibler les efforts d'observation, de modélisation et d'aide à la décision.

La levée des verrous scientifiques

INRAE a récemment structuré une partie de son action autour de « défis Recherche et Innovation », menés en mode projet, de manière interdisciplinaire, pour accélérer le passage des connaissances vers des solutions opérationnelles. Parmi eux figure le défi « Outiller les territoires agricoles pour une gestion équilibrée de l'eau ». Il vise à concevoir, pour les territoires agricoles, des outils de simulation de l'évolution des ressources en eau au service du pilotage de la gestion. Ces outils doivent permettre d'explorer différents scénarios d'évolution du climat et de la ressource, en les croisant avec des hypothèses sur les pratiques agricoles, les transitions agroécologiques, les économies d'eau ou encore de nouveaux aménagements de stockage.

Parallèlement à ce défi, la chaire Eau, Agriculture et Changement Climatique (EACC) a engagé un chantier centré sur les méthodes permettant de mieux com-

prendre les usages, d'évaluer et d'anticiper les besoins en eau. L'objectif est de produire des références fiables et des méthodes accessibles, mobilisant le potentiel des outils numériques, pour suivre les évolutions conjointes de la ressource et des usages agricoles, en contexte irrigué comme pluvial, et pour appuyer à la fois l'optimisation de court terme et la planification de long terme. Les travaux conduits dans ce cadre, qu'il s'agisse d'études, de colloques, de stages ou de tables rondes, montrent aussi que la production de connaissances ne peut être dissociée des conditions de leur appropriation. Ils contribuent à documenter les scénarios de demande en eau, l'adoption des outils de pilotage de l'irrigation et les débats sur les aménagements, tout en alimentant les démarches territoriales de concertation.

Dans le prolongement de ces travaux, les recherches menées en télédétection peuvent contribuer à lever plusieurs verrous sur la connaissance des usages de l'eau. Elles permettent de mieux documenter l'irrigation et l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle, et donc de rapprocher l'estimation des besoins de l'observation des usages réels. Le Page *et al.* (2014) ont ainsi montré l'intérêt de séries temporelles satellitaires pour le pilotage de l'irrigation, tandis que Ferrant *et al.* (2017) mettent en évidence l'apport des données Sentinel pour cartographier les cultures irriguées et approcher les usages saisonniers de l'eau. À plus long terme, la mission TRISHNA (Lagouarde *et al.*, 2019) devrait renforcer ces capacités grâce à des observations thermiques mieux adaptées au suivi du stress hydrique et de l'évapotranspiration.

Au-delà de ces verrous, l'enjeu est donc de faire évoluer les études quantitatives vers des dispositifs capables non seulement d'estimer des besoins futurs, mais aussi de rendre explicites les hypothèses, les incertitudes, les marges de manoeuvre et les conditions de révision des choix. Cette démarche quantitative ne suffit pas à elle seule pour éclairer la décision publique et gagne à être articulée avec des approches sociologiques et socio-économiques pour saisir les comportements des acteurs, les conflits d'usage et l'acceptabilité des mesures. C'est à cette condition que la quantification des besoins futurs en eau peut nourrir utilement l'action publique, les démarches territoriales et les décisions de gestion. ■

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>

Caractériser les vulnérabilités des bassins Rhône-Méditerranée et Adour-Garonne pour mieux s'adapter au changement climatique.

<https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2026.52.9819>

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>

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

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

Projets de territoire pour la gestion de l'eau : à quoi cela rime ? Pour quelle vision, quel credo ? <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2026.52.10464>

RÉFÉRENCES

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/X0490E/X0490E00.htm>
- Arambourou, H., & Ferrière, S. (2025). Quelle évolution de la demande en eau d'ici 2050 ? *France Stratégie, La Note d'analyse*, 148, 1-15. <https://www.strategie-plan.gouv.fr/publications/quelle-evolution-de-la-demande-en-eau-dici-2050>
- Arambourou, H., Ferrière, S., & Oliu-Barton, M. (2024). Prélèvements et consommations d'eau : quels enjeux et usages ? *France Stratégie, La Note d'analyse*, 136, 1-16. <https://www.strategie-plan.gouv.fr/publications/prelevements-consommations-deau-enjeux-usages>
- ASCE Environmental and Water Resources Institute, Evapotranspiration in Irrigation and Hydrology Committee. (2025). Evapotranspiration terminology and definitions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 151(5), 06025003. <https://doi.org/10.1061/JIEDH.IRENG-10491>
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., & Therond, O. (2015). The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.011>
- Evin, G., Hingray, B., Blanchet, J., Eckert, N., Morin, S., & Verfaillie, D. (2019). Partitioning uncertainty components of an incomplete ensemble of climate projections using data augmentation. *Journal of Climate*, 32(8), 2423-2440. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0606.1>
- Ferrant, S., Selles, A., Le Page, M., Herrault, P. A., Pelletier, C., Al-Bitar, A., Mermoz, S., Gascoin, S., Bouvet, A., Saqalli, M., Dewandel, B., Caballero, Y., Ahmed, S., Maréchal, J. C., & Kerr, Y. H. (2017). Detection of irrigated crops from Sentinel-1 and Sentinel-2 data to estimate seasonal groundwater use in South India. *Remote Sensing*, 9(11), 1119. <https://doi.org/10.3390/rs9111119>
- Gaudou, B., Sibertin-Blanc, C., Therond, O., Amblard, F., Auda, Y., Arcangeli, J.-P., Balestrat, M., Charron-Moirez, M.-H., Gondet, E., Hong, Y., Lardy, R., Louail, T., Mayor, E., Panzoli, D., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J. M., Taillandier, P., Van Bai, N., Vavasseur, M., & Mazzega, P. (2014). The MAELIA multi-agent platform for integrated analysis of interactions between agricultural land-use and low-water management strategies. Dans S. J. Alam & H. V. D. Parunak (Eds.), *Multi-Agent-Based Simulation XIV* (pp. 85-00). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54783-6_6
- Krause, P. (2002). Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(9-10), 663-673. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00051-7)
- Lagouarde, J. P., Bhattacharya, B. K., Crébassol, P., Gamet, P., Adlakha, D., Murthy, C. S., Singh, S. K., Mishra, M., Nigam, R., Raju, P. V., Babu, S. S., Shukla, M. V., Pandya, M. R., Boulet, G., Briottet, X., Dadou, I., Dedieu, G., Gouhier, M., Hagolle, O., Irvine, M., Jacob, F., Kumar, K. K., Laignel, B., Maisongrande, P., Mallick, K., Oliso, A., Ottlé, C., Roujean, J. L., Sobrino, J., Ramakrishnan, R., Sekhar, M., & Sarkar, S. S. (2019). Indo-French high-resolution thermal infrared space mission for Earth natural resources assessment and monitoring—Concept and definition of TRISHNA. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W6, 403-407. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W6-403-2019>
- Le Page, M., Toumi, J., Khabba, S., Hagolle, O., Tavernier, A., Kharrou, M. H., Er-Raki, S., Huc, M., Kasbani, M., El Moutamanni, A., Yousfi, M., & Jarlan, L. (2014). A life-size and near real-time test of irrigation scheduling with a Sentinel-2 like time series (SPOT4-Takes) in Morocco. *Remote Sensing*, 6(11), 11182-11203. <https://doi.org/10.3390/rs6111182>
- Mancosu, N., Spano, D., Orang, M., Sarreshteh, S., & Snyder, R. L. (2016). SIMETAW#—A model for agricultural water demand planning. *Water Resources Management*, 30(2), 541-557. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1176-7>
- Montginoul, M. (2013). La consommation d'eau en France : historique, tendances contemporaines, déterminants. *Sciences Eaux & Territoires*, 10(1), 68-73. <https://doi.org/10.3917/set.010.0011>
- Paredes, P., López-Urrea, R., Martínez-Romero, Á., Petry, M., Cameira, M. R., Montoya, F., Salman, M., & Pereira, L. S. (2025). Estimating the lengths of crop growth stages to define the crop coefficient curves using growing degree days (GDD): Application of the revised FAO56 guidelines. *Agricultural Water Management*, 319, 109758. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109758>
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I. A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M., & Zhu, X. (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25(6), 1922-1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>
- Rouault, P., Courault, D., Flamin, F., Pouget, G., Doussan, C., El Hajj, M. M., Al-Mashharawi, S. K., McCabe, M., & Debolini, M. (2025). Integration of Sentinel-2 data into the SIMETAW model for assessing irrigation water requirements and evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 317, 109637. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109637>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Valdés-Gómez, H., Celette, F., García de Cortázar-Atauri, I., Jara-Rojas, F., Ortega-Farías, S., & Gary, C. (2009). Modelling soil water content and grapevine growth and development with the STICS crop-soil model under two different water management strategies. *OENO One*, 43(1), 13-28. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.1.806>
- Walker, W. E., Haasnoot, M., & Kwakkel, J. H. (2013). Adapt or perish: A review of planning approaches for adaptation under deep uncertainty. *Sustainability*, 5(3), 955-979. <https://doi.org/10.3390/su5030955>