

Sciences Eaux & Territoires



© serey77 (Adobe Stock)

ÉCONOMIES D'EAU EN IRRIGATION



Editorial

- 01 *La rédaction de la revue*

Avant-propos

- 03 *Claire SERRA-WITTLING, Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ, Bruno MOLLE et Sami BOUARFA*

Le contexte européen

- 08 **Synthèse** – Adaptation de l'irrigation au changement climatique dans l'Union européenne : les actions engagées par les États membres pour économiser l'eau
Claire SERRA-WITTLING, Silvia BARALLA, Inmaculada BRAVO DOMINGUEZ, Katrin DRASTIG, Graziano GHINASSI, Stéphane GUILLOT, Attila NAGY, Viktor NAGY, Zornitsa POPOVA et Sevilay TOPÇU
- 18 **Point de vue** – L'Europe et la Politique agricole commune dans la recherche des économies en eau : le point de vue de la Commission européenne
Philippe LAMMENS
- 24 **Table ronde** – Quelle place pour l'irrigation en France et en Europe dans l'avenir ?
Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ et Sami BOUARFA
- 28 **En direct des territoires** – L'irrigation de la vigne en ex-Languedoc-Roussillon : un potentiel de production maintenu par les économies d'eau
Léonie CAMBREA, Christophe LAFON et Laurent MAYOUX
- 34 **Focus** – Le partenariat européen pour l'innovation crée une dynamique de recherche sur l'eau et l'agriculture
Pascale RICCOBONI – Propos recueillis par Sabine ARBILLE
- 36 **Retour d'expérience** – Quel potentiel d'économie d'eau pour les stratégies d'irrigation des paysages de moraines du land de Brandebourg, en Allemagne ?
Beate ZIMMERMANN, Rainer SCHLEPPHORST et Veikko JUNGHANS
- 38 **Focus** – Économie d'eau pour un périmètre irrigué en gravitaire : défis et problématiques de la Vale do Lis, Portugal
José M. GONÇALVES, Susana FERREIRA, Rui EUGÉNIO, Manuel NUNES, Henrique DAMÁSIO et Isabel FERREIRA



Économies d'eau réalisées

- 46 **La modernisation des systèmes d'irrigation en France : quelles économies d'eau possibles à l'échelle de la parcelle ?**
Claire SERRA-WITTLING, Bruno MOLLE et Bruno CHEVIRON
- 54 **Retour d'expérience** – Transition agro-écologique des systèmes de culture irrigués innovants sur le territoire des Coteaux de Gascogne
Kamal ABANNAR, Cyrielle MAZALEYRAT, Jean-Jacques WEBER, Élise AUDOUIN, Christophe BONILLO, Cyril Dejean, Geoffrey FROMENT et Jean-Marie LOPEZ
- 58 **Combinaison de modèles de bilan hydrique et d'indicateurs de stress hydrique pour le pilotage de l'irrigation : étude de cas au Portugal**
Maria Isabel FERREIRA, Vasco CARRILHO, Nuno CONCEIÇÃO, Sonia V. LOURENÇO et Goncalo F. LEAL
- 66 **Efficience et optimisation de l'irrigation : le modèle Optirrig**
Bruno CHEVIRON, Magalie DELMAS, Claire SERRA-WITTLING, Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ, Bruno MOLLE, Madiop LO et Yassin ELAMRI
- 72 **Focus** – Irré-LIS®, exemple d'outil d'aide à la décision en irrigation
Sophie GENDRE



Nouveau regard

- 78 **Le point sur** – Économies d'eau en irrigation : quelques solutions techniques proposées par les entreprises
Bruno MOLLE et Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ
- 82 **Analyse des méthodes d'évaluation de l'état hydrique de la vigne**
Thibaut SCHOLASCH et Markus RIENTH
- 86 **Efficience de l'irrigation et économie d'eau : effet d'échelle et effet rebond**
Luciano MATEOS
- 90 **Point de vue** – La recherche de l'efficience maximum de l'eau, un objectif à ne pas déconnecter d'une vision intégrée du système de production
François GONTARD

ÉDITORIAL



es épisodes récurrents de sécheresse au cours de ces dernières années nous ont rendus davantage conscients de la nécessité d'économiser l'eau pour tous les usages. L'agriculture, qui est responsable de plus de 25 % des prélèvements d'eau en Europe, est concernée au premier plan par le sujet.

Il n'en reste pas moins que pour faire pousser des fruits et des légumes, il faut, et il faudra toujours, de l'eau. Or, avec l'augmentation des températures, liée au changement climatique, l'évapotranspiration des plantes augmente et le bilan hydrique des sols se dégrade. L'irrigation est alors une des solutions pour corriger les effets de la sécheresse et assurer la pérennité de la production agricole, et au-delà la sécurité alimentaire et l'avenir de l'agriculture.

Cependant, face aux nombreuses pressions qui s'exercent autour de la question de l'irrigation, notamment dans les régions du sud de l'Europe, il est nécessaire plus que jamais de questionner les pratiques d'irrigation sous l'angle de l'efficacité d'utilisation de l'eau aux différentes échelles spatiales et pour toutes les technologies. C'est une des principales pistes soutenues par l'Union européenne au travers de différents instruments, comme la directive cadre européenne sur l'eau (DCE) qui se focalise entre autre sur les moyens d'économies d'eau, ou encore du Fonds européen agricole pour le développement rural (FEADER) qui soutient les investissements en équipements économes en eau.

C'est dans ce contexte que les experts de la gestion de l'eau agricole d'INRAE ont organisé en novembre 2019, à Montpellier un colloque européen intitulé « Économies d'eau en irrigation ». Les objectifs de ce colloque étaient doubles : échanger sur les économies possibles d'eau en irrigation pour le développement d'une agriculture durable, et stimuler la diffusion des résultats de la recherche et des innovations techniques pour porter ce sujet à l'échelle européenne.

Onze États membres présents au colloque ont pu témoigner de leurs expériences dans le domaine de l'irrigation durable des cultures. Entrepreneurs, acteurs de l'eau et de l'agriculture, représentants de l'Union européenne ont également apporté leur éclairage sur l'avenir de l'irrigation en Europe face au changement climatique.

Retrouvez la synthèse de leurs échanges dans ce nouveau numéro de la revue *Sciences Eaux & Territoires* qui est publié en français et en anglais.

Bonne lecture.

La rédaction.



L'agriculture, responsable de plus de 25 % des prélèvements d'eau en Europe, est concernée au premier plan par les enjeux liés aux économies d'eau.

AVANT-PROPOS



n Europe, 25 % des prélèvements d'eau douce sont consommés par l'agriculture, pouvant atteindre 80 % dans certaines régions méditerranéennes où l'irrigation est indispensable pour la sécurisation de la production alimentaire. Face au changement climatique et aux multiples sollicitations de la ressource en eau, les enjeux liés aux économies d'eau en agriculture deviennent de plus en plus présents. Ces enjeux sont différents d'un pays à l'autre, voire d'une région à l'autre, et sont fortement liés aux spécificités pédoclimatiques et agronomiques locales.

Les pratiques agricoles sont régulées au niveau européen par les aides publiques de l'Union européenne. Actuellement, l'Union européenne cherche à promouvoir les bonnes pratiques, notamment pour évoluer vers des modes d'agriculture économes en eau et respectueux de l'environnement. Par exemple, le FEADER (Fonds européen agricole pour le développement rural) soutient les investissements en équipements d'irrigation économes en eau (Règlement européen n° 1305/2013 – Article 46, point 4). Ainsi, chaque État membre de l'Union européenne est libre d'utiliser la méthode qu'il souhaite pour réaliser l'évaluation ex-ante des économies d'eau potentiellement réalisables par un changement de matériel d'irrigation.

Les économies en eau sont directement liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau, indicateur souvent utilisé pour exprimer le niveau de performance des systèmes d'irrigation depuis la source jusqu'à la plante. Les stratégies mondiales d'utilisation de l'eau se concentrent sur la nécessité d'accroître son efficacité à des fins agricoles et d'en réduire le gaspillage afin de libérer des volumes pour d'autres utilisations plus productives et stratégiques et le maintien des services environnementaux. Dans ce contexte, l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation permet d'atteindre des économies d'eau supplémentaires. Il ne faut cependant pas oublier que cette amélioration est un processus lent et difficile qui dépend à la fois de la situation locale de pénurie d'eau mais aussi des contraintes de gestion (durée du tour d'eau par exemple). Ce progrès, qui peut se révéler coûteux, nécessite un savoir-faire et des actions coordonnées à différents niveaux.

Un moment d'échange au niveau européen sur les économies d'eau en irrigation

Au vu de la complexité du sujet, l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea)¹, Montpellier SupAgro, l'Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage (AFEID), l'Association des irrigants des régions méditerranéennes françaises (AIRMF), la Chambre régionale d'agriculture d'Occitanie, la Chambre régionale d'agriculture Provence-Alpes-Côte-d'Azur et le pôle Aqua-Valley, ont coorganisé un colloque, de périmètre européen, intitulé « Économies en eau en irrigation » les 13 et 14 novembre 2019 à Montpellier. Ce colloque a été centré sur les questions scientifiques et techniques en lien avec les économies d'eau permises par les changements de matériel et de pratiques d'irrigation. Les deux journées ont été destinées aux acteurs de la gestion de l'eau agricole au niveau européen avec les objectifs suivants :

- échanger autour des leviers d'économie d'eau et d'amélioration de l'efficacité en irrigation,
- partager les retours d'expériences sur la gestion quantitative,
- partager les méthodologies d'évaluation ex-ante des économies d'eau réalisées par un changement de matériel ou l'adoption d'outils de pilotage dans les différents pays de l'Union européenne,
- présenter des innovations techniques pour économiser l'eau en irrigation,
- favoriser les échanges entre les acteurs opérationnels, institutionnels, techniques et scientifiques.

Le colloque a été l'occasion de rassembler de nombreux experts en irrigation de l'Union européenne, issus des domaines opérationnel, scientifique et technique, institutionnel et politique, ou socio-économique, et en particulier plusieurs groupes opérationnels du PEI (Partenariat européen pour l'innovation). Une cinquantaine d'intervenants se sont relayés pour présenter des exposés sous des formats dynamiques et diversifiés alternant témoignages d'agriculteurs et acteurs locaux, présentations scientifiques, retours d'expérience, temps de discussion et débats. Ainsi, environ deux cents participants sont venus de divers horizons : agriculture, services d'État, agences de l'eau, instituts techniques et scientifiques, établissements d'éducation, entreprises, collectivités et structures gestionnaires.

Au travers des différentes séances, plusieurs éléments de débat sont apparus, ce qui a donné lieu à diverses questions, des discussions et l'expression de différentes opinions sur la question des économies d'eau en irrigation. Les présentations ont été réparties en différentes séquences :

- exemples de méthodologies utilisées en Europe pour l'évaluation des économies d'eau,
- retours sur des travaux spécifiques dans les pays de l'Union européenne,
- économies d'eau possibles grâce au changement de matériel d'irrigation,
- économies d'eau possibles grâce à un meilleur pilotage d'irrigation,
- économies d'eau possibles grâce aux approches intégrées,
- workshop scientifique,
- présentations flash des entreprises,
- table ronde finale.

1. Désormais INRAE, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, qui rassemble depuis janvier 2020, les ex-organismes Inra et Irstea.

À l'issue de ce colloque

La discussion sur les économies d'eau potentielles en irrigation est stratégique dans le contexte du changement climatique. Ce sujet est actuellement abordé à différentes échelles et vient au centre des préoccupations de tous les acteurs de la gestion de l'eau agricole. C'est ainsi que cet événement a donné lieu à diverses réflexions et permis de tirer quelques conclusions.

Synthèse des retours pays

Des experts européens ont fait le bilan. Leurs témoignages variés montrent que de nombreuses tentatives sont réalisées pour économiser l'eau, aussi bien dans les pays ayant une longue histoire d'irrigation que dans les pays où un besoin d'irrigation est apparu récemment. Ces exemples divers et variés montrent que, à l'échelle européenne, les économies d'eau sont possibles grâce à l'amélioration de l'efficacité globale de l'irrigation, en combinant des technologies (infrastructures, systèmes d'application, outils de planification) et des pratiques plus performantes.

Mise en avant d'innovations

Plusieurs entreprises privées françaises et européennes développent des innovations permettant des économies d'eau. Il en ressort un foisonnement de solutions à la fois technologiques et méthodologiques, permettant de nettes améliorations des performances des matériels et des outils de pilotage de l'irrigation. Il apparaît nécessaire de mieux mettre ces offres en valeur et de travailler sur leur complémentarité pour développer une irrigation plus intelligente et donc plus performante face au défi climatique.

Importance d'évaluer les impacts de la réglementation sur les économies d'eau

Les échanges ont fait ressortir le manque de retour quant à l'impact de la réglementation, en particulier des mesures liées à l'article 46 du règlement européen n°1305/2013 (soutien des investissements en matériel d'irrigation économes en eau par le FEADER), sur les consommations d'eau. Il apparaît nécessaire d'évaluer ex post l'impact de la réglementation sur les économies d'eau effectivement réalisées. Si on veut évaluer la pertinence des politiques d'économies d'eau, il faut mettre en place une méthodologie harmonisée de mesure des volumes consommés et des productions pour quantifier les économies d'eau aux différentes échelles (parcelle, réseau, bassin versant, aquifère) sous pression du changement climatique.

Perspectives de recherche

Le workshop scientifique, ainsi que plusieurs autres interventions au cours du colloque, ont fait ressortir :

- la nécessaire poursuite des efforts autour de l'évaluation de la performance de l'irrigation, en particulier pour mieux évaluer les économies d'eau,
- les méthodologies et indicateurs à utiliser : quelle échelle spatiale et temporelle? Comment quantifier les effets rebonds?
- les apports des nouveaux outils (capteurs, objets connectés, télédétection...),
- le besoin de prendre en compte et d'intégrer d'autres éléments que l'eau (sol, énergie, travail, environnement...),
- le besoin de s'appuyer sur des données issues de mesures validées et de communiquer de manière claire et rigoureuse.

Il s'avère nécessaire de poursuivre les actions en vue de l'amélioration des matériels et des pratiques d'irrigation. Pour cela, il apparaît impératif d'orienter les travaux vers des thématiques de recherche renouvelées :

- l'adaptation aux conditions extrêmes liées au changement climatique (vague de chaleur, sécheresse),
- l'irrigation de nouvelles cultures dans certains contextes particuliers (vigne, olivier...),
- le développement d'outils de pilotage (nouveaux capteurs, modèles, utilisation du big data...),
- l'intégration des différentes échelles dans l'évolution de la performance,
- les pratiques agroécologiques en irrigation.

Les récents épisodes de sécheresse et de chaleur amènent de nouveaux questionnements et remettent en cause certains concepts traditionnels. L'irrigation peut être reconsidérée non seulement comme moyen de compenser l'évapotranspiration de la culture dans un objectif de production de biomasse, mais également comme moyen de lutte contre le stress thermique aggravé par la sécheresse de l'air (brumisation), comme facteur favorisant l'activité biologique du sol, comme complément à l'aptitude naturelle de certaines plantes à s'adapter au stress hydrique.

Mise en réseau d'experts européens multi-acteurs

Les participants s'accordent pour dire qu'il est important de favoriser ces échanges interactifs et multi-acteurs et de les maintenir à échéances régulières. Ils permettent à la fois d'identifier les besoins et questionnements mutuels (scientifiques, techniques et réglementaires), et bien sûr de diffuser les avancées en termes de connaissance et d'innovation dans le domaine de l'irrigation.

Le format « Union européenne » de ce réseau d'experts est à privilégier autour de la réglementation et de sa mise en œuvre par les régions (Politique agricole commune, Programme de développement rural). Les États membres doivent tous faire face aux défis liés au changement climatique, au Sud, avec déjà une longue expérience d'irrigation, au Nord ou à l'Est avec des épisodes de sécheresse inconnus jusqu'alors. ■

TÉMOIGNAGE

Philippe LAMMENS (Commission européenne)

« J'ai été très heureux d'avoir pu ouvrir ce colloque.

Comme gestionnaire du Programme de développement rural (PDR) de Languedoc-Roussillon à la Direction-Générale Agriculture & Développement Rural de la Commission européenne, je suis conscient des défis que la gestion de l'eau pose dans cette région. Ainsi, quand j'étais à Montpellier en juin 2018 pour un comité de suivi, j'en ai profité pour rendre visite à l'ex-IRSTEA, pour apprendre ce que la recherche peut nous apporter comme solutions en matière de gestion de l'eau. C'est lors de cette visite que l'idée est née d'organiser un moment d'échange au niveau européen sur les économies d'eau en irrigation. En novembre 2018, un premier comité de pilotage pour ce colloque a eu lieu, suivi par plusieurs autres.

Les attentes de la Commission par rapport à ce colloque étaient doubles :

- d'abord, avoir des échanges sur les économies possibles d'eau en irrigation pour le développement d'une agriculture durable;
- de plus, stimuler davantage la diffusion des résultats au niveau européen :
 - de la recherche et
 - des innovations techniques pour économiser l'eau en irrigation.

J'ai été ravi de la participation de tant de représentants d'acteurs opérationnels, institutionnels, techniques et scientifiques et de nombreux autres intervenants, provenant de onze États membres et même d'en dehors de l'Union européenne (Turquie, Ukraine...), qui ont permis beaucoup d'échanges et de discussions fructueuses. La diffusion des résultats, qui a commencé lors du colloque même, sera pleinement assurée grâce à ce numéro spécial de la revue INRAE « Sciences, Eaux & Territoires ».

COLLOQUE « ÉCONOMIES D'EAU EN IRRIGATION » MONTPELLIER - 2019



© INRAE

Les organisateurs



Les financeurs





LE CONTEXTE EUROPÉEN

Comment ont évolué les prélèvements d'eau pour l'irrigation dans l'Union européenne ? Quels dispositifs ont été mis en œuvre dans les États membres pour économiser l'eau ? Quels ont été les résultats les plus probants et avec quelles pratiques innovantes ?

Retrouvez dans cette première partie le point de vue des scientifiques et des acteurs de l'eau et de l'agriculture en Europe sur la question des économies d'eau en irrigation dans divers contextes régionaux de changement climatique.

- 08 **Synthèse** – Adaptation de l'irrigation au changement climatique dans l'Union européenne : les actions engagées par les États membres pour économiser l'eau
Claire SERRA-WITTLING, Silvia BARALLA, Inmaculada BRAVO DOMINGUEZ, Katrin DRASTIG, Graziano GHINASSI, Stéphane GUILLOT, Attila NAGY, Viktor NAGY, Zornitsa POPOVA et Sevilay TOPÇU
- 18 **Point de vue** – L'Europe et la Politique agricole commune dans la recherche des économies en eau : le point de vue de la Commission européenne
Philippe LAMMENS
- 24 **Table ronde** – Quelle place pour l'irrigation en France et en Europe dans l'avenir ?
Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ et Sami BOUARFA
- 28 **En direct des territoires** – L'irrigation de la vigne en ex-Languedoc-Roussillon : un potentiel de production maintenu par les économies d'eau
Léonie CAMBREA, Christophe LAFON et Laurent MAYOUX
- 34 **Focus** – Le partenariat européen pour l'innovation crée une dynamique de recherche sur l'eau et l'agriculture
Pascale RICCOBONI – Propos recueillis par Sabine ARBEILLE
- 36 **Retour d'expérience** – Quel potentiel d'économie d'eau pour les stratégies d'irrigation des paysages de moraines du land de Brandebourg, en Allemagne ?
Beate ZIMMERMANN, Rainer SCHLEPPHORST et Veikko JUNGHANS
- 38 **Focus** – Économie d'eau pour un périmètre irrigué en gravitaire : défis et problématiques de la Vale do Lis, Portugal
José M. GONÇALVES, Susana FERREIRA, Rui EUGÉNIO, Manuel NUNES, Henrique DAMÁSIO et Isabel FERREIRA

Synthèse

Adaptation de l'irrigation au changement climatique dans l'Union européenne : les actions engagées par les États membres pour économiser l'eau

Comment ont évolué les prélèvements d'eau pour l'irrigation dans l'Union européenne ?

Quels dispositifs ont été mis en œuvre dans les États membres pour économiser l'eau ?

Quels ont été les résultats les plus probants et avec quelles pratiques innovantes ?

Lors du colloque « Économies d'eau en irrigation » organisé en novembre 2019 à Montpellier, des experts européens ont fait le bilan. Leurs témoignages variés montrent qu'à l'échelle européenne, les économies d'eau sont possibles grâce à l'amélioration de l'efficacité globale de l'irrigation, en combinant des technologies (infrastructures, systèmes d'application, outils de planification) et des pratiques plus performantes.

Comment le changement climatique affecte les besoins en eau des cultures en Europe ?

Le déficit hydrique des cultures est défini comme la différence entre les besoins en eau spécifiques à chaque culture et l'eau apportée par les précipitations. Il représente le besoin net en eau d'irrigation pour la pleine satisfaction des besoins des cultures. Le changement climatique entraîne une diminution des précipitations combinée à une augmentation de la demande en eau des cultures. Comme le montre la figure 1a, le déficit en eau des cultures de maïs a augmenté de 1995 à 2015 dans de larges régions d'Europe du Sud et de l'Est pour atteindre plus de 50%, alors qu'une diminution a été estimée pour certaines régions d'Europe du Nord-Ouest.

Les hausses de température projetées entraîneront une augmentation de l'évapotranspiration qui accroîtra la demande en eau des cultures dans toute l'Europe. L'évolution prévue du déficit hydrique des cultures de maïs grain est illustrée sur la figure 1b. Les simulations sont basées sur le modèle de culture WOFOST, qui inclut également l'effet de l'augmentation des concentrations de CO₂ sur l'efficacité d'utilisation de l'eau pour le maïs. Les simulations montrent une augmentation du déficit hydrique des cultures dans de vastes régions d'Europe, en particulier en Europe centrale. Cela pourrait conduire à irriguer des cultures qui étaient jusqu'à présent conduites en pluvial et à étendre les systèmes d'irrigation dans des régions actuellement dépourvues d'infrastructures d'irrigation. Toutefois, cette expansion

pourrait être limitée par les réductions projetées de la disponibilité en eau et l'augmentation de la demande d'autres secteurs. Des mesures adaptatives, ainsi qu'une gestion intégrée de l'eau, souvent à l'échelle des bassins versants, sont nécessaires.

Comment évoluent les prélèvements d'eau pour l'irrigation ?

L'agriculture est responsable d'environ 70% du prélèvement total d'eau douce dans le monde, principalement par l'irrigation (FAO, 2015). En Europe, l'irrigation est actuellement concentrée au bord de la Méditerranée. Le taux de prélèvement d'eau est estimé à 24% pour l'ensemble de l'Union européenne (Agence européenne pour l'environnement, 2009), bien que de fortes variations régionales soient apparentes (figure 2).

En Europe du Nord (Danemark, Estonie, Finlande, Islande, Irlande, Lettonie, Lituanie, Norvège, Suède, Royaume-Uni), l'agriculture irriguée n'est que peu développée et se limite généralement à la production horticole en été. Les prélèvements pour l'agriculture ont doublé entre 1990 et 2000, passant de 1 500 à 3 300 Mm³, puis ont diminué jusqu'à 480 Mm³ en 2015, ce qui représente moins de 3% des prélèvements totaux.

En Europe de l'Est (Bulgarie, République tchèque, Hongrie, Pologne, Roumanie, Slovaquie), le prélèvement d'eau pour l'agriculture était de près de 14 000 Mm³ en 1990, lorsque l'irrigation jouait un rôle important dans l'agriculture collectivisée à grande échelle sous le régime

soviétique. Avec l'effondrement de l'URSS, une diminution générale de la superficie irriguée s'est amorcée en raison de facteurs économiques et de la structure inadaptée des anciens systèmes d'irrigation au nouveau modèle d'agriculture privée (FAO, 2016). Les prélèvements d'eau sont tombés à 3 300 Mm³ et sont restés stables depuis 2000, représentant environ 12 % des prélèvements totaux.

Dans les pays occidentaux (Autriche, Belgique, Suisse, Allemagne, France, Liechtenstein, Luxembourg, Pays-Bas), l'irrigation est principalement pratiquée en complément des précipitations naturelles, qui sont par ailleurs généralement suffisantes pour une agriculture productive. Dans ces pays, les agriculteurs investissent dans le matériel d'irrigation principalement pour réduire les risques et augmenter les rendements de certaines

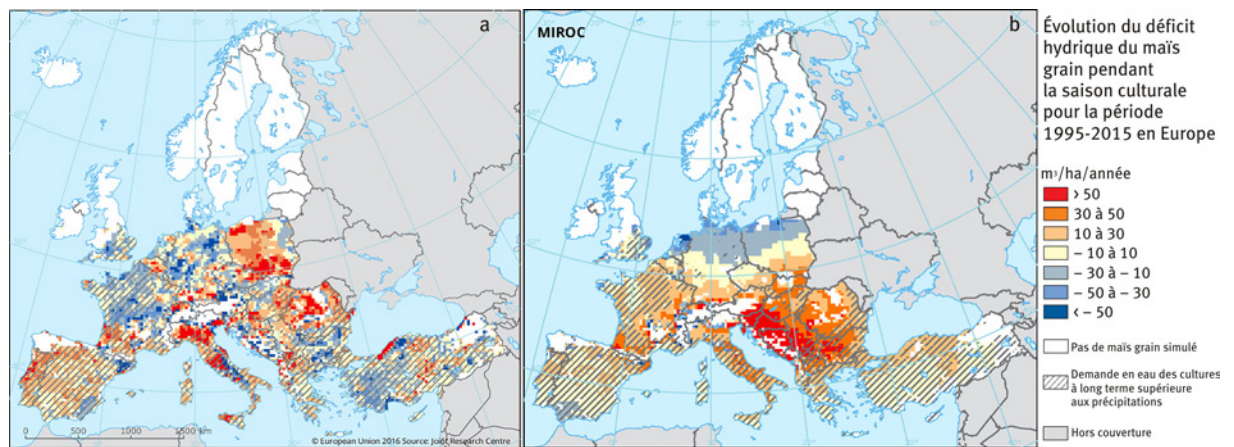
cultures telles que le maïs, les légumes et les cultures industrielles. Il est à noter que l'Agence européenne pour l'environnement a inclus la France dans le groupe « Europe de l'Ouest », même si ce groupe correspond mieux au Nord de la France qu'au Sud qui appartiendrait davantage aux « pays du Sud ». Les prélèvements d'eau pour l'irrigation ont régulièrement diminué, passant de 7 000 Mm³ en 1990 à 3 400 Mm³ en 2015, représentant alors 4 % des prélèvements totaux dans cette zone (12 % en France (Gleick, 2014)).

Les pays du Sud de l'Europe (Albanie, Bosnie-Herzégovine, Chypre, Grèce, Espagne, Croatie, Italie, Monténégro, Malte, Portugal, Serbie et Slovénie) se caractérisent par un climat méditerranéen aux conditions semi-arides qui rend l'agriculture irriguée beaucoup plus productive que l'agriculture pluviale. Dans la plupart des cas,

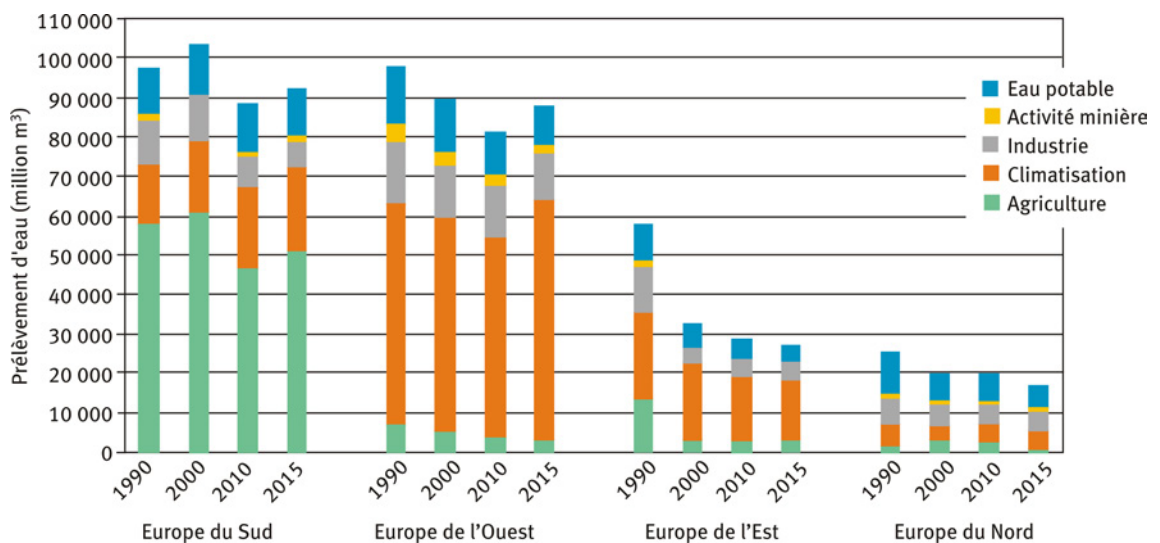
1 Déficit hydrique du maïs grain pendant la saison culturale en Europe.

a. Tendence pour la période 1995-2015. La couleur rouge indique une augmentation de l'écart entre les besoins en eau des cultures et l'eau disponible, la couleur bleue indique une réduction du déficit.

b. Taux de changement annuel projeté pour la période 2015-2045 avec le modèle MIROC (Model for Interdisciplinary Research On Climate). (Agence européenne pour l'environnement, 2016).



2 Évolution des prélèvements d'eau par secteur économique depuis les années 1990 (Agence européenne pour l'environnement, 2019).



L'irrigation est une caractéristique de l'agriculture établie de longue date et elle est souvent le principal utilisateur d'eau. Avec environ 60 000 Mm³, les prélèvements pour l'irrigation représentaient généralement près de 60 % du volume total prélevé en 1990 et 2000, et environ 55 % en 2010 et 2015 (46 000 et 51 000 Mm³, respectivement), atteignant 73 % au Portugal et 89 % en Grèce (Gleick, 2014).

Dans l'ensemble, malgré l'intensification du déficit hydrique des cultures dans de nombreuses zones d'Europe, on observe une diminution des prélèvements d'eau pour l'irrigation dans toutes les régions entre 1990 et 2015 (75 %, 69 %, 51 % et 12 % pour l'Europe de l'Est, du Nord, de l'Ouest et du Sud, respectivement). Elle est plus faible, mais réelle, dans les régions où le déficit en eau des cultures est très prononcé (Europe du Sud). Cette réduction du prélèvement d'eau d'irrigation peut avoir des causes diverses, telles que des stratégies historiques/politiques, le choix des cultures ou l'amélioration des technologies d'irrigation. Cette dernière sera détaillée ci-dessous et comprend le passage de systèmes d'irrigation de surface à des systèmes d'irrigation sous pression, la modernisation des réseaux de distribution existants, le développement de systèmes plus efficaces, l'amélioration des pratiques d'irrigation, l'adoption de méthodes d'automatisation et de pilotage.

Comment économiser l'eau en améliorant la technologie et la gestion de l'irrigation ?

Économies d'eau potentielles aujourd'hui et demain

Il existe plusieurs leviers pour économiser l'eau en irrigation, tels que la modernisation du réseau de transport pour réduire les fuites, les pratiques de gestion des sols et des cultures (culture sans labour, paillage, gestion des mauvaises herbes), et l'amélioration des technologies (systèmes d'irrigation plus efficaces) et de la gestion de

l'irrigation (pilotage, irrigation déficitaire). En ce qui concerne les améliorations à l'échelle de la parcelle, on sait que les systèmes d'irrigation localisés (micro-aspersion, goutte à goutte de surface et enterré) peuvent contribuer à réduire la quantité d'eau appliquée par rapport aux systèmes par aspersion (canon enrouleur, pivot, rampe), et que l'adoption d'outils de pilotage tels que les sondes de sol peut contribuer à économiser l'eau, bien que les économies d'eau observées soient très variables selon les situations (Serra-Wittling et al., 2019).

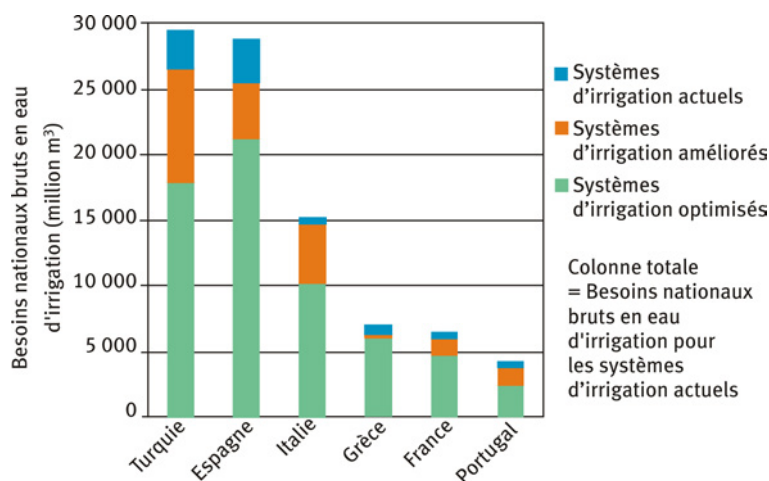
Le cas particulier de la région méditerranéenne

Fader *et al.* (2016) ont étudié les économies d'eau d'irrigation potentiellement réalisables grâce à des systèmes d'application et de transport plus efficaces, dans le contexte spécifique de la région méditerranéenne (figure 9). Ils ont comparé les besoins bruts en eau d'irrigation (BBEI) pour les systèmes utilisés actuellement, pour un scénario amélioré (amélioration de l'infrastructure de transport et des dispositifs d'application) et pour un scénario optimisé (transport de l'eau par canalisations combiné au goutte-à-goutte). Le BBEI est le prélèvement d'eau pour l'irrigation et est obtenu en divisant le besoin net en eau d'irrigation (BNEI) par l'efficacité globale du système. Ainsi, la différence entre BBEI et BNEI représente les pertes d'eau d'irrigation au niveau du système d'adduction et de la parcelle. Les résultats de ce travail montrent que la région méditerranéenne pourrait économiser actuellement 35 % de l'eau en améliorant nettement les systèmes d'irrigation et l'infrastructure de transport (scénario optimisé). Une amélioration mineure (scénario amélioré) pourrait entraîner une économie d'eau de 10 %. Certains pays (Turquie, Espagne) ont un potentiel d'économie plus élevé que d'autres (Grèce, France, Portugal). Les auteurs concluent que les incitations politiques en faveur des technologies économes en eau ainsi que le développement de systèmes d'adduction d'eau efficaces peuvent contribuer à réduire les prélèvements d'eau dès aujourd'hui mais aussi dans la perspective du changement climatique.

Allemagne. Diversifier les cultures : un levier pour l'adaptation au changement climatique, en plus de l'amélioration du pilotage de l'irrigation¹

En Allemagne, 373 000 ha ont été utilisés pour l'irrigation en 2010, ce qui représente 3 % de la superficie totale cultivée et 1 % de la superficie totale du pays (FAOSTAT, 2019). L'irrigation est pratiquée principalement pour assurer le rendement et le niveau de qualité. Dans les sols sableux légers des régions du nord et de l'est de l'Allemagne, la capacité de rétention en eau du sol est faible et les précipitations annuelles ne suffisent pas pour alimenter de manière optimale les céréales, les pommes de terre et les légumes. Dans le sud de l'Allemagne, les sols argileux et limoneux à forte capacité de rétention peuvent nécessiter un apport d'eau supplémentaire lorsque les précipitations sont faibles et pour les cultures plus sensibles au stress hydrique, comme les betteraves sucrières, les pommes de terre et les légumes (Drastig *et al.*, 2016a).

3 Besoins nationaux bruts en eau d'irrigation (BBEI) dans quelques pays méditerranéens européens pour les systèmes d'irrigation actuels, les systèmes d'irrigation améliorés et les systèmes d'irrigation optimisés. Moyenne sur la période 2000-2009 (adapté de Fader *et al.*, 2016).



1. Voir la présentation de Katrin DRASTIG ici :

<https://watersaving.sciencesconf.org/293112>

Au cours de la période 1902-2010, les précipitations annuelles moyennes ont augmenté d'environ 1 mm/an, alors que les températures annuelles ont augmenté de 0,01 °C par an. Toutefois, aucune tendance significative à la hausse ou à la baisse de la demande en eau d'irrigation modélisée (mm/an) n'a été observée (ligne bleue sur la figure 4) (Drastig *et al.*, 2016a). Simultanément, la demande volumétrique nette d'eau d'irrigation (Mm³/an) a diminué (aire bleue dans la figure 4) en raison d'un changement radical dans le choix des cultures et des superficies cultivées (moins de pommes de terre et d'avoine). Ainsi, le choix des cultures en Allemagne a eu un impact plus important sur la demande en eau d'irrigation que le changement climatique.

Au cours des dix dernières années (2008-2018), l'agriculture allemande a dû faire face à une demande relativement plus élevée en eau d'irrigation pour cinq années extrêmement sèches, ce qui a conduit à repenser les systèmes de production. Les améliorations technologiques, telles que le goutte-à-goutte de surface, le goutte-à-goutte enterré, l'irrigation de précision, les logiciels de pilotage de l'irrigation sont considérées comme des technologies innovantes permettant d'économiser l'eau. En Allemagne, six systèmes de pilotage de l'irrigation sont actuellement utilisés, mais, parmi les 13 700 agriculteurs irrigants, moins de 10 % ont adopté des outils de pilotage (Baroni *et al.*, 2019). Toutefois, l'adaptation au changement climatique impliquera non seulement une amélioration des systèmes d'irrigation par le biais du pilotage, mais aussi une plus grande diversification des cultures (Drastig *et al.*, 2016b).

Des systèmes de transport et d'application plus efficaces

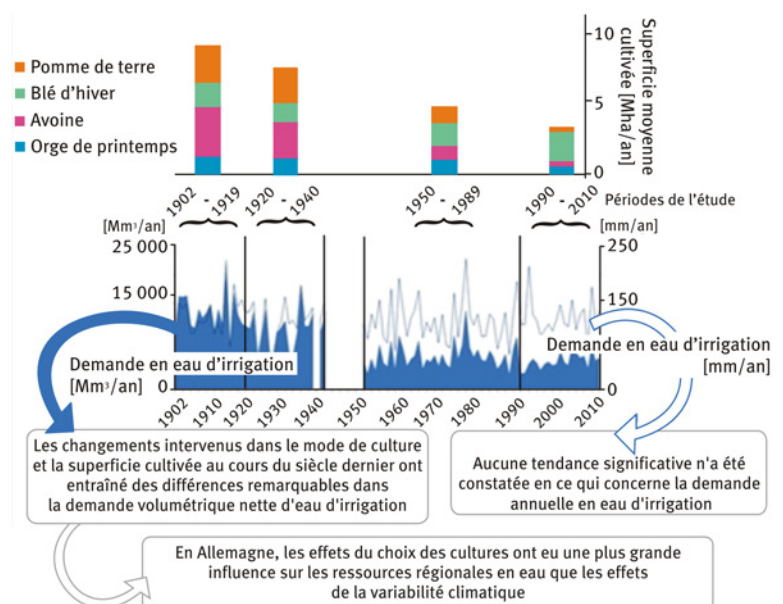
Espagne. Économies d'eau grâce à un vaste programme de modernisation de l'irrigation depuis la fin des années 1990²

L'Espagne occupe la première place dans l'Union européenne avec 3,77 Mha de surface irriguée, soit 22 % de la surface totale cultivée. L'irrigation en Espagne doit relever les défis de la rentabilité agricole, du changement climatique, du déficit en eau dans certaines régions où l'agriculture est le principal moteur de l'activité économique, des questions environnementales telles que la réduction de la pollution en nutriments, et enfin des défis sociaux tels que l'amélioration des conditions de vie et de travail des irrigants. C'est pourquoi, à la fin des années 1990, l'Espagne a lancé un gigantesque programme de modernisation des systèmes d'irrigation en améliorant les infrastructures, en mettant en œuvre de nouvelles technologies telles que l'irrigation localisée et en proposant de nouvelles méthodes de gestion de l'irrigation. 1,5 Mha ont été modernisés, grâce à près de 3 000 millions d'euros d'investissements publics. Aujourd'hui (figure 5), l'irrigation gravitaire et l'irrigation par aspersion représentent chacune près d'un quart de la surface irriguée. L'irrigation localisée représente 52 % de la surface irriguée, principalement pour les oliveraies, les vignobles, les plantations d'agrumes, les vergers et les légumes. Ce programme de modernisation a permis de réduire la consommation d'eau du secteur agricole :

en 2002, le secteur agricole représentait 80 % de l'eau totale consommée en Espagne, alors qu'actuellement ce chiffre est tombé à environ 65 %. **Les économies d'eau dues à la modernisation sont estimées à 3 096 Mm³/an.**

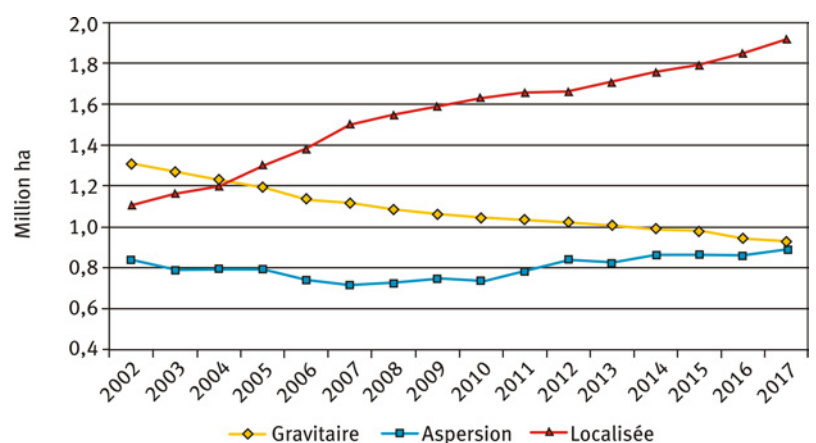
Ce processus de modernisation, qui est encore en cours, est soutenu par le programme européen de développement rural mis en œuvre par le biais de 17 différents programmes régionaux de développement rural en Espagne. Les investissements soutenus par la sous-mesure « Modernisation des infrastructures publiques d'irrigation » sont éligibles si les irrigants s'engagent à (1) inclure un système de comptage de l'eau, (2) collecter les données nécessaires aux indicateurs d'irrigation (pour faciliter l'évaluation des investissements publics), (3) déterminer les économies d'eau potentielles, qui

4 Modélisation de la demande en eau d'irrigation de l'agriculture allemande entre 1902 et 2010 (Drastig *et al.*, 2016a).



5 Évolution des systèmes d'irrigation en Espagne.

Source : ESYRCE (enquête annuelle sur les surfaces cultivées et les rendements réalisée par le ministère espagnol de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation).



2. Voir la présentation de Inmaculada BRAVO DOMINGUEZ ici : <https://watersaving.sciencesconf.org/297731>

doivent être supérieures aux valeurs seuils établies dans le cadre du développement rural national, et (4) déterminer éventuellement l'économie d'eau effective (si la masse d'eau prélevée est déclarée comme n'atteignant pas le bon état quantitatif).

Hongrie. Soutien aux systèmes d'irrigation efficaces en eau par le programme de développement rural³

En Hongrie, trois opérations ont été identifiées dans le domaine de la gestion de l'eau dans le cadre du programme de développement rural : (1) investissements d'amélioration, (2) investissements visant à améliorer la rétention de l'eau ou l'efficacité de son utilisation, (3) augmentation de la surface des zones irriguées. En ce qui concerne l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau, le projet doit comporter des investissements visant à améliorer durablement l'utilisation de l'eau dans l'agriculture, à appliquer des systèmes d'irrigation efficaces sur le plan de l'eau (et de l'énergie) et à réduire les pertes d'eau. Les éléments suivants sont soutenus :

- technologies d'irrigation efficaces, amélioration de l'efficacité de l'eau dans les installations d'irrigation ; amélioration et reconstruction d'infrastructures d'irrigation efficaces et d'installations connexes ;
- nouvelles installations d'irrigation, ainsi que mise en place de nouveaux services d'eau d'irrigation ;
- technologies d'irrigation à haut rendement énergétique et amélioration de l'efficacité énergétique des installations d'irrigation ;
- soutien supplémentaire pour les jeunes agriculteurs.

Comme exemple de projet soutenu, citons l'achat de nouveaux équipements d'irrigation, similaire au projet présenté à la figure 6. Le demandeur souhaitait renouveler son ancien système d'irrigation par un système linéaire et efficace en termes de consommation d'eau. La nouvelle machine devait couvrir la totalité des 46 ha de surface irriguée. La demande de subvention comprenait un GPS, un programmeur, des tuyaux et des compteurs d'eau. Le montant demandé était de 72 141 euros. **L'économie d'eau d'irrigation a été estimée à 20 % et l'économie d'énergie à 80 %.**

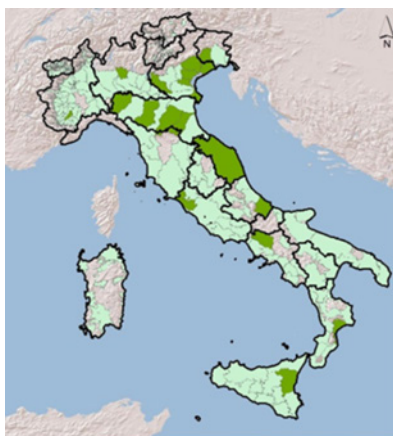
3. Voir la présentation de Attila NAGY ici : <https://watersaving.sciencesconf.org/293780>

6 Photos d'un projet similaire à celui soutenu par le programme de développement rural hongrois (source : YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=XyMfK8QK85M>)



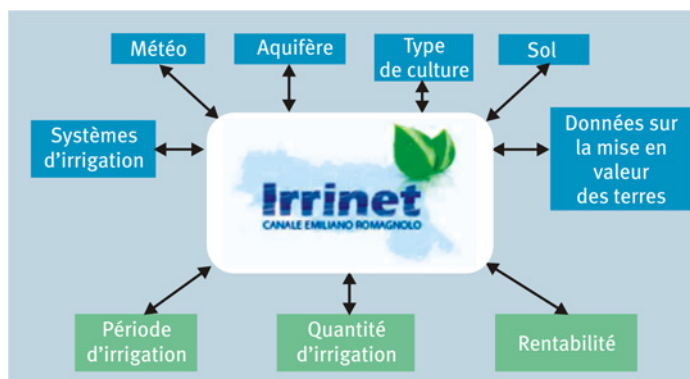
7 Entités d'irrigation ayant des projets d'investissement financés en Italie (SIGRIAN, 2019).

Économies d'eau potentielles réalisables grâce à ces investissements dans les différents districts hydrographiques.



District hydrographique	Économies d'eau potentielles réalisables grâce à des investissements/prélèvements pour l'agriculture (%)
Alpes orientales	1,75 %
Fleuve Po	0,22 %
Les Appenins du Nord	19,09 %
Les Appenins centraux	1,48 %
Les Appenins du Sud	5,47 %
Sardaigne - Sicile	6,42 %
Total pour l'Italie	0,66 %

8 Entrées et sorties du système IRRINET (source : Plateforme européenne d'adaptation au climat Climate-ADAPT, 2019b).



9 Région Emilia-Romagna en Italie (source: Wikipedia, 2020).



Italie. Amélioration des réseaux de distribution et installation de compteurs pour économiser l'eau⁴

Conformément à la politique européenne de développement rural 2014-2020, l'Italie combine un programme national de développement rural (PDR) et 21 PDR régionaux. Au niveau du PDR national, la sous-mesure 4.3 vise à économiser l'eau pour la protection de l'environnement et l'adaptation au changement climatique. Elle soutient les investissements d'irrigation collectifs et hors exploitation pour les consortiums de mise en valeur des terres (« *consorzi di bonifica* ») et les organismes publics responsables de la gestion de l'eau agricole. Au niveau des PDR régionaux, la sous-mesure 4.3 est accessible aux groupements d'exploitations agricoles; en outre, la sous-mesure 4.1 soutient les investissements dans les exploitations agricoles.

Après les procédures d'évaluation et de sélection, 35 projets ont été financés par le PDR national auprès de 19 agences d'irrigation, représentant environ 273 millions d'euros. Quatre-vingt-deux pour cent du financement ont concerné le Centre-Nord de l'Italie, en particulier le district du bassin du Pô et le district du bassin des Alpes orientales. Les principales actions financées sont liées aux investissements sur les réseaux de distribution existants et à l'installation de compteurs, et seulement de façon marginale sur les nouvelles réalisations. Elles pourraient permettre d'**économiser environ 139 millions de m³ d'eau, ce qui correspond à 0,66 % des prélèvements collectifs nationaux** (figure 7) (SIGRIAN, 2019). En 2020, grâce à des ressources financières supplémentaires, 15 autres projets ont été financés pour 14 agences d'irrigation (Fonds national de cohésion et de développement) et 16 projets pour 11 agences d'irrigation (fonds supplémentaires du PDR national), garantissant une augmentation des économies d'eau d'environ **168 millions de m³** (fonds supplémentaires du PDR national – environ 97 millions de m³; Fonds de cohésion et de développement – environ 71 millions de m³).

L'évaluation *ex ante* des économies d'eau potentielles s'est avérée limitée en raison, entre autres, de la grande variabilité des contextes d'irrigation et du manque d'homogénéité de la méthodologie utilisée pour cette évaluation. Cependant, au niveau des exploitations agricoles, certaines régions, notamment la Vénétie, proposent une méthodologie intéressante pour calculer les économies d'eau en tenant compte de l'amélioration d'efficacité des équipements. Dans tous les cas, une évaluation *ex post* de l'économie d'eau réellement réalisée sera possible car les bénéficiaires ont désormais l'obligation de disposer ou d'installer des compteurs, et de collecter et transmettre les volumes d'irrigation prélevés à SIGRIAN (<https://sigrian.crea.gov.it/>) dont les données sont accessibles à toutes les autorités compétentes.

Des outils de pilotage et automatisé

Italie. IRRINET - IRRIFRAME : un exemple de service de conseil en irrigation pour les économies d'eau⁵

Au cours des trente-cinq dernières années, les terres irriguées ont varié entre 2,5 et 2,9 Mha, faisant de l'Italie le deuxième pays de l'UE avec la plus grande surface irriguée après l'Espagne. Plus de 20 % de la surface agricole utilisée est irriguée. L'irrigation par aspersion couvre près de 40 % de la surface totale irriguée, la micro-irrigation représente environ 20 % et l'irrigation de surface 40 % (généralement pour le riz cultivé dans le Nord).

Le sixième recensement général de l'agriculture en Italie a estimé que les économies d'eau permises par les services de conseil en irrigation étaient d'environ 10 % (Institut national italien des statistiques, 2014). Parmi les services de conseil disponibles aujourd'hui, IRRIFRAME (anciennement IRRINET) est basé sur un modèle de bilan hydrique visant à gérer l'irrigation des cultures à l'échelle de la parcelle. La structure du modèle (figure 8) comprend le sol, avec son bilan hydrique; la plante, avec son développement; et l'atmosphère, avec son régime thermique, les précipitations et la demande évaporative.

4. Voir la présentation de Silvia BARALLA ici : <https://watersaving.sciencesconf.org/293315>

5. Voir la présentation de Graziano GHINASSI ici : <https://watersaving.sciencesconf.org/293716>

Le service web IRRINET a été développé avec un financement public par le CER (Canale Emiliano Romagnolo, un consortium de l'eau situé dans la région d'Emilie-Romagne) depuis 1999. L'Association nationale des consortiums de mise en valeur des terres (ANBI) a développé IRRIFRAME, un service informatique similaire sur le modèle d'IRRINET.

Le service IRRINET concerne actuellement plus de 12 000 exploitations, couvrant près de 22 % de la surface irriguée de la région Emilie-Romagne (figure 9). Au cours de la saison d'irrigation 2017, 28 500 SMS IRRINET ont été envoyés et 147 000 programmations d'irrigation ont été produites. **On estime que l'application IRRINET a permis en 2017 une économie d'eau annuelle d'environ 90 Mm³, ce qui correspond à 20 % de la demande agricole totale de la région d'Émilie-Romagne, sans diminuer les rendements** (Plateforme européenne d'adaptation au changement climatique Climate-ADAPT, 2019a).

Ile de la Réunion. Mise en place d'outils de télégestion pour économiser l'eau d'irrigation dans un contexte pédoclimatique particulier⁶

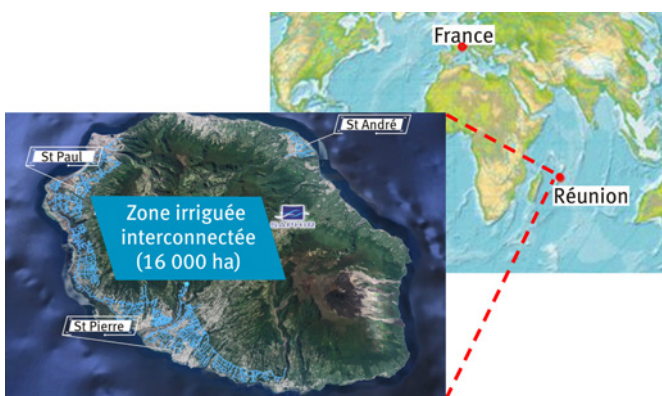
La Réunion est un département français d'outre-mer situé dans l'océan Indien. Principalement concentrée le long du littoral, la superficie totale cultivée est de 43 000 ha, soit moins de 20 % de la surface totale de l'île. Environ 16 000 ha sont irrigués (figure 10). La canne à sucre représente la principale activité économique industrielle et couvre 57 % de la surface cultivée. Sauf dans les montagnes, où la pluviométrie est suffisante, les champs de canne à sucre sont irrigués, soit par aspersion en couverture intégrale, soit en goutte à goutte enterré. Pour les légumes et les fruits, les principaux systèmes d'irrigation sont la goutte-à-goutte et la micro-aspersion.

Plusieurs obstacles entravent le développement d'une irrigation optimisée. Une ressource en eau suffisante, la sécurisation grâce à l'interconnexion des réseaux hydro-agricoles, ainsi que le faible prix de l'eau d'irrigation ne favorisent pas les économies d'eau. Le débit à l'entrée des parcelles contraint souvent à irriguer pendant la journée, avec une forte évapotranspiration. De plus, la grande variabilité des microclimats fait qu'il est difficile pour les irrigants de connaître exactement le besoin en eau de leurs cultures. De nombreux outils performants pour la programmation de l'irrigation sont aujourd'hui disponibles, mais très peu sont utilisés en raison du manque de formation ou de volonté des irrigants.

Face à ces défis, des solutions variées sont mises en œuvre pour favoriser les économies d'eau : amélioration et modernisation du matériel d'irrigation au niveau des parcelles, promotion de l'irrigation au goutte-à-goutte enterré dans les parcelles de canne à sucre appropriées, développement de l'automatisation, conseil individuel aux irrigants, formation aux méthodes et outils de pilotage de l'irrigation, subventions publiques telles que le FEADER. Ainsi, la SAPHIR (Société d'aménagement des périmètres hydro-agricoles de la Réunion) déploie des outils pour automatiser le contrôle à distance de l'irrigation. Fin 2019, une trentaine de contrôleurs ont été installés (figure 11). Ils permettent de réaliser des progrès significatifs dans le suivi et la collecte des volumes d'irrigation appliqués, de fournir un service de conseil direct à l'irrigation, de réagir immédiatement en cas de dysfonctionnement. Cependant, la mise en œuvre de ces solutions peut s'avérer difficile dans les très grandes parcelles ou dans les parcelles sans alimentation électrique. Jusqu'à présent, ces dispositifs ne tiennent pas compte des données météorologiques.

6. Voir la présentation de Stephane GUILLOT ici : <https://watersaving.sciencesconf.org/294525>

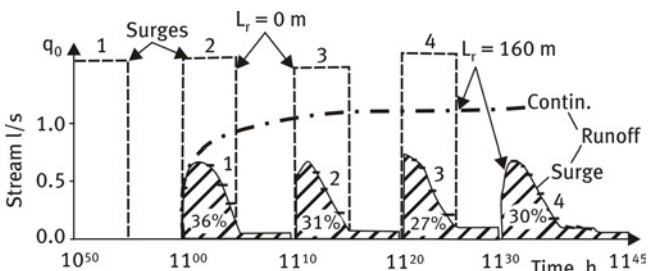
10 Superficie irriguée à La Réunion (source : SAPHIR).



11 Contrôleur d'irrigation pour automatiser l'irrigation à distance (photo : SAPHIR).



12 Irrigation par vagues : lames d'eau délivrées en tête de raie et ruissellement en fin de raie. Le ruissellement sous irrigation continue traditionnelle est représenté par la ligne pointillée (Varlev et al., 1998).



Des pratiques d'irrigation innovantes

Bulgarie. L'irrigation par vagues intermittentes au lieu de l'irrigation traditionnelle à la raie pour des économies d'eau consistantes⁷

L'irrigation a été l'une des politiques clés pour augmenter la productivité agricole sous le régime soviétique. Compte tenu de l'augmentation de productivité liée à l'irrigation dans les régions continentales à étés chauds et secs, l'extension des zones irriguées constituait un objectif important (Dwyer *et al.*, 2000). En Bulgarie, l'irrigation permet une augmentation de la productivité des cultures de 1,6 à 2,1 fois le rendement des cultures pluviales (Popova, 2012). En outre, l'irrigation atténue la variabilité des rendements au cours des différentes années climatiques, ce qui est une condition préalable à un développement économique stable et sans risque (Popova *et al.*, 2014). Le pourcentage de terres irriguées est passé de 14 % de la surface agricole en 1960 à 27 % en 1989 (Dwyer *et al.*, 2000). En 1990, 700 000 ha étaient irrigués (Varlev, 2012). Au début des années 1990 a débuté la période de transition d'une économie planifiée centrale à une économie de marché, accompagnée de graves difficultés économiques. L'agriculture irriguée a été confrontée à une crise profonde avec une diminution de la production agricole, une détérioration des infrastructures d'irrigation et de drainage dans les exploitations, ainsi qu'un effondrement des marchés (Zhovtonog *et al.*, 2005). Au cours des trente dernières années, 800 stations de pompage ont été démolies, tandis que 80 sont restées pour l'irrigation. Actuellement, seulement 30 000 ha sont encore irrigués (Varlev, 2012). La relation traditionnelle entre la science et la pratique a été perdue, ainsi qu'une partie considérable des connaissances acquises sur l'irrigation et de l'expérience.

En raison de la grande capacité de rétention en eau des sols et des pentes de terrain appropriées (de 0,3 à 3 %), l'irrigation à la raie est particulièrement bien adaptée aux conditions bulgares. L'irrigation à la raie a fait l'objet d'études scientifiques détaillées au cours de la période 1970-2000 (Popova et Kuncheva, 1996 ; Varlev *et al.*, 1998). L'uniformité de la distribution de l'eau et l'efficacité de l'application, l'érosion du sol et le lessivage de l'azote vers les eaux souterraines ont été étudiés dans plusieurs régions. En conséquence, des technologies originales améliorées, économes en eau et respectueuses de l'environnement ont été développées et mises en pratique pour l'irrigation à la raie et la fertilisation, comme : l'irrigation « par vagues », l'irrigation « à la raie alternée » avec fertilisation dans des « sillons secs » et autres (Varlev *et al.*, 1998 ; figure 12 ; Varlev, 2011 ; Popova, 2016).

Lors de l'irrigation traditionnelle (continue) à la raie, des pertes d'eau importantes ont lieu par ruissellement et drainage profond (Varlev, 2011). Une alternative à l'irrigation à la raie traditionnelle est l'irrigation par vagues, définie comme des cycles marche/arrêt de la lame d'eau en tête de raie. L'avancement de la lame comporte deux étapes. Au cours de la première étape (phase d'avancement de la lame), l'irrigation par vagues, par rapport à l'irrigation traditionnelle à la raie, permet d'économiser 20 à 30 % de l'eau fournie grâce à une meilleure uniformité d'avance-

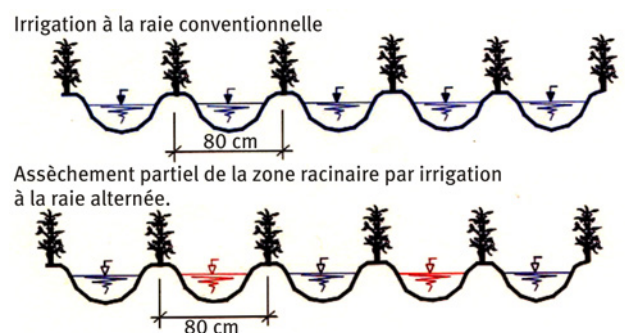
ment de la lame. Au cours de la deuxième étape (phase de post-avancement), l'irrigation par vagues réduit les pertes par ruissellement et permet d'économiser 10 à 15 % d'eau. En combinant les deux phases, les économies d'eau réalisées grâce à l'irrigation par vagues s'élèvent à 30 à 45 % par rapport à l'irrigation à la raie en continu (Varlev *et al.*, 1998 ; Varlev *et al.*, 2011).

Turquie. L'assèchement partiel de la zone racinaire (Partial Root Drying, PRD) : une technique d'irrigation durable pour une utilisation efficiente de l'eau et pour des économies d'eau sans baisse de rendement⁸

En Turquie, 65 % de la surface agricole totale est irriguée par irrigation de surface, 19 % par aspersion (cultures de plein champ telles la betterave, la pomme de terre et l'arachide) et 16 % par goutte-à-goutte (vergers, vignobles, légumes et serres). Un effort concerté est fait par l'État pour équiper les nouvelles installations d'irrigation de technologies modernes telles les canalisations fermées pour le transport de l'eau au lieu des canaux ouverts, et les méthodes de micro-irrigation économes en eau plutôt que l'irrigation de surface (irrigation à la raie ou par submersion).

Le projet IRRISPLIT, financé par la Commission européenne (ICA3-CT-1999-00008), visait à évaluer les effets du PRD (assèchement partiel de la zone racinaire) sur la croissance végétative et la production de cultures fruitières dans la région méditerranéenne. La pratique du PRD consiste à mouiller une moitié de la zone d'enracinement et à laisser l'autre moitié sèche, ce qui permet d'utiliser une quantité réduite d'eau d'irrigation. Les côtés mouillés et secs sont intervertis lors des irrigations successives (figure 13). Le PRD peut être réalisé avec une irrigation alternée à la raie ou au goutte-à-goutte. Elle est adoptée et pratiquée par certains agriculteurs de la région égéenne en Turquie, en particulier dans les champs de maïs et de coton irrigués à partir de ressources en eau souterraine et/ou dans les zones où l'eau est rare. Le PRD (par raie alternative) double presque l'efficacité de l'utilisation de l'eau sans réduction significative du rendement du coton (Kirda *et al.*, 2007a).

13 Principe de la pratique de l'assèchement partiel de la zone racinaire (Partial Root Drying, PRD) par irrigation à la raie alternée. Une moitié de la zone racinaire est mouillée et l'autre moitié est laissée sèche. Les côtés mouillés et secs sont intervertis lors des irrigations successives (illustré par Topcu).



7. Voir la présentation de Zornitsa POPOVA ici : <https://watersaving.sciencesconf.org/291861>

8. Voir la présentation de Sevilya TOPÇU ici : <https://watersaving.sciencesconf.org/297729>

► Topcu *et al.* (2007) ont montré que **la pratique du PRD peut économiser jusqu'à 50 % de l'eau d'irrigation sans réduction significative du rendement des tomates cultivées en serre** sous irrigation au goutte à goutte. La teneur plus élevée en ABA (acide abscissique) dans les tissus foliaires en PRD indique que l'ABA est un moyen important de signalisation chimique qui régule le contrôle des stomates et permet aux plantes d'utiliser une eau peu abondante.

Pour la mandarine, la réduction du rendement en fruits avec le PRD n'a été que marginale et non significative par rapport à l'irrigation traditionnelle sur deux saisons (Kirda *et al.*, 2007b). Cependant, l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (IWUE, en $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) a été multipliée par près de trois. Les résultats suggèrent que des économies d'eau d'irrigation pouvant atteindre 70 %, par rapport à la pratique traditionnelle, sont réalisables pour les fruits grâce à la pratique du PRD.

Plantation d'orangers irriguées par un système goutte à goutte à Antalya (Turquie).



© batuhan toker - Adobe Stock

Ces exemples divers et variés montrent que de nombreuses tentatives sont réalisées pour économiser l'eau, aussi bien dans les pays ayant une longue histoire d'irrigation que dans les pays où un besoin d'irrigation est apparu récemment. À l'échelle de l'Union européenne, les économies d'eau sont possibles grâce à l'amélioration de l'efficacité globale de l'irrigation, en combinant des technologies (infrastructures, systèmes d'application, outils de pilotage) et des pratiques plus performantes. ■

Les auteurs

Claire SERRA-WITTLING

G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, 361 Rue Jean-François Breton, BP 5095, F-34196 Montpellier Cedex 5, France.

✉ claire.serra-wittling@inrae.fr

Silvia BARALLA

Conseil pour la recherche et l'économie agricoles (CREA), Centre de recherche pour les politiques agricoles et la bioéconomie, Via Po, 14 00198 Rome, Italie.

✉ silvia.baralla@crea.gov.it

Inmaculada BRAVO DOMINGUEZ

Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation de l'Espagne, Direction générale du développement rural, de l'innovation et de la formation agroalimentaire, Unité irrigation et infrastructures rurales, Gran Vía de San Francisco, 4-6, 3ª planta, 28005 Madrid, Espagne.

✉ ibravo@mapa.es

Katrin DRASTIG

Institut Leibniz pour l'ingénierie agricole et la bioéconomie (ATB), équipe de recherche « AgroHyd », département 2, « Évaluation des technologies et cycles de vie », Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, Allemagne.

✉ kdrastig@atb-potsdam.de

Graziano GHINASSI

Département des sciences et technologies agricoles, environnementales, alimentaires et forestières (DAGRI), Université de Florence,

Via San Bonaventura 13, 50145 Firenze, Italie.

✉ graziano.ghinassi@unifi.it

Stéphane GUILLOT

SAPHIR (Société d'Aménagement des Périmètres Hydroagricoles de l'île de la Réunion), 4 route ligne Paradis, 97454 Saint-Pierre, La Réunion, France.

✉ s.guillot@saphir.re

Attila NAGY and Viktor NAGY

Ministère de l'Agriculture, Kossuth Tér 11, 1055 Budapest, Hongrie.

✉ attila.nagy2@me.gov.hu

✉ viktor.nagy@am.gov.hu

Zornitsa POPOVA

Institut N. Poushkarov de science du sol, agrotechnologie et protection des plantes, Département de physique, érosion et biote du sol, 7, Shosse Bankya Str, Sofia 1331, Bulgarie.

✉ zornitsa_popova@abv.bg

Sevilay TOPÇU

(Professeur émérite) Université de Çukurova, Faculté d'agriculture, Département des structures agricoles et de l'irrigation, 01330 Saricam-Adana, Turquie.

✉ stopcu@cu.edu.tr

EN SAVOIR PLUS...

- BARONI, G., DRASTIG, K., LICHTENFELD, A.-U., JOST, L., CLAAS, P., 2019, Assessment of Irrigation Scheduling Systems in Germany: Survey of the Users and Comparative Study, *Irrigation and drainage*, vol. 68, p. 520-530, <https://doi.org/10.1002/ird.2337>
- DRASTIG, K., PROCHNOW, A., LIBRA, J., KOCH, H., ROLINSKI, S., 2016a, Irrigation water demand of selected agricultural crops in Germany between 1902 and 2010, *Science of the Total Environment*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.206>
- DRASTIG, K., LIBRA, J., KRAATZ, S., KOCH, H., 2016b, Relationship between irrigation water demand and yield of selected crops in Germany between 1902 and 2010: a modeling study, *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, 1427.
- DWYER, J., 2000, *The environmental impacts of irrigation in the European Union*, A report of the Environment Directorate of the European Commission, 147 p.
- EUROPEAN CLIMATE ADAPTATION PLATFORM CLIMATE-ADAPT, 2019a, *IRRINET: IT irrigation system for agricultural water management in Emilia-Romagna, Italy*, <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/case-studies/irrinet-it-irrigation-system-for-agricultural-water-management-in-emilia-romagna-italy>
- EUROPEAN CLIMATE ADAPTATION PLATFORM CLIMATE-ADAPT, 2019b, *Input and output of the IRRINET system*, https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/case-studies/irrinet-it-irrigation-system-for-agricultural-water-management-in-emilia-romagna-italy/irrinet_figure-3.png/view
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2009, *Water resources across Europe — Confronting water scarcity and drought*, EEA Report, EEA, Copenhagen, Denmark, p. 55.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2016, *Crop water demand*, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/water-requirement-2/assessment>
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019, *The development of water abstraction since the 1990s*, https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/water-abstractions-for-irrigation-manufacturing-3#tab-chart_1
- FADER, M., SHI, S., VON BLOH, W., BONDEAU, A., CRAMER, W., 2016, Mediterranean irrigation under climate change: more efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 20, p. 953-973.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015, *FAO Statistical Pocket Book, World, food and agriculture*, Rome.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016, AQUASTAT website, http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/profile_segments/EuropeEastern-IrrDr_eng.stm
- FAOSTAT, 2019, <http://www.fao.org/nr/aquastat/>
- GLEICK, P.H., 2014, *The World's Water. The Biennial Report on Freshwater Resources*, vol. 8, Island Press Washington, DC.
- KIRDA, C., TOPCU, S., CETIN, M., DASGAN, H.Y., KAMAN, H., TOPALOGLU, F., DERICI, M.R., EKICI, B., 2007a, Prospects of partial root zone irrigation for increasing irrigation water use efficiency of major crops in the Mediterranean region, *Ann Appl Biol*, vol. 150, p. 281-291.
- KIRDA, C., TOPALOGLU, F., TOPCU, S., KAMAN, H., 2007b, Mandarin yield response to partial root drying and conventional deficit irrigation, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 31, p. 1-10.
- POPOVA Z., KUNCHEVA R., 1996, Modeling in Water Losses Evaluation for Nonhomogeneous Furrow Set. American Society of Civil Engineering (ASCE), *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 22 (1), p. 1-6.
- POPOVA, Z., 2012, Drought vulnerability and irrigation demand assessed through model simulations, in: POPOVA, Z. (ed.), *"Risk Assessment of Drought in Agriculture and Irrigation Management through Simulation models"*, Part III. Vulnerability of agriculture to drought, p. 120-140, published by N.Pushkarov ISSAPP (in Bg with extended Résumé and figures' titles in En), 242 p.
- POPOVA, Z., IVANOVA, M., MARTINS, D., PEREIRA, L.S., DONEVA, K., ALEXANDROV, V., KERCHEVA, M., 2014, Vulnerability of Bulgarian agriculture to drought and climate variability with focus on rainfed maize systems, *Natural Hazards*, vol. 74 (2), p. 865-886, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-014-1215-33>
- POPOVA, Z., 2016, Risk assessment of non-uniformity in irrigation and fertilization under climate uncertainties in the Sofia Field, *Bulgarian Journal of Soil Science BJSS*, Year 1: Issue 2, p. 170-186, <http://www.bsss.bg/Journal.html>
- SERRA-WITTLING, C., MOLLE, B., CHEVIRON, B., 2019, Plot level assessment of irrigation water savings due to the shift from sprinkler to localized irrigation systems or to the use of soil hydric status probes. Application in the French context, *Agricultural Water Management*, vol. 223, 105682, <https://hal.inrae.fr/hal-02609656/document>
- SIGRIAN, 2019, *Beneficiaries NRDP- Sub measure 4.3*, <https://sigrian.crea.gov.it/index.php/en/home-3/>
- TOPCU, S., KIRDA, C., DASGAN, Y., KAMAN, H., CETIN, M., YAZICI, A., BACON, M.A., 2007, Yield response and N-fertiliser recovery of tomato grown under deficit irrigation, *Europ. J. Argonomy*, vol. 26, p. 64-70.
- VARLEV, I., POPOVA, Z., GOSPODINOV, I., 1998, Furrow surge irrigations as a water saving technique, in: PEREIRA, L.S., GOWING, J., eds, *"Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage"*, E & FN Spon, New York, <https://bit.ly/3iA8H0l>
- VARLEV, I., 2011, *Surge and Traditional furrow irrigation. A Practical Guide*, SSA, 44 p.
- VARLEV, I., 2012, State of irrigation in Bulgaria in 2011 and measures to overcome the crises, in: POPOVA, Z. (ed.), *"Risk Assessment of Drought in Agriculture and Irrigation Management through Simulation models"*, Part II Development of Irrigation Scheduling System for precise Irrigation, p. 40-50.
- ZHOVTONOG, O., DIRKSEN, W., ROEST, K., 2005, Comparative assessment of irrigation sector reforms in Central and Eastern European countries of transition, *Irrigation and Drainage*, vol. 54, p. 487-500.

Point de vue

L'Europe et la Politique agricole commune dans la recherche des économies en eau : le point de vue de la Commission européenne

Dans un contexte de changements globaux qui affectent les ressources des territoires et en premier lieu les ressources en eau (changement climatique, mais aussi augmentation de la population et de la demande en produits agricoles), la gestion de l'eau pour l'irrigation est devenue une préoccupation majeure de l'Union européenne. Dans cet entretien, Philippe Lammens, gestionnaire de programmes de développement rural à la Direction générale Agriculture de la Commission européenne fait le point des dispositifs mis en œuvre dans le cadre de la Politique agricole commune, actuelle et future, pour une utilisation plus durable de l'eau en agriculture.

Quel est selon vous le rôle de l'agriculture dans la pénurie (potentielle) en eau ?

Le rôle de l'agriculture dans la pénurie en eau est une question complexe et doit être vu dans le contexte du développement durable.

L'agriculture est un secteur à forte consommation d'eau, elle est responsable d'environ 25 % des prélèvements totaux dans l'Union européenne (UE). Mais, l'ampleur de la pénurie potentielle est fortement liée au changement climatique : selon une étude du Centre commun de recherche de la Commission, il est clairement apparu que le nombre de personnes touchées par une pénurie en eau augmentera significativement si on ne respecte pas l'Accord de Paris.

L'enjeu des économies d'eau en agriculture devient de plus en plus pressant. Il faut donc faire davantage pour réduire la pression exercée sur les ressources en eau. Nous pouvons heureusement déjà constater des tendances positives : depuis les années 1990¹, les prélèvements pour l'irrigation ont diminué de 22 % dans l'UE, mais les tendances varient entre pays.

L'irrigation est-elle le seul outil auquel l'agriculteur peut recourir pour assurer les besoins d'eau de ses cultures ?

Depuis la sécheresse des dernières années, nous sommes davantage conscients que l'irrigation joue un rôle fondamental pour assurer la production alimentaire. Nous devons toutefois aussi nous concentrer sur d'autres aspects, comme les espèces de cultures les

mieux adaptées aux conditions locales, les bonnes pratiques agricoles qui favorisent une bonne structure du sol, améliorant ainsi la rétention et l'infiltration de l'eau, le stockage de l'eau et une meilleure gestion de l'eau. Dans l'ensemble, l'efficacité de l'utilisation de l'eau doit augmenter.

Que fait la Commission européenne vis-à-vis de la question de l'eau pour l'agriculture ?

Vu la situation préoccupante, les commissaires européens, compétents pour l'environnement et l'agriculture, ont créé une *task-force* sur cette thématique au sein de la Commission. Elle étudie des moyens pour améliorer l'état qualitatif et quantitatif de l'eau, de manière intersectorielle. Une action phare de cette *task-force* est la création début 2019 d'un « *Knowledge hub* »² sous forme d'un site web sur l'eau et l'agriculture, où les connaissances disponibles sont partagées entre les parties prenantes de l'UE. Ce site web facilite l'accès aux données, aux analyses, aux outils d'évaluation, ainsi qu'aux exemples de bonnes pratiques et de solutions éprouvées pour la gestion durable de l'eau en agriculture.

Comme vous le savez, la Commission a un rôle primordial dans la proposition d'actes législatifs européens. Après les directives bien connues, comme la directive nitrates et la directive cadre sur l'eau, la Commission a récemment publié une proposition de règlement sur la réutilisation de l'eau pour l'irrigation. La réutilisation de l'eau devient un outil de plus en plus intéressant et nécessaire pour surmonter les défis environnementaux.

1. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/use-of-freshwater-resources-2/assessment-1>

2. <https://water.jrc.ec.europa.eu/>

Comme il est bien connu dans le monde de la recherche, la Commission soutient bon nombre de programmes de recherche et d'innovation, notamment concernant l'eau dans l'agriculture. De plus, pour la période post-2020, la Commission propose d'augmenter significativement le soutien à la recherche agricole.

Enfin, dans le cadre de la Politique agricole commune (PAC), les propositions de la Commission visent depuis des années à aider les agriculteurs à maximiser, à la fois, leur production économique et leur performance environnementale. Le financement insuffisant est l'un des obstacles les plus courants pour faire les investissements souhaitables pour économiser de l'eau.

Dans la nouvelle Commission, le vice-président, Monsieur Timmermans, a notamment comme objectif de développer le « *Green Deal* » et la stratégie « *From farm to fork* », cela en vue d'une alimentation durable qui prend en compte les trois piliers de la durabilité : les piliers économique, social et environnemental. Les propositions sur la future PAC vont dans cette direction.

Quels sont les instruments et les priorités bénéfiques pour l'économie en eau au sein de la Politique agricole commune (PAC) actuelle ?

Au sein de la PAC actuelle, plusieurs instruments sont disponibles pour aider les agriculteurs à maximiser, à la fois, la production économique et la performance environnementale de leurs exploitations.

Premièrement, les paiements directs soutiennent les revenus des agriculteurs et les aident donc à investir tout en garantissant le respect d'un certain nombre de normes concernant notamment la sécurité alimentaire, la protection de l'environnement et le maintien des terres dans de bonnes conditions environnementales et agricoles. Parmi ces normes figurent celles spécifiques à la gestion de l'eau.

Au titre du 2^e pilier de la PAC, le Fonds européen agricole pour le développement rural (Feader) est une source de financement majeure et plus ciblée pour les investissements, par exemple dans les secteurs de l'eau et de l'agriculture. Pour la période 2014-2020, l'aide totale du Feader s'élève à un peu plus de cent milliards d'euros, répartis entre cent-dix-huit programmes de développement rural, couvrant les vingt-huit États membres (EM) de l'UE. Au moins 30 % du financement de chaque programme doit être consacré à des mesures pertinentes pour l'environnement et le changement climatique et quatre milliards d'euros d'investissements (publics et privés) sont programmés dans des systèmes d'irrigation plus efficaces.

La politique de développement rural durant cette période 2014-2020 se caractérise par six grandes priorités, et chaque priorité consiste en plusieurs « sous-priorités » ou domaines prioritaires. Les grandes priorités (P) et les domaines prioritaires (DP) qui ont des liens étroits avec la thématique « eau et agriculture » sont les suivantes.

- La P4 « restaurer, préserver et améliorer les écosystèmes », au sein de laquelle nous avons le DP 4B « améliorer la gestion de l'eau, y compris la gestion des engrais et des pesticides ».

Il s'agit surtout de mesures en faveur de la qualité de l'eau, par exemple de mesures afin de limiter le lessivage des intrants, des fertilisants et des produits phytopharmaceutiques.

Dans l'ensemble des cent-huit programmes de développement rural (PDR) qui ont programmé ce DP 4B, l'objectif est que 26,5 millions d'hectares de terres agricoles (ce qui représente 15,1 % du total des terres agricoles) et 1,4 million d'hectares de terres forestières (ou 4,2 % des terres forestières) soient sous contrats de gestion pour améliorer la gestion de l'eau.

- La P5 « promouvoir l'utilisation rationnelle des ressources et soutenir la transition vers une économie à faibles émissions de carbone et résiliente au changement climatique » au sein de laquelle nous avons le DP 5A « accroître l'efficacité d'utilisation de l'eau dans l'agriculture ».

Ce DP 5A est programmé dans cinquante-quatre des cent-dix-huit PDR, ce qui représente 2,1 % des dépenses publiques totales.

Dans l'ensemble de ces cinquante-quatre PDR, l'objectif est notamment de passer à un système d'irrigation plus efficace pour 13 % des terres irriguées, grâce à quatre milliards d'euros d'investissements (publics et privés).

- Les mesures de la Priorité transversale P1 « favoriser le transfert de connaissances et l'innovation » contribuent aussi à l'atteinte des objectifs des autres Priorités et DP, donc aussi au DP 5A « Efficacité de l'eau ».

- Enfin, la P2 « améliorer la viabilité et la compétitivité et promouvoir les technologies agricoles innovantes » doit être mentionnée, puisque certains investissements, par exemple ceux qui contribuent à une meilleure gestion de l'eau, contribuent également à une meilleure compétitivité. Ainsi, des investissements dans un système d'irrigation plus efficace, peuvent être attribués soit à la P2 soit au DP 5A.

Plus concrètement, par quel type de mesures, ces priorités et domaines prioritaires se traduisent-ils au sein des programmes de développement rural ?

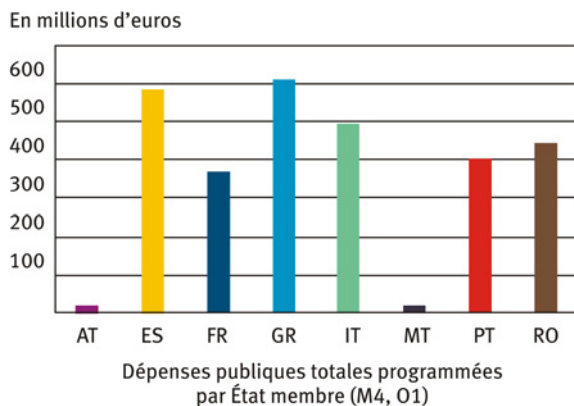
Si on se concentre sur le DP 5A « accroître l'efficacité d'utilisation de l'eau dans l'agriculture », la mesure 4 (M4) « investissements physiques » est budgétairement de loin la mesure la plus importante ! Des 3,2 milliards d'euros programmés au total en faveur du DP 5A, un peu plus de trois milliards sont programmés au sein de la M4. La mesure M4 « investissements physiques » peut notamment :

- soutenir la modernisation des systèmes d'irrigation existants, aussi bien au niveau de la parcelle qu'au niveau de l'infrastructure par laquelle l'eau arrive jusqu'à la parcelle, afin de réduire la consommation d'eau, tout en améliorant la viabilité économique des exploitations agricoles ;

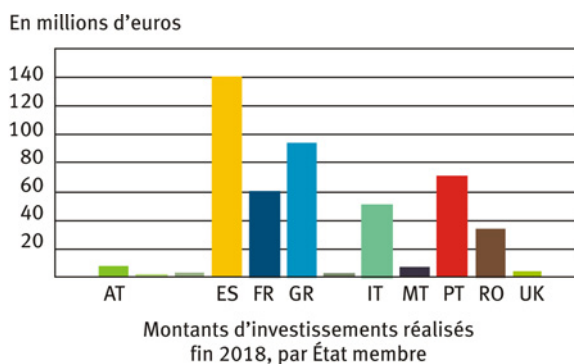
- établir ou améliorer le stockage durable de l'eau.

Des aides aux investissements en vue d'une utilisation efficace de l'eau dans l'agriculture (au sein du DP 5A) sont programmées dans douze états membres (EM).

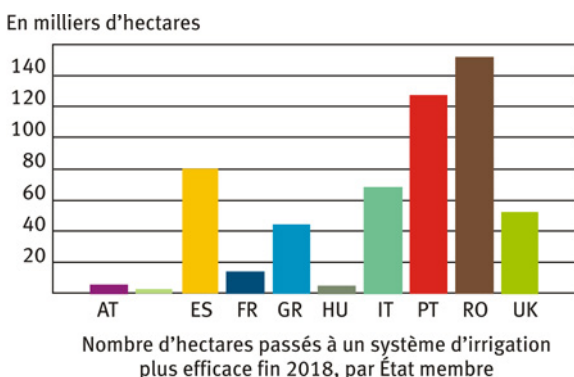
- ❶ Aides programmées aux investissements pour une utilisation efficace de l'eau (DP 5A). AT : Autriche, ES : Espagne, FR : France, GR : Grèce, IT : Italie, MT : Malte, PT : Portugal, RO : Roumanie (source : UE).



- ❷ M4 : Montants des investissements soutenus en faveur d'une utilisation efficace de l'eau (DP 5A). AT : Autriche, ES : Espagne, FR : France, GR : Grèce, IT : Italie, MT : Malte, PT : Portugal, RO : Roumanie, UK : Royaume-Uni (source : UE).



- ❸ M4 : Nombre d'hectares passant à un système d'irrigation plus efficace (DP 5A). AT : Autriche, ES : Espagne, FR : France, Gr : Grèce, HU : Hongrie, IT : Italie, PT : Portugal, RO : Roumanie, UK : Royaume-Uni (source : UE).



La figure ❶ montre l'importance des aides publiques programmées dans les EM qui programment le plus d'aides à cette fin, au sein du DP 5A. Ce sont clairement les EM du Sud de même que la Roumanie qui ont programmé le plus d'aides pour augmenter l'efficacité de l'eau.

Il s'agit ici des montants minimaux en faveur des investissements bénéfiques pour réaliser des économies d'eau puisqu'il est certain que certaines autorités de gestion ont attribué ces aides pour ce type d'investissements à la P2 (amélioration de la compétitivité). Les montants de ces aides ne sont pas repris dans la figure ❶ qui ne reprend que les investissements en faveur du DP 5A.

La figure ❷ illustre les montants des investissements soutenus, par EM, déjà fin 2018, en faveur d'une utilisation efficace de l'eau, au titre du DP 5A.

Les mêmes EM du Sud reviennent évidemment, mais pas nécessairement dans le même ordre, du fait d'un taux d'aide différent. Pour les pays où les montants d'investissements soutenus étaient les plus élevés, fin 2018, les montants d'investissements variaient entre 34 millions d'euros pour la Roumanie et 142,5 millions d'euros pour l'Espagne.

Une bonne partie de ces investissements se concrétisent par des hectares irrigués qui passent à un système d'irrigation plus efficace comme le montre la figure ❸.

Fin 2018 par exemple, c'était déjà le cas pour presque cent-cinquante mille hectares en Roumanie, plus de cent-vingt-six mille hectares au Portugal, plus de quatre-vingt mille hectares en Espagne et presque soixante-huit mille hectares en Italie.

Pour rappel, l'objectif du DP 5A est que 13 % des terres irriguées passent à un système d'irrigation plus efficace : fin 2018, 40 % de cet objectif a déjà été atteint.

À côté des investissements physiques, y a-t-il d'autres types de mesures de développement rural qui favorisent des économies d'eau ?

Plusieurs autres mesures de développement rural contribuent en effet également à une utilisation plus durable de l'eau en agriculture. Parmi celles-ci, les plus pertinentes sont de façon directe les mesures agro-environnementales et climatiques (M10), de façon secondaire le soutien à l'agriculture biologique (M11) et de façon transversale les mesures M1 (Actions de transfert de connaissances et d'information), M2 (Services de conseil) et M16 (Coopération).

Les mesures agro-environnementales et climatiques (M10) peuvent aussi aider les agriculteurs à adopter des pratiques agricoles intelligentes et durables, réduisant ainsi le besoin de ressources, y compris l'eau.

Par exemple, des mesures agro-environnementales peuvent être mises en œuvre à l'aide de nouvelles technologies :

- des robots mesurant la consommation d'eau des cultures, des capteurs 3D pour mesurer la croissance des plantes ou des drones pour surveiller le stress hydrique. L'efficacité de l'utilisation de l'eau peut ainsi être améliorée ;
- une agriculture de précision peut également permettre de détecter les carences en éléments nutritifs et les maladies des cultures, en permettant ainsi

aussi une utilisation plus efficace de l'eau disponible, à côté d'une minimalisation de fuites d'intrants dans l'environnement.

Le soutien à l'agriculture biologique (M11) contribue également, de façon secondaire, à une meilleure gestion de l'eau, notamment en vue d'une meilleure rétention de l'eau dans le sol (grâce à un taux supérieur en matière organique).

Les mesures transversales 1 et 2 peuvent aussi contribuer à une meilleure gestion quantitative de l'eau :

- la M1, par des aides aux actions de transfert de connaissances et d'information à ce propos. Par exemple, en Grèce, les aides publiques élevées aux investissements vont de pair avec des aides pour ces actions de formation et d'information (fin 2018, déjà pour presque 4 millions d'euros) ;
- la M2, par la fourniture de services de conseil aux agriculteurs en matière de gestion de l'eau. Par exemple, en Italie et dans une certaine mesure aussi en Bulgarie, en Estonie et en Espagne, les aides aux investissements vont (plutôt) de pair avec des aides aux services de conseil concernant l'utilisation efficace de l'eau.

Il faut souligner qu'investir dans des actions, telles que la formation, les actions d'information ou de démonstrations et les services de conseil, est également efficace pour améliorer l'état de l'eau. En effet, ces activités de facilitation nous semblent même essentielles pour accompagner les agriculteurs vers une production plus efficace et une utilisation rationnelle de l'eau.

Enfin, la M16 (Coopération) aide les projets de coopération. Elle vise, entre autres, à développer de nouvelles pratiques, procédés et technologies permettant de réduire la consommation d'eau, par exemple au sein des Groupes opérationnels (GO) du PEI (Partenariat européen pour l'innovation). Au sein d'un GO, différents acteurs (agriculteurs, chercheurs, conseillers, petites et moyennes entreprises...) se réunissent pour résoudre un problème concret, ce qui peut mener à un projet innovant, dont les résultats sont diffusés ultérieurement.

Depuis le début de la période de programmation actuelle, au sein de l'UE, au moins vingt-cinq GO ont été créés qui se penchent plus particulièrement sur la thématique de l'irrigation et d'économie d'eau. Et, un « focus group » sur l'eau s'est créé, c'est-à-dire un groupe d'experts européens, également multi-acteurs, qui discutent des besoins de recherche et d'innovation sur des thèmes très concrets relatifs à l'eau en agriculture.

Les mesures relevant du développement rural sont une des principales sources de financement pour la mise en œuvre des programmes de mesures au titre de la directive cadre sur l'eau (DCE). En effet, il existe d'importantes synergies entre les mesures de la PAC et les mesures identifiées dans les plans de gestion de district hydrographique afin d'éviter notamment la pénurie d'eau et de contribuer à la réalisation des objectifs de la DCE.

La PAC est aujourd'hui une des principales sources de financement des investissements dans le domaine de l'eau et de l'agriculture. Mais, à côté du financement des mesures dans le cadre de la PAC, beaucoup de mesures sont aussi financées par des fonds en dehors des programmes européens, notamment par des budgets nationaux, régionaux ou des fonds privés.

La PAC future se prépare.

Dans le futur, pourra-t-on poursuivre les efforts en faveur d'une meilleure gestion de l'eau ?

Nous avons déjà communiqué largement que la future PAC poursuivra une ambition environnementale et climatique accrue. En ce qui concerne l'eau, la proposition de la Commission sur la PAC post-2020 comporte plusieurs points pertinents. Par exemple, pour la première fois, des éléments pertinents de la DCE feront partie de la conditionnalité, c'est-à-dire des normes à respecter pour avoir droit aux paiements directs (du 1^{er} pilier).

Connaissances, innovation et numérisation

Aussi dans la future PAC, le partage des connaissances, l'innovation et la numérisation dans les domaines de l'agriculture et de l'eau constitueront un objectif transversal.

Pour cela, la recherche, les services de conseil agricole et les systèmes de connaissance et d'innovation agricoles (AKIS) joueront un rôle crucial.

Nouveau modèle de mise en œuvre

Conformément aux objectifs fixés au niveau de l'UE, les EM devront identifier et déterminer leurs propres besoins d'intervention et sélectionner, justifier et élaborer des mesures à partir de l'ensemble donné d'instruments.

Par conséquent, si par exemple la rareté de l'eau ou le captage excessif d'eau et/ou la pollution de l'eau par l'agriculture ont été identifiés comme des sujets de préoccupation, les EM et/ou Régions devront agir en conséquence lors de la conception de leurs interventions futures.

Le nouveau modèle de mise en œuvre de la PAC proposé confère donc davantage de subsidiarité aux EM pour la conception de leurs interventions, mais cela comporte aussi une responsabilité accrue pour la réalisation d'objectifs spécifiques. Ce sera donc l'occasion de concevoir des interventions plus ciblées sur les situations et besoins locaux. En d'autres termes, suivant la proposition de la Commission, l'utilisation des aides du Feader pour les projets d'approvisionnement en eau et d'irrigation pourrait être plus simple et plus flexible, tout en garantissant le respect des exigences de durabilité.

Références à la gestion de l'eau dans les propositions « post 2020 »

Dans les propositions post 2020 de la Commission européenne, il y a plusieurs références à la gestion de l'eau, notamment pour les secteurs fruits et légumes, viti-vinicole et le secteur de l'olive.

Dans les propositions relatives aux plans stratégiques, on retrouve, entre autres :

- parmi les objectifs, « mettre au point, mettre en œuvre et promouvoir des méthodes de production respectueuses de l'environnement (...) et notamment la protection de l'eau (...) et également contribuer à l'atténuation du changement climatique et à l'adaptation à celui-ci » ;
- parmi les types d'intervention, les EM peuvent choisir un ou plusieurs des types d'interventions suivants : « les investissements dans des actifs corporels et incorporels, axés en particulier sur les économies d'eau... », « la recherche et la production expérimentale, axées en particulier sur les économies d'eau... », les actions visant

Philippe Lammens, gestionnaire de programmes de développement rural à la Direction générale Agriculture et Développement rural de la Commission européenne présente les dispositifs de la Politique agricole commune pour une utilisation plus durable de l'eau en agriculture (colloque Économies d'eau en irrigation, Montpellier, novembre 2019).



à améliorer l'utilisation et la gestion de l'eau, y compris les économies d'eau et le drainage...

Beaucoup d'importance a donc été donnée à la gestion de l'eau et plus particulièrement aux économies d'eau dans les nouvelles propositions post 2020 !

Développement rural (DR) : aides aux investissements

Pour le DR, la proposition de la Commission prévoit la continuité, dans le sens où les EM peuvent continuer à octroyer une aide aux investissements qui contribuent à la réalisation des objectifs communs de l'UE et tel que précisé dans le plan stratégique de l'EM, selon le nouveau modèle de mise en œuvre de la PAC.

Références à l'irrigation en particulier

Dans le contexte d'aides aux investissements, on retrouve même des références à l'irrigation en particulier : il est indiqué que les EM doivent établir une liste des investissements inéligibles (une « liste négative »). De plus, cette liste doit au moins inclure une série de points, dont : « les investissements dans l'irrigation non compatibles avec l'obtention d'un bon état des masses d'eau tel que visé dans la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE), y compris l'expansion de l'irrigation affectant des masses d'eau dont l'état a été qualifié de moins que bon dans le plan de gestion de district hydrographique ». Par « moins que bon », il faut comprendre sur le plan quantitatif.

On veut donc renforcer les synergies avec la DCE. Les négociations avec le Parlement européen et le Conseil sont encore en cours. Les « économies d'eau » pourraient y jouer un rôle très important.

Le colloque Économies d'eau en irrigation, organisé en novembre 2019 à Montpellier, a-t-il répondu à vos attentes ?

J'ai été très heureux d'avoir pu ouvrir ce colloque. Comme gestionnaire du PDR de Languedoc-Roussillon à la Direction générale Agriculture et Développement rural de la Commission européenne, je suis conscient des défis que la gestion de l'eau pose dans cette région. Ainsi, quand j'étais à Montpellier en juin 2018 pour un comité de suivi, j'en ai profité pour rendre visite à l'ex-Irstea³, pour apprendre ce que la recherche peut nous apporter comme solutions en matière de gestion de l'eau. C'est lors de cette visite que l'idée est née d'organiser un moment d'échange au niveau européen sur les économies d'eau en irrigation. En novembre 2018, un premier comité de pilotage pour ce colloque a eu lieu, suivi par plusieurs autres.

Les attentes de la Commission par rapport à ce colloque étaient doubles :

- d'abord, avoir des échanges sur les économies possibles d'eau en irrigation pour le développement d'une agriculture durable ;
- de plus, stimuler davantage la diffusion des résultats au niveau européen :
 - de la recherche,
 - des innovations techniques pour économiser l'eau en irrigation.

J'ai été ravi de la participation de tant de représentants d'acteurs opérationnels, institutionnels, techniques et scientifiques et de nombreux autres intervenants, provenant de onze EM et même d'en dehors de l'UE (Turquie, Ukraine...), qui ont permis beaucoup d'échanges et de discussions fructueuses. La diffusion des résultats, qui a commencé lors du colloque même, sera pleinement assurée grâce à ce numéro spécial de la revue INRAE « Sciences, Eaux & Territoires ». ■

L'auteur

Philippe LAMMENS

Commission européenne, Direction générale
Agriculture et développement rural,
Rue de la Loi 130/Wetstraat 130,
1049 Bruxelles, Belgique
philippe.lammens@ec.europa.eu

3. Désormais INRAE, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, qui rassemble depuis le 1^{er} janvier 2020, les ex-organismes Inra et Irstea.



En 2010, la Commission européenne a estimé que l'Europe pouvait réduire de 40 % sa consommation de ressource en eau en optimisant les systèmes d'irrigation.

Table ronde

Quelle place pour l'irrigation en France et en Europe dans l'avenir ?

Dans ce regard croisé, des experts de différentes institutions professionnelles agricoles et de l'administration française et européenne abordent l'avenir de l'agriculture irriguée en Europe dans un contexte où celle-ci est souvent décriée par la société et où la question du changement climatique devient de plus en plus prégnante. Chaque acteur s'exprime autour de trois questions : quels sont les besoins et à quelles conditions développer l'irrigation en France et en Europe ? Quelle politique et quels projets pour l'agriculture irriguée ? Peut-on améliorer les performances de l'irrigation ?

NOTE DES AUTEURS

Ces échanges sont issus de la table ronde finale du colloque Économie d'eau en irrigation qui s'est tenu les 13 et 14 novembre 2019, à Montpellier (photo ❶). Nous avons repris dans cet article les messages principaux des intervenants et les remerciements de s'être prêtés à cet exercice.

Alexandra CATALÃO, Commission Européenne, DG AGRI.

Gestionnaire du programme de développement Provence-Alpes-Côte d'Azur au sein de la direction générale AGRI.E1.

André BERNARD, Association des irrigants des régions méditerranéennes françaises (AIRMF).

Président de la Chambre régionale d'agriculture Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Bruno GRAWITZ, Président de l'Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage (AFEID).

Marco ARCIERI, *International Commission on Irrigation and Drainage* (ICID).

Vice-président de la Commission internationale de l'irrigation et du drainage.

Adriano BATTILANI, Irrigants d'Europe.

Secrétaire général des Irrigants d'Europe.

Franck SOLACROUP, Agence de l'eau Adour-Garonne.

Directeur du département des ressources en eau, milieux aquatiques et agriculture de l'Agence de l'eau Adour-Garonne.

Dominique COLIN, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.

Directeur de la délégation de Montpellier de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.

Denis CARRETIER, Chambre régionale d'agriculture d'Occitanie.

Président de la Chambre régionale d'agriculture d'Occitanie.

❶ Le colloque Économies d'eau en irrigation (Montpellier, novembre 2019), une initiative nécessaire pour créer le débat et partager les diverses expériences autour de l'avenir de l'agriculture irriguée en France et en Europe.



Quels sont les besoins et à quelles conditions développer l'irrigation en France et en Europe ?

Irrigants d'Europe

Aujourd'hui de multiples pressions de la société s'exercent autour de l'irrigation, ce qui amène certaines personnes à envisager que l'on puisse ne plus irriguer dans certaines régions du sud de l'Europe. C'est le cas en Espagne et en France, deux pays pour lesquels la Commission européenne recueille le plus de critiques envers les associations d'irrigants. Or il s'agit le plus souvent d'un manque d'information sur le sujet et d'une confusion entre les problèmes de l'agriculture en général et les pratiques d'irrigation. En effet, la question n'est pas de ne plus irriguer mais de mieux irriguer. Il s'agit d'envisager une utilisation multifonctionnelle des ressources en eau, qui puissent entre autres, répondre aux besoins en eau d'irrigation des plantes, maintenir les sols humides, la fertilisation... et de trouver un équilibre avec les différents groupes de pression (eau potable, eau d'irrigation, eau des milieux aquatiques...).

Association des irrigants des régions méditerranéennes françaises

Je voudrais rebondir sur le cas de la France qui est un des pays où les pressions sont de plus en plus fortes. Or les chiffres sont plutôt rassurants. D'après le Commissariat général au développement durable (ministère de la Transition écologique), l'agriculture française consomme 2,73 % de l'eau qui tombe sous forme de précipitations, ce qui représente une faible part de la ressource par rapport à d'autres usages. La France a d'ailleurs engagé depuis une dizaine d'années d'importantes mesures pour optimiser l'eau dans l'agriculture. Ces mesures sont, par exemple, l'arrêt des financements nationaux à l'hydraulique agricole en 2008, la nouvelle Politique agricole commune (PAC) 2014-2020, la régionalisation des programmes de développement rural (PDR), l'évolution des modalités de soutien des Agences de l'eau (ex. : projets de territoire, appels à projets de développement de filières, contrats territoriaux et diagnostics technico-économiques de l'irrigation), etc.¹

Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage

Quand on parle d'irrigation on ne parle que d'un maillon qui va de la petite goutte qui est prélevée dans son milieu naturel soit à partir des eaux de surface, soit de l'eau souterraine, jusqu'à la production agricole. Sur le terrain les situations sont très diversifiées. Il devient dès lors difficile de ne se focaliser que sur l'irrigation.

Sur le terrain, les systèmes d'irrigation mobilisés (systèmes d'irrigation gravitaire, arrosage par sprinkler, irrigation localisée ou goutte-à-goutte) sont en effet plus ou moins économes en eau. Les besoins en eau varient aussi selon le type de cultures (pérennes ou non) et les conditions de sols. Comment dès lors généraliser un point de vue négatif sur l'usage de l'irrigation face à une telle diversité de situations ?

Il faut donc considérer l'ensemble de la chaîne de production et remettre le sujet de l'irrigation dans son contexte social et économique pour apporter une réponse pertinente à la question.

Agence de l'eau Adour-Garonne

Dans le bassin de l'Adour-Garonne, les questions sociales et économiques relevées par l'AFEID nous concernent au premier plan. Notre bassin est parmi les plus exposés aux critiques relatives à l'irrigation. Or, supprimer l'irrigation n'est ni une option envisagée ni une option envisageable. Nous avons un bassin très rural et agricole où la production agricole et l'agroalimentaire y représentent un chiffre d'affaire supérieur à celui de l'aéronautique ou encore du tourisme. Il s'agit de trouver un équilibre qui permet de concilier le bon état des milieux aquatiques et le maintien du développement économique, en ayant à l'esprit qu'il y aura une augmentation de 1,5 million d'habitants dans notre bassin, à l'horizon 2050.

Chambre régionale d'agriculture d'Occitanie

Pour développer l'irrigation, le premier message à faire comprendre aux divers utilisateurs est que l'eau doit être partagée pour l'alimentation humaine, pour l'agriculture, l'industrie et les milieux aquatiques. En effet, il y a toujours une opposition sur l'utilisation de l'eau, et l'irrigation est fortement critiquée.

Un autre sujet qui fait débat concerne la répartition inégale des pluies dans le temps. Certes, il y a des épisodes de déficits hydriques, mais aussi des périodes de l'année très pluvieuses. Il s'agit de réfléchir ensemble, aux possibilités de stockage de l'eau pour les périodes de pluies massives qui permettront de sécuriser les ressources en eau dans les bassins.

Agence de l'eau Adour-Garonne

Compte tenu du contexte socio-économique du bassin de l'Adour-Garonne évoqué plus haut, il faudra en effet plus que jamais faire le choix de la sécurisation de l'eau. Le bassin subit régulièrement des sécheresses très importantes qui amènent des tensions pour les milieux, l'eau potable et d'autres usages. Dans un contexte de changement climatique, ces sécheresses vont se traduire par deux fois moins d'eau en été dans les cours d'eau à l'horizon 2050. Or, contrairement à l'agence Rhône-Méditerranée-Corse, nous n'avons pas les aménagements qui permettent le stockage et le transport de l'eau (lac de Serre-Ponçon, canal de Provence...). Il y a donc un vrai défi dans notre bassin pour d'une part économiser l'eau, et d'autre part sécuriser la ressource, *via* notamment des réservoirs de substitution multi-usages.

Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse

Dans la délégation de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, les quatre départements qui bordent la façade méditerranéenne sont quasiment tous en déficit hydrique. Cette situation a incité l'agence depuis une dizaine d'années à faire des études de volumes prélevables² et voir comment ces volumes sont partagés entre les différentes

1. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018.

2. Volume que le milieu est capable de fournir dans des conditions écologiques satisfaisantes, c'est-à-dire qu'il est compatible avec les orientations fondamentales fixées par le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux et, le cas échéant, avec les objectifs généraux et le règlement du schéma d'aménagement et de gestion des eaux.

► usages. Nous avons donc engagé le territoire à partager l'eau en sachant que ce n'est pas une question facile, et que, couplée à des périodes de pénurie de plus en plus fréquentes, il y aurait des tensions sur la ressource. Dans son plan d'action, l'Agence met en priorité les économies en eau avant les substitutions. L'eau économisée représente en effet la ressource qu'on peut mobiliser à moindre coût. Ainsi, l'Agence de l'eau ne finance des projets d'irrigation durable que lorsque toutes les actions d'économies ont été éprouvées et/ou épuisées.

Irrigants Europe

On évoque beaucoup la problématique de l'irrigation dans les pays du sud. Or on constate depuis peu que les besoins d'irrigation sont en train de se déplacer vers le nord. On a observé il y a deux ans des crises dans le secteur agroalimentaire en Angleterre, en Allemagne, en Suède et dans certains pays de l'est de l'Europe. L'irrigation est une des solutions pour faire face à la sécheresse, mais pour cela, il faut penser à une irrigation bénéfique pour l'environnement et compatible avec l'agroécologie pour aider au maintien de la matière organique des sols en évitant son dessèchement.

Il faut également mentionner que dans les pays du bassin méditerranéen en Italie, en Espagne, en Grèce, au Portugal, en France..., il y a beaucoup d'infrastructures d'irrigation qui sont cruciales pour gérer l'environnement face aux événements extrêmes liés aux changements climatiques. Sans l'agriculture irriguée, nous allons perdre le moyen de lutter contre le changement climatique. Il faut donc soutenir une irrigation qui soit efficace en sachant qu'il y a des limites sur la ressource car elle n'est pas infinie.

Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage

Si l'on ne produit plus dans certaines régions d'Europe, il faudra importer des denrées. Cependant, il faut savoir que le bilan hydrique n'est pas le même pour une culture produite en Europe et pour la même culture importée en Europe. En général, on ne prend en compte que la consommation en eau locale, or c'est tout le système global qu'il faut analyser. Il y a une approche très intéressante appelée « analyse de cycle de vie » (ACV), qui considère l'ensemble de la filière de production, depuis la consommation des matières premières jusqu'à la livraison au bénéficiaire. En termes de politiques, cette analyse de cycle de vie devrait être très présente pour juger de la pertinence d'irriguer telle ou telle culture à tel ou tel endroit de la planète, et évaluer de façon objective l'impact environnemental global de la production.

Peut-on améliorer les pratiques d'irrigation ?

Association des irrigants des régions méditerranéennes françaises

Il y a des marges de progrès dans le domaine de l'optimisation de l'irrigation pour diminuer les volumes d'eau prélevés en s'appuyant notamment sur les technologies numériques, les outils de cartographie aérienne, etc. L'objectif est d'apporter la bonne dose d'eau au bon moment et au bon endroit. Il faut par ailleurs agir pour la sécurisation de l'eau autour de projets de territoire ayant une vocation multi-usage. Parmi les usages prioritaires,

il est nécessaire d'allouer une partie des ressources aux cultures dont les objectifs de commercialisation ou de qualité nécessitent un approvisionnement en eau. Pour ces cultures, les projets d'irrigation doivent évoluer en priorité pour améliorer la gestion de l'eau en adoptant des technologies et des approches de plus en plus spécifiques (bilan hydrique, sol et plante).

Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage

Les situations sont très différentes dans chaque pays. En France par exemple, on peut se permettre de faire de la haute technologie car derrière, il y a non seulement des moyens financiers mais aussi tout un ensemble de services de communication et de conseils pour que les nouvelles technologies diffusent et soient appliquées correctement dans les exploitations.

En revanche, ce n'est pas le cas dans tous les pays où l'on se trouve parfois face à un manque crucial de technicité de base pour mener un projet d'irrigation, comme l'entretien des stations de pompage et des réseaux d'eau. Un minimum de technicité est nécessaire pour parvenir à une certaine optimisation de l'irrigation.

Chambre régionale d'agriculture d'Occitanie

Pour abonder dans le sens de ce qu'il vient de se dire, je voudrais souligner qu'en France, dans les territoires, l'évolution technique progresse ainsi que la formation qui va de pair avec notamment l'appui des différents organismes conseillers. On peut imaginer que dans un futur pas si lointain, tous les agriculteurs puissent déclencher l'irrigation de leurs parcelles à distance en ayant pris en compte au préalable tout un ensemble d'informations relatives au sol, au climat et aux cultures.

Agence de l'eau Adour-Garonne

Être efficient et économe en eau *via* le pilotage de l'irrigation, un matériel performant ou le choix de variétés ou de cultures plus adaptées est important mais j'aimerais enfin mentionner que lorsqu'on parle de l'irrigation, il faut aussi prendre conscience de ce qui se passe dans le sol avec une approche agronomique. En effet, le sol constitue un réservoir d'eau qui peut être augmenté avec des apports de matière organique. En améliorant la réserve utile du sol, on pourra espacer les tours d'eau par exemple. Le sol est un patrimoine agricole qu'il faut toujours prendre en compte dans la discussion des économies en eau.

Quelle politique et quels projets pour l'agriculture irriguée ?

Commission européenne

Dans un contexte de changements globaux qui affectent les ressources des territoires et en premier lieu les ressources en eau (changement climatique, mais aussi augmentation de la population et de la demande en produits agricoles), la gestion de l'eau pour l'irrigation est devenue une préoccupation majeure pour la Commission européenne.

Dès les années 2000, la Commission s'est intéressée à la problématique de la ressource en eau en mettant en œuvre un ensemble de directives pour la gestion quantitative et qualitative de l'eau : directive cadre sur l'eau, directive pesticides, directive nitrates, directive

eau potable. Au sein même de la PAC (Politique agricole commune), il y a toujours eu des mesures pour favoriser les investissements durables sur l'eau. C'est le cas par exemple de l'article 46 du R.1305/2013 qui sur la période 2014-2020, stipule que les aides à l'irrigation ne peuvent être attribuées que dans les situations générant des économies d'eau et n'affectant pas son bon état.

Si l'on parle du lien entre l'irrigation et la future PAC 2020, une proposition de la Commission (plus restrictive en comparaison avec l'actuelle programmation en accord entre l'agriculture et l'environnement) a été faite et envoyée au Parlement européen et au Conseil pour discussion. Les positions du Parlement européen et du Conseil ne sont pas encore connues à ce jour. Le Conseil a cependant déjà fait une proposition d'amendements pour davantage conditionner les investissements aux résultats d'études environnementales ex-ante sur la pression des masses d'eau pour que la démonstration soit faite de l'absence d'effets négatifs. Ceci alimentera la nouvelle PAC qui aura des conditionnalités environnementales plus restrictives en faveur d'une agriculture plus durable.

En ce qui concerne les aides du développement rural (FEADER), la France est le sixième État membre en termes de soutien derrière l'Espagne, la Grèce, l'Italie, la Roumanie et le Portugal.

La France utilise surtout la mesure de soutien aux investissements pour une utilisation efficace de l'eau, au total 182 millions d'euros FEADER sont prévus en maquette dont 28,5 millions payés pour faire passer plus de 73 000 hectares à un système d'irrigation plus efficace. Cette mesure concerne surtout les trois régions du sud (Nouvelle Aquitaine, Occitanie et PACA). En comparaison à la même période, l'Espagne a utilisé plus de 37 des 358 millions d'euros prévus pour le renouvellement des installations d'irrigation sur 235 000 hectares.

Association des irrigants des régions méditerranéennes françaises

En ce qui concerne la directive cadre sur l'eau (DCE), une première évaluation a été réalisée en 2019. Contrairement aux objectifs que s'est fixée la directive en 2000, plus de la moitié des masses d'eau en Europe ne sont pas en bon état écologique. Il a été annoncé que ceci aurait des conséquences sur la PAC post 2020. Ce sujet a été évoqué dans la réunion du Cercle français de l'eau. Or il nous semble qu'un facteur n'a pas été pris en compte lors de l'élaboration de la DCE : il relève de l'adaptation au changement climatique. Donc effectivement il y a un travail à faire pour mieux intégrer la DCE dans la nouvelle PAC, mais également prendre en compte la question de l'adaptation dans l'harmonisation des règlements.

Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage

Pour les pays du sud (Tunisie, Jordanie) où les tensions pour l'accès à l'eau sont encore plus fortes qu'en Europe, la réutilisation de l'eau pour l'irrigation est essentielle pour assurer le devenir des cultures. En France, on en n'est pas encore à ce stade. Cependant des projets émergent autour de la réutilisation des eaux usées traitées notamment pour irriguer la vigne. Du point de vue des technologies, tant pour le traitement des eaux que pour le dimensionnement des systèmes de distribution

au champ, les recherches avancent. Toutefois, il demeure un important problème de perception sociale auprès des producteurs et surtout des consommateurs. Sans oublier les aspects réglementaires qui en France et en Europe sont pour l'instant dans une impasse. Or cette question de la réutilisation de l'eau va devenir encore plus importante dans le futur.

Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse

En France, dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse, le projet du Canal de la Robine (2016-2019) est un bon exemple d'économies en eau d'irrigation, avec en ligne de mire un objectif de 25 millions de m³ d'eau économisée sur les 100 Mm³ prélevés chaque année. Ce projet est accompagné par l'Agence de l'eau pour ce qui concerne la gestion collective et le comptage de l'eau, et la définition des missions d'économie.

Dans ce contrat, des actions concernent l'Association syndicale autorisées (ASA) de Raonel dans l'Aude, qui gèrent 900 ha majoritairement plantés de vigne, avec un prélèvement annuel de 10 millions de m³ d'eau, alors que l'autorisation est de 7,8 millions de m³. L'objectif était donc de réaliser une économie d'eau de 3 millions de m³ par an, dont 1,3 à l'étiage. Pour ce faire, on a construit 27 km de réseaux et une station de pompage de 1 500 m³ /h afin d'alimenter sous pression 900 hectares de vignobles et de grandes cultures maraîchères. L'Agence de l'eau a financé ce projet à hauteur de 1,3 million d'euros. Dans ce contexte, on a finalement réussi à faire 3,3 millions de m³ d'économie par an.

Ce projet est intéressant car il a permis de réaliser des économies en eau, de sécuriser la ressource et le développement économique tout en la partageant avec d'autres usages.

Conclusion de la Commission européenne

Premièrement, la conclusion plus encourageante de ce colloque est que plusieurs mesures innovantes, technologies et pratiques agronomiques sont déjà disponibles pour améliorer significativement l'efficacité de l'irrigation. Deuxièmement, qu'on ne peut pas continuer à ignorer les conséquences sur l'agriculture de l'impact du réchauffement climatique. Par conséquent, il y a une nécessité croissante d'intensifier la discussion sur l'utilisation efficace de l'eau à différents niveaux, en particulier entre les agriculteurs et les scientifiques.

Pour finaliser, je voulais souligner que ce type de colloque est une initiative nécessaire pour créer le débat afin de partager les diverses expériences autour de ce sujet d'avenir, l'utilisation efficace de l'eau pour une agriculture durable et respectueuse de l'environnement, et vous pouvez toujours compter sur la Commission. ■

Les auteurs

Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ
et Sami BOUARFA

G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD,
Montpellier SupAgro, Univ Montpellier,
361 Rue Jean-François Breton, BP 5095,
F-34196 Montpellier Cedex 5, France.

✉ juan-david.dominguez-bohorquez@inrae.fr

✉ sami.bouarfa@inrae.fr

En direct des territoires

L'irrigation de la vigne en ex-Languedoc-Roussillon : un potentiel de production maintenu par les économies d'eau

Dans un contexte de déficits hydriques récurrents, l'irrigation raisonnée des vignes a été mise en avant comme une solution adaptée pour régulariser la production (en volume et en qualité) et préserver de façon durable l'outil de production. Dans le bassin viticole du Languedoc-Roussillon, le plus étendu en France, deux dispositifs d'aides publiques financées par l'Union européenne ont été mis en place depuis 2007 pour inciter les irrigants à de meilleures pratiques. Le premier a permis d'équiper plus de 23 700 hectares de vigne d'un système d'irrigation efficient au goutte à goutte. Quant au second, en incitant les exploitants à moderniser leur réseau, il a permis de générer des économies d'eau qui ont pu être redistribuées pour une part dans les milieux aquatiques et le reste pour la création de nouveaux réseaux hydrauliques.

La vigne, première culture irriguée en ex-Languedoc-Roussillon

Malgré un très fort recul sur les quarante dernières années lié à la chute de consommation des vins « basiques », le bassin viticole du Languedoc-Roussillon (LR) reste le plus étendu de France avec une superficie de plus de 220 000 hectares en production¹, désormais stabilisée (figure 1). Il représente près de 30 % de la surface agricole utile du territoire pour 14 300 exploitations dont la production avoisine les 12,5 millions d'hectolitres en moyenne sur la dernière décennie. Cette production génère un chiffre d'affaires d'environ 1 150 millions d'euros, soit environ 50 % du produit brut agricole du bassin. L'apport du secteur viticole à l'économie du territoire et à l'emploi demeure donc substantiel et doit être préservé.

Avec en 2017 plus de 32 000 hectares, dont environ 13 000 hectares irrigués supplémentaires depuis 2010 (figure 2), la vigne est désormais, selon une étude de l'AIRMF², la première culture irriguée dans le bassin LR. Elle représente ainsi plus de 40 % des surfaces irriguées devant les fruits et les légumes.

Un vignoble confronté au changement climatique

Alors que le rendement moyen du vignoble avoisinait les 75 hl/ha dans les années 1980 (avec une prédominance des vins des tables), ce chiffre est tombé à 56 hl/ha sur la période de 2000 à 2019, la variabilité entre millésime restant marquée (de l'ordre de 10 hl/ha).

En examinant plus finement l'évolution, on observe un décrochage depuis 2015 avec un minimum alarmant de 44 hl/ha atteint en 2017.

Les évolutions structurelles du vignoble et la réorientation qualitative de sa production, avec le remplacement de cépages très productifs tels que l'Aramon par des cépages qualitatifs (Merlot, Syrah, Chardonnay) expliquent en partie la baisse des rendements observés (figure 3). Toutefois, ce facteur n'est plus opérant depuis une vingtaine d'années du fait d'un encépagement qualitatif structurellement stabilisé. De plus, grâce aux efforts de restructuration, l'économie viticole du bassin LR est sortie de la crise récurrente et a renoué avec une certaine prospérité, ces conditions étant favorables à une plus grande attention portée aux pratiques culturales et au maintien d'une productivité satisfaisante.

1. Source : Agreste, 2017.

2. Association des irrigants des régions méditerranéennes françaises.

Dans ce contexte, les facteurs climatiques ressortent comme prépondérants dans l'explication de la baisse des rendements observée depuis le début des années 2000. Ainsi, une corrélation de cette tendance baissière avec les évolutions relevées pour ces facteurs météorologiques (hausse des températures et de l'évapotranspiration, diminution des précipitations), notamment durant le cycle végétatif, est clairement suggérée. Les modifications du régime pluviométrique, avec une diminution des pluies efficaces et une répartition de plus en plus hétérogène qui accroît la fréquence de très longues périodes sèches, accentuent une tendance marquée à une baisse des réserves en eau des sols précoces. L'ensemble de ces phénomènes s'avère particulièrement préjudiciable au grossissement des baies. Il faut noter également qu'un déficit hydrique trop prononcé en période de maturation peut avoir des conséquences négatives sur la composition chimique des raisins (blocages de maturité) et le profil sensoriel des vins.

L'irrigation raisonnée de la vigne ou la gestion du stress hydrique comme réponse au changement climatique

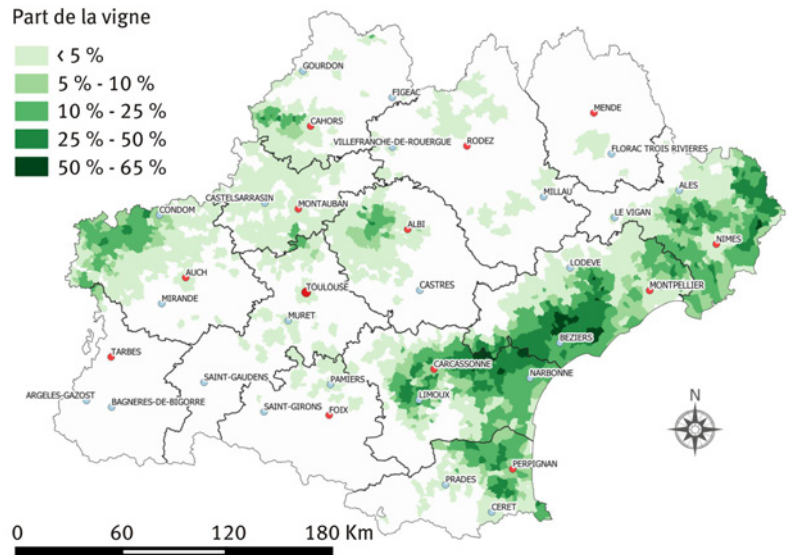
Dans ce contexte de déficits hydriques récurrents dont les effets sont de plus en plus visibles sur les volumes de récolte mais également parfois sur la qualité des vins, l'irrigation raisonnée des vignes a été clairement mise en avant comme une solution adaptée pour régulariser la production (aspects quantitatifs et qualitatifs) et préserver de façon durable l'outil de production. Particulièrement pertinente dans les vignobles dédiés au segment « cœur de gamme » (vins de cépage indication géographique protégée en particulier), elle doit être pilotée de façon précise pour répondre aux besoins minimum de la vigne, lorsque ceux-ci ne sont pas satisfaits par la pluviométrie. En effet, si la vigne est une plante tolérante à la sécheresse, ses mécanismes d'adaptation à la contrainte hydrique ne peuvent se mettre en place que si celle-ci s'installe progressivement.

Dans un itinéraire hydrique idéal, l'eau nécessaire est fournie par les précipitations et la réserve en eau du sol. Ainsi, l'irrigation raisonnée au vignoble ne doit intervenir qu'en l'absence de pluie lorsque les réserves en eau du sol sont consommées, suivant des volumes annuels recommandés compris entre 500 m³ et 1 000 m³/ha, avec des apports fractionnés, quotidiens ou hebdomadaires, préférentiellement localisés au goutte-à-goutte.

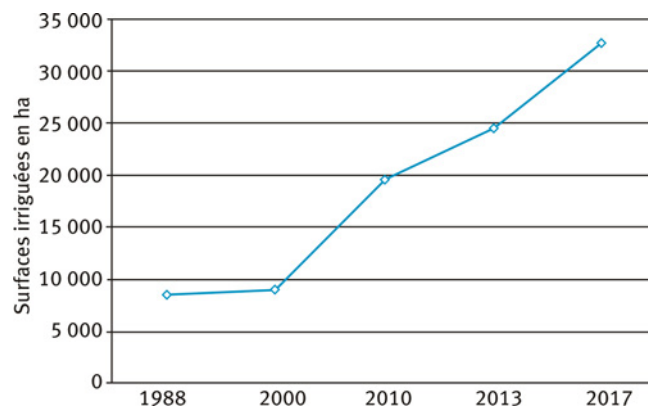
Selon l'objectif de production, l'année climatique et le type de sol, l'irrigation ne s'avère donc pas nécessaire tous les ans. La conduite raisonnée de l'irrigation du vignoble nécessite que le viticulteur se fixe un itinéraire hydrique correspondant à son objectif de production et dispose d'indicateurs qui lui permettront de suivre l'évolution du statut hydrique de ses parcelles.

C'est dans le sens d'une irrigation maîtrisée, qu'à partir de 2014, et en parallèle de la mise en eau de nouveaux périmètres irrigués, un programme d'accompagnement a été développé à l'attention des viticulteurs « néo-irrigants ». Ce programme, élaboré grâce au partenariat des chambres d'agriculture avec Société d'aménagement régional du Bas-Rhône et du Languedoc et l'Institut français de la vigne

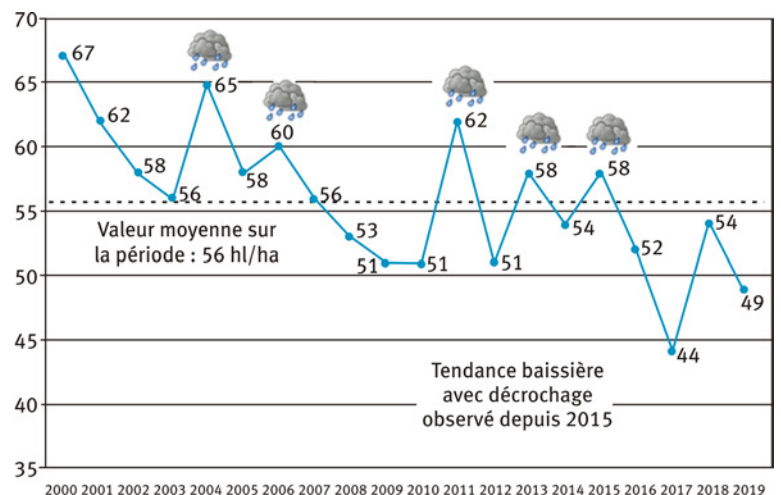
❶ Poids de la vigne par commune en Occitanie (en pourcentage de la superficie communale) – 2018 (source : DRAAF Occitanie, IGN BD Carto®, Douanes CVI 2018).



❷ Évolution des surfaces viticoles irriguées en Languedoc-Roussillon de 1988 à 2017 (source : RGA 1988, 2000, 2010, Agreste 2013, AIRMF 2017).



❸ Évolution des rendements moyens de la vigne en Languedoc-Roussillon depuis 2000 (hl/ha). Source : rendements FranceAgriMer.



et du vin, a été soutenu par la Région, à l'époque Languedoc-Roussillon, et l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, dans l'objectif :

- de sensibiliser les viticulteurs à une gestion raisonnée et économe de l'eau afin de préserver les ressources locales ;
- leur permettre d'acquérir les connaissances spécifiques nécessaires à l'adéquation entre contrainte hydrique et objectifs de production (figure 4).

L'irrigation raisonnée n'est bien sûr pas la solution unique et doit être accompagnée d'autres mesures d'adaptation, comme la sélection de cépages, de clones et porte-greffes plus résistants à la sécheresse. De nouvelles approches de l'entretien du sol, par leurs effets agronomiques positifs (rétention de l'eau, amélioration de la matière organique...) sont également promues dans le cadre de l'adaptation du vignoble au changement climatique. L'ensemble de ces techniques d'adaptation sont notamment étudiées par des équipes de recherche dans le cadre du projet de recherche LACCAGE coordonné par l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)³.

Concilier maintien de l'économie agricole et préservation de la ressource en eau

L'irrigation de la vigne de cuve est fortement encadrée réglementairement. Elle est régie par le décret n° 2006-1526 et 1527 du 4/12/2006 complété par le décret 2017-1327 du 8/09/2017 spécifique aux vignes des aires de production de vins d'appellation d'origine (AOC/AOP)⁴.

Un des principes forts inscrit dans ces textes est l'interdiction d'irriguer à compter du 15 août (véraison) et jusqu'à la récolte.

Au niveau des politiques publiques, certaines contribuent au développement de l'irrigation au vignoble. On peut mentionner l'aide proposée depuis 2008 dans le cadre de l'OCM⁵ vitivinicole. Le dispositif permet aux viticulteurs de bénéficier d'un accompagnement financier à l'équipement des parcelles en goutte-à-goutte dans le cadre des aides à la restructuration du vignoble. L'objectif du programme financé par le Fonds européen agricole de garantie (FEAGA) est de renforcer la compétitivité des entreprises viticoles, l'adaptation du vignoble au changement climatique permettant d'y contribuer. Cette aide est attribuée par FranceAgriMer sur une base forfaitaire, à hauteur de huit cents euros par hectare. Son versement est subordonné à la présentation d'un justificatif d'un droit de prélever dans les ressources en eau ou d'une adhésion à un réseau collectif, un contrôle systématique sur place est par ailleurs réalisé.

En dix ans, ce sont plus de 23 700 ha de vigne qui ont été équipés d'un système d'irrigation efficient au goutte-à-goutte dans le cadre de ce programme, soit une moyenne de 2 900 ha par an (figure 5).

En parallèle de cette mesure gérée par FranceAgriMer, un autre programme européen de la Politique agricole commune (PAC), dédié au développement rural, permet d'accompagner la thématique de l'irrigation au vignoble. Il mobilise les enveloppes financières du Fonds européen agricole pour le développement rural (FEADER). Outil du deuxième pilier de la PAC, celui-ci contribue à la compétitivité de l'agriculture, à la gestion durable des ressources naturelles et à la lutte contre le changement climatique tout en répondant au développement territorial et à l'attractivité des zones rurales.

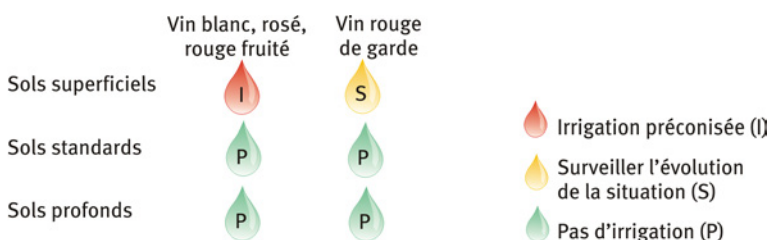
La première programmation à travers le Programme de développement rural hexagonal (PDRH) 2007-2013 a accompagné les projets d'hydraulique agricole d'économies d'eau par la mesure 125 B1 déclinée en deux sous-mesures. La 125 B1b a été la seule sollicitée de ces deux mesures à des fins de modernisation des réseaux collectifs d'irrigation notamment des canaux gravitaires, très courants, liés à l'historique de gestion de l'eau dans le bassin du Languedoc-Roussillon (figure 6).

Face au dérèglement climatique, une demande importante de besoins en eau au sein du monde viticole est nettement revendiquée dès 2006-2007, période durant laquelle les premières études de faisabilité de projets d'irrigation vont être réalisées.

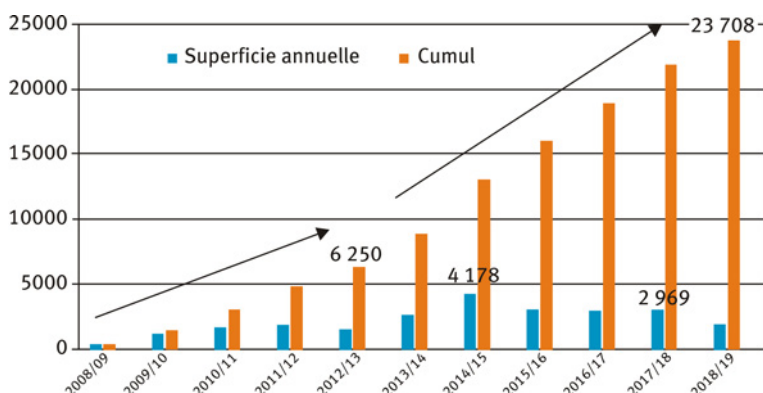
Toutes les conditions pour négocier des mesures supplémentaires d'accompagnement en hydraulique agricole sont alors réunies en Languedoc-Roussillon :

- une structuration avancée des territoires dans la gestion concertée de la ressource à l'échelle des bassins-versants (schémas d'aménagement et de gestion des eaux, contrats de rivières...);

4 Exemple de préconisation pour le déclenchement d'irrigation (source : Bulletin de conseil de la Chambre d'agriculture de l'Hérault).



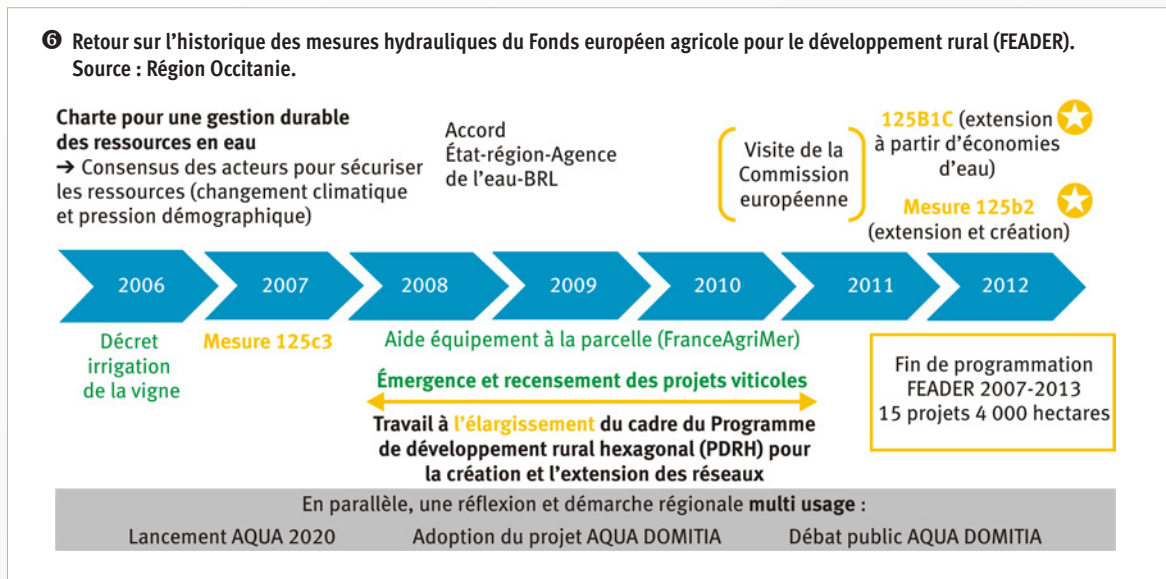
5 Évolution des surfaces équipées en goutte-à-goutte de 2008 à 2018 dans le bassin Languedoc-Roussillon, à partir de l'aide à la restructuration du vignoble (source : FAM).



3. Le projet LACCAGE (*Long term adaptation to climate change in viticulture and enology*) - <https://www6.inrae.fr/laccage/>

4. AOC : appellation d'origine contrôlée ; AOP : appellation d'origine protégée.

5. Organisation commune de marché (programme national d'appui à la filière soumis à la Commission européenne en juin 2008 et prolongé jusque 2020).



- des études des volumes prélevables engagées à partir de 2010, bases des futurs plans de gestion de la ressource en eau (PGRE) pour un retour à l'équilibre quantitatif en lien avec la directrice cadre européenne sur l'eau (DCE) ;
- d'importantes économies d'eau engagées lors de la programmation 2007-2013 ;
- une volonté politique affirmée de la Région avec les cinq départements de LR se rejoignant dans la démarche Aqua 2020 pour une gestion de la ressource permettant de concilier satisfaction des usages et préservation des milieux aquatiques. Un des volets de cette démarche régionale, aboutira au projet d'adducteur d'eau brute, Aqua Domitia, en réponse aux besoins de sécurisation des usages (eau potable, tourisme, agriculture) et de soulagement des milieux par substitution des prélèvements ;
- un outil mis à disposition des porteurs de projet : le Réseau hydraulique régional.

Après plusieurs années de négociation avec la Commission européenne et des visites sur place, l'intérêt de l'irrigation raisonnée en secteur méditerranéen est validé et deux mesures viennent élargir le PDRH :

- la mesure 125 B1c « Extension de réseaux d'irrigation sans augmentation de volumes prélevés à partir de la réutilisation d'une partie des économies d'eau » ;
- la mesure 125 B2 « Création/extension de réseaux collectifs avec augmentation de volumes prélevés » sans impact sur les milieux, à partir de ressources abondantes (Rhône) ou sécurisées (réservoirs).

Le premier projet viticole emblématique aidé par la Région Languedoc-Roussillon durant cette programmation FEADER sera celui porté par l'ASA⁶ « Les canaux de Saint-André et du Poujoula » à Roquebrun (Hérault) en 2012 : de 6,3 Mm³ prélevés sur l'Orb pour l'irrigation gravitaire de 50 ha, l'ASA réduit son prélèvement annuel

à 2,8 Mm³ et permet de desservir sous-pression 350 ha de vignes irriguées au goutte-à-goutte⁷ (photo ❶).

La mesure 125 B2 aboutit quant à elle à la création de nouveaux réseaux hydrauliques dans le respect de la ressource en eau et des milieux aquatiques en réponse au changement climatique et au stress hydrique des cultures (arboriculture, maraîchage et viticulture) : quinze projets d'irrigation collective seront ainsi accompagnés en fin de programmation pour 4 000 ha équipés (2,7 Mm³ mobilisés et 16,4 millions d'euros d'investissement dont 6,57 millions d'euros de FEADER).

Ainsi, de 2007 à 2014 incluant l'année de transition entre les deux programmations FEADER, 108 Mm³ ont été économisés en faveur du retour au bon état des masses d'eau et 4 836 ha font l'objet de nouvelles surfaces irriguées pour un accompagnement de 112 porteurs de projets. Le FEADER a été mobilisé à hauteur de 14 millions d'euros pour 39 millions d'euros d'investissements en hydraulique agricole. La Région a, quant à elle, contribué à environ 7 millions d'euros (hors études) en contrepartie avec les Départements.

La complémentarité des mesures d'économies d'eau et de soutien économique des territoires agricoles est indéniable. Ces deux mesures sont indissociables au sein de la politique régionale déployée en matière de gestion de l'eau et d'agriculture.

La seconde programmation du FEADER 2014-2020 est décrite dans le Programme de développement rural (PDR) Languedoc-Roussillon. Le binôme des mesures « économies d'eau/nouveaux hectares irrigués » (TO4.3.2⁸/TO4.3.3⁹) est reconduit dans des conditions très encadrées : ressource sécurisée, pilotage de l'irrigation, impact environnemental évalué, intérêt agronomique avéré.

6. Association syndicale autorisée.

7. Source : Premières Assises régionales de l'eau – présentation A.Castel (président de l'ASA) et Y.Gilbert (SMVOL), 25 mai 2016.

8. TO 432 : type d'Opération soutien aux infrastructures hydrauliques : réalisation d'économies d'eau et substitution de prélèvements existants.

9. TO 433 : type d'opération soutien aux infrastructures hydrauliques : extension, création de réseaux et d'ouvrages de stockages en réponse à la sécheresse et au changement climatique (volet collectif et volet individuel).

① Jeune plant de vigne irrigué au goutte-à-goutte.



© Chambre d'agriculture de l'Hérault

▶ Entre 2015 et 2018, il est fait état de 77 porteurs de projets d'hydraulique agricole en faveur de 69 Mm³ d'économies d'eau engagées, voire réalisées en partie, et de 5 776 nouveaux hectares programmés. Ces projets représentent un total de 68 millions d'euros d'investissements, dont 17 millions d'euros aidés par la Région Occitanie et 13 millions d'euros de FEADER.

La programmation se terminant en 2020, les deux appels à projets restants amènent à des résultats semblables à la première programmation en termes d'accompagnement du nombre de projets et d'économies d'eau attendues.

Comme on peut le voir depuis plus de dix ans, la dynamique concernant l'hydraulique agricole en région Occitanie dans l'ex-Languedoc-Roussillon reste forte et mobilisatrice. Elle est la résultante d'un consensus de l'ensemble des acteurs dans les territoires : outils économiques (caves coopératives) et organisations professionnelles agricoles, gestionnaires de réseaux collectifs d'irrigation (ASA notamment), collectivités en lien avec les instances locales de gestion de l'eau (Commissions locales de l'eau, gestionnaires de milieux), les partenaires financiers (Europe, Région, Départements, Agence de l'eau, FranceAgriMer) et les services de l'État (DDTM et DREAL¹⁰).

De 2007 à 2018, sont d'ores et déjà à mettre à l'actif des deux programmations du FEADER :

- 177 Mm³ d'économies annuelles réalisées pour les milieux par les gestionnaires des réseaux d'irrigation en faveur des objectifs environnementaux (DCE) ;
- 8,7 Mm³, soit 5 % des économies réalisées, remobilisées entre 2013 et 2018, pour le redéploiement de réseaux en vue de pérenniser les exploitations agricoles et les filières du bassin Languedoc-Roussillon.

L'utilisation de projets d'irrigation comme levier pour des économies d'eau : une dynamique à poursuivre

Déjà soulignée lors de la démarche « H₂O 2030, l'eau en partage »¹¹ portée par la Région Occitanie pour élaborer son plan d'intervention pour l'eau, la demande pour l'irrigation viticole reste très forte dans la frange méditerranéenne de la nouvelle grande région Occitanie. Cette demande a d'ailleurs été reprise par les Départements (Aude, Gard, Hérault) qui ont récemment lancé des schémas ou études prospectives afin d'identifier de façon plus précise au sein de leurs territoires les besoins en eau brute en lien avec le changement climatique et d'étudier des solutions en première approche.

10. DDTM : direction départementale des territoires et de la mer ; DREAL : direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.

11. H₂O 2030, l'eau en partage <https://www.laregion.fr/-H2030->

L'ex-Languedoc-Roussillon est avec la région Provence-Alpes-Côte d'Azur l'un des secteurs du bassin Rhône-Méditerranée qui a le plus contribué sur les dix dernières années aux importantes économies d'eau, réalisées pour plus des deux tiers par l'agriculture¹², notamment au travers de la modernisation des canaux.

Il est important de mettre au crédit de l'agriculture dans les projets de territoires, une partie de ces volumes épargnés au profit des milieux aquatiques. Des marges de manœuvre existent avec les économies d'eau qui restent à réaliser sur des réseaux collectifs, notamment gravitaires. Elles doivent permettre de poursuivre le redéploiement de réseaux dans un objectif de maintien de l'agriculture tout à fait conciliable avec l'atteinte des objectifs environnementaux.

Aujourd'hui une dizaine de projets finalisés (substitution et/ou extension) dans leur conception sont en attente d'un financement pour leur réalisation (2 000 à 2 500 ha). Au-delà de ces projets, la demande potentielle reste très forte (estimée à plus de 20 000 ha) et devra s'accompagner à court terme par la formalisation de ces besoins. Il est souhaitable que le cadre actuel d'intervention soit similaire pour la prochaine programmation. ■

Les auteurs

Léonie CAMBREA

La Région Occitanie, Direction de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt,
Service Territoires, Aménagement rural et Forêt,
Hôtel de Région de Montpellier,
201 avenue de la Pompignane, F-34064
Montpellier Cedex 02, France.

✉ leonie.cambrea@laregion.fr

Christophe LAFON

Chambre régionale d'agriculture Occitanie,
Site de Lattes, Mas de Saporta,
Maison des Agriculteurs, CS 30012,
F-34875 Lattes Cedex, France.

✉ christophe.lafon@occitanie.chambagri.fr

Laurent MAYOUX

FranceAgriMer, DRAAF Occitanie,
697 avenue Etienne, Meuhl, F-34078 Montpellier,
France.

✉ laurent.mayoux@franceagrimer.fr

12. Source : Tableau de bord du SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021.

TÉMOIGNAGE DE L'ASA DU CANAL D'ARROSAGE DE PÉZILLA-LA-RIVIÈRE

Témoignage recueilli dans le département des Pyrénées Orientales, choisi en 2007 comme zone d'étude pour le projet Vulcain*, exercice de prospective sur la vulnérabilité d'un territoire au changement global, car comprenant les hydrosystèmes représentatifs du contexte méditerranéen mais aussi un contexte socio-économique parmi les plus tendus de la région Languedoc-Roussillon, en termes de demande et de ressource en eau disponible.

La vigne, historiquement non irriguée, y souffre du manque d'eau et le manifeste par de faibles volumes de production. Les vigneron·nes de ce département souhaitent adapter le vignoble, et en lien avec les acteurs de leurs territoires, déployer de nouveaux réseaux d'irrigation économes en eau pilotés pour maintenir ces terroirs soumis à des épisodes de sécheresses de plus en plus récurrents.

Au cœur du Roussillon, dans la vallée de la Têt, l'ASA du canal d'arrosage de Pézilla la Rivière a souhaité agir dans ce nouveau contexte en modernisant et en étendant son réseau d'irrigation.

À l'instar de nombreux canaux de ce département, l'existence de celui de Pézilla se perd dans les âges, la première mention du canal datant de 1411. Le périmètre syndical de l'ASA est aujourd'hui de 750 ha auxquels sont en passe d'être ajoutés 260 ha de vignoble irrigué. Le projet porté par l'ASA comporte la modernisation de son réseau qui en générant près de 2 millions de m³ d'économie d'eau par an va permettre d'en remobiliser environ 300 000 m³ pour l'arrosage des vignes au goutte-à-goutte, laissant 1,7 millions de m³ en rivière pour contribuer à la restauration de l'équilibre quantitatif de la masse d'eau.

Le projet de l'ASA de Pézilla la Rivière tend à démontrer que l'on peut concilier les enjeux socio-économiques d'un territoire avec les enjeux environnementaux, le Président de la structure, André Garrigue, en est convaincu :

« Au vu des dernières années sèches que nous avons traversées et connaissant les risques liés aux dérèglements climatiques, il nous a paru urgent de nous impliquer pour sécuriser les revenus de nos vigneron·nes, pérenniser les activités économiques de notre commune mais également la qualité de son environnement.

... Initié dans le cadre de l'éco parc catalan, avec la municipalité de Pézilla, mais également accompagné par la Chambre d'agriculture et Perpignan Méditerranée Métropole, notre projet avance.

Nous avons fait réaliser un diagnostic de l'état de notre réseau qui a permis d'identifier les interventions qui vont déboucher sur d'importantes économies d'eau. Les subventions accordées par la Région, le Département et l'Agence de l'Eau pour améliorer l'étanchéité de nos réseaux et installer un système d'automatisation des vannes vont nous donner la possibilité d'ajuster le prélèvement dans la rivière aux stricts besoins en eau de notre canal. Sans ce financement public à hauteur de 80% notre structure ne pourrait pas réaliser de tels investissements. Une partie des économies d'eau générées servira à l'arrosage de la vigne et la majeure partie sera rendue à la rivière pour la vie aquatique, c'est un projet vertueux ! ».

* Projet Vulcain :

✉ <https://www.brgm.fr/projet/vulcain-vulnerabilite-hydrosystemes-soumis-changement-global-zone-mediterranene>

Focus

Le partenariat européen pour l'innovation crée une dynamique de recherche sur l'eau et l'agriculture

Le Partenariat européen pour l'innovation pour une agriculture productive et durable (PEI-AGRI) est un des instruments de l'Union européenne pour promouvoir l'innovation dans le secteur de l'agriculture en rapprochant plus étroitement la recherche et la pratique de terrain.

Pascale Riccoboni, chargée de l'animation nationale du PEI-AGRI au sein du Réseau rural national, fait le bilan de cette initiative et des dynamiques de recherche partenariale qu'elle a créées dans le domaine de l'eau et l'agriculture en France et en Europe.

Qu'est-ce que le PEI-AGRI et comment se décline-t-il à l'échelle européenne ?

Le secteur agricole doit relever de nombreux défis : nourrir la planète dans un contexte de forte croissance démographique, faire face aux changements globaux et en particulier au changement climatique, limiter les impacts environnementaux de l'agriculture, concilier qualité et rendement... L'innovation et la connaissance sont indispensables pour accompagner les transitions économiques, environnementales, sanitaires et sociales qui en découlent. C'est dans ce contexte qu'a été mis en œuvre le Partenariat européen pour l'innovation pour une agriculture productive et durable (PEI-AGRI) initié dans le cadre de la programmation 2014-2020.

Cet instrument européen est déployé via la politique européenne de la recherche et le second pilier de la Politique agricole commune (PAC). Il soutient les projets et activités de mise en réseau et de production et partage de connaissances pour réussir les transitions de l'agriculture et la forêt. Les projets PEI-AGRI ont en commun « l'approche multi-acteurs » : différents acteurs, comme des agriculteurs ou des conseillers, collaborent avec les scientifiques tout au long du projet pour développer des solutions innovantes aux problèmes rencontrés sur le terrain. Élaborées pour et avec les agriculteurs, ces solutions ont de meilleures chances d'être pertinentes et utilisées. Son autre mission est d'accélérer la diffusion des innovations en Europe.

À l'échelle de la France, les régions financent des projets collectifs appelés groupes opérationnels (GO) du PEI, tandis que le Réseau rural national réalise une animation spécifique PEI croisant les échelles et les acteurs. Transdisciplinaires, les groupes opérationnels contribuent tous à l'innovation sur les territoires dans de nombreuses thématiques : diminution des produits phytosanitaires, gestion des ressources (eau, air, sol), santé des végétaux et des animaux, outils de connaissances et de pilotage, usage du numérique, etc. À mi-2020, plus de mille cinq

cents groupes opérationnels ont été sélectionnés en Europe, dont deux cent quarante-six mis en œuvre en France. La PAC, avec le FEADER (Fonds européen agricole pour le développement rural), soutient financièrement ces projets.

Les projets de recherche et d'innovation transnationaux et soutenus par des fonds européens de la recherche (Horizon 2020) associent des partenaires de toute l'Europe. Le nombre de partenaires au sein de ces consortiums varie entre dix et, pour le plus important, cent dix. Parmi ces projets, on distingue les réseaux thématiques, qui font circuler les connaissances existantes et les traduisent en informations et outils pour les acteurs de terrain. Cent cinquante projets multi-acteurs, dont trente-cinq réseaux thématiques ont été signés entre 2014 et avril 2020.

L'eau est un paramètre important de l'agriculture. Quelle place le PEI AGRI accorde-t-il à la gestion de l'eau ?

De plus en plus de projets du PEI abordent très directement la question de l'eau.

Des travaux approfondissent les différentes approches pour la reconquête de la qualité de l'eau, la protection des ressources d'eau potable contre la pollution par les pesticides et les nitrates, identifient et développent des outils ou mesures innovantes ou encore des gouvernances adaptées à une protection plus efficace de l'eau potable. D'autres travaux ciblent la problématique sous l'angle de l'optimisation de l'utilisation des intrants (nutriments, produits phytosanitaires, eau) pour la compétitivité des exploitations ; tandis que d'autres travaillent tout à la fois sur les modèles de fertirrigation qui combinent objectifs de production et débouchés commerciaux.

Outre ces projets qui abordent directement la problématique de l'eau, il importe de souligner que les projets du PEI, pour un nombre très significatif d'entre eux (près des deux tiers des GO français), travaillent sur la transition

des exploitations vers des pratiques agro-écologiques, voire la triple performance¹. Les approches systèmes valorisées en vue de cette transition sont potentiellement plus vertueuses au regard de l'eau. Enfin, la plupart des projets s'inscrivent dans une démarche territoriale.

Une quarantaine de groupes opérationnels Eau et Agriculture ont été initiés en Europe. On peut citer à titre d'exemple deux projets portés par l'Allemagne (Zimmermann *et al.*, 2020) et le Portugal (Gonçalves *et al.*, 2020), qui font l'objet d'une présentation détaillée dans ce numéro. À ces projets régionaux s'ajoutent une dizaine de projets transnationaux H2020, comme le projet SolACE² qui travaille sur des solutions pour améliorer l'efficacité des agro-systèmes et des cultures en matière d'utilisation d'eau et de nutriments (azote, phosphore) dans un contexte de plus grande variabilité des précipitations. Associant quinze pays partenaires, dont la France représentée entre autre par INRAE, il examine un large éventail de contextes et de systèmes agricoles.

« L'eau et l'agriculture » est aussi l'une des treize thématiques portées par des groupes d'experts européens réunis au sein de *Focus Group* organisés par le réseau européen du PEI. Un *Focus Group* rassemble vingt experts d'origine et compétence variées pour dresser l'état de l'art, identifier les freins, les opportunités, les solutions sur une question de recherche importante pour les agriculteurs. Il produit un rapport destiné à inspirer d'autres acteurs, dont des groupes opérationnels ou des projets de recherche.

Les projets financés sont en ligne sur le site du réseau rural national³ et sur le site du réseau européen du PEI⁴. Enfin, outre le PEI AGRI présenté ci-dessus, il existe quatre autres PEI de l'Union européenne, dont l'un est spécifique à l'eau. Comme son nom l'indique, son objectif est de faciliter le développement de solutions innovantes pour faire face aux défis européens et mondiaux de l'eau. Il soutient également la création d'opportunités de marché pour ces innovations.

Le PEI AGRI dans sa programmation 2014-2020 vient de s'achever : quel est le bilan de six années d'actions sur le terrain ? Et quelles sont les perspectives d'avenir de cet instrument européen ?

Ce dispositif, dans sa dimension européenne et nationale, dans sa double dimension politique de la recherche et politique agricole commune, a été mis en place il y a six ans, à partir de zéro. En ce sens, il est unique dans son genre. Il s'est déployé au profit des secteurs agricole, agro-alimentaire et forestier, et aussi des territoires ruraux. Des projets abordent plus particulièrement les questions d'innovation sociale et territoriale, de nouveaux modèles économiques, ou encore les services d'innovation et de conseil les plus adaptés aux transitions. Le PEI a permis de développer cette synergie entre monde agricole, monde de l'enseignement, du développement et de la recherche, collectivité, parfois société

civile, pôles et entreprises..., et cette interaction entre petits et grands projets. Ce déploiement a mobilisé beaucoup d'énergie et de moyens. S'agissant du PEI soutenu par le FEADER, le volume et le type des GO sont divers selon les pays et les régions, mais les résultats sont prometteurs. S'agissant du PEI soutenu par la politique de la recherche Horizon 2020, cent cinquante projets ont été sélectionnés pour neuf cents millions d'euros (cible de cent quatre-vingt projets). L'enjeu réside maintenant dans la valorisation et l'appropriation des connaissances et résultats.

Pour la période 2021-2027, la Commission européenne a proposé de poursuivre et renforcer le PEI-AGRI sous sa double dimension politique de la recherche (Horizon Europe) et politique agricole commune. La modernisation, l'innovation et la connaissance sont des objectifs transversaux de la future politique agricole commune. Celle-ci prévoit de soutenir les projets de coopération, notamment les GO du PEI AGRI (« Un PEI AGRI » au service de toute la PAC), la formation et le conseil (avec des attentes renforcées pour le conseil en terme de prise en compte de la triple performance et d'accompagnement de projet partenariaux innovants par exemple), les réseaux de la PAC (européen ou nationaux)... Les systèmes de connaissance et d'innovation agricole (SCIA ou AKIS en anglais) et leur amélioration sont largement développés dans la prochaine PAC. Ils sont pour la première fois traités dans les documents cadre, par exemple le « plan stratégique national PAC » des États membres. La Commission a également proposé de doubler les financements de recherche et d'innovation dédiés à l'agriculture, l'alimentation, la bioéconomie et les ressources naturelles dans le prochain programme européen de recherche et innovation appelé « Horizon Europe ». ■

L'auteur

Pascale RICCOBONI

Chargée de l'animation nationale du PEI AGRI au sein du Réseau rural national, copiloté par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Régions de France et l'Agence nationale de la cohésion des territoires, 3 rue Barbet de Jouy, 75349 Paris SP 07, France.
 ✉ pascale.riccoboni@agriculture.gouv.fr

Propos recueillis par Sabine ARBEILLE

Revue Sciences Eaux & Territoires
 ✉ sabine.arbeille@inrae.fr

EN SAVOIR PLUS...

- 📄 **Site du réseau rural français, page web consacré au PEI :**
 ✉ <https://www.reseaurural.fr/le-partenariat-europeen-pour-linnovation-agri>
- 📄 **Les flash thématiques PEI :**
 ✉ <https://www.reseaurural.fr/le-partenariat-europeen-pour-linnovation-agri/actualites-et-evenements-du-pe>
- 📄 **Sommet européen du PEI dédié à transitions agro-écologique :**
 ✉ <https://www.reseaurural.fr/Sommet-agri-innovation-2019>

1. La triple performance rend compte des trois piliers du développement durable (économique, environnemental et social).
 2. *Solutions for improving Agroecosystem and Crop Efficiency for water and nutrient use.*
 3. <https://www.reseaurural.fr/le-partenariat-europeen-pour-linnovation-agri>
 4. <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/> : projets en ligne dès lors que l'information sur le GO a été transmis officiellement.

Retour d'expérience

Quel potentiel d'économie d'eau pour les stratégies d'irrigation des paysages de moraines du land de Brandebourg, en Allemagne ?

Les sols morainiques du land de Brandebourg présentent une forte hétérogénéité pédologique liée aux apports fluctuants de sédiments glaciaires et fluvio-glaciaires au cours du temps. De par leur nature sableuse, l'exploitation agricole et horticole de ces sols nécessite une irrigation soutenue dans un contexte d'accès aux ressources en eau de plus en plus restreint. Dans cet article, les auteurs font un point critique des différentes stratégies d'économie d'eau en irrigation menées au cours des dernières années, avec pour certaines expériences innovantes des résultats plus ou moins concluants liés notamment aux épisodes de sécheresses récurrents de 2018 et 2019.

D

ans le land de Brandebourg, situé à l'est de l'Allemagne, un bilan hydrique climatique négatif durant la période de végétation se surajoute à la texture sablonneuse de la plupart des sols. Un nombre croissant d'exploitants agricoles investissent donc dans de nouvelles infrastructures d'irrigation ou réhabilitent d'anciennes infrastructures, construites sous l'ex-République démocratique allemande (RDA). À ce jour, environ deux pour cent de terres arables du land sont irriguées principalement pour la production de pommes de terre, de légumes de plein champ, de maïs, de blé d'hiver et d'autres céréales. Comme dans les autres lands d'Allemagne, réaliser des économies d'eau en irrigation s'avère de plus en plus important, notamment en raison de l'augmentation de la demande globale en eau de l'agriculture et de l'horticulture et de l'approvisionnement limité ou localement en baisse des nappes phréatiques.

En 2016, nous avons lancé un Partenariat européen d'innovation (PEI) avec l'objectif de développer une solution simple pour piloter une irrigation durable et de précision. Dans l'exploitation d'un de nos partenaires, nous avons alors sélectionné un champ d'environ 30 ha, irrigué par un pivot central. Pour le projet, nous avons pourvu deux travées de la machine d'un système d'irrigation à débit variable qui consiste en des vannes pour réguler la pression de l'eau dans chaque asperseur et une unité de contrôle séparée.

L'irrigation de précision n'est utile que lorsque les conditions du site ou sa gestion varient au sein d'un même champ. Dans le land de Brandebourg, l'hétérogénéité du sol est principalement due à la variation des sédiments glaciaires et fluvio-glaciaires et à leur transport ultérieur. Par exemple, la présence ou l'absence d'un horizon limoneux dans des sables, par ailleurs purs, peut déterminer la disponibilité en eau dans le sol pour les plantes dans la zone des racines (photo 1).

En vue de cartographier cette variation, nous avons échantillonné le sol après en avoir effectué une étude de détection proximale. Tout d'abord, nous avons réalisé une cartographie géoélectrique avec un système de cartographie mobile afin d'enregistrer, sur un maillage systématique, la résistance électrique apparente à des profondeurs de sols variables. Cette opération a été suivie d'une étude intensive du sol.

L'analyse statistique de ces données a révélé quatre zones de gestion de l'irrigation (ou ZGI), qui sont basées

sur une carte de la capacité de rétention en eau du sol pour les plantes (figure 1). Afin de déterminer le moment et la quantité d'eau nécessaire pour chaque ZGI et pour chaque jour durant la saison d'irrigation, nous avons utilisé le modèle « *Irrigama steering* », modèle d'humidité du sol et d'évapotranspiration (connu sous le nom de BEREST dans une version antérieure) couplé à un module de pilotage de l'irrigation. Les données d'entrée du modèle comprennent les conditions climatiques actuelles, les prévisions météorologiques ainsi que les paramètres du sol et des plantes. La recommandation pour chaque zone de gestion est traduite en une carte d'application qui est ensuite transférée à l'unité de contrôle du pivot (figure 1).

Dans le cadre de notre projet, nous avons déjà testé l'irrigation de précision sur notre champ d'essai en 2018 et 2019. En 2018, lorsque l'Allemagne et presque toute l'Europe ont souffert d'une grave sécheresse agricole, le champ a été semé avec du maïs d'ensilage. La demande globale en eau d'irrigation était très élevée (278 à 287 mm), quelle que soit la zone de gestion, car le fort potentiel de transpiration l'emportait sur les différences de la capacité de stockage de l'eau du sol. En d'autres termes, chaque goutte d'eau était transpirée immédiatement. Il n'est donc pas surprenant que la différence de besoins en eau d'irrigation entre les zones soit très faible et limitée au début de la saison. Au total, l'irrigation de précision du maïs a permis d'économiser moins de 1 % de l'eau en 2018.

1 Betteraves endommagées plantées sur un sol entièrement sablonneux dans le voisinage direct de cultures poussant normalement sur du sable avec un sous-sol argileux.



© R.Schlepphorst

En 2019, année également très sèche, le champ a été semé avec du blé d'hiver. Le volume d'eau utilisée pour l'irrigation variait entre 174 à 175 mm. Les variations de besoin en eau d'irrigation entre les ZGI étaient une fois de plus minimales et limitées au début de la saison ; en conséquence, l'irrigation de précision n'a de nouveau généré que des économies d'eau inférieures à 1 % de l'eau d'irrigation. Au cours de la même année, nous avons également testé une stratégie d'irrigation déficitaire régulée qui prévoit une situation de stress hydrique avant que ne soit pratiquée l'irrigation. Grâce à cette stratégie, il a été possible de réaliser des économies d'eau à hauteur de 15 %, ce qui en fait une alternative intéressante à une irrigation complète, surtout lorsque la disponibilité de l'eau est limitée.

Comme la quantité des données de terrain est limitée, nous avons utilisé notre modèle de pilotage de l'irrigation pour simuler les besoins en eau d'irrigation pour une rotation de cultures sur douze ans composée de maïs d'ensilage, de blé d'hiver, de pois fourrager et de pomme de terre. Ces espèces ont été cultivées virtuellement dans le même champ que celui utilisé pour les essais pratiques, c'est-à-dire dans les mêmes conditions locales de climat et de sol. Les résultats ont révélé que les économies réalisées grâce à l'irrigation de précision varient considérablement d'une culture à l'autre et d'une année à l'autre pour une culture donnée. En ce qui concerne les variations d'une année à l'autre, des économies plus importantes sont souvent réalisées durant les années plus humides, et vice-versa. Comme mentionné plus haut, cela est probablement dû à l'interaction entre la transpiration potentielle et le stockage de l'eau dans le sol, celui-ci n'étant important que dans les situations où le sol a atteint ou presque sa capacité de rétention au champ. Globalement, les économies potentielles simulées de l'irrigation de précision sont plutôt limitées et souvent inférieures à 10 %.

Nous avons également simulé les potentiels d'économies d'eau pouvant être réalisées par le biais de notre stratégie d'irrigation déficitaire : bien que le potentiel d'économies varie selon les cultures et les années, elles se situent toujours au-delà de 10 % et dans certains cas peuvent atteindre 50 %. Il est évident que cela a un coût : chaque millimètre d'eau appliquée en irrigation au bon moment est converti en biomasse et donc en rendement. Dans le cadre de notre recherche, lors de notre expérimentation de deux ans sur le terrain, nous avons également évalué les stratégies d'irrigation sur le plan économique. Nous avons constaté que quelles que soient la culture et la zone de gestion de l'irrigation, l'irrigation conduit toujours à un accroissement du rendement. Mais lorsque les coûts d'irrigation sont aussi élevés que dans notre cas, cette dernière n'est pas toujours rentable. Dans le cadre de notre expérimentation, l'irrigation uniforme a toujours produit de meilleurs résultats que l'irrigation de précision, ce qui n'est pas surprenant si l'on considère les faibles économies en eau (et par conséquent en énergie) comparé au coût élevé des équipements additionnels requis. Avec l'irrigation déficitaire du blé d'hiver en 2019, nous avons observé une baisse du rendement par rapport à la technique d'irrigation complète (rendement en grains, irrigation complète : 5,1 Mg/ha ; rendement en grains, irrigation déficitaire : 4,4 Mg/ha ; rendement en grain en l'absence d'irrigation : 2,2 Mg/ha). Il est intéressant de noter que l'effet sur le rendement observé de l'irrigation déficitaire par rapport à l'irrigation complète était plus prononcé dans la ZGI où les conditions du sol étaient défavorables (ZGI, figure 1), qui pourtant semble bénéficier dans une plus large mesure d'une irrigation

complète que les zones ayant une plus grande capacité de rétention d'eau. En moyenne, l'irrigation complète et l'irrigation déficitaire se sont avérées rentables dans ce cas. De plus, nous sommes partis de l'hypothèse selon laquelle dans les régions où les coûts en eau sont bien plus élevés que ceux relatifs à notre étude (0,115 euros/m³), toutes les stratégies d'irrigation mentionnées plus haut produiront d'autres résultats économiques, au moins pour l'irrigation déficitaire.

En résumé, nous avons obtenu les résultats suivants :

- d'infimes économies en eau avec une irrigation à taux variable (de précision) par rapport à une irrigation uniforme ;
- les années où les précipitations sont faibles en cours de saison, il est difficile de réaliser des économies en eau au moyen de l'irrigation de précision car c'est la transpiration potentielle qui dicte les besoins en irrigation. Aucun bénéfice économique de l'irrigation de précision n'a été observé dans le cadre de notre étude en raison du déséquilibre entre le coût élevé des équipements et les faibles économies en eau et en énergie ;
- des économies plus importantes pourraient être possibles si les différences de sol à l'intérieur du champ étaient plus importantes que dans notre champ d'essai ;
- un potentiel d'économie d'eau plus important grâce à l'irrigation déficitaire, mais une stratégie optimale reste à établir.

En définitive, dans le cadre de la réalisation d'une irrigation durable en agriculture, il est tout aussi important d'investir dans un équipement d'irrigation adéquat, d'utiliser des variétés de cultures résistantes à la sécheresse et d'utiliser des systèmes d'aide à la décision pour le pilotage de l'irrigation. ■

Les auteurs

Beate ZIMMERMANN et Rainer SCHLEPPHORST

Research Institute for Post-Mining Landscapes e.V.,
Brauhausweg 2, D-03238 Finsterwalde, Allemagne.

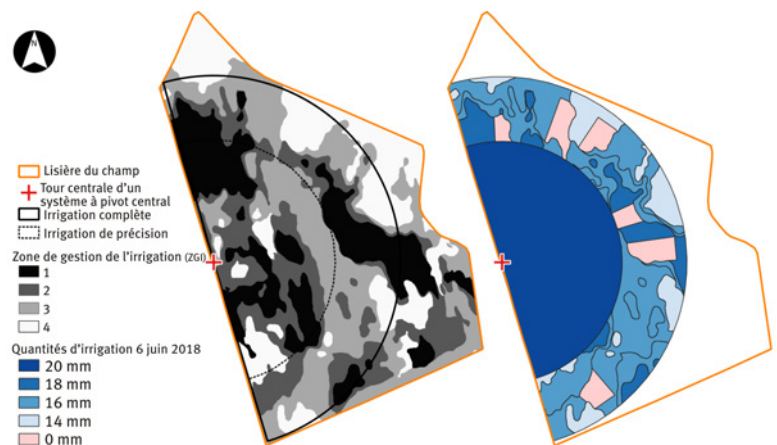
✉ b.zimmermann@fib-ev.de / ✉ r.schlepphorst@fib-ev.de

Veikko JUNGHANS

Universität Humboldt de Berlin,
Unter den Linden 6, 10117 Berlin, Allemagne.

✉ veikko.junghans@agrar.hu-berlin.de

❶ À gauche : carte des zones de gestion d'irrigation. ZGI 1 a une capacité moyenne en rétention d'eau de 59 mm dans le voisinage des racines, alors que dans la zone 4, cette capacité se chiffre à 75 mm. À droite : illustration d'une carte d'application. L'irrigation de précision est possible pour une partie de la surface irriguée (longueur de deux travées), site sur lequel les surfaces non-irriguées de référence sont aussi situées.



Focus

Économie d'eau pour un périmètre irrigué gravitaire : défis et problématiques de la Vale do Lis, Portugal

Le périmètre irrigué de la Vale do Lis situé dans le centre côtier du Portugal est administré par une association d'usagers qui gère l'exploitation et l'entretien des principales infrastructures de pompage et d'adduction de l'eau vers les parcelles. Dans le cadre d'un projet soutenu par le partenariat européen d'innovation agricole, une étude menée en collaboration avec les agriculteurs et focalisée sur les performances du réseau d'approvisionnement collectif a permis d'identifier les pistes d'actions prioritaires pour réaliser des économies d'eau en conciliant développement rural et durabilité environnementale et économique.

Face aux changements globaux, la société exhorte l'agriculture irriguée à des économies d'eau par la réduction de la consommation d'eau (Harmel *et al.*, 2020). Maintenir ou accroître la production agricole avec une quantité d'eau réduite est le défi majeur à relever. Cela nécessite une adaptation de l'agriculture irriguée par le biais de différentes technologies et de pratiques compatibles avec le savoir-faire des exploitants agricoles et la durabilité économique de leurs exploitations (Perry *et al.*, 2009). Cette dernière question est particulièrement pertinente dans le cas des périmètres irrigués collectifs car ils jouent un rôle décisif dans l'agriculture mondiale, et notamment dans le cas du Portugal, pour assurer cette durabilité socio-économique. La performance du système de distribution d'eau n'est pas seulement mesurée en fonction de son efficacité hydraulique pour acheminer l'eau ; le système de transport et de distribution de l'eau hors exploitation doit en effet fournir l'eau selon des critères adéquats, fiables et équitables, ce qui constitue une condition préalable à une bonne gestion de l'eau et à la productivité des terres (Playán *et al.*, 2018).

La question des économies d'eau sur un périmètre irrigué est complexe et s'avère un enjeu de taille car cet objectif devrait être atteint en maintenant l'irrigation dans la zone, et, si possible en augmentant les revenus des agriculteurs. Cela implique d'accroître le rendement de

l'eau et des terres, avec des conditions de consommation d'énergie acceptables et, comme souligné plus haut, une distribution de l'eau équitable et satisfaisante dans le système du réseau collectif. Les systèmes d'adduction par gravité alimentés par les eaux de surface ne permettent pas d'éviter totalement les pénuries d'eau, sauf par des réservoirs en amont permettant de contrôler le volume d'eau disponible pour l'irrigation en été. Pour de telles périodes de pénurie, il est nécessaire d'adopter des pratiques de gestion d'eau spécifiques pour en optimiser l'équité (Frisvold *et al.*, 2018). Afin de faire face aux risques encourus suite à un manque d'eau d'irrigation, les priorités en matière de gestion sont concentrées sur les économies d'eau en exploitation et hors exploitation ainsi que sur la réutilisation de l'eau en aval ; on peut notamment mentionner le pompage des fossés, ou une utilisation plus efficace de l'eau du sol ou de l'eau souterraine récupérée par capillarité.

Cette étude présente les résultats du Groupe opérationnel de gestion de l'eau de la Vale do Lis (RRN, 2020), tels qu'intégrés dans le Partenariat européen d'innovation agricole (PEI-AGRI). L'étude a pour objectifs le suivi d'un réseau collectif de distribution et de la gestion de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation, en évaluant les lignes directrices et procédures nécessaires pour réaliser des économies d'eau dans un contexte d'amélioration du développement rural et de durabilité environnementale et économique.

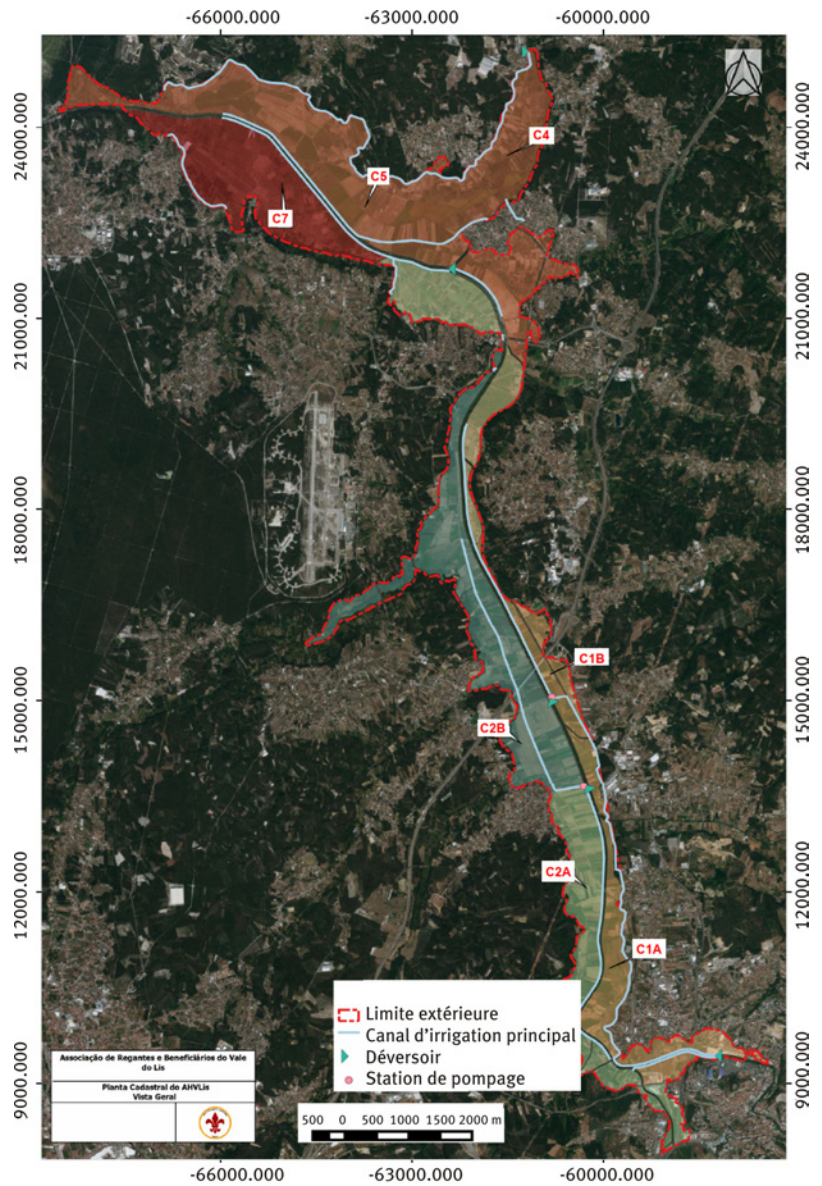
Zone d'étude et méthodologie

Le District de la Vale do Lis (LVID) dispose d'un système d'adduction par gravité alimenté par le fleuve Lis et ses affluents, renfloué par le pompage de l'eau des rivières et des fossés de drainage (figure 1). Il s'agit d'un périmètre irrigué public géré par une association d'usagers de l'eau (AUE), localisée dans le centre côtier du Portugal (coordonnées 39°51'22.1" N 8°50'56.1" O). L'AUE est une association d'exploitants agricoles, de propriétaires ou de locataires de parcelles agricoles situées dans le périmètre d'irrigation ; l'association se charge de gérer les principales installations hydrauliques, les déversoirs, les stations de pompage, les canaux, les ouvrages de prise d'eau, notamment tout ce qui concerne leur fonctionnement et leur entretien. La zone couvre une superficie totale d'environ 2 000 ha, et les cultures principales sont le maïs fourrage, les graminées fourragères, les cultures horticoles, les vergers et le riz (la figure 2 présente quelques aspects de l'approvisionnement en eau, de l'irrigation en exploitation et des cultures du LVID). Les sols, de qualité agricole supérieure, sont principalement des alluvions récents, mais certains sont mal drainés et présentent des risques d'engorgement et de salinisation, surtout dans les zones en aval. La structure des propriétés agricoles en exploitation est en majorité caractérisée par de petites parcelles d'une taille moyenne de 0,20 ha (Ferreira *et al.*, 2020). Les infrastructures hydrauliques assurent la protection du périmètre de drainage par le biais de collecteurs en pente et de fossés, l'approvisionnement en eau d'irrigation grâce à un système d'adduction d'eau, et le drainage des champs basé sur un réseau de fossés. L'eau est fournie à travers un système de distribution à canaux ouverts en provenance de déversoirs placés le long du fleuve Lis et de ses affluents ; il faut noter que la longueur du réseau primaire est d'environ 44,5 km, et que l'eau est également obtenue par le pompage des fossés de drainage.

Le réseau d'adduction et de distribution du périmètre irrigué est subdivisé en secteurs d'alimentation, qui comprennent chacun un canal principal, alimenté par gravité par une dérivation du fleuve à partir d'un déversoir. Durant la période de pic pour l'irrigation, les zones irriguées en aval de certains secteurs ne sont pas pleinement alimentées. Afin de surmonter ce problème, la recharge en eau est pompée du fleuve ou de fossés de drainage. Les secteurs d'alimentation sont les éléments majeurs du système opéré par l'AUE qui contrôle l'arrivée d'eau en provenance du déversoir, le pompage de la recharge, ainsi que l'alimentation vers le réseau d'irrigation secondaire constitué de petits canaux en terre ou avec revêtement pour distribuer l'eau vers les prises d'eau anti-incendie des champs. Cette composante secondaire du réseau d'irrigation est gérée par un groupe d'exploitants agricoles locaux en concertation avec l'AUE. Les principaux problèmes rencontrés se rapportent à la pénurie d'eau, surtout pendant les années de sécheresse, aux risques environnementaux relatifs à la salinisation des sols et à l'impact économique résultant du pompage à des fins d'irrigation à partir du système de drainage, et aux pertes en rendement en découlant. Le manque de mécanismes d'automatisation pour contrôler les niveaux d'eau dans les canaux du réseau entraîne

un dysfonctionnement et une charge de main d'œuvre élevée, qui est en partie allégée grâce à la participation des exploitants agricoles au fonctionnement des réseaux principaux et secondaires.

1 Localisation des secteurs d'approvisionnement en eau dans le périmètre irrigué de la Vale do Lis (source : Association des usagers de l'eau (AUE) de la Vale do Lis, 2020).



2 Zone irriguée et cultures par secteurs, en 2018, dans le District de la Vale do Lis.

Secteur	C1A	C1B	C2A	C2B	C4	C5	C7	Total
Zone totale, ha	175,6	104,4	189,7	286,2	418,4	2 017,6	257,1	1 639
Zone, ha	114,2	82,8	159,5	214,7	292,8	166,1	205,7	1 236
Zone irriguée, %	65	80	85	75	70	80	80	75,5
Maïs, %	20	18	43	33	61	60	9	38,4
Pâturages, %	48	30	7	24	29	10	77	32,5
Horticulture, %	5,5	13	14,5	13	5	0	0	6,7
Riz, %	0	5	0	15	5	30	1	8,3
Vigne, %	20	15	15	15	0	0	3	7,9
Fruits, %	6,5	19	20,5	0	0	0	10	6,2

► Au sein du LVID, la technologie dominante en matière d'irrigation des exploitations est l'irrigation de surface, à la raie ou par submersion avec bassins nivelés ; elle est essentiellement pratiquée pour le maïs fourrage et les pâturages permanents. Dans certains cas, elle se caractérise par un mauvais nivellement du sol et une mauvaise alimentation en eau par un canal sans revêtement, ce qui en réduit l'efficacité ; cependant, le nivellement de précision au laser est réalisé sur les champs plus vastes permettant ainsi une grande amélioration de l'efficacité. Le maïs, les pâturages et le riz constituent la majorité de la zone cultivée (79,3 %) (tableau 1). Les systèmes d'irrigation sous pression revêtent une importance de plus en plus grande avec le pompage autonome. Ces systèmes comportent notamment l'irrigation par goutte-à-goutte

ou par micro asperseurs, système le plus représentatif utilisé pour les arbres fruitiers, l'horticulture et les pépinières, et l'irrigation par aspersion, y compris au pivot, utilisée pour le maïs, les prairies et l'horticulture. La méthodologie de suivi des systèmes collectifs d'irrigation et d'approvisionnement en eau se calque sur la méthodologie présentée par Replogle *et al.* (2007), y compris toutes les observations des pratiques opérationnelles et le comptage de l'eau en sortie du circuit d'approvisionnement, en vue d'évaluer l'eau utilisée pour l'irrigation et le niveau d'énergie consommée dans les stations de pompage. Les données mesurées les plus pertinentes sont celles qui portent sur le volume de rejets sur chaque secteur. À cette fin, la méthode de vitesse d'écoulement d'une section du canal a été utilisée

2 Vue aérienne: a) vanne/barrage gonflable (au secteur d'approvisionnement C7) ; b) canal principal avec revêtement (secteur C2B) ; c) canal secondaire et champs irrigués en surface (secteur C7) ; d) irrigation des sillons à partir d'un canal en terre (secteur C5) ; e) champs irrigués par aspersion à pivot mobile (secteur C1A) ; f) champ de poivrons avec système d'irrigation goutte à goutte (secteur C1B).



(figure 3a), où les vitesses ponctuelles ont été mesurées avec un courantomètre électromagnétique, une fois par semaine environ, permettant ainsi de déterminer, sur une base temporelle de dix jours, le volume entrant pour le secteur. Certains secteurs disposent de données sur la recharge par pompage. La méthode du bilan hydrique a été appliquée aussi bien à l'échelle du secteur que du champ selon les procédures présentées par Gonçalves *et al.* (2020), la teneur en humidité du sol étant évaluée au moyen de la méthode TDR pour *Time Domain Reflectometry* (figure 3b). Les données météorologiques et de coefficients culturaux sur dix jours sont présentées au tableau 2 et sont tirées du rapport 56 de la FAO – *Food and Agriculture Organization* (Allen *et al.*, 1998).

Les indicateurs de performance sur lesquels s'est basée l'étude sont l'allocation d'eau d'irrigation TIA – *Total Irrigation Allocation*), résultat de la somme de l'eau distribuée par gravité (GIA – *Gravity Irrigation Allocation*) et par pompage (PIA – *Pump Irrigation Allocation*). L'efficacité globale de l'irrigation (GIE – *Global Irrigation Efficiency*) est la proportion de l'eau utilisée de manière bénéfique (NID – *Net Irrigation Demand*) par rapport à la TIA. La GIE est un indicateur intégratif d'efficacité qui établit un rapport entre le volume d'eau consommée par les cultures et l'eau utilisée pour l'irrigation à l'échelle des périmètres (Nam *et al.*, 2016). Elle prend en compte plusieurs processus d'écoulement de l'eau, y compris, l'eau prélevée de sa source et acheminée vers l'exploitation, l'application au champ, la consommation par les cultures ; ce qui permet d'obtenir une évaluation de l'efficacité de l'irrigation à l'échelle du périmètre.

Résultats et discussion

Les hydrogrammes sur l'approvisionnement en eau, y compris par gravité et par pompage, ont été comparés à la demande d'irrigation nette sur dix jours. Les résultats ont révélé que la période de pointe de l'approvisionnement était observée au moment de la vingtième séquence de dix jours (2 juillet) et la vingt-quatrième (3 août). La recharge par pompage s'effectue avec l'eau provenant des rivières ou des fossés, ce qui signifie un usage très efficace de l'eau ainsi qu'une récupération des nutriments des eaux de drainage. Comme il pourrait en résulter une salinité accrue et des risques pour la santé, la situation est suivie de près.

3 Vue des activités de suivi au champ :
a) taux de débit du canal avec courantomètre électromagnétique ;
b) teneur en humidité du sol avec la méthode TDR.

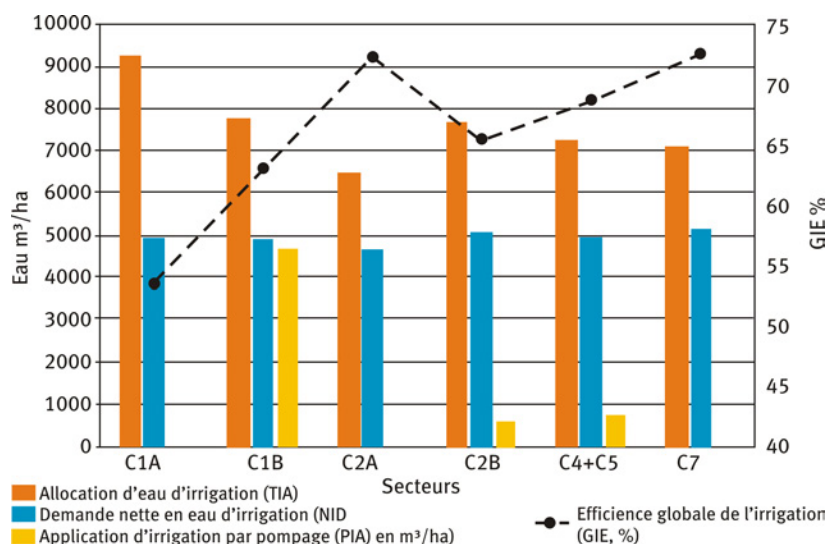


2 Données météorologiques et coefficients culturaux moyens par secteur, en 2018.

Mois	Mai					Juin				Juillet				Août			Septembre			Octobre	
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
ET ₀ , mm*	35,4	41,6	31,6	25,5	44,7	37,9	37,0	38,6	43,9	37,0	76,3	82,0	35,8	35,4	33,9	34,8	21,3	19,8			
P, mm*	0,0	0,5	26,0	38,9	1,8	17,6	1,7	0,1	0,1	0,7	0,3	0,7	0,9	0,0	0,1	0,0	27,4	42,9			
K _c * (C1A)	0,62	0,65	0,74	0,81	0,83	0,85	0,89	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,87	0,83	0,77	0,72	0,71	0,71			
K _c (C1B)	0,61	0,64	0,72	0,79	0,83	0,85	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,87	0,84	0,77	0,72	0,70	0,70			
K _c (C2A)	0,43	0,47	0,58	0,69	0,75	0,79	0,88	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,86	0,81	0,68	0,61	0,58	0,58			
K _c (C2B)	0,61	0,63	0,71	0,78	0,81	0,85	0,92	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,90	0,85	0,77	0,72	0,72	0,72			
K _c (C4)	0,53	0,53	0,59	0,66	0,72	0,78	0,91	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,91	0,84	0,72	0,66	0,66	0,66			
K _c (C5)	0,57	0,57	0,63	0,69	0,75	0,81	0,93	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,93	0,87	0,75	0,69	0,69	0,69			
K _c (C7)	0,79	0,80	0,82	0,84	0,86	0,87	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	0,85	0,83	0,82	0,82			

* Données de Leiria (www.ipma.pt), en périodes de 10 jours (décompte à partir du début de l'année) ; ET₀, évapotranspiration de référence ; P, précipitations ; K_c, coefficient culturaux par secteurs : C1A, C1B, C2A, C2B, C4, C5, C7.

④ Allocation d'eau d'irrigation (TIA), demande nette en eau d'irrigation (NID), et application d'irrigation par pompage (PIA) en m³/ha ; efficacité globale de l'irrigation (GIE, %) ; valeurs saisonnières, en 2018.



Les valeurs de la TIA pour la saison d'irrigation 2018 par secteur variaient entre 6 470 m³/ha et 9 220 m³/ha (C1A et C2A, respectivement), avec une moyenne de 7 400 m³/ha (figure ④). Les valeurs de la NID variaient entre un minimum de 4 670 m³/ha sur le secteur C2A et un maximum de 5 130 m³/ha sur le secteur C7 avec une moyenne de 4 950 m³/ha. La recharge d'alimentation par pompage correspond à 60 % dans le secteur C1B, 10 % dans les secteurs C4 et C5, et 7,6 % dans le secteur C2B, avec une moyenne générale de 9,3 %.

Les valeurs de GIE varient entre 0,53 et 0,72 (dans les secteurs C1A, C2A, et C7, respectivement), avec une moyenne de 0,69 (figure ④). De manière générale, on peut conclure que l'approvisionnement était adéquat, en fonction de la demande en matière d'irrigation en exploitation, avec une équité satisfaisante dans la distribution de l'eau grâce à une forte collaboration entre l'AUE et les exploitants agricoles. La valeur moyenne de la GIE, 0,69 (avec une fourchette comprise entre 0,53 et 0,72), est considérée comme satisfaisante (Wolters, 1992). Ces données n'ont cependant pas fourni suffisamment d'informations pour distinguer l'efficacité à l'échelle de l'exploitation de celle hors exploitation. D'une part, l'efficacité de transport dans les canaux principaux est assez variable, parfois inférieure à 70 %. D'autre part, les résultats observés de l'irrigation au champ permettent de conclure que l'efficacité de l'application à l'échelle de l'exploitation varie entre 65 % et 90 %, selon la méthode d'irrigation, du gravitaire au goutte-à-goutte. Comme mentionné précédemment, les pertes majeures en eau par ruissellement de surface présentaient des conditions permettant leur réutilisation en aval. En conséquence, ces pertes apparentes se sont en fait avérées avantageuses en matière d'utilisation d'eau car elles ont donné lieu à une efficacité accrue.

Les conditions pratiques dans le LVID mettent en évidence un ensemble de problèmes qui limitent les perfor-

mances optimales du système. Étant donné que le réseau d'approvisionnement est constitué de canaux ouverts, on note la présence d'un volume important de débris dans l'eau, à savoir la végétation aquatique qui prolifère en raison des nutriments contenus dans l'eau provenant des rivières. Ce problème se traduit par un travail manuel et un coût d'entretien élevés, ce qui en fait une activité peu efficace car le réseau est très vaste, représentant un total de 180 km, canaux secondaires inclus, et cette tâche n'est faisable que durant la période de non-irrigation. Il en résulte une réduction de la capacité d'évacuation des canaux, l'obstruction des grilles de drainage et une perte de précision dans la gestion de l'eau. Il faut du matériel pour débarrasser les débris, par exemple des grilles et des dégrilleurs, conçus pour filtrer l'eau d'irrigation.

Les actions visant à améliorer le système d'approvisionnement devraient prendre en compte les futurs thèmes de recherche suivants :

- un cadre pour l'élaboration de plans opérationnels de gestion de l'irrigation basés sur des outils de suivi, de simulation et de prévision afin d'intégrer des informations diverses, et fournir des données sur la distribution et la demande en eau pour opérationnaliser le système d'approvisionnement (Salomón-Sirolesi et Farinós-Dasí, 2019) ;
- des actions destinées aux exploitants agricoles et menées par l'AUE ainsi que d'autres parties prenantes afin d'améliorer l'irrigation sur le terrain en procédant à l'expérimentation et à la démonstration de différentes technologies les mieux adaptées aux conditions locales (Ricart *et al.*, 2018) ;
- la modernisation du système d'approvisionnement par canaux, en visant une plus grande fiabilité, efficacité et automatisation, en réalisant des économies d'eau, d'énergie et de coûts de la main-d'œuvre (Luppi *et al.*, 2018), et en s'appuyant sur des technologies de l'information et de la communication (Soto-García *et al.*, 2013).

Conclusions

La gestion de l'irrigation de l'eau est basée sur l'ajustement de la distribution en temps quasi réel, sur une période de temps très brève de quelques heures ou de quelques jours. Il est utile de préciser que l'indépendance relative de plusieurs secteurs en terme de distribution permet une prise de décision au plus près des usagers, favorisant ainsi plus de flexibilité dans la gestion. À son tour, l'esprit de coopération dont fait montre le groupe des usagers au niveau des canaux secondaires rend la gestion plus facile et favorise l'équité dans la distribution de l'eau, plus particulièrement pour ceux qui vivent en aval. Les fonctions d'arbitrage et de réglementation qui relèvent de l'AUE sont essentielles pour surveiller tout foyer de conflits possible entre les utilisateurs, et les minimiser au besoin. Cet exemple illustre de nombreux cas dans lesquels la gestion participative du périmètre irrigué a produit de bons résultats.

En conclusion, il faudrait mentionner des actions prioritaires pour consolider une gestion améliorée de l'eau, l'innovation technologique constituant un élément de modernisation du périmètre irrigué. Cette modernisation justifie le déploiement d'efforts multiples et de synergies de la part des parties prenantes, à savoir les exploitants agricoles, l'association des usagers de l'eau et les chercheurs. Le Groupe opérationnel en particulier, à travers le

suivi du système d'approvisionnement et l'évaluation de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation, en forte collaboration avec les exploitants agricoles, fournit l'information et la connaissance, permettant ainsi à l'AUE d'améliorer progressivement la gestion de l'eau dans le district. ■

Les auteurs

José M. GONÇALVES, Susana FERREIRA et Manuel NUNES
Institut Polytechnique de Coimbra, École supérieure d'Agriculture, 3045-601 Coimbra, Portugal.

✉ jmmg@esac.pt
✉ susana.ferreira@esac.pt
✉ mnunes@esac.pt

Rui EUGÉNIO et Henrique DAMÁSIO

Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Lis, Quinta do Picoto, Leiria, 2425-492 Souto da Carpalhosa, Portugal.

✉ eugenio-ru@sapo.pt
✉ hdamasio71@gmail.com

Isabel FERREIRA

Institut supérieur d'agronomie, Université de Lisbonne, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbonne, Portugal.

✉ isabelferreira@isa.ulisboa.pt

Remerciements

Projet du « Groupe opérationnel de gestion de l'eau de la Vale do Lis » (PDR2020-1.0.1-FEADER-030911 – Grupo Operacional para a gestão da água no Vale do Lis).

EN SAVOIR PLUS...

- ✉ ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998, *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO, Irrig. Drain. Pap. 56, FAO, Rome.
- ✉ FERREIRA, S., OLIVEIRA, F., SILVA, F.G., TEIXEIRA, M., GONÇALVES, M., EUGÉNIO, R., DAMÁSIO, H., GONÇALVES, J.-M., 2020, Assessment of Factors Constraining Organic Farming Expansion in Lis Valley, Portugal, *AgriEngineering* 2020, 3, p. 111-127, ✉ <https://doi.org/10.3390/agriengineering2010008>
- ✉ FRISVOLD, G., SANCHEZ, C., GOLLEHON, N., MEGDAL, S.B., BROWN, P., 2018, Evaluating Gravity-Flow Irrigation with Lessons from Yuma, Arizona, USA, *Sustainability*, 10, 1548, ✉ <https://doi.org/10.3390/su10051548>
- ✉ GONÇALVES, J.M., FERREIRA, S., NUNES, M., EUGÉNIO, R., AMADOR, A., FILIPE, O., DUARTE, I.M., TEIXEIRA, M., VASCONCELOS, T., OLIVEIRA, F., GONÇALVES, M., DAMÁSIO, H., 2020, Developing Irrigation Management at District Scale Based on Water Monitoring: Study on Lis Valley, Portugal, *AgriEngineering*, 2(1), p. 78-95, ✉ <https://doi.org/10.3390/agriengineering2010006>
- ✉ HARMEL, D., CHAUBEY, I., ALE, S., NEJADHASHEMI, A.P., IRMAK, S., DEJONGE, K.C., MANI, I., 2020, Perspectives on Global Water Security, *Transactions of the ASABE*, 63(1), p. 69-80, ✉ <https://doi.org/10.13031/trans.13524>
- ✉ LUPPI, M., MALATERRE, P.-O., BATTILANI, A., FEDERICO, V.D., TOSCANO, A., 2018, A multi-disciplinary modelling approach for discharge reconstruction in irrigation canals: The Canale Emiliano Romagnolo (Northern Italy) case study, *Water*, 10, ✉ <https://doi.org/10.3390/w10081017>
- ✉ NAM, W.-H., HONG, E.-M., CHOI, J.-Y., 2016, Assessment of water delivery efficiency in irrigation canals using performance indicators, *Irrig Sci*, 34, p. 129-143, ✉ <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0488-6>
- ✉ PERRY, C., STEDUTO, P., ALLEN, R.G., BURT, C.M., 2009, Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities, *Agricultural Water Management*, 96(11), p. 1517-1524, ✉ <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.05.005>
- ✉ PLAYÁN, E., SAGARDOY, J.A., CASTILLO, R., 2018, Irrigation governance in developing countries: Current problems and solutions, *Water*, 10(9), 1118, ✉ <https://doi.org/10.3390/w10091118>
- ✉ REPLOGLE, J.A., KRUSE, E.G., 2007, Delivery and distribution systems, in: HOFFMAN, G.J., EVANS, R.G., JENSEN, M.E., MARTIN, D.L., ELLIOT R.L. (Eds.), *Design and Operation of Farm Irrigation Systems* (2nd Edition), ASABE, St. Joseph, M.I., p. 347-391.
- ✉ RICART, S., RICO, A., KIRK, N., BÜLOW, F., RIBAS-PALOM, A., PAVÓN, D., 2018, How to improve water governance in multifunctional irrigation systems? Balancing stakeholder engagement in hydro-social territories, *Int. J. of Water Res. Develop.*, 35(3), p. 491-524, ✉ <https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1447911>
- ✉ RRN, Grupo Operacional para a Gestão da Água no Vale do Lis, ✉ <https://inovacao.rederural.gov.pt/2/81-grupo-operacional-para-a-gestao-da-agua-no-vale-do-lis>
- ✉ SALOMÓN-SIROLES, M., FARINÓS-DASÍ, J., 2019, A New Water Governance Model Aimed at Supply-Demand Management for Irrigation and Land Development in the Mendoza River Basin, Argentina, *Water*, 11, 463, ✉ <https://doi.org/10.3390/w11030463>
- ✉ SOTO-GARCIA, M., DEL-AMOR-SAAVEDRA, P., MARTIN-GORRIZ, B., MARTÍNEZ-ALVAREZ, V., 2013, The role of information and communication technologies in the modernisation of water user associations' management, *Comp. Electron. Agric.*, 98, p. 121-130, ✉ <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.005>
- ✉ WOLTERS, W., 1992, *Influences on the Efficiency of Irrigation Water Use*, ILRI publication, Wageningen, The Netherlands.



ÉCONOMIES D'EAU RÉALISÉES

Quel est le potentiel réel d'économie d'eau à la parcelle résultant du changement de matériel d'irrigation ou de l'adoption d'outils de pilotage dans un contexte donné ? Les scientifiques d'INRAE ont analysé plus de quatre-vingt-treize références d'essais expérimentaux de consommation d'eau pour apporter des éléments de réponse.

Dans les territoires, l'heure est à la transition agroécologique des systèmes irrigués autour de projets couplant pratiques agricoles de conservation des sols et techniques et/ou stratégies d'irrigation économes en eau.

Enfin, différents outils de pilotage de l'irrigation sont aujourd'hui opérationnels pour accompagner les décisions des exploitations dans leur pratique d'irrigation.

- 46 **La modernisation des systèmes d'irrigation en France : quelles économies d'eau possibles à l'échelle de la parcelle ?**
Claire SERRA-WITTLING, Bruno MOLLE et Bruno CHEVIRON
- 54 **Retour d'expérience – Transition agro-écologique des systèmes de culture irrigués innovants sur le territoire des Coteaux de Gascogne**
Kamal ABANNAR, Cyrielle MAZALEYRAT, Jean-Jacques WEBER, Élise AUDOUIN, Christophe BONILLO, Cyril Dejean, Geoffrey FROMENT et Jean-Marie LOPEZ
- 58 **Combinaison de modèles de bilan hydrique et d'indicateurs de stress hydrique pour le pilotage de l'irrigation Étude de cas au Portugal**
Maria Isabel FERREIRA, Vasco CARRILHO, Nuno CONCEIÇÃO, Sonia V. LOURENÇO et Goncalo F. LEAL
- 66 **Efficiency et optimisation de l'irrigation : le modèle Optirrig**
Bruno CHEVIRON
- 72 **Focus – Irré-LIS®, exemple d'outil d'aide à la décision en irrigation**
Sophie GENDRE

La modernisation des systèmes d'irrigation en France : quelles économies d'eau possibles à l'échelle de la parcelle ?

Quel est le potentiel réel d'économie d'eau à la parcelle résultant du changement de matériel d'irrigation ou de l'adoption d'outils de pilotage dans un contexte donné ?

Pour répondre à cette question, les auteurs de cet article ont compilé plus de quatre-vingt-treize références d'essais expérimentaux de consommation d'eau représentatifs d'un large éventail de conditions pédo-climatiques et de cultures en France métropolitaine. Leurs résultats montrent que les économies d'eau potentiellement réalisables en passant de l'aspersion à un système localisé d'irrigation sont limitées, voire impossibles, lors des années très sèches. Au contraire, le pilotage de l'irrigation à l'aide de sondes d'état hydrique du sol permet des économies d'eau moins dépendantes des conditions climatiques.

Quelles stratégies pour économiser l'eau en irrigation ?

En raison de la rareté de l'eau qui s'intensifie avec le changement climatique dans la plupart des pays, les économies d'eau deviennent de plus en plus d'actualité. La politique de l'Union européenne en matière de ressource en eau vise les économies et une gestion durable. Par l'intermédiaire du Fonds européen agricole pour le développement rural (FEADER), elle soutient les investissements dans des équipements qui améliorent l'efficacité de l'irrigation. Dans ce contexte, « un investissement dans l'amélioration d'une installation d'irrigation existante ou d'un élément d'une infrastructure d'irrigation n'est admissible que s'il ressort d'une évaluation *ex ante* qu'il est susceptible de permettre des économies d'eau d'un minimum compris entre 5 % et 25 %, selon les paramètres techniques de l'installation ou de l'infrastructure existante » (Union européenne – 2013 ; article 46, point 4).

Des économies d'eau d'irrigation peuvent être réalisées en réduisant les pertes, pertes dont la définition et l'estimation varient selon les approches (Seckler *et al.*, 2003 ; Jensen, 2007 ; Perry, 2007 ; Lankford, 2012 ; Van Halsema et Vincent, 2012). La première approche, liée au concept d'« efficacité classique », considère le

rapport entre l'eau utilisée de manière bénéfique par la culture (évapotranspiration) et l'eau fournie. La seconde, appelée approche « néoclassique », prend en compte la part de l'eau apportée potentiellement disponible pour une réutilisation en aval. L'approche classique est appropriée à l'échelle de la parcelle et considère que l'eau quittant la parcelle est perdue (Hsiao, 2007), tandis que l'approche néoclassique est pertinente pour la gestion de la ressource à l'échelle du bassin, car elle valorise les volumes d'eau drainée utiles pour la recharge des nappes (Richter *et al.*, 2017).

Dans le contexte réglementaire européen mentionné ci-dessus, les économies d'eau sont essentiellement considérées à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation, conformément à l'approche « d'efficacité classique ». Dans ce cas, l'ensemble du parcours de l'eau d'irrigation au niveau de la parcelle peut être décrit dans un « schéma en cascade » (Serra-Wittling et Molle, 2017) divisé en six étapes depuis l'entrée de la parcelle jusqu'aux racines des plantes : l'eau entrant dans la parcelle, l'eau appliquée (c'est-à-dire à la sortie de la buse ou du goutteur), l'eau atteignant la surface du sol, l'eau stockée dans la zone racinaire, l'eau réellement évapotranspirée, l'eau absorbée et réellement transpirée qui participe à l'élaboration du rendement des cultures (figure 1). Entre

chaque étape, des pertes d'eau d'irrigation peuvent se produire, à savoir les fuites dans le matériel, l'évaporation directe dans l'air et la dérive due au vent en aspersion, le ruissellement et le drainage liés à une application excessive ou non uniforme, l'eau résiduelle dans le sol après récolte représentant un stockage d'eau excessif, la transpiration des mauvaises herbes, l'évaporation du sol (pour une revue complète, voir Hsiao *et al.*, 2007). L'efficacité globale de l'irrigation est alors définie comme le rapport entre l'eau d'irrigation transpirée et l'eau d'irrigation entrant dans la parcelle.

Il existe plusieurs leviers pour économiser l'eau en limitant les pertes d'eau d'irrigation (BIO Intelligence Service, 2012 ; Jensen *et al.*, 2014), notamment la gestion des sols et des cultures (culture sans labour, paillage, gestion des mauvaises herbes), et l'amélioration de l'irrigation par les technologies (application efficiente de l'eau) et la gestion (pilotage, irrigation déficitaire).

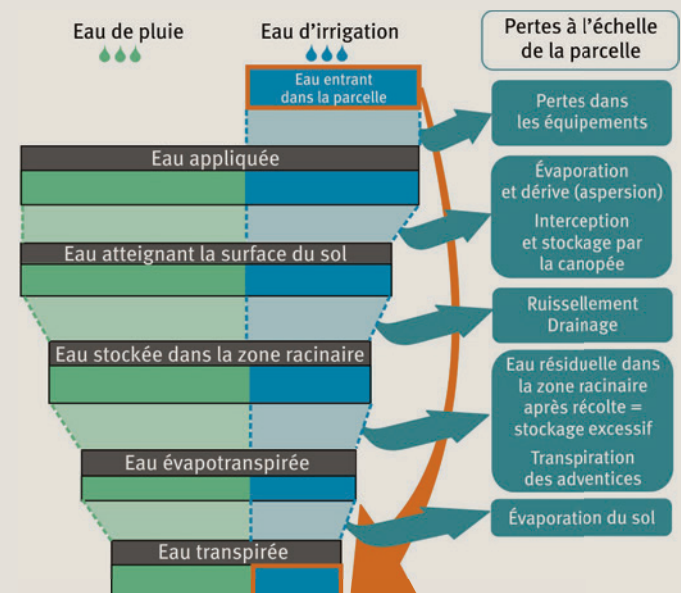
La modernisation de l'irrigation au niveau technologique peut être réalisée en ajoutant certains dispositifs à un système existant. Par exemple, un système d'irrigation à débit variable (VRI, pour *Variable Rate Irrigation*) peut être adapté sur pivots (Zhao *et al.*, 2017) ou un contrôleur peut être utilisé pour gérer les vitesses de rotation du canon sur un enrouleur (Ghinassi et Pezzola, 2014). Une autre façon de tirer parti de la technologie consiste à adopter des systèmes plus efficaces, c'est-à-dire à passer de l'irrigation gravitaire ou par aspersion à l'irrigation localisée (goutte-à-goutte de surface, goutte-à-goutte enterré ou micro-aspersion). Tous les systèmes localisés permettent d'éliminer la dérive et l'évaporation directe qui se produisent normalement en aspersion. Ils réduisent également le ruissellement et le drainage, car ils diminuent les quantités d'eau appliquées (généralement proches mais en dessous de la saturation du sol), permettent un meilleur contrôle de ces quantités et fournissent des débits plus faibles (en général inférieurs à la conductivité hydraulique saturée du sol). L'irrigation au goutte-à-goutte élimine également l'interception par la canopée. Le goutte-à-goutte enterré réduit considérablement l'évaporation du sol (Bonachela *et al.*, 2001). Enfin, l'amélioration de l'uniformité de la distribution spatiale de l'irrigation contribue également à une plus grande efficacité et à la réduction des pertes en eau, sauf dans des conditions spécifiques (pentes marquées, profondeurs ou types de sol inégaux) où il est préférable d'appliquer des doses différentes aux différentes parties des parcelles. En général, les systèmes d'irrigation localisée ne permettent de réaliser des économies d'eau que si une uniformité satisfaisante est obtenue. Citons quelques valeurs moyennes d'efficacité communément adoptées à l'échelle de la parcelle sur une saison culturale, tenant compte de l'évaporation directe, de la dérive, de l'interception par le couvert végétal, du ruissellement et des pertes par drainage (mais pas de l'évaporation du sol) : 65% (55 à 75%) pour l'enrouleur, 75% (60 à 85%) pour la couverture intégrale, 80% (75 à 90%) pour le pivot traditionnel, 85% (70 à 95%) pour la micro-aspersion et le goutte-à-goutte de surface, et 90% (75 à 95%) pour le goutte-à-goutte enterré (Howell, 2003).

Parmi les améliorations qui peuvent être apportées à la gestion de l'irrigation, on peut citer le choix de l'heure d'irrigation (jour ou nuit) (Molle *et al.*, 2012 ; Caverro

et al., 2016), l'irrigation déficitaire régulée (Geerts et Raes, 2009) et le pilotage de l'irrigation. Ce dernier consiste à ajuster la fréquence et les quantités d'irrigation selon une stratégie d'irrigation optimisée par des modèles (Evet et Tolk, 2009 ; Li *et al.*, 2018 ; Malik *et al.*, 2019, parmi beaucoup d'autres), ou selon les conditions climatiques et l'état hydrique de la plante (Jones, 2004) ou du sol. Les capteurs les plus couramment utilisés pour suivre le statut hydrique du sol sont les sondes capacitatives (Evet *et al.*, 2012) et les sondes tensiométriques (Bianchi *et al.*, 2017). Ces sondes sont utilisées pour piloter l'irrigation en fonction du statut hydrique réel du sol, ce qui permet d'éviter la sur-irrigation et, par conséquent, de réduire le ruissellement, le drainage et l'eau résiduelle dans le sol après la récolte.

Bien qu'il soit reconnu que l'amélioration de la technologie et de la gestion de l'irrigation est susceptible de générer des économies d'eau, dans la pratique, on sait peu de choses sur le potentiel d'économies d'eau que l'on peut réellement atteindre à l'échelle de la parcelle. L'objectif de cette étude était d'évaluer les économies d'eau d'irrigation réalisables en passant de l'aspersion à un système d'irrigation localisée ou en utilisant des sondes d'état hydrique du sol. Pour ce faire, nous avons utilisé le contexte français métropolitain comme cas d'étude et compilé toutes les études disponibles menées en France. Nous avons choisi de nous concentrer sur les économies d'eau réalisées grâce au changement de matériel d'irrigation ou grâce à l'adoption de sondes d'état hydrique du sol pour le pilotage de l'irrigation. Nous avons analysé comment ces économies d'eau sont influencées par le contexte climatique. De plus, une démarche de modélisation avec le modèle de culture Optirrig a servi à quantifier les pertes en eau d'irrigation et l'efficacité globale de l'irrigation à l'échelle de la parcelle.

1 Étapes du parcours de l'eau d'irrigation à l'échelle de la parcelle et pertes d'eau d'irrigation.



$$\text{Efficacité globale d'irrigation} = \frac{\text{Eau d'irrigation réellement transpirée}}{\text{Eau d'irrigation entrant dans la parcelle}}$$

Méthodologie : collecte de références sur les économies d'eau

Collecte de données

Nous avons compilé toutes les études disponibles, menées sur le territoire métropolitain français au cours des trente dernières années, afin de comparer la consommation en eau soit entre deux systèmes d'irrigation différents (aspersion ou système localisé), soit entre deux modes de pilotage différents (sans et avec sondes d'état hydrique du sol), mais toujours dans le même contexte (même année, même sol, même culture). Toutes ces études sont basées sur des essais expérimentaux de terrain réalisés par les chambres d'agriculture, les instituts techniques, les instituts de recherche, les stations expérimentales ou les organismes régionaux de gestion de l'eau. Elles ont été menées soit dans des stations expérimentales, soit par des agriculteurs encadrés par un conseiller technique en irrigation. Les données produites par ces études sont le plus souvent non publiées et se trouvent dans des rapports de littérature grise. Elles proviennent de vingt-cinq sites différents, principalement des régions françaises ayant les plus grandes surfaces irriguées (figure 2), et concernent les grandes cultures, l'arboriculture et le maraîchage. Au total, quatre-vingt-treize références de consommation d'eau d'irrigation à l'échelle de la parcelle ont été collectées. Soixante-dix d'entre elles concernent la comparaison entre deux systèmes d'irrigation : un système d'aspersion (canon enrouleur, rampe sur enrouleur, pivot ou couverture intégrale) et un système localisé (goutte-à-goutte de surface, goutte-à-goutte enterré ou micro-asperseur). Vingt-trois références comparent la consommation d'eau de deux modes de pilotage : sans et avec sondes d'état hydrique

du sol. Aucune des données ne fait référence à l'irrigation gravitaire, celle-ci n'étant plus très répandue en France. Chaque référence permet d'évaluer l'économie d'eau réalisée entre le système le plus consommateur d'eau et celui qui en consomme le moins. Nous n'avons sélectionné que les données décrivant les économies d'eau réalisées sans perte significative de rendement ou de qualité : une réduction de rendement allant jusqu'à 10% a été tolérée. L'ensemble de la base de données est accessible dans l'article de Serra- Wittling *et al.* (2019).

Création de la base de données

Chaque référence contient :

- des données générales concernant le contexte agro-pédo-climatique,
- des données spécifiques décrivant les situations comparées (deux systèmes d'irrigation différents ou deux modes de pilotage différents, c'est-à-dire sans et avec sonde d'état hydrique du sol), les quantités d'eau d'irrigation et les rendements associés,
- des variables calculées à partir des données brutes précédentes.

Données générales

Année, localisation, réserve utile du sol (RU), type de culture (grande culture, maraîchage, arboriculture), précipitations cumulées (P) et évapotranspiration de référence de Penman-Monteith (ET_o) cumulée. P et ET_o ont été obtenues soit à partir de la station météorologique du site expérimental lui-même, soit à partir de la station météorologique la plus proche d'INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) ou de Météo France. P et ET_o sont cumulées sur la saison culturale, c'est-à-dire depuis la date moyenne de semis (ou de plantation ou de mise à fruit) jusqu'à la date moyenne de récolte.

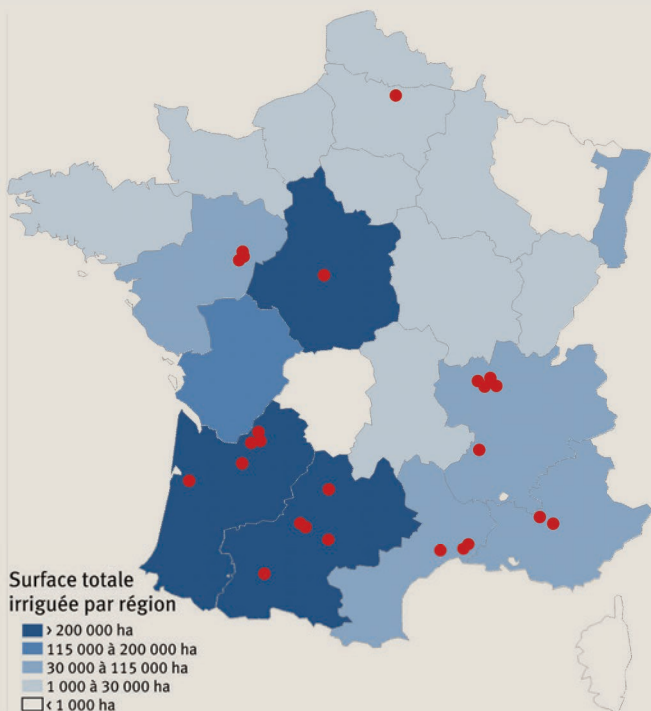
Données spécifiques de comparaison entre deux situations d'irrigation

Les systèmes d'irrigation 1 et 2 sont comparés (le système 1 étant le plus consommateur d'eau, et le système 2 le moins consommateur). Dans tous les cas, le système d'irrigation 1 est un système d'irrigation par aspersion (canon enrouleur, rampe sur enrouleur, pivot ou couverture intégrale) et le système d'irrigation 2 est un système d'irrigation localisée (goutte-à-goutte de surface – GGS, goutte-à-goutte enterré – GGE ou micro-aspersion – MA). Deux systèmes de pilotage sont également comparés. Le premier est basé soit sur les pratiques traditionnelles des agriculteurs, soit sur les bulletins hebdomadaires de conseil en irrigation, soit sur des évaluations de l'évapotranspiration maximale (ETM), et n'utilise aucun dispositif de pilotage. Le second utilise des capteurs de sol (sondes tensiométriques ou capacitatives) pour ajuster la dose d'irrigation à la teneur en humidité du sol. Pour chaque système d'irrigation ou de pilotage, la quantité totale d'eau d'irrigation appliquée pendant la saison culturale avec le système 1 (Irr1) et le système 2 (Irr2) est enregistrée, ainsi que les rendements associés.

Variables calculées

Le déficit hydrique de la saison culturale (DH, sans unité) est calculé ainsi : $DH = ET_o / P$, où ET_o (mm) est l'évapotranspiration potentielle cumulée et P (mm) le cumul des précipitations sur la saison culturale. Les valeurs de DH

2 Surfaces irriguées en France (2010) et localisation des vingt-cinq sites expérimentaux sur lesquels les données ont été collectées.



supérieures à 1 représentent des situations avec un déficit hydrique effectif pour les cultures, nécessitant donc une irrigation. Les valeurs de DH égales ou inférieures à 1 ne nécessitent généralement pas d'irrigation et ne sont donc pas prises en compte dans cette étude. DH doit être considéré comme un indicateur de la sécheresse climatique, mais pas comme un besoin quantifié d'eau d'irrigation.

L'économie d'eau (EE en %) obtenue en utilisant le système 2 par rapport au système 1, ou en utilisant un capteur de sol par rapport à aucun capteur de sol, est évaluée par $[(Irr1 - Irr2) / Irr1] \times 100$, où Irr1 (mm) et Irr2 (mm) sont les quantités totales d'eau d'irrigation appliquées pendant la saison culturale avec les systèmes 1 et 2 respectivement. On distingue les économies d'eau obtenues en comparant deux systèmes d'irrigation (EE-SI) et celles obtenues en comparant deux modes de pilotage, avec et sans sondes d'état hydrique du sol (EE-SP).

Modélisation des pertes en eau

Modèle de culture Optirrig

Le module « Efficience » récemment développé du modèle Optirrig permet de simuler les volumes d'eau d'irrigation à chaque étape du parcours de l'eau d'irrigation, du canal aux racines des plantes. Dans cette étude, il a été utilisé au niveau de la parcelle (voir également l'article de Cheviron et al, 2020, dans ce même numéro). Il évalue l'efficience globale de l'irrigation (rapport entre l'eau d'irrigation transpirée et l'eau d'irrigation entrant dans la parcelle) ainsi que les volumes successifs d'eau d'irrigation perdus depuis l'entrée de la parcelle jusqu'aux racines (évaporation directe et dérive due au vent en aspersion, drainage, évaporation du sol et eau résiduelle du sol après la récolte).

Étude de cas

L'essai expérimental a été réalisé avec du maïs, en 2009, sur une parcelle agricole de la plaine de l'Ain (30 km à l'est de Lyon, France). Le sol alluvial a une réserve utile de 60-80 mm. L'irrigation a été pilotée à l'aide de tensiomètres. Le système d'irrigation était un enrouleur avec un diamètre du tube de 100 mm et une longueur de 400 m. Pendant la saison culturale, sept irrigations ont eu lieu avec des hauteurs d'eau de 30 à 35 mm. Le système localisé était un goutte-à-goutte enterré (GGE)

avec un espacement des goutteurs de 30 cm, un débit de 1,14 l. h⁻¹, un espacement latéral des lignes de 150 cm et une profondeur de 50 cm. Cinquante-cinq irrigations de 2,5 à 3,75 mm ont été réalisées. Les volumes d'irrigation ont été suivis pour les deux systèmes pendant la saison, ainsi que les rendements. On a fait l'hypothèse qu'aucune perte d'eau d'irrigation ne se produit dans la parcelle, de sorte que toute l'eau entrant dans la parcelle s'écoule par la buse ou le goutteur. Les quantités d'eau d'irrigation perdues ont été simulées à l'aide du module « Efficience » d'Optirrig.

Résultats et discussion : évaluation des stratégies d'économie d'eau

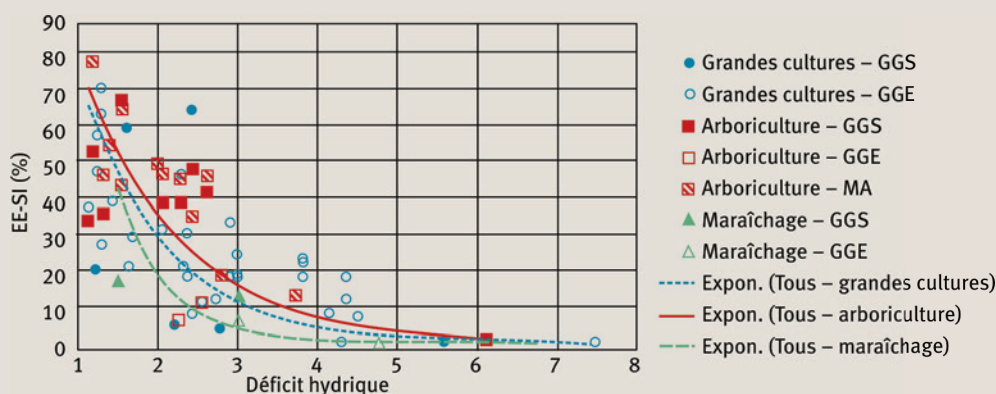
Économies d'eau réalisées grâce aux systèmes d'irrigation (EE-SI)

Comme le montre la figure 3, l'économie d'eau observée entre deux systèmes d'irrigation (EE-SI), avec le goutte-à-goutte de surface (GGS), le goutte-à-goutte enterré (GGE) ou la micro-aspersion (MA) au lieu de l'aspersion, varie de 0 à 77 %, ce qui témoigne d'une grande variabilité.

Les systèmes d'irrigation localisée (GGS, GGE ou MA) peuvent, dans une plus ou moins grande mesure, contribuer à réduire la quantité d'eau appliquée pendant la saison culturale par rapport aux systèmes d'aspersion (canon enrouleur, pivot, couverture intégrale). Ces économies d'eau s'expliquent par la plus grande efficience d'application des systèmes localisés qui réduisent les pertes se produisant en aspersion par dérive et évaporation directe, interception du couvert végétal, ruissellement, drainage et évaporation du sol. Les économies d'eau d'irrigation peuvent également être attribuées à l'utilisation plus efficace de l'eau de pluie avec les systèmes localisés. En effet, étant donné que l'intervalle entre les irrigations par aspersion varie entre trois et dix jours (selon la région, le climat, le sol), et que les prévisions météorologiques sont beaucoup moins précises au-delà de trois-quatre jours, des précipitations peuvent se produire entre deux irrigations par aspersion, entraînant ainsi un gaspillage d'eau d'irrigation.

EE-SI (%) tend à diminuer lorsque le déficit hydrique augmente (figure 3). Il apparaît que, pour un déficit

3 Économies d'eau (EE-SI) réalisées entre un système d'aspersion et un système d'irrigation localisée, en fonction du déficit hydrique de la saison culturale. Courbes exponentielles (Expon.) pour chaque type de culture. GGS : goutte-à-goutte de surface, GGE : goutte-à-goutte enterré, MA : micro-aspersion.



► hydrique supérieur à 4,5, EE-SI est toujours nul, quel que soit le système d'irrigation ou le type de culture. Cela peut s'expliquer par la réduction des pertes par drainage lors de l'aspersion en année sèche. Lors des années humides, l'eau de pluie peut remplir partiellement la réserve d'eau du sol, de sorte qu'une partie des quantités d'eau d'irrigation appliquées en aspersion peut être perdue par percolation profonde ou par stockage dans le profil à la fin de la saison, contrairement aux systèmes automatisés localisés où de petites quantités d'eau sont appliquées quotidiennement. Lors des années sèches, toute l'eau d'irrigation contribue à la reconstitution des réserves en eau du sol, de sorte qu'aucune perte ne se produit et que l'efficacité globale d'irrigation des systèmes d'aspersion augmente et se rapproche de celle des systèmes localisés, réduisant ainsi les économies d'eau observées entre les deux systèmes.

Économies d'eau réalisées grâce au pilotage avec sondes d'état hydrique du sol (EE-SP)

Dans tous les cas, les quantités d'eau sont plus faibles lorsque l'irrigation est gérée avec des sondes d'état hydrique sol. Les valeurs de EE-SP observées varient entre 8% et 68% (figure 4). En effet, les sondes de sol permettent de prendre, en temps réel, des décisions qui complètent les stratégies de pilotage, où les changements de dates et de doses d'irrigation sont effectués en fonction du statut hydrique réel du sol. Il en résulte une réduction de la sur-irrigation et donc une diminution des pertes dues au ruissellement, à la percolation profonde et à l'eau résiduelle du sol après la récolte. Les sondes de sol peuvent également contribuer à optimiser l'utilisation des précipitations, car l'irrigation peut être démarrée plus tard dans la saison et arrêtée plus tôt. Dans le cas de l'irrigation par aspersion, la première, et parfois aussi la dernière, irrigation de la saison, peut être supprimée, ce qui permet une économie d'eau consistante.

Contrairement à EE-SI, EE-SP ne semble pas dépendre des conditions climatiques car le déficit hydrique n'a pas d'effet significatif sur EE-SP. Comme le pilotage avec les

sondes de sol est basée non pas sur les quantités totales de précipitations depuis le début de la saison culturale, mais sur leur effet réel sur l'état hydrique du sol (tension ou teneur en eau), il est compréhensible que les économies d'eau liées au pilotage par sondes ne dépende pas du déficit hydrique de l'année. Cependant, il faudrait davantage de données pour confirmer cette tendance et des expériences complémentaires sont nécessaires pour vérifier si les sondes de sol sont susceptibles de permettre des économies d'eau lors des années d'extrême sécheresse ($DH > 4,5$).

D'où proviennent les économies d'eau observées ? Étude de cas

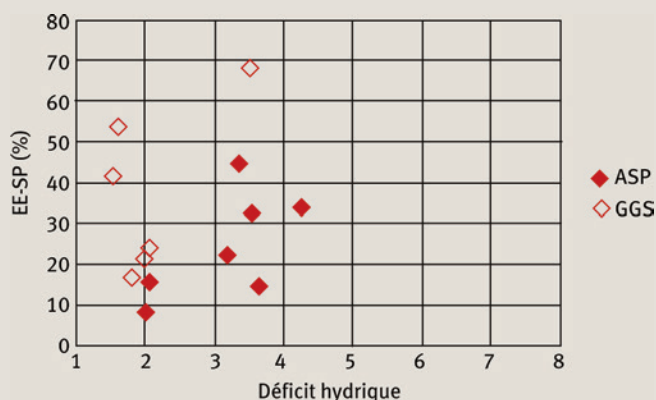
Les quantités d'eau d'irrigation appliquées sont de 230 et 153 mm pour l'aspersion et le GGE respectivement, de sorte que le GGE permet une économie d'eau de 34% par rapport à l'aspersion (EE-SI) (figure 5). Les rendements de maïs obtenus sont équivalents pour les deux systèmes : 13,3 et 13,1 T.ha⁻¹ pour l'aspersion et le GGE respectivement.

La modélisation avec Optirrig permet de quantifier la partie de l'eau d'irrigation réellement utilisée pour la transpiration des cultures et les volumes perdus. La transpiration réelle représente 49% de l'eau d'irrigation totale pour le système d'aspersion et 68% pour le GGE, ce qui confirme que le GGE a une efficacité globale d'irrigation bien meilleure (près de 20% supérieurs) que l'enrouleur, grâce à la réduction des pertes d'eau avec le GGE.

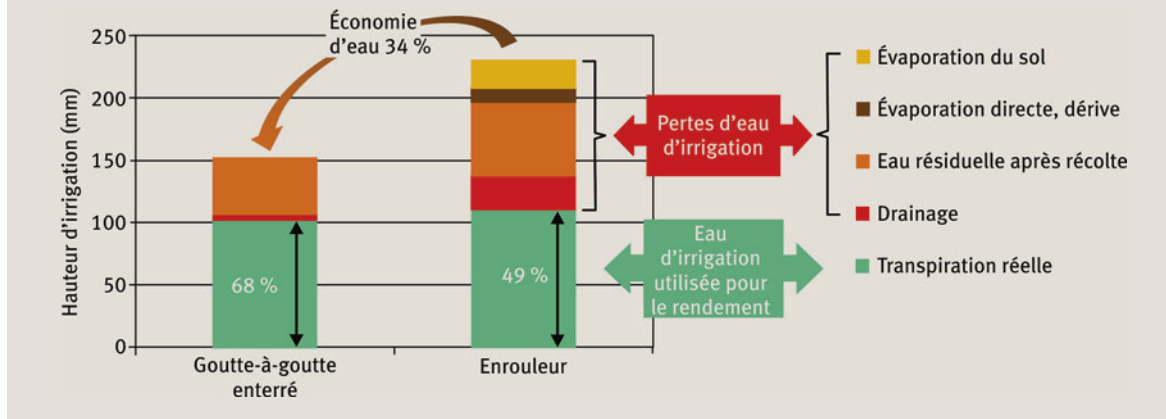
Avec l'enrouleur, la perte en eau d'irrigation par évaporation directe dans l'air et par dérive due au vent a été arbitrairement fixée à 5% de la quantité totale d'eau entrant dans la parcelle (Molle *et al.*, 2012). En principe, ces pertes ne se produisent pas en goutte-à-goutte car la totalité de l'eau sortant du goutteur est censée atteindre le sol. L'évaporation du sol ne se produit pas avec le GGE car l'eau d'irrigation appliquée à 50 cm de profondeur ne peut pas s'évaporer du sol. Avec l'enrouleur, cette perte représente 22 mm, soit 9% de l'eau entrant dans la parcelle. La principale perte d'eau d'irrigation est l'eau stockée dans le sol à la récolte : 59 mm avec l'enrouleur et 46 mm avec le GGE, soit 50% des pertes totales avec l'enrouleur et 94% pour le GGE. Ce stock d'eau final dans le sol restera inutilisé, car aucune culture ne sera semée directement après le maïs. Pour l'approvisionnement en eau de la culture suivante, on peut supposer que les précipitations hivernales seront suffisantes pour assurer le remplissage de la réserve du sol. Le drainage est une autre perte importante d'eau d'irrigation avec l'enrouleur (27 mm) car il représente 11% de l'eau totale appliquée, soit 22% des pertes totales d'eau d'irrigation. Seuls 3 mm d'eau d'irrigation sont perdus par le drainage avec le GGE. Le drainage est plus important avec l'irrigation par aspersion car les quantités d'eau appliquées (30-35 mm) sont plus élevées qu'avec le GGE (2,5-3,75 mm). Certaines pertes d'eau d'irrigation énumérées ci-dessus sont liées à la technologie d'irrigation elle-même et dépendent du type de système utilisé (aspersion ou irrigation localisée). Elles sont appelées « pertes techniques ». L'évaporation directe ou la dérive due au vent et l'évaporation du sol sont uniquement liées à l'irrigation par aspersion. Les pertes par drainage et stockage excessif dans le profil sont plus élevées avec l'irrigation par asper-

4 Économies d'eau réalisées en utilisant des sondes d'état hydrique du sol (EE-SP) pour piloter l'irrigation en plein champ, en fonction du déficit hydrique de la saison culturale.

ASP : irrigation par aspersion, GGS : goutte-à-goutte de surface.



5 Simulation avec le modèle de culture Optirrig des quantités d'eau d'irrigation transpirées par la culture ou perdues, pour le maïs irrigué en goutte-à-goutte enterré (GGE) ou par aspersion (canon enrouleur).



sion car les quantités d'eau appliquées sont plus importantes. D'autres pertes (appelées « pertes tactiques ») sont plutôt liées à la gestion et au pilotage de l'irrigation (dates et doses). La dérive due au vent avec l'aspersion peut être limitée en évitant les jours ou les heures ventés. Retarder l'irrigation après une pluie importante devrait réduire les pertes par drainage. Le stockage excessif de l'eau d'irrigation dans le sol pourrait être évité en réduisant ou en supprimant la (ou les) dernière(s) irrigation(s). La réduction des pertes en eau, et donc l'économie d'eau grâce au GGE par rapport à l'aspersion, sont possibles à la fois par les améliorations techniques et tactiques.

Conclusion

Cette étude a compilé toutes les études de terrain disponibles menées sur le territoire métropolitain français au cours des trente dernières années, concernant les économies d'eau réalisées avec des systèmes d'irrigation localisée (goutte-à-goutte de surface, goutte-à-goutte enterré ou micro-aspersion) par rapport aux systèmes d'aspersion (canon enrouleur, rampe sur enrouleur, pivot ou couverture intégrale), ainsi qu'avec un pilotage avec des sondes d'état hydrique du sol (tensiométriques ou capacitatives) par rapport à la gestion traditionnelle avec bilan hydrique. Une approche de modélisation réalisée sur un cas d'étude a permis de quantifier les pertes d'eau d'irrigation contribuant aux économies d'eau observées. Notre travail montre que :

- les systèmes d'irrigation localisée, ainsi que les sondes d'état hydrique du sol, sont des solutions très efficaces pour économiser l'eau à l'échelle de la parcelle et ainsi augmenter la productivité de l'eau d'irrigation. Toutefois, il n'est pas raisonnable de généraliser les valeurs d'économies d'eau réalisées car elles sont très variables et dépendent de plusieurs facteurs ;
- la réduction des pertes en eau, et donc les économies d'eau réalisées grâce aux systèmes localisés par rapport aux systèmes d'aspersion, proviennent autant d'améliorations techniques que tactiques. Par conséquent, pour promouvoir les économies d'eau, il semble judicieux d'encourager, parallèlement aux investissements dans

des équipements économes en eau, l'amélioration des pratiques des irrigants et, en particulier, l'adoption d'outils de pilotage de l'irrigation ;

- les économies d'eau obtenues avec les systèmes d'irrigation localisée sont fortement dépendantes des conditions climatiques, contrairement à celles obtenues avec les sondes d'état hydrique du sol. Ce résultat doit être considéré avec attention dans la perspective du changement climatique. En ce qui concerne les économies d'eau et la limitation des prélèvements d'eau, il est important de garder à l'esprit que les économies d'eau potentiellement réalisables en passant d'un système d'aspersion à un système d'irrigation localisée sont optimales dans des conditions de déficit hydrique modéré. Elles deviennent limitées, voire impossibles, lors des années très sèches. Au contraire, la gestion de l'irrigation à l'aide de sondes de sol permet des économies d'eau potentielles moins dépendantes des conditions climatiques.

Enfin, il est important de rappeler que les économies d'eau au niveau de la parcelle n'impliquent pas nécessairement des économies d'eau à long terme à l'échelle du territoire (Grafton *et al.*, 2018). L'adoption d'équipements d'irrigation plus efficaces entraîne souvent une augmentation des prélèvements d'eau en raison de changements de cultures et de types de rotation, ou de l'extension des surfaces irriguées. C'est ce que l'on appelle l'« effet de rebond » (Pfeiffer et Lin, 2014 ; Berbel *et al.*, 2015). Pour réduire les prélèvements d'eau, l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation doit être simultanément liée à des mesures qui diminuent la quantité d'eau que les agriculteurs sont autorisés à prélever. ■

Les auteurs

Claire SERRA-WITTLING, Bruno MOLLE
et Bruno CHEVIRON

G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier
SupAgro, Univ Montpellier,
361 Rue Jean-François Breton, BP 5095,
F-34196 Montpellier Cedex 5, France.

✉ claire.serra-wittling@inrae.fr
✉ bruno.molle@inrae.fr
✉ bruno.cheviron@inrae.fr

EN SAVOIR PLUS...

- 📄 **BIO INTELLIGENCE SERVICE**, 2012, Water saving potential in agriculture in Europe: findings from the existing studies and application to case studies. Final report prepared for European Commission DG ENV, 234 p.,
🔗 https://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/BIO_Water%20savings%20in%20agriculture_Final%20report.pdf
- 📄 **HSIAO, T.C., STEDUTO, P., FERERES, E.**, 2007, A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture, *Irrigation Science*, vol. 25, p. 209-231, 🔗 <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00271-007-0063-2.pdf>
- 📄 **SERRA-WITTLING, C., MOLLE, B.**, 2017, Évaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation. Rapport d'étude réalisée avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, IRSTEA, 149 p.,
🔗 <http://www.g-eau.fr/index.php/fr/umr-geau/actualites/item/758-etude-irstea-2017-sur-l-evaluation-des-economies-d-eau-potentielles-a-la-parcelle-realisables-par-la-modernisation-des-systemes-d-irrigation-c-serra-wittling-et-b-molle>
- 📄 **SERRA-WITTLING, C., MOLLE, B., CHEVIRON, B.**, 2019, Plot level assessment of irrigation water savings due to the shift from sprinkler to localized irrigation systems or to the use of soil hydric status probes. Application in the French context, *Agricultural Water Management*, vol. 223, 105682, 🔗 <https://hal.inrae.fr/hal-02609656/document>

BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE

- 📄 **BERBEL, J., GUTIÉRREZ-MARTÍN, C., RODRÍGUEZ-DÍAZ, J.A., CAMACHO, E., MONTESINOS, P.**, 2015, Literature review on rebound effect of water saving measures and analysis of a Spanish case study, *Water Resources Management*, vol. 29, p.663-678.
- 📄 **BIANCHI, A., MASSERONI, D., THALHEIMER, M., OLIVERA DE MEDICI, L., FACCHI, A.**, 2017, Field irrigation management through soil water potential measurements: a review, *Italian Journal of Agrometeorology*, n° 2, p. 25-38.
- 📄 **BONACHELA, S.F., ORGAZ, F., VILLALOBOS, F.J., FERERES, E.**, 2001, Soil evaporation from drip-irrigated olive orchards, *Irrigation Science*, vol. 20, p. 65-71.
- 📄 **CAVERO, J., FACI, J.M., MARTÍNEZ-COB, A.**, 2016, Relevance of sprinkler irrigation time of the day on alfalfa forage production, *Agricultural Water Management*, vol. 178, p. 304-313.
- 📄 **EUROPEAN UNION**, 2013, Regulation (EU) No 1305/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 on support for rural development by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and repealing Council Regulation (EC) No 1698/2005, *Official Journal of the European Union L*, n° 347, p. 487-548.
- 📄 **EVETT, S.R., SCHWARTZ, R.C., CASANOVA, J.J., HENG, L.K.**, 2012, Soil water sensing for water balance, ET and WUE, *Agricultural Water Management*, vol. 104, p. 1-9.
- 📄 **EVETT, S.R., TOLK, J.A.**, 2009, Introduction: Can water use efficiency be modeled well enough to impact crop management?, *Agronomy Journal*, vol. 101, p. 423-425.
- 📄 **GEERTS, S., RAES, D.**, 2009, Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas, *Agricultural Water Management*, vol. 96, p. 1275-1284.
- 📄 **GHINASSI, G., PEZZOLA, E.**, 2014, *Controlling sprinkler rotation speed to optimize water distribution uniformity of travelling rain guns*, 2014 ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, Montreal, Quebec Canada, July 13-16, 2014.
- 📄 **GRAFTON, R.Q., WILLIAMS, J., PERRY, C.J., MOLLE, F., UDALL, B., GARRICK, D., RINGLER, C., WHEELER, S.A., ALLEN, R.G., WANG, Y., STEDUTO, P.**, 2018, The paradox of irrigation efficiency. Higher efficiency rarely reduces water consumption, *Science*, vol. 361, p. 748-750.
- 📄 **HOWELL, T.A.**, 2003, Irrigation Efficiency, in: STEWART, B.A., HOWELL, T.A. (Eds.), *Encyclopedia of Water Science*, Marcel Dekker, New York, p. 467-472.
- 📄 **JENSEN, C.R., ORUM, J.E., PEDERSEN, S.M., ANDERSEN, M.N., PLAUBORG, F., LIU, F., JACOBSEN, S.E.**, 2014, A short overview of measures for securing water resources for irrigated crop production, *Journal of Agronomy and Crop Science*, vol. 200, p. 333-343.
- 📄 **JENSEN, M.E.**, 2007, Beyond irrigation efficiency, *Irrigation Science*, vol. 25, p. 233-245.
- 📄 **JONES, H.G.**, 2004, Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods, *Journal of Experimental Botany*, vol. 55, p. 2427-2436.
- 📄 **LANKFORD, B.**, 2012, Fictions, fractions, factorials and fractures; on the framing of irrigation efficiency, *Agricultural Water Management*, vol. 108, p. 27-38.
- 📄 **LI, J.**, 2018, Increasing crop productivity in an eco-friendly manner by improving sprinkler and micro-irrigation design and management: A review of 20 years' research at the IWH, China, *Irrigation and drainage*, vol. 67, p.97-112.
- 📄 **MALIK, W., ISLA, R., DECHMI, F.**, 2019, DSSAT-CERES-maize modelling to improve irrigation and nitrogen management practices under Mediterranean conditions, *Agricultural Water Management*, vol. 213, p. 298-308.
- 📄 **MOLLE, B., TOMAS, S., HENDAWI, M., GRANIER, J.**, 2012, Evaporation and wind drift losses during sprinkler irrigation influenced by droplet size distribution, *Irrigation and drainage*, vol. 61, p. 240-250.
- 📄 **PERRY, C.**, 2007, Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations, *Irrigation and drainage*, vol. 56, p. 367-378.
- 📄 **PFEIFFER, L., LIN, C.Y.C.**, 2014, Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 67, p. 189-208.
- 📄 **RICHTER, B.D., BROWN, J.D., DIBENEDETTO, R., GORSKY, A., KEENAN, E., MADRAY, C., MORRIS, M., ROWELL, D., RYU, S.**, 2017, Opportunities for saving and reallocating agricultural water to alleviate water scarcity, *Water Policy*, vol. 19, n° 5, p. 886-907.
- 📄 **SECKLER, D., MOLDEN, D., SAKTHIVADIVEL, R.**, 2003, The concept of efficiency in water resources management and policy, in: KIJNE, J.W., BARKER, R., MOLDEN, D. (Eds.), *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement*, CAB International.
- 📄 **VAN HALSEMA, G.E., VINCENT, L.**, 2012, Efficiency and productivity terms for water management: A matter of contextual relativism versus general absolutism, *Agricultural Water Management*, vol. 108, p.9-15.
- 📄 **ZHAO, W., LI, J., YANG, R., LI, Y.**, 2017, Yields and water-saving effects of crops as affected by variable rate irrigation management based on soil water spatial variation (in Chinese, with English abstract), *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33, p. 1-7.



Irrigation par aspersion en plein champ.

Retour d'expérience

Transition agro-écologique des systèmes de culture irrigués innovants sur le territoire des Coteaux de Gascogne

Sur le territoire des Coteaux de Gascogne, agriculteurs, chercheurs et gestionnaires de l'eau s'engagent pour une transition agro-écologique des systèmes de culture irrigués.

C'est dans ce contexte qu'en 2019, un projet pilote a permis de réaliser une première évaluation des performances agro-économiques des systèmes de cultures irrigués établies sur les pratiques d'agriculture de conservation des sols et sur les techniques et/ou stratégies d'irrigation économes en eau.



Depuis 2012, des expériences sur les économies d'eau à la parcelle sont menées sur la ferme expérimentale de La Mirandette, située à Masseube dans le département du Gers, conjointement entre la Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) et l'unité mixte de recherche G-EAU (INRAE-CIRAD) avec un appui de l'Agence de l'eau Adour Garonne et de la Région Occitanie.

Naturellement, le territoire des Coteaux de Gascogne connaît un déficit structurel en eau. Le recours à l'irrigation y est indispensable pour satisfaire les besoins des cultures pendant l'été. Cependant, cette pratique fait l'objet d'une pression sociale qui pousse vers une réduction des prélèvements pour l'irrigation. Ce territoire est aussi considéré comme l'un des plus sensibles de l'hexagone à l'érosion hydrique des sols (Gis Sol-INRAE, 2011). Les phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols sont amplifiés par les méthodes conventionnelles utilisées actuellement : le labour et le sol laissé nu pendant une période de l'année exposé à l'agressivité des pluies et du vent. De plus, les parcelles sont pour beaucoup d'entre elles situées à flanc de coteaux et donc sur des pentes susceptibles d'amplifier les processus de ruissellement et d'érosion. À l'échelle de la parcelle, les impacts négatifs de l'érosion se traduisent non seulement par une baisse de la fertilité et donc de la productivité des sols, mais également par une efficacité plus faible d'application et de distribution des irrigations. À l'échelle du bassin hydroagricole, les effets néfastes de l'érosion des sols cultivés se traduisent par une pollution de nature physique (sédiments) et chimique (herbicides, pesticides, azote synthétique, etc.) des cours d'eau.

Une alternative aux pratiques agricoles usuelles en grandes cultures existe pour réduire la pression de prélèvement sur le milieu, lutter contre l'érosion des sols et restaurer/maintenir leur fertilité. Au niveau des pratiques culturales, elle repose sur les techniques d'agriculture de conservation du sol (ACS) dont les principes reposent sur une forte réduction (voire suppression) du travail du sol, sur une couverture végétale (quasi) permanente du sol et, sur des successions culturales diversifiées. Concernant plus particulièrement les systèmes de culture irrigués, les pratiques culturales de type ACS associées aux techniques d'irrigation plus économes en eau, méritent d'être testées voire démontrées, notamment leurs performances agroenvironnementales durant la phase de transition agro-écologique.

1 GLOSSAIRE

- ACS** – Agriculture de conservation des sols.
- AEAG** – Agence de l'eau de l'Adour Garonne.
- ASP** – Aspersion.
- CACG** – Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne.
- CIRAD** – Centre de coopération Internationale de recherche agronomique pour le développement.
- ETM** – Évapotranspiration maximale.
- GGE** – Goutte-à-goutte enterré.
- INRAE** – Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.
- SD** – Semis direct.
- TASCII** – Transition agro-écologique des systèmes de culture irrigués innovants.
- TCS** – Techniques de culture simplifiées.
- UMR G-EAU** – Unité mixte de recherche « Gestion de l'eau, acteurs et usages ».

Ce projet pilote permettra d'analyser les contributions de l'ACS à l'amélioration des performances environnementales liées à l'érosion, à la fertilité, à la rétention en eau des sols (et donc aux économies d'eau d'irrigation et réduction de la pression de prélèvement sur le milieu), à la réduction des produits phytosanitaires tout en garantissant un bon niveau de rentabilité économique.

La démarche du projet associe la co-construction, l'expérimentation, la pré-diffusion et le suivi-évaluation participatif des effets à court et à long terme de l'ACS et de la réduction des apports d'eau. Un suivi scientifique conséquent en station est réalisé au sein de la ferme expérimentale de La Mirandette (composante n° 1, figure 1) et un suivi léger hors station est réalisé chez des agriculteurs. Initiée dès 2020, cette deuxième composante s'organise autour d'un partenariat avec six agriculteurs pilotes dont les parcelles sont situées dans un rayon de vingt-cinq kilomètres autour de La Mirandette (composante n° 2, figure 2). Cette composante nous permet aussi de réaliser des expérimentations dans des contextes différents : agriculture biologique, élevage, monoculture ; sol en argileux, argilo-limoneux (boulbène)... Dès lors, elle constitue un outil didactique de vulgarisation et de démonstration auprès des agriculteurs.

La méthodologie repose sur le test au champ de différents systèmes de cultures irrigués, via la combinaison de :

- modalités de travail du sol : technique culturales simplifiées (TCS) vs. semis direct (SD) et labour ; et
 - irrigation : aspersion (ASP) vs. goutte-à-goutte enterré (GGE), à 100% ou 80% des besoins de la plante (ETM).
- En 2019, les expérimentations ont été conduites sur la culture du maïs, dans le cadre d'une rotation (maïs, céréales à paille, soja). Ce projet se poursuit sur plusieurs années (quatre ans au minima).

Résultats de la campagne 2019

La campagne expérimentale, conduite en 2019 dans le cadre du projet pilote TASCII, a permis de réaliser une première évaluation des performances agro-économiques des systèmes de cultures irrigués établies sur les pratiques d'agriculture de conservation des sols (ACS) et sur les techniques et/ou stratégies d'irrigation économes en eau.

Modalité matériel d'irrigation

Les travaux réalisés sur la comparaison des matériels d'irrigation depuis 2012 ont démontré une meilleure efficacité en eau du GGE par rapport à l'aspersion à hauteur de 15% de rendement moyen en grain en plus par m³, excepté en 2014 dont les conditions météorologiques étaient particulièrement humides.

Indicateur de développement végétatif

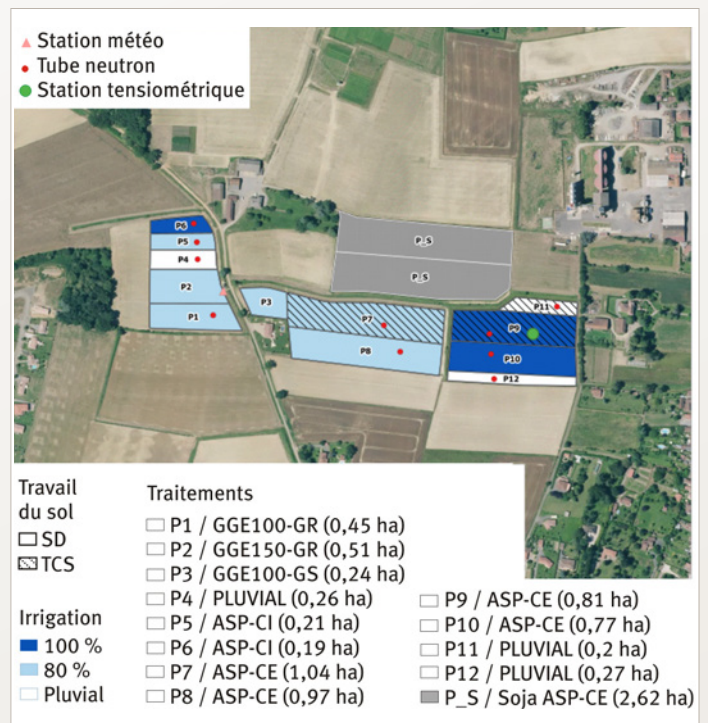
Dans des conditions de semis comparable, on obtient une levée de -3 à -12% sur le SD par rapport au TCS. Après la levée (45 jours après le semis du maïs), et au stade 6/7 feuilles, les parcelles en SD montrent un développement végétatif plus lent par rapport au TCS. Ensuite, le SD commence à rattraper son retard pour arriver à un développement végétatif équivalent au TCS au stade de remplissage de grain. L'hypothèse qui peut être avancée est l'effet combiné du non-labour et du paillis sur la dynamique de réchauffement du sol en surface qui, comparée à celle sur sol travaillé en TCS, pénaliserait le développement des plantules du fait des températures du sol plus fraîches.

2 TÉMOIGNAGE

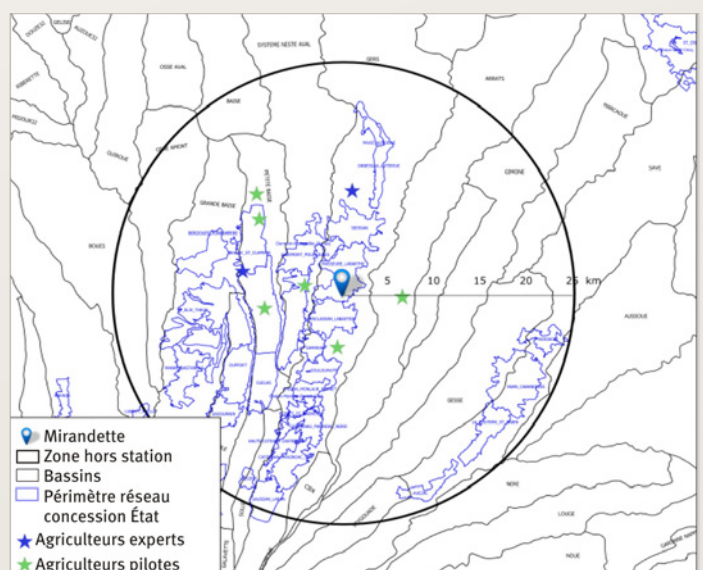
Florent ESTEBENET, agriculteur pilote

« On a besoin de tester sans prendre de risques de nouvelles techniques et des outils limitants les coûts et les intrants, pour maintenir une rentabilité économique dans les exploitations agricoles et restaurer les sols de nos territoires. La Mirandette est une belle vitrine avec de très beaux résultats. Le projet TASCII nous offre cette opportunité. »

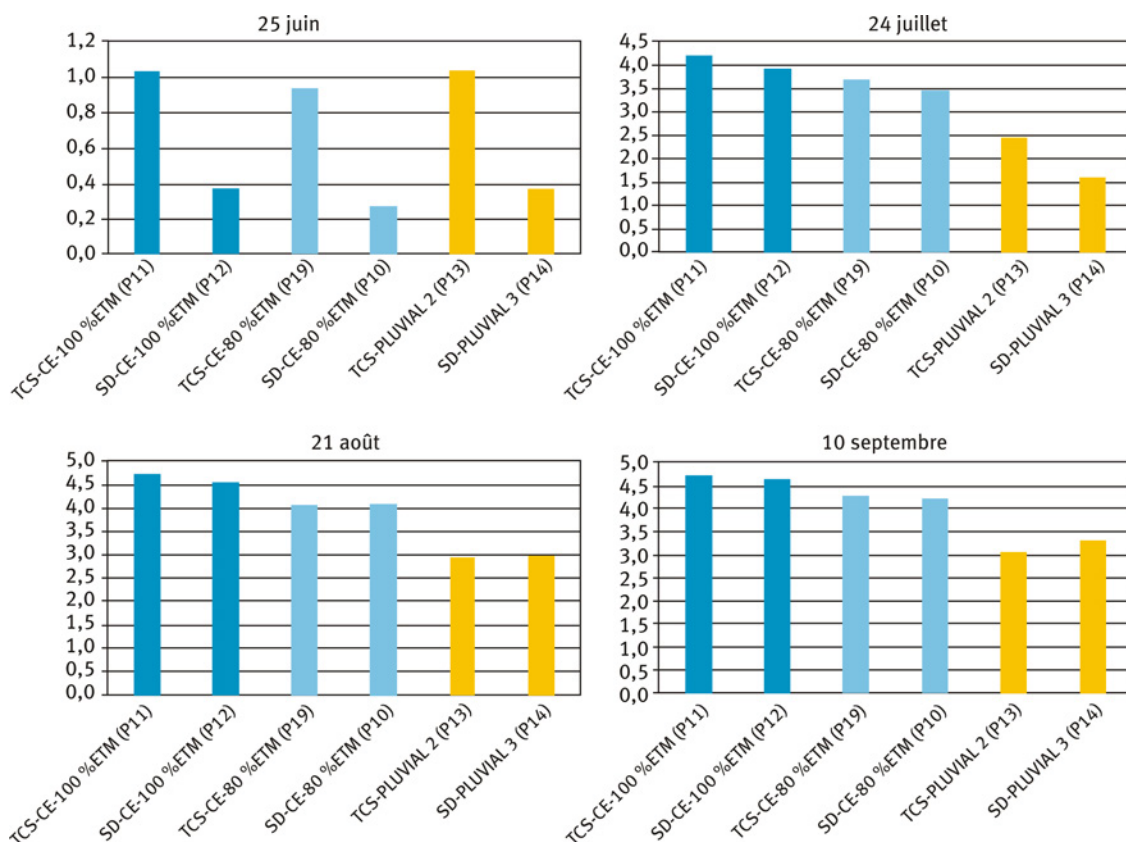
1 Expérimentation à La Mirandette en 2019 (composante 1 du projet).



2 Expérimentation chez les agriculteurs pilotes en 2020 (composante 2 du projet).



③ Indice foliaire LAI (TCS : techniques culturales simplifiées, SD : semis direct).

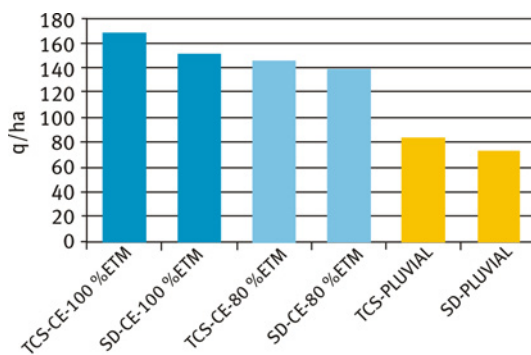


Pour l'ensemble des stades végétatifs, le développement végétatif est directement impacté par les conditions d'irrigation, la réduction ou l'absence d'irrigation réduit conséquemment la végétation (figure ③).

Indicateur de rendement

En concordance avec les indices foliaires enregistrés au cours des différentes périodes végétatives, les productions maïs-grain (hu.15%) obtenues en 2019 sur les parcelles expérimentales de La Mirandette s'échelonnent de 72 qx/ha pour la parcelle conduite en semis direct non irriguée, à 168 qx/ha pour la parcelle travaillée en TCS et irriguée à 100% des besoins en eau des plantes (figure ④). Ces résultats sont donc proportionnels au gradient de satisfaction hydrique. Par ailleurs, de très hauts

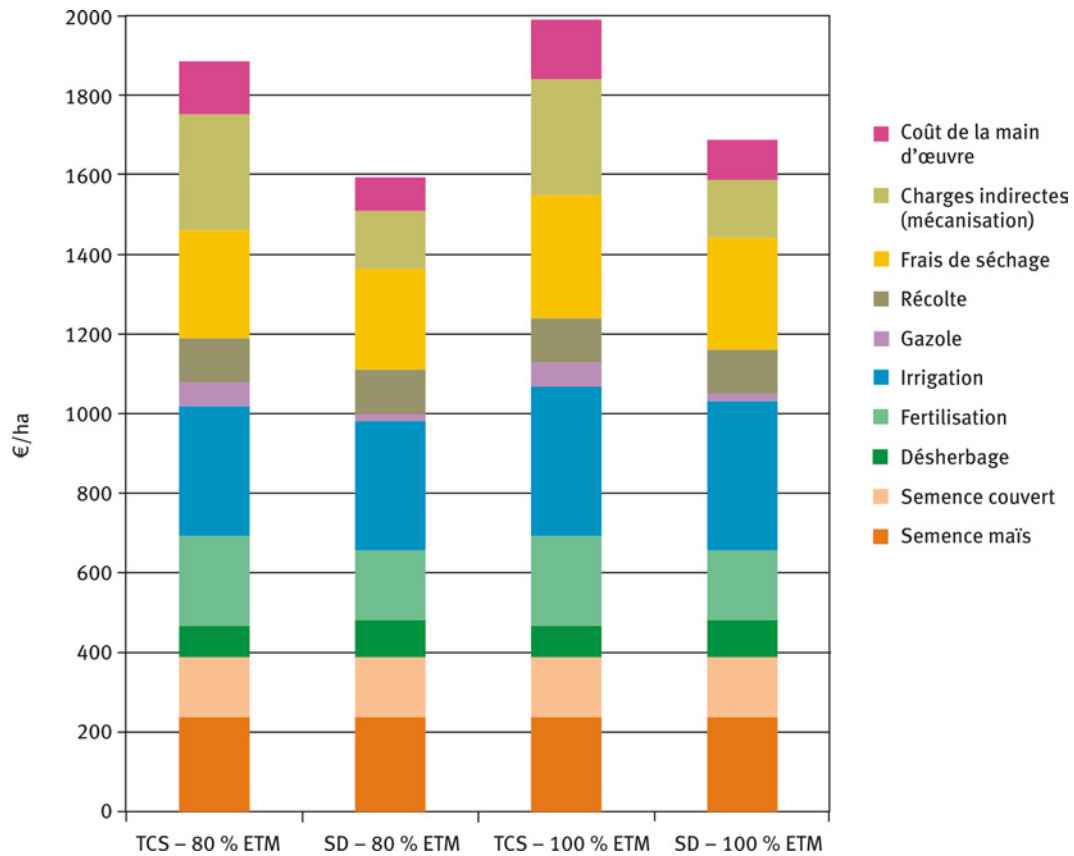
④ Rendement en quintal par hectare.



① Marge en euro par hectare et par itinéraire technique.

Itinéraire technique	TCS - 80 % ETM	SD - 80 % ETM	TCS - 100 % ETM	SD - 100 % ETM
Chiffre d'affaire (produit brut)	1 899	1 771	2 169	1 969
Charges opérationnelles	1 460	1 363	1 549	1 441
Marge brute	439	408	621	528
Charges de structure (mécanisation)	291	146	291	146
Coût de la main d'œuvre	133	84	150	101
Marge directe	15	178	180	281

5 Coût en euro par hectare par itinéraire technique.



niveaux de production (142 qx/ha en moyenne) sont mesurés sur les traitements irrigués à 80 % des besoins en eau des plantes. Sur l'ensemble des traitements, on constate un écart d'environ 7 % entre le SD et le TCS qui peut s'expliquer par les différences de levées entre les deux systèmes.

Indicateurs économiques

Le TCS engendre des coûts supérieurs au SD liés aux coûts de mécanisation supplémentaires pour le travail du sol en TCS. De plus, le SD permet de réaliser des économies de coûts sur les fertilisants (51 euros/ha en moyenne) au vu des apports des couverts végétaux (figure 5). L'irrigation à 80 % d'ETM permet aussi de réaliser des économies de coûts de 50 euros/ha sur les coûts par rapport à une irrigation à 100 % d'ETM.

Malgré ses coûts supplémentaires, le TCS permet de réaliser des rendements supérieurs au SD et par conséquent un chiffre d'affaires supérieur. Pour le calcul du chiffre d'affaires à l'hectare, on s'est basé sur les rendements aux normes de la coopérative (soit 7 à 9 % moins que les rendements mesurés à la parcelle expérimentale) et un prix de maïs de 140 euros la tonne.

Si nous nous limitons seulement à la marge brute, nous constatons que le TCS génère plus de marge brute que le SD (tableau 1). Par contre, si nous allons plus loin dans l'analyse en intégrant les coûts de mécanisation et de main d'œuvre, alors le SD génère plus de marge directe.

L'irrigation a un effet considérable sur la marge, des apports à 80 % ETM permettent seulement d'économiser 50 euros/ha (3 % des coûts) mais elle fait perdre plus de 200 euros/ha de chiffre d'affaires en moyenne. Une irrigation qui satisfait les besoins hydriques de la plante (100 % ETM) permet de réaliser plus de 36 % de marge brute et plus que le double de marge directe (140 %) par rapport à une irrigation à 80 % des besoins de la plante (ETM). ■

Les auteurs

Kamal ABANNAR, Cyrielle MAZALEYRAT, Jean-Jacques WEBER, Élise AUDOUIN et Christophe BONILLO

Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne, Chemin de Lalette, CS 50449, F-65004 Tarbes Cedex, France.

- ✉ k.abannar@cacg.fr
- ✉ c.mazaleyrat@cacg.fr
- ✉ weberjj@wanadoo.fr
- ✉ e.audouin@cacg.fr
- ✉ c.bonillo@cacg.fr

Cyril DEJEAN, Geoffrey FROMENT et Jean-Marie LOPEZ

G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, 361 Rue Jean-François Breton, BP 5095, F-34196 Montpellier Cedex 5, France.

- ✉ cyril.dejean@inrae.fr
- ✉ geoffrey.froment@inrae.fr
- ✉ jean-marie.lopez@cirad.fr

Combinaison de modèles de bilan hydrique et d'indicateurs de stress hydrique pour le pilotage de l'irrigation : étude de cas au Portugal

Après avoir présenté le contexte de l'irrigation au Portugal, les auteurs de cet article examinent la robustesse de deux approches et leur combinaison afin de mieux programmer les campagnes d'irrigation à l'échelle de la parcelle. Deux cas d'application sont présentés et discutés : l'un sur des cultures horticoles à enracinement superficiel (piment, *Capsicum annuum L.*) et l'autre sur des cultures avec racines ligneuses profondes (olivier, *Olea europea 'Arbequina'*).

Irrigation au Portugal

Contexte

Malgré les fortes divergences climatiques observées au Portugal, l'irrigation n'en demeure pas moins une nécessité afin de garantir des rendements rentables pour la plupart des cultures. La figure 1a illustre des situations extrêmes de précipitations moyennes et de l'évapotranspiration de référence (Viana do Castelo, dans une région côtière du nord-ouest et Beja, une région intérieure du sud-est). Pour les deux cas, on peut noter une nette situation de déficit en eau en fin de printemps et en été, mais ce déficit est beaucoup plus accentué dans le cas de Beja.

En plus de la variation climatique, d'autres différences marquées caractérisent le nord et le sud du pays (figure 1b). Le Tage (Tejo en portugais) qui coule de la frontière orientale de l'Espagne à la côte ouest (selon un angle d'environ 45° avec le nord), divise le Portugal en deux vastes régions. Au nord du Tage, la zone est couverte de vallées, les pentes y sont fortes et les sols peu profonds, à l'exception des grandes vallées fluviales. Au sud du fleuve, la topographie se caractérise par des plaines ondulées, et la profondeur du sol a tendance à s'accroître.

Paradoxalement, la densité de population est, et a toujours été, plus grande dans la région nord (les zones montagneuses exceptées). Cela s'explique par un déficit

en eau plus réduit et sur une période plus courte dans le nord-ouest, améliorant le rendement des cultures. Ces différences sont accentuées par l'asymétrie sociale et économique, les petites exploitations et l'agriculture familiale étant prédominantes dans le nord.

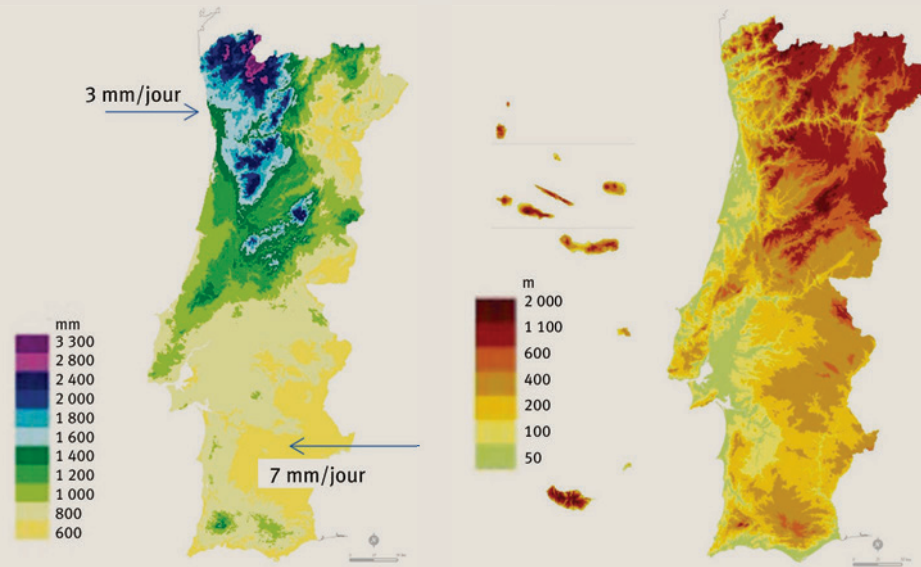
Des différences si prononcées ont de forts impacts sur le secteur de l'irrigation, rendant difficile une analyse globale sur l'ensemble du pays. Lorsque cela est possible, notre analyse prendra donc en compte les sept « régions agraires » du Portugal (anciennes divisions administratives récemment remplacées par les cinq régions NUT II¹ établies par la Commission européenne : le nord, le centre, Lisbonne et la Vallée du Tage, Alentejo et Algarve) :

- Entre-Douro-e-Minho (nord-ouest) ;
- Trás-os-Montes (nord-est) ;
- Beira Litoral (littoral centre) ;
- Beira Intérieure (intérieur centre) ;
- Ribatejo e Oeste (zone littorale proche de Lisbonne et de la Vallée du Tage) ;
- Alentejo ; et
- Algarve (extrême sud).

Au Portugal, les terres irrigables ont toujours constitué moins de 25 % de la superficie agricole utile, chiffre aujourd'hui proche de 15 % (tableau 1). Au cours des dernières décennies, les terres irrigables et irriguées ont marqué un recul sensible.

1. Nomenclature d'unités territoriales statistiques, le niveau II caractérisant les NUT de 800 000 à 3 millions d'habitants.

- ❶ À gauche : précipitations annuelles (moins de 600 mm et plus de 3 300 mm, évapotranspiration sur la base des références du mois de juillet à Viana do Castelo et Beja, moyenne sur 30 ans).
 À droite : carte hypsométrique (jusqu'à 2 000 m) du Portugal.
 Source: <https://snirh.apambiente.pt/>



Le tableau ❷ indique que l'option de l'irrigation sous pression dépend dans une grande mesure du type de culture : 91 % des cultures permanentes (vergers, oliviers, vignobles) sont irriguées au goutte-à-goutte. D'autre part, les deux tiers de la superficie de pâturage sont irrigués par gravité.

Comme l'illustre le tableau ❸, la part des systèmes gravitaires par rapport aux systèmes sous pression est en lien étroit avec l'irrigation pratiquée dans les petites exploitations. Lorsque celle-ci est dominante – dans les régions agricoles du nord (Entre-Douro-e-Minho et Trás-os-Montes) et le littoral centre (Beira Litoral) – les systèmes gravitaires sont encore prédominants, alors que dans les régions sud, c'est plutôt l'irrigation par aspersion et goutte-à-goutte qui est pratiquée. Le coût et la disponibilité de l'eau semblent également jouer un rôle, ce qui explique que dans la région de l'Algarve, où l'irrigation s'appuie sur des eaux souterraines provenant de puits profonds, le rapport entre l'irrigation sous pression et celle par gravité est plus élevé, bien que la plupart des terres soient occupées par les petits exploitants.

Au Portugal, il y a trente-deux programmes collectifs d'irrigation majeurs, dont la plupart dépendent de grands barrages réservoirs. Ces programmes ont été réalisés à travers des investissements publics et contribuent dans une grande mesure à la lutte contre le dépeuplement tout en favorisant le développement. Avec la mise en place récente du projet d'irrigation d'Alqueva, (120 000 ha), les programmes publics d'irrigation ont connu une forte croissance. Cependant, la plupart des terres irrigables appartiennent encore à des systèmes privés, soit individuels, soit collectifs (tableau ❹).

❶ Parcelle irrigable (équipée) et parcelle irriguée.

Utilisation des sols	Terres agricoles utilisées		Terres irrigables équipées		Terres irriguées	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Région agricole						
Entre Douro e Minho	211 154	94 829	45 %	81 858	39 %	
Trás-os-Montes	432 873	46 666	11 %	38 852	9 %	
Beira Litoral	125 436	61 116	49 %	51 314	41 %	
Beira Interior	337 031	49 580	15 %	35 649	11 %	
Ribatejo e Oeste	391 006	112 539	29 %	101 208	26 %	
Alentejo	1 956 508	155 123	8 %	138 231	7 %	
Algarve	88 297	16 274	18 %	16 170	18 %	
Portugal continental	3 542 305	536 127	15 %	464 283	13 %	

❷ Terres irriguées selon les grands groupes de cultures et systèmes d'irrigation.

Système d'irrigation	Gravité		Asperseurs et goutte-à-goutte		Total
	ha	%	ha	%	
Grands groupes de cultures					
Cultures permanentes	12 245	9	123 254	91	135 499
Cultures temporaires	99 993	36	177 131	64	277 124
Pâturages	34 443	66	17 561	34	52 004
Total	146 681	32	317 946	68	464 627

3 Terres irriguées selon les régions agricoles et systèmes d'irrigation.

Région agricole \ Système d'irrigation	Gravité		Asperseurs et goutte-à-goutte		Total ha
	ha	%	ha	%	
Entre Douro e Minho	46 809	57	35 268	43	82 077
Trás-os-Montes	27 942	70	11 930	30	39 872
Beira Litoral	25 454	50	25 908	50	51 362
Beira Interior	11 084	31	24 575	69	35 659
Ribatejo e Oeste	19 120	19	82 120	81	101 240
Alentejo	14 653	11	12 695	89	138 248
Algarve	1 618	10	14 552	90	16 170
Portugal continental	146 680	32	317 948	68	464 628

4 Systèmes irrigués selon les systèmes privés et collectifs.

Association des utilisateurs d'eau et Sociétés publiques d'irrigation		Régime privés		Total ha
ha	%	ha	%	
135 300	25	400 827	75	536 127

5 Distribution selon les cultures irriguées.

Type de cultures	Superficie (ha)	%
Blé	5 770	1,2 %
Maïs	81 190	17,5 %
Riz (Paddy)	29 250	6,3 %
Fourrage	87 807	18,9 %
Pâturage	51 661	11,1 %
Pomme de terre	11 834	2,5 %
Tournesol	4 093	0,9 %
Tomate pour l'industrie	17 943	3,9 %
Autres cultures maraîchères	10 025	2,2 %
Légumes	14 654	3,2 %
Agrumes	15 048	3,2 %
Autres fruits frais	25 683	5,1 %
Oliviers	65 887	14,2 %
Vignoble	25 181	5,4 %
Autres cultures	20 706	4,5 %
Total	464 731	100,0 %

6 Indicateurs de surfaces irriguées par région agricole.

Région agricole \ Indicateurs	Moyenne de la surface irriguée	Consommation unitaire
	(ha/exploitation)	(m ³ /ha)
Entre Douro e Minho	1,9	6 662
Trás-os-Montes	1,8	6 331
Beira Litoral	1,4	8 253
Beira Interior	2,3	7 929
Lisboa e vale do Tejo	7,3	7 787
Alentejo	18,5	6 937
Algarve	2,6	9 973
Portugal continental	3,2	7 349

Les cultures irriguées sont très diversifiées (tableau 5), avec une dominance partagée du maïs (17,5 %), du fourrage (18,9 %) et de l'olivier (14,2 %). Les pâturages (11,1 %) et les vergers (8,3 %) jouent également un rôle important.

Afin de finir ce tour d'horizon de l'irrigation portugaise, le tableau 6 met en évidence quelques indicateurs intéressants ainsi que leurs différences régionales.

Comme déjà mentionné, l'agriculture portugaise est caractérisée par de petites exploitations (dont 72, 3 % couvrent moins de cinq hectares). Les superficies irriguées sont légèrement plus petites, environ deux hectares par exploitation, à l'exception de la Vallée du Tage et Alentejo.

En ce qui concerne les besoins en irrigation, on peut constater que, de manière générale, la consommation des cultures est réduite vers le sud car la pluviosité diminue alors que les températures moyennes augmentent, ce qui accroît constamment les besoins en irrigation dans les régions sud. L'exception que représente Alentejo s'explique facilement par le fait que les besoins en irrigation pour les oliviers et les vignobles, qui y sont largement représentés, sont très faibles.

Pilotage de l'irrigation

Dans ce contexte, la gestion de l'eau à l'échelle parcellaire consiste à prendre des décisions importantes sur deux aspects généralement considérés comme les composantes stratégiques du pilotage de l'irrigation (quel volume d'eau appliquer, et quand l'appliquer), que ce soit en période de confort ou de stress hydrique modéré.

Par confort, on sous-entend le maintien de la plante à son taux d'évapotranspiration le plus élevé en fonction des conditions météorologiques et des conditions physiques des cultures (évapotranspiration des cultures, *ET_c*, sans stress hydrique), lesquelles conditions sont souvent associées aux rendements maximums. Une situation de stress hydrique modéré présuppose une réduction de l'*ET_c* par des stratégies d'irrigation déficitaire. Il faut noter ici que les différents aspects d'application de l'eau ne sont pas analysés (techniques d'irrigation, taux d'application de l'irrigation, et ainsi de suite).

Il est devenu courant, dans la littérature, d'utiliser, comme alternatives, deux moyens pour assurer une bonne gestion et déterminer quel volume d'eau est nécessaire et à quel moment, et ces processus seront nommés ci-après A et B.

A. L'approche du bilan hydrique, largement utilisée, qui peut être décrite comme suit : dans l'équation du bilan hydrique, l'évapotranspiration réelle (*ET_a*) utilise les données d'entrée estimées par modèles simples, les autres données pertinentes (par ex. les précipitations, *P*) sont mesurées ou estimées, et constituent également des entrées pour le modèle. Cela permet à l'utilisateur d'obtenir, comme résultats, l'évolution du volume d'eau retenu dans le sol (volume-contrôle), et à partir d'un point de départ connu, de déterminer l'état hydrique du sol à un moment donné (équation 1). La position relative de cette valeur par rapport à quantité totale d'eau disponible dans le sol (*TAW*), ainsi que la stratégie à suivre, permet de décider de la hauteur d'eau d'irrigation à appliquer (parfois appelée quantité d'eau d'irrigation). Par exemple l'utilisateur peut estimer les besoins en eau (hauteur

d'eau d'irrigation) équivalents au déficit hydrique du sol s'il décide d'amener le sol à sa capacité au champ (FC), ou il peut décider d'appliquer moins d'eau, laissant le sol dans une certaine condition prédéfinie, en dessous de la capacité au champ.

B. L'approche des indicateurs de stress hydrique (mesures in situ automatisées ou non automatisées), qui n'est adaptée qu'aux indicateurs quantifiant le stress sur le court terme, normalement utilisée pour le pilotage de l'irrigation. Ces indicateurs peuvent être (pour ne mentionner que les plus testés) : la teneur en eau du sol, le potentiel de l'eau dans le sol, le potentiel hydrique foliaire avant l'aube, le potentiel hydrique de la tige juste après le midi solaire, plusieurs variables dérivées du diamètre de la tige, la transpiration relative ($\approx Ks$, par ex. avec les techniques de mesure du flux de sève), la température du feuillage (par ex. par détection du rayonnement infrarouge thermique émis (TIR), par télédétection ou par détecteurs de proximité).

Si ces deux approches sont utilisées séparément, il faut souligner que l'approche du **bilan hydrique (A)** visant à déterminer l'état hydrique du sol apporte une réponse directe à deux questions : quelle dose appliquer (hauteur d'eau d'irrigation, en mm, associée aux besoins en eau d'irrigation en général) et à quel moment irriguer. Cela correspond aux estimations de la quantité totale d'eau disponible dans le sol (TAW), basée sur les paramètres suivants du système : teneurs en eau du sol à la capacité au champ (FC) et au point de flétrissement permanent (PWP) exprimées en fraction volumétrique (respectivement, θ_{FC} et θ_{PWP} , en m^3 d'eau/ m^3 de sol), et au pourcentage d'eau facilement transpirable admissible, p (voir l'équation 6, appliquée dans le contexte d'un exemple de plante à racines peu profondes). Normalement, en l'absence d'études spécifiques, p est tirée des tableaux de la FAO (Allen *et al.*, 1998) et ajustée à l'ETc, selon les travaux précurseurs et enrichissants de Denmead et Shaw (1962).

Inversement, les **indicateurs de stress hydrique (B)** renseignent sur quand irriguer, si les seuils sont connus, et éventuellement, sur quelle quantité appliquer. Mais puisque dans ce cas précis une approche essais-erreurs est appliquée, l'approche B n'est pas recommandée pour le pilotage.

Aucune de ces possibilités (A ou B) n'est pleinement satisfaisante en soi. La liste d'incertitudes de la première approche est longue et ses limites ont fait l'objet de discussions poussées (par ex. : Ferreira, 2017). La connaissance de ces limites, principalement dans le cas de l'irrigation déficitaire des cultures non-herbacées a rendu la seconde approche plus populaire, ce qui est bien loin de rendre ses objectifs et résultats complets.

Plutôt que d'être considérée comme « alternatives », la combinaison de ces deux approches s'avère être une solution relativement courante, en usage actuellement – de manière plus ou moins empirique – pour le conseil aux exploitations en matière de pilotage d'irrigation. Ces deux résultats (A et B) peuvent être utilisés pour le contrôle et les ajustements, ou en vue d'obtenir de nouvelles informations. Un exemple d'utilisation expérimentale ainsi que les résultats découlant de cette combinaison dans une étude de cas portant sur des cultures

basses (avec racines peu profondes) est décrit brièvement (sans impliquer les mesures ETa). De plus, dans des expérimentations réalisées en oliveraie irriguée où l' ETa (et par conséquent Kc) avait été mesurée (plantes à racines profondes, résultats publiés), il a été possible d'aller plus loin, et une fonction de coefficient du stress obtenue expérimentalement a pu être comparée aux valeurs modélisées.

Plantes à racines peu profondes

L'expérimentation a eu lieu dans un champ de poivrons d'industrie (*Capsicum annum* L. 'Pompeo F1') irrigué au goutte-à-goutte situé dans une propriété privée (38° 57'07" N, 7°48'41" W, 226 m) près de Sousel (Portalegre), zone au climat tempéré de type méditerranéen (Csa), et au sol limoneux-sableux. Les goutteurs étaient espacés de 20 cm d'intervalle, avec un débit nominal de 0,75 L h⁻¹. Les plants ont été transplantés dans le champ le 4 mai 2018. Quatre sous-parcelles ont été constituées, deux avec une ligne simple (T1 and T3), et deux autres avec deux lignes doubles et du plastique entre elles (T2 and T4) ; deux devant être sous des conditions sans stress (T1 and T2) et deux sous stress (T3 and T4) ; de cette façon, la fonction stress était utilisée, et pour garantir différentes valeurs d'indice de surface foliaire (LAI) sur un seul côté par unité de surface. Le débit de l'irrigation était enregistré en permanence dans chacune des sous-parcelles.

Concernant l'application du bilan hydrique, la nomenclature suivante sera utilisée (voir les détails mentionnés plus bas) :

- eau stockée dans la zone racinaire du sol, pour le jour i : WS_i (en mm),
- variation quotidienne du stock d'eau : $\Delta WS = WS_{i+1} - WS_i$ (en mm),
- teneur volumétrique en eau du sol : θ (m^3/m^3),
- teneur volumétrique en eau du sol directement mesurée : θ_{meas} (m^3/m^3),
- teneur volumétrique en eau du sol modélisée : θ_{mod} (m^3/m^3).

Les deux approches (A and B) ci-dessus décrites ont été utilisées :

A. La modélisation de ETa fournit des données d'entrées pour l'équation du bilan hydrique afin d'obtenir la variation du stock d'eau dans le volume racinaire ($\Delta WS = WS_{i+1} - WS_i = \text{résultat}$, voir équation 1) (ici, volume total d'eau stockée en mm, d'où ont été obtenus la diminution de l'eau du sol et la teneur volumétrique en eau du sol, équation 2).

B. L'indicateur de stress hydrique utilisé pour les plantes/cultures ou l'état hydrique du sol était la teneur en eau volumétrique mesurée directement par la méthode gravimétrique classique (détails dans Carrilho, 2019).

Les variables d'entrée de l'équation de bilan hydrique utilisées au pas de temps journalier [équation 1] sont l'eau stockée dans la zone racinaire du sol, pour la journée i (WS_i , en mm), les précipitations (P , en mm/jour) et la hauteur d'irrigation (I , en mm/jour), mesurées tous les deux, l' ETa estimée (en mm/jour) et, le cas échéant, le drainage estimé (D , en mm/jour) au-delà du volume de

► contrôle (zone racinaire). Le résultat visé est l'eau stockée dans la zone racinaire pour la journée d'après (WS_{i+1}) et ainsi de suite :

$$WS_{i+1} = WS_i + P_i + I_i - D_i - ETa_i \quad [1]$$

Afin de trouver le point de départ de WS_i , la fraction volumétrique ou la teneur en eau du sol (θ , m^3/m^3) était directement mesurée au jour $i=1$ ($\theta_{meas,i}$) c'est-à-dire :

$$WS_i = z_{av,i} \times \theta_{meas,i} \quad [2]$$

où $z_{av,i}$ est la profondeur moyenne de la zone racinaire au jour i , définie comme le volume total occupé par les racines par unité de surface totale du sol.

La teneur volumétrique en eau du sol pour la journée d'après ($\theta_{mod,i+1}$) était approximativement obtenue de WS_{i+1} (équation 1) comme suit :

$$\theta_{mod,i+1} = WS_{i+1} / z_{av,i+1} \quad [3]$$

En comparant les valeurs estimées avec celles mesurées ($\theta_{meas,i+1}$), les paramètres principaux de l'estimation de l' ETa peuvent être ajustés de manière à ce que la meilleure correspondance entre les deux séries (modélisée et mesurée) soit trouvée. Les paragraphes suivants démontreront comment les paramètres cruciaux de cette approche simple ont été obtenus.

Variables et paramètres requis afin d'estimer ETa .

L'équation 4 a été utilisée afin d'effectuer les estimations de ETa :

$$ETa = ET_o \times Kc \times Ks \quad [4]$$

où l'évapotranspiration de référence (ET_o , en mm/jour) a été obtenue par l'équation de Penman-Monteith avec les conditions des cultures de référence (variables provenant d'une station météorologique standard et des paramètres de l'herbe tel que suggéré par Allen *et al.*, 1998), Kc a été prise en compte dans sa version simple (plutôt que

double), dans un premier temps d'après les tableaux actuels du même manuel FAO 56. Le coefficient de stress Ks , lorsqu'inférieur à 1, (ex. : quand $SWD > TAWp$), a été obtenu en utilisant un modèle simple (Allen *et al.*, 1998) :

$$Ks = (TAW - SWD) / [TAW \times (1 - p)] \quad [5]$$

où TAW représente le volume total d'eau disponible, SWD représente le déficit hydrique du sol, et la valeur de p fixée à 0,3, définissant l'eau facilement disponible ($RAW = TAW \times p$) pour laquelle la consommation d'eau n'est pas affectée ($Ks = 1$). Si SWD est inférieur à RAW , $Ks = 1$.

Le TAW est estimé comme d'ordinaire dans les applications d'ingénierie :

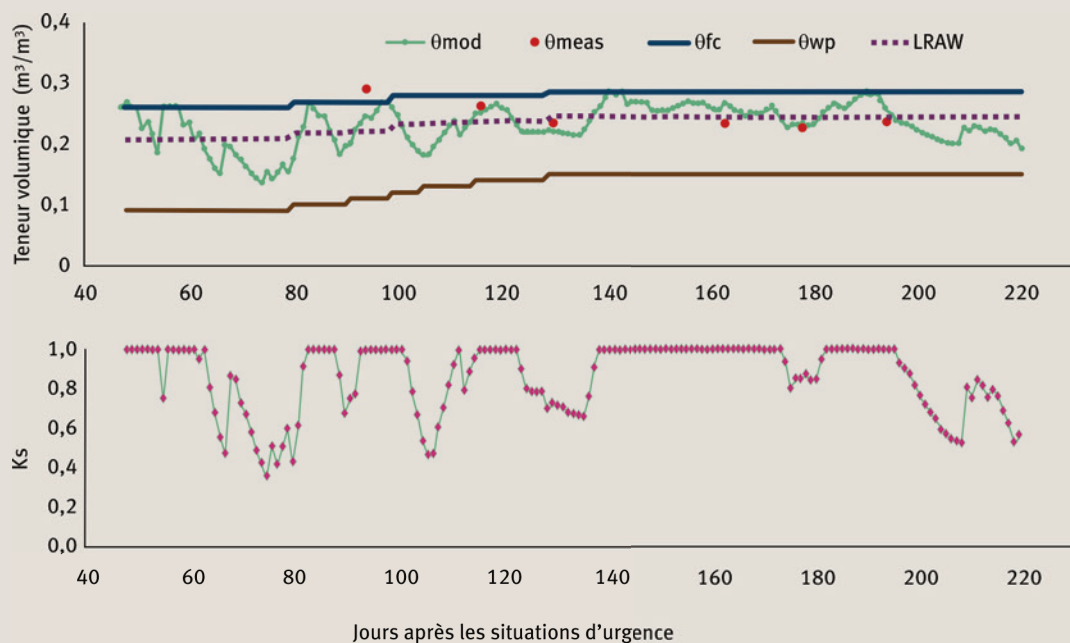
$$TAW = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \times z_{av} \quad [6]$$

avec les paramètres θ_{FC} et θ_{WP} changing as z_{av} variant au fur et à mesure que z_{av} augmente (racines occupant des couches plus profondes avec différentes propriétés), et z_{av} , obtenu en adaptant la fonction sinusoidale proposée par Borg et Grimes (1986) pour la croissance racinaire, basée sur un grand nombre d'observations de terrain contenant 48 espèces de cultures. Ces résultats sur la profondeur des racines ont été comparés aux mesures locales *in situ* (trois par saison, Carrilho, 2019) pour ajuster z_{av} et l'estimation. SWD était généralement estimé ainsi :

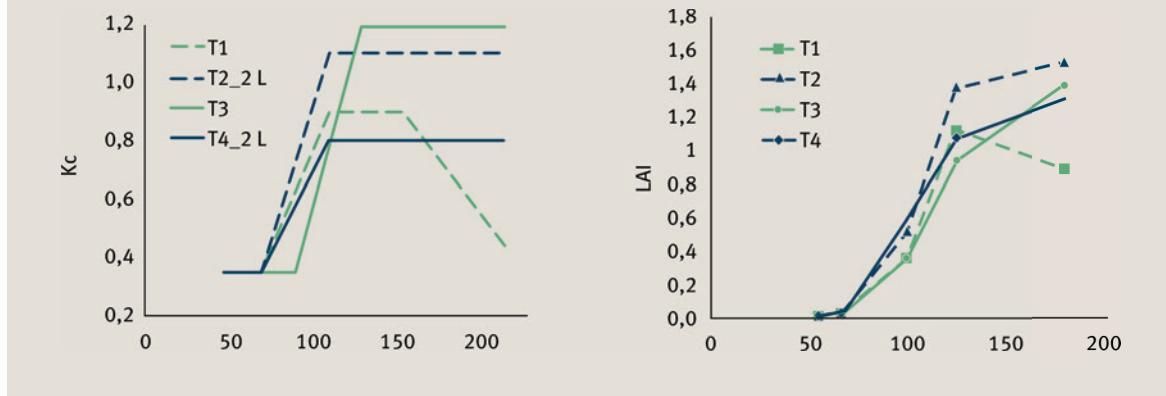
$$SWD = (\theta_{FC} - \theta_{mod}) \times z_{av} \quad [7]$$

Les paramètres du sol θ_{FC} et θ_{WP} ont été obtenus en multipliant les fractions correspondantes de la masse par la densité apparente du sol (D_a), le tout mesuré *in situ*, en quatre couches (de 0 à 50 cm en profondeur) avec quatre répétitions.

2 Progression saisonnière : en haut : de la teneur volumétrique en eau du sol, mesurée (θ_{meas}) ou modélisée (θ_{mod}), en rapport avec les lignes définissant les valeurs correspondantes : FC, WP et limite inférieure RAW ; et en bas : coefficient de stress estimé comme dans l'équation 5.



③ Progression saisonnière de (a, gauche) K_c obtenue de manière expérimentale à travers un processus d'auto-apprentissage à partir de la modélisation et des mesures de la teneur en eau du sol, et des mesures correspondantes de LAI (b, droite) pour quatre traitements (voir le texte) : ligne simple (T1, T3) et ligne double (T2 et T4), sous des conditions de stress (T3, T4), et en l'absence de stress hydrique (T1 and T2), pour des cultures de poivrons industrielles, Portalegre (Portugal). L'impact du stress à court terme (figure ②b) est exclu de ces valeurs K_c , qui reflètent seulement l'impact du stress sur le développement foliaire sur le long terme.



Pour ce qui est de la seconde approche (B), divers échantillons de θ_{meas} ont été prélevés sur les mêmes quatre couches de sol, en trois points par parcelle (tuyaux goutte-à-goutte, à 20 cm et 40 cm de ceux-ci), et sur quatre parcelles (48 mesures par jour). L'état hydrique du sol était également surveillé par une entité externe au moyen d'une sonde capacitive de mesure ; résultats douteux non présentés.

La stratégie se présente comme suit : en réduisant, dans la mesure du possible, l'incertitude inhérente aux paramètres θ_{FC} , θ_{WP} , Z_{av} et en supposant les valeurs p obtenues comme décrit ci-dessus, K_c (pour chaque stade phénologique examiné) a été fixé comme la variable inconnue, dont les valeurs peuvent être obtenues par expérimentation en comparant les valeurs mesurées et modélisées de l'état hydrique du sol. De plus, afin de clarifier l'interprétation des valeurs de K_c obtenues de cette manière, la tendance saisonnière de LAI a été suivie.

La progression saisonnière de la teneur volumétrique en eau obtenue avec les équations ① à ③ a d'abord été comparée aux valeurs observées à six dates différentes. Les paramètres utilisés au départ (surtout K_c) ont générés de mauvais résultats (non présentés). En conséquence, afin d'améliorer l'adéquation, la courbe d'évolution saisonnière de K_c a été modifiée pour les quatre traitements individuellement, et les sorties donnant les meilleurs résultats ont été analysées, (exemple à la figure ②a, pour le traitement T3), avec les valeurs correspondantes K_s (figure ②b).

La tendance saisonnière de K_c (figure ③a), observée à titre expérimental dans les quatre traitements a été comparée au LAI (figure ③b) mettant en évidence une correspondance relativement bonne, surtout pour les traitements bien irrigués. Les différences majeures par rapport aux valeurs présentées dans Doorenbos et Pruitt (1977) et dans Allen *et al.* (1998) – les deux manuels 24 et 56 de la FAO – portaient sur un cycle végétatif beaucoup plus long et le fait que, en général, K_c ne décroît pas à la fin de la période observée (jusqu'à la dernière récolte commerciale).

Une conclusion méthodologique importante était la possibilité, en recourant à cette approche, d'extraire certains paramètres du modèle sans même avoir à effectuer des mesures de ET_a . Cela a été rendu possible grâce à l'accessibilité du système racinaire. Ainsi l'état hydrique du sol est bien représenté par les mesures effectuées, ce qui n'est pas toujours le cas pour les plantes à racines profondes.

Plantes à racines profondes

Étant donné que l'ancien dispositif expérimental permettait de mesurer directement le K_c , pour les cultures à l'étude, la variable sélectionnée pour ajustement était K_s . Sur oliveraies irriguées au goutte-à-goutte (*Olea europaea* 'Arbequina'), on a pu obtenir des données expérimentales de K_s (fonctions K_s) en lien avec plusieurs indicateurs de stress hydriques (variable indépendante).

Les premiers résultats proviennent de Ferreira do Alentejo (au sud du Portugal), d'un système intensif à forte densité (4,75 x 7 m, 20% de couverture des sols), durant l'été 2011. Ces résultats ont été publiés dans les ouvrages Ferreira *et al.* (2012), Ferreira (2017), Conceição *et al.* (2017a, b, 2018). Une description détaillée des matériels et de la méthodologie est consignée dans ces publications. Dans une expérimentation plus récente (été 2017), ayant eu lieu à Serpa, dans la même région, dans une oliveraie à système super-intensif, un ensemble de données non encore pleinement explorées ont confirmé la fonction de stress établie antérieurement (Lourenço *et al.*, 2020).

Dans les deux cas, les cycles de stress ont été utilisés : il s'agissait, pendant plusieurs semaines des étés 2011 et 2017, de garder sous stress une sous-parcelle, et en même temps de bien en irriguer une autre (pour référence). L'effet sur la réduction de la transpiration (flux de sève) et sur plusieurs indicateurs de stress hydrique a été suivi. Ce qui nous intéresse ici, c'est la réduction relative de l'utilisation de l'eau (K_s) comme conséquence à court terme du stress hydrique.

▶ Dans le contexte actuel, ces exemples sont utilisés pour accentuer la nécessité de vérifier et de modifier les paramètres de la fonction de stress, TAW et p , si l'on suppose que cette forme (équation 6) décrit relativement bien la réalité observée, ce qui n'est pas toujours le cas (Paço *et al.*, 2012).

La méthode d'analyse de cette courte présentation consiste à montrer les paramètres appliqués aux conditions sous analyse et à les comparer avec ceux qui émaneraient des recommandations des manuels. De plus, l'interprétation est appuyée par des études complémentaires sur le fonctionnement des racines pour la première expérimentation, et sur d'autres études également, menées par la même équipe sur une parcelle d'oliviers non-irrigués proche..

L'usage direct de l'approche décrite (plantes à racines peu profondes) s'avère, dans la plupart des cas, inapplicable aux plantes à enracinement profond. Cela s'explique par le fait qu'il n'est pas réaliste de s'appuyer sur l'hypothèse selon laquelle les variations de stock d'eau mesurées dans les couches inaccessibles illustrent l'utilisation de l'eau par les plantes. Dans la présente situation, les mesures à long terme de l'utilisation de l'eau pour les cultures avaient été effectuées en ayant recours à une combinaison de mesures d'eddy covariance et de l'évaporation du sol (pour assurer la fiabilité) associées à la technique de mesure du flux de sève (pour le long terme). L'application prudente de telles techniques dans les terrains de culture d'olives mentionnés dans cet article est complexe mais avait déjà été décrite en détails (par ex. : Conceição *et al.*, 2017 et Tezza *et al.*, 2019). Durant ces deux cycles (2011 et 2017), au cours desquels une sous-parcelle avait été placée en situation de stress, alors que l'autre était bien irriguée, K_s n'était pas

modélisé mais avait été expérimentalement obtenu, étant le résultat approximatif du rapport entre l'eau utilisée dans les deux sous-parcelles (supposant que K_c est resté inchangé, pour la durée du cycle de stress). Les résultats ont permis d'effectuer la dérivation d'une fonction pour la réduction de la transpiration (Ferreira, 2017, 2020), ce qui fut confirmé dans l'expérimentation de Serpa, plus simple et effectuée à une date postérieure (Lourenço *et al.*, 2020).

Les paramètres de l'équation 5 précisément adaptés aux résultats expérimentaux sont $p = 0,04$ et $TAW = 310$ mm (figure 4).

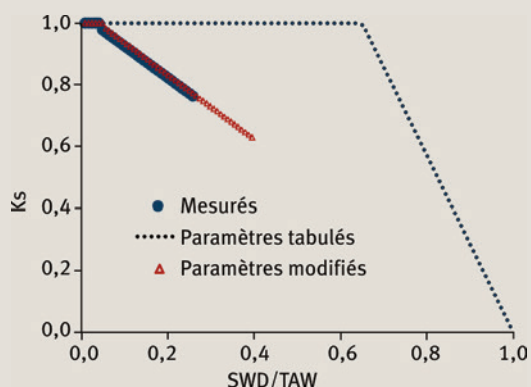
La différence entre les deux valeurs pour TAW (168 mm et 310 mm, figure 4) suggère que les racines avancent plus en profondeur que ne l'illustrent les tableaux et les premières observations. Inversement, la valeur constatée pour p est assez différente de celle suggérée dans les tableaux. Ce constat s'accorde avec nos observations de la fermeture modérée des stomates à une étape assez précoce du stress hydrique, dans ce cultivar, qui présente des caractéristiques iso-hydriques (Conceição *et al.*, 2017b).

De plus, l'ensemble des résultats de mesures des flux remontant à trois ans ont éclairé les aspects relatifs au volume exploité par les racines :

- pour les oliviers irrigués au goutte-à-goutte, soumis aux pratiques d'irrigation déficitaire de l'exploitant, l'utilisation totale de l'eau pendant la saison d'irrigation était supérieure aux volumes totaux d'irrigation mesurée (Conceição *et al.*, 2017), et cela en dépit de leur jeune âge. Cela pourrait peut-être s'expliquer par le fait que les plantes utilisent un volume important d'eau stockée en hiver et en début de printemps dans des couches relativement profondes.
- un suivi de l'état hydrique du sol à une profondeur atteignant 1,3 m (associé à des études sur la redistribution hydrologique sur terrain pluvial et terrain irrigué) suggère également une exploitation importante de couches profondes du sol (par ex. : Conceição *et al.*, 2018, Ferreira *et al.*, 2018). En outre, et plus important encore, sur ce terrain, l'eau disponible entre la surface et 1,3 m de profondeur n'était pas suffisante pour assurer les flux observés (données non publiées). En conséquence, les mesures des couches supérieures du sol n'ont probablement qu'une valeur indicative (limites des mesures du sol, lorsqu'utilisées seules pour des plantes à racines profondes).

En conséquence, dans cette étude de cas portant sur cultures ligneuses profondes, très résilientes et bien adaptées aux pénuries d'eau de l'été, les approches communes de modélisations pour l' ET_a utilisées seules et sans vérification, peuvent s'avérer inadaptées dans les cas d'application générale de l'irrigation déficitaire (évapotranspiration réduite par le stress). Réciproquement, les mesures du sol seules peuvent également être un échec pour le pilotage de l'irrigation. Dans ce genre de situation, le potentiel en eau foliaire avant l'aube s'est avéré très utile, mais n'est malheureusement pas automatisé (Conceição *et al.*, 2017). Une variable sélectionnée dérivée du diamètre de la tige nécessitait une parcelle bien irriguée en guise de référence, ce qui n'est pas pratiqué (Ferreira *et al.*, 2012).

4 Rapport entre K_s et SWD exprimé sous forme de fraction de TAW . Comparaison entre les valeurs mesurées et modélisées avec les paramètres tabulés (FAO 56 tabulé $p = 0,65$, avec variations pour les taux ET_c , résultat : $0,75$) et $TAW = 138$ mm (dérivé de la profondeur racinaire tabulée, $z = 1,2$ m, pour une couverture des sols de 20 %, et les paramètres des sols, présupposant une courbe complète à l'horizontal). Résultats des modèles également présentés en utilisant les paramètres modifiés expérimentalement : $p = 0,04$ and $TAW = 310$ mm.



Si la modélisation de l'ETa est cruciale pour extraire des paramètres des modèles sans mesures de l'ETa, comme effectué dans l'exemple des plantes à racines peu profondes, cette technique peut être difficile pour les plantes à racines profondes. Un exercice d'essai-erreur pourrait éventuellement apporter des réponses partielles, des approches statistiques (par ex. : Azevedo, 2019) pouvant même être possibles. ■

Remerciements

Les expérimentations mentionnées ont principalement fait l'objet de l'appui des projets WUSSIAAME (PTDC/AACAMB/100635/2008, FCT, Portugal) et WASA (ERANETMED/0006/2014).

Les auteurs

Maria Isabel FERREIRA, Vasco CARRILHO, Nuno CONCEIÇÃO and Sonia LOURENÇO

Physics and Water Resources, Depart. Sci. Eng. Biosystems (DCEB) and Research Center Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food (LEAF), Institut supérieur d'agronomie (ISA), Université de Lisbonne, Portugal.

✉ isabelferreira@isa.ulisboa.pt

✉ vasco_carrilho@hotmail.com

✉ nuconceicao@isa.ulisboa.pt

✉ svlourenco@isa.ulisboa.pt

Goncalo LEAL

Direction générale de l'Agriculture et du Développement rural (DGADR), Av. Afonso Costa, 3, 1949-002 Lisboa, Portugal

✉ galeal@dgadr.pt

EN SAVOIR PLUS...

- ✉ ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998, Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, Rome: FAO (FAO, *Irrigation and Drainage paper*, 56).
- ✉ AZEVEDO, P., 2018, Aplicações de Big Data e algoritmos de Machine Learning à gestão inteligente da rega Master thesis, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, ✉ <https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/17896>
- ✉ BORG, H., GRIMES, D.W., 1986, Depth development of roots with time: An empirical description, *Trans. ASAE*, n° 29, p. 194-197, ✉ <https://doi.org/10.13031/2013.30125>
- ✉ CARRILHO, V.S., 2019, Determinação experimental do coeficiente cultural em dois sistemas culturais de pimento no Alentejo, Master thesis, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, ✉ <http://hdl.handle.net/10400.5/19522>
- ✉ CONCEIÇÃO, N., HÄUSLER, M., LOURENÇO, S., PACHECO, C.A., TEZZA, L., FERREIRA, M.I., 2017a, Evapotranspiration measured in a traditional rainfed and an irrigated intensive olive orchard during a year of hydrological drought, *Acta Hort.*, n° 1150, p. 281-288, ✉ <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1150.39>
- ✉ CONCEIÇÃO, N., TEZZA, L., HÄUSLER, M., LOURENÇO, S., PACHECO, C.A., FERREIRA, M.I., 2017b, Three years of monitoring evapotranspiration components and crop and stress coefficients in a deficit irrigated intensive olive orchard, *Agric Water Manag.*, n° 191, p. 138-152, ✉ <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.011>
- ✉ CONCEIÇÃO, N., TEZZA, L., LOURENÇO, S., HÄUSLER, M., BOTETA, L., PACHECO, C.A., FERREIRA, M.I., 2018, Importance of very fine roots in deep soil layers for the survival of rainfed olive trees, *Acta Hort.*, 1199, 57, ✉ <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1199.9>
- ✉ DENMEAD AND SHAW, 1962, Availability of Soil Water to Plants as Affected by Soil Moisture Content and Meteorological Conditions, *Agronomy Journal*, n° 54, p. 385-390, ✉ <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050005x>
- ✉ DOORENBOS, J., PRUITT, W.O., 1977, Crop Water Requirements, *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24, FAO, Rome, 144 p.
- ✉ FERREIRA, M.I., CONCEIÇÃO, N., PACHECO, C.A., HÄUSLER, M., 2012, Análise de indicadores de desconforto hídrico durante ciclos de stress num olival intensivo no Alentejo. Proceed. VI Simp. Nac. de Olivicultura (Mirandela, November 2012), *Actas Portuguesas de Horticultura*, 21: p. 207-216, ✉ http://aphorticultura.pt/pdf/Indice_Atas_Portuguesas_de_Horticultura-21.pdf
- ✉ FERREIRA, M.I., 2017, Stress coefficients for soil water balance combined with water stress indicators for irrigation scheduling of woody crops, *Horticulturae*, 3 (2), 38, ✉ <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020038>
- ✉ FERREIRA, M.I., GREEN, S., CONCEIÇÃO, N., FERNANDEZ, J.E., 2018, Assessing hydraulic redistribution with the compensated average gradient heat-pulse method on rain-fed olive trees, *Plant Soil*, 425:21, ✉ <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3585-x>
- ✉ FERREIRA, M.I., 2020, Oliveira, a antiga arte de não morrer de fome nem de sede: estudos no Baixo Alentejo, Proceed. VIII Simp. Nac. de Olivicultura, Santarém (June 2018, APH), *Actas Portuguesas de Horticultura*, 31: p. 51-57, ✉ <http://www.rederural.gov.pt/centro-de-recursos/send/14-organizacao-producao/1801-actas-portuguesas-de-horticultura-n-31-viii-simpolio-nacional-de-olivicultura>
- ✉ LOURENÇO, S., CONCEIÇÃO, N., PRIETO LOSADA, H., SILVESTRE, J., SIQUEIRA, J., SANTOS, F., FERREIRA, M.I., 2020, Transpiration reduction as an answer to water stress: model versus measurements for irrigated olive trees in South Portugal, *Acta Hort* (in press).
- ✉ PAÇO, T.A., FERREIRA, M.I., PACHECO, C.A., 2012, Scheduling peach orchard irrigation in water stress conditions: Use of relative transpiration and predawn leaf water potential, *Fruits*, n° 68, p. 147-168.
- ✉ TEZZA, L., HÄUSLER, M., CONCEIÇÃO, N., FERREIRA, M.I., 2019, Measuring and modelling soil evaporation in an irrigated olive orchard to improve water management, *Water* 11(12), 2529, ✉ <https://doi.org/10.3390/w11122529>

Efficiency and optimization of irrigation : the Optirrig model

Optirrig est un outil logiciel de génération, d'analyse et d'optimisation de scénarios d'irrigation qui a été développé par INRAE. Il s'appuie sur une description simplifiée de la croissance des plantes en fonction de l'évolution des ressources en eau et en azote du sol. Il permet de comparer les mérites de différentes stratégies d'irrigation en fonction de différentes contraintes (quota d'eau, périodes de disponibilité limitée, arrêtés préfectoraux, coût de l'eau et de l'énergie), pour des objectifs opérationnels à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation ou du territoire.

Le modèle Optirrig

Le modèle Optirrig (Cheviron *et al.*, 2016) est une structure informatique à deux couches, dont la couche interne est héritée du modèle Pilote (Mailhol *et al.*, 2018) en suivant le même principe de parcimonie quant au nombre et à la nature des variables pertinentes, et aux liens entre elles. Cependant, cette boucle hydro-agronomique a été récemment réécrite en langage R et sous forme modulaire, de manière à permettre un développement collaboratif, simplifier l'analyse du modèle et l'inclusion de nouveaux processus, avec par exemple la création d'un module efficacité. La couche externe consiste en une série de « modes scénarios » qui ont en commun l'utilisation de runs multiples, pour des scénarios exploratoires (tests de pratiques d'irrigation et de fertilisation, scénarios climatiques), de l'analyse numérique (étude d'incertitude et de sensibilité) ou de l'optimisation de l'irrigation (optimisation ex-post jusqu'ici, optimisation en temps quasi-réel dans les projets actuels).

La figure 1 détaille la boucle hydro-agronomique (figure 1a), comment le signal d'irrigation se propage à travers les variables du modèle (figure 1b) puis où s'effectuent les calculs dédiés à l'efficacité de l'irrigation (figure 1c) et enfin comment les différents scénarios d'irrigation sont gérés dans les « modes scénarios » pour évaluer leurs impacts sur les indicateurs d'efficacité (figure 1d). Le modèle tourne à un pas de temps journalier mais ses variables saisonnières (ex. : indice de récolte H_i , rendement agricole Y) ainsi que les valeurs finales des variables journalières associées (ex. : matière sèche totale TDM) peuvent être anticipées, à condition d'être assez avancé dans la saison. Cette anticipation vaut aussi pour les autres indicateurs saisonniers (ex. : irrigation cumulée, rendement financier), elle permet un contrôle des tentatives d'optimisation en liant l'horizon opérationnel (effets à court court-terme) et l'horizon tactique (effets sur la saison).

Dans une vue d'ensemble, les paramètres-clés de la boucle hydro-agronomique sont la capacité au champ et la profondeur du profil (i.e., la détermination correcte de la réserve utile) et la variable centrale est l'indice foliaire LAI. De bonnes prédictions de la dynamique du LAI, à partir des paramètres « phénologiques » de temps thermiques associés aux stades de développement de la culture, assurent généralement des prédictions fiables de la dynamique des autres variables. Il faut noter que le stress hydrique affectant LAI est calculé comme un déficit relatif d'évapotranspiration tandis que le stress hydrique affectant TDM est calculé comme un déficit relatif de transpiration, avec la possibilité d'ajuster indépendamment la nocivité des stress (paramètre λ associé aux stress, figure 1a). Ceci est un degré de liberté intéressant dans la paramétrisation du modèle, pour contrôler séparément l'amplitude des termes LAI et TDM une fois leurs dynamiques connues.

Efficacité de l'irrigation

« Du canal aux feuilles de la plante »

L'eau d'irrigation va de la source (canal, rivière, nappe phréatique ou réservoir) jusqu'aux racines et aux feuilles des plantes, à travers une succession de processus et d'échelles :

- écoulement sous pression lors du pompage et de l'amenée d'eau à la parcelle, avec des pertes régulières (fuites, fonctionnement normal des canons) ou singulières (rupture de canalisations, endommagement des gaines d'irrigation) ;
- écoulement multiphasique dans l'air, avec (i) atomisation d'une petite fraction massique du jet lors de l'aspersion, et transport hors périmètre de cette fraction plus sensible au vent qu'à la gravité, et (ii) déformation du périmètre mouillé (région impactée par les gouttes liquides) causée par le vent avec dépassement des limites de la parcelle ;

- possible flaquage lors d'irrigation trop intenses, en particulier durant la phase d'humectation des sols, avec un risque de ruissellement, de pertes accrues par évaporation ou de drainage profond ;
- écoulement de surface lent lors de l'irrigation gravitaire, avec les pertes ci-dessus plus une distribution d'eau inégale selon la position amont ou aval dans la parcelle ;
- écoulement dans la matrice du sol ou dans ses macropores lors de l'infiltration, avec un risque de stockage excessif par rapport aux capacités d'absorption d'eau par les racines de la plante ;
- reprise de l'eau du sol par les racines et écoulement de l'eau dans les organes de la plante, causé par des différences de pression successives, résultant finalement en changement de phase (évaporation par les feuilles).

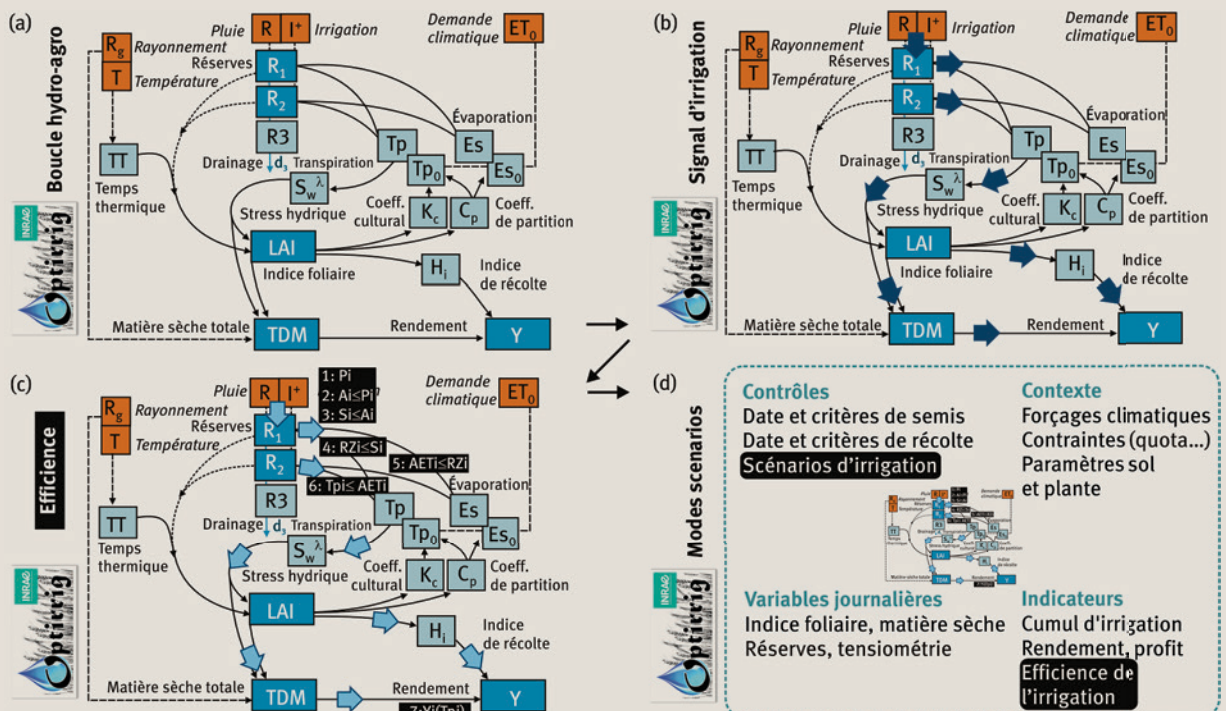
Même si elle ne couvre pas complètement le sujet, l'expression « du canal aux feuilles des plantes » renvoie à la succession d'échelles spatiales, de technologies de l'irrigation et de processus physiques traversés par l'eau d'irrigation. L'équipe OPTIMISTE (Optimisation du pilotage et des technologies de l'irrigation, minimisation des intrants, transferts dans l'environnement) de l'unité mixte de recherche G-EAU (INRAE Montpellier) travaille sur la connaissance détaillée des processus physiques en jeu et sur leur mesure, pour la constitution d'une banque de données mais aussi pour en tirer des formulations simplifiées, identifier les processus d'ordre 1 à implémenter dans Optirrig.

Schéma en cascade

La figure 2 illustre cette cascade de processus et les pertes associées, en les rattachant à des éléments présents dans le modèle, soit des variables calculées explicitement, soit des effets décrits indirectement à travers des coefficients (ici, la dérive due au vent et la compétition avec les adventices). Comme cela apparaissait déjà dans la figure 1c, séparer le terme d'irrigation en plusieurs termes (P_i : irrigation amenée à la parcelle, A_i : irrigation qui traverse les équipements et S_i : irrigation qui atteint le sol) permet une analyse fine des « processus amont » (que le module efficience permet d'étendre plus amont, jusqu'au pompage de l'eau).

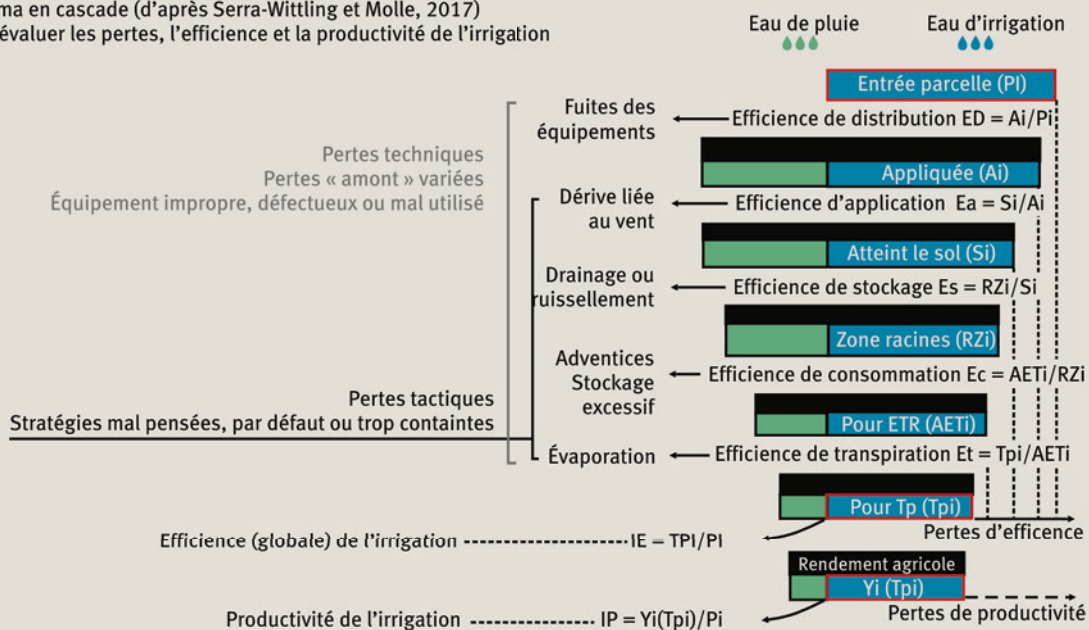
Le point le plus marquant de la figure 2 est sans doute la partition « artificielle » entre les fractions d'eau de pluie et d'eau d'irrigation (adaptée de Serra-Wittling et Molle, 2017). Cette partition est propagée de manière très visuelle à travers les différents processus, avec des pertes successives et spécifiques, jusqu'à parfois réduire la partie utile de l'irrigation à une petite partie de l'eau d'irrigation disponible en entrée de la parcelle. Il en va de même pour la partie utile de l'eau de pluie, mais l'irrigation est délibérée, alors que la pluie ne l'est pas. L'optimisation appliquée à la fraction « eau d'irrigation » devrait donc dépendre du remplissage de la réserve du sol par la pluie, ce qui implique (i) d'identifier l'évolution des fractions d'eau de pluie et d'eau d'irrigation dans la réserve du sol (figure 1c) et (ii) chercher dans la figure 2 les bonnes variables-cibles pour l'optimisation de l'irrigation.

1 (a) Forçages climatiques (orange), variables principales et observables (bleu moyen) et variables auxiliaires (bleu clair) dans la boucle hydro-agronomique. (b) Transmission du « signal d'irrigation » à travers les variables du modèle. (c) Focus sur l'efficience de l'irrigation avec l'ajout de variables dédiées : P_i l'eau d'irrigation amenée à la parcelle, A_i l'irrigation appliquée à travers les équipements, S_i l'irrigation qui atteint le sol, RZi l'irrigation stockée dans la zone racinaire, $AETi$ l'irrigation évapotranspirée, Tpi l'irrigation transpirée, $Yi(Tpi)$ la fraction du rendement agricole directement attribuable à l'irrigation, voir les détails dans le schéma en cascade de la figure 2. (d) Modes scénarios d'Optirrig pour des runs multiples de la boucle hydro-agronomique, pour des contextes et/ou des contrôles sélectionnés, en testant ici des scénarios d'irrigation et leurs impacts attendus sur les variables journalières du modèle et les indicateurs saisonniers, et en se focalisant sur l'efficience de l'irrigation en plus des variables cibles habituelles pour l'optimisation.



② Schéma en cascade pour lister et évaluer les pertes successives (techniques et/ou tactiques) durant l'irrigation à la parcelle. Les efficacités des différents processus se combinent pour donner une efficacité globale qui représente la fraction de l'eau d'irrigation amenée à la parcelle (P_i) qui est finalement transpirée par la culture (T_{pi}). Le lien entre efficacité et productivité de l'irrigation est également représenté.

Schéma en cascade (d'après Serra-Wittling et Molle, 2017)
pour évaluer les pertes, l'efficacité et la productivité de l'irrigation



Bien sûr, une difficulté pour l'optimisation est la nature imprévisible du climat sur un horizon de quelques jours, et encore plus sur l'horizon de la saison. L'optimisation de l'irrigation en temps quasi-réel est donc bien plus compliquée que l'optimisation ex-post, une fois que la chronique et les valeurs finales de toutes les variables sont connues, et que des stratégies d'irrigation améliorées peuvent être recherchées sans incidence directe sur la saison en cours. Cependant, même si le schéma en cascade a été imaginé pour évaluer l'efficacité de stratégies passées, il convient aussi pour décrire la dynamique de ses différents termes. En prenant toutes les quantités mentionnées comme des variables journalières, on peut aussi évaluer les effets à court terme des tentatives d'optimisation en temps quasi-réel orientées vers plus d'efficacité.

Dans les problèmes d'optimisation de l'irrigation, les pertes techniques émanent de l'équipement et les pertes tactiques d'une stratégie déficiente. Les pertes techniques et les parades associées ont été décrites dans Serra-Wittling et Molle (2017) et Serra-Wittling *et al.* (2019). Cet article traite plutôt des actions tactiques, en lien avec de récents développements d'Optirrig.

Le schéma en cascade permet de visualiser les pertes successives (et comment elles s'additionnent étape par étape pour constituer des pertes globales) ou d'identifier les efficacités des différents processus, étape par étape. Ces efficacités E (E_d pour la distribution, E_a pour l'application, E_s pour le stockage, E_c pour la consommation, E_t pour la transpiration) prennent des valeurs entre 0 et 1, et de même que l'efficacité globale obtenue par multipli-

cation. Cette autre lecture du schéma en cascade s'avère utile pour déterminer le maillon faible de la chaîne d'efficacité. En guise d'exemple, quand toutes les efficacités valent $E=0,9$ (ce qui est vraiment élevé) le score total n'est « que » $IE=0,95=0,69$ et quand toutes les efficacités valent $E=0,75$ (ce qui est assez mauvais pour E_d et E_a mais bon pour les autres termes) le score total chute à $IE=0,24$. Cette lecture du schéma en cascade incite à (i) estimer les valeurs contextuelles de E_d , E_a , E_s , E_c et E_t , pour un *a priori* sur les points faibles de la chaîne d'efficacité, (ii) concevoir une expérimentation pour confirmer le diagnostic, (iii) établir des cibles réalistes (en termes d'efficacité) compte-tenu des contraintes de gestion du site et des objectifs, et (iv) traiter le problème d'optimisation, soit à la main, par des essais et erreurs, soit dans des procédures plus formelles.

La manière de traiter les problèmes d'optimisation dépend certainement des variables prises en compte et des interactions entre elles. Par exemple, la présence de termes communs (P_i , T_{pi}) dans les expressions de l'efficacité de l'irrigation IE et de sa productivité IP suggère une corrélation claire entre IE et IP . De plus, le rendement financier leur est probablement corrélé aussi, car « plus de plante avec moins de gouttes » ne peut pas nuire. Finalement, on parvient à cadrer un peu le problème d'optimisation grâce aux relations entre ses variables-clefs (le cumul d'irrigation ΣI , le rendement agricole Y et le rendement financier F) et en se choisissant un angle d'attaque : réduire les pertes (i.e. augmenter les efficacités des processus) dans le schéma en cascade.

Implémentation dans Optirrig

Hypothèses et vérifications

Jusqu'à-là, la figure 1 c la figure 2 ont insisté sur la distinction entre les fractions d'eau de pluie et d'eau d'irrigation dans plusieurs des variables du modèle (réserves du sol, drainage, évaporation, transpiration). L'hypothèse de départ, celle qui sous-tend toute l'approche, est celle d'un mélange total entre l'eau de pluie et l'eau d'irrigation dans les réservoirs du sol, et donc dans les organes de la plante. Par conséquent, les quantités propagées dans les variables du modèle sont des fractions volumiques « fictives » (ou « effectives ») d'eau de pluie et d'eau d'irrigation.

D'après des travaux de référence en physique du sol sur les processus de diffusion, tournées vers l'adaptation de la loi de Fick (Crank, 1956; Carslaw et Jaeger, 1959; Kirkham et Powers, 1972) et d'après les relations entre la diffusivité et la teneur en eau (ex.: Millington et Quirk, 1961), il est très probable que le mélange complet se produise entre l'eau de pluie et l'eau d'irrigation, au pas de temps journalier du modèle, pour la taille typique de ses réservoirs et pour leurs teneurs en eau habituelles. En particulier, l'irrigation vise justement à ne pas atteindre des teneurs en eau trop faibles qui seraient des cas-limites pour cette approche, et auraient simplement pour effet de retarder le mélange, non de l'empêcher. De plus, l'existence de flux gravitaires de convection, soit explicites (drainage entre les réservoirs d'Optirrig) soit implicites (mouvements d'eau à l'intérieur de chaque réservoir), est très favorable au mélange (ex.: Flühler et al., 1996; Chalhoub et al., 2013).

Le mélange complet signifie qu'il n'y a pas de stratification entre l'eau de pluie et l'eau d'irrigation dans le sol, sans différences de densité ou de rhéologie (hautement improbables pour de l'irrigation en eau conventionnelle)

et que l'ordre d'arrivée dans le sol ne joue aucun rôle. Ceci écarte les écoulements de type « effet-piston » et suppose aussi que le mélange se fasse avant que le drainage ne survienne.

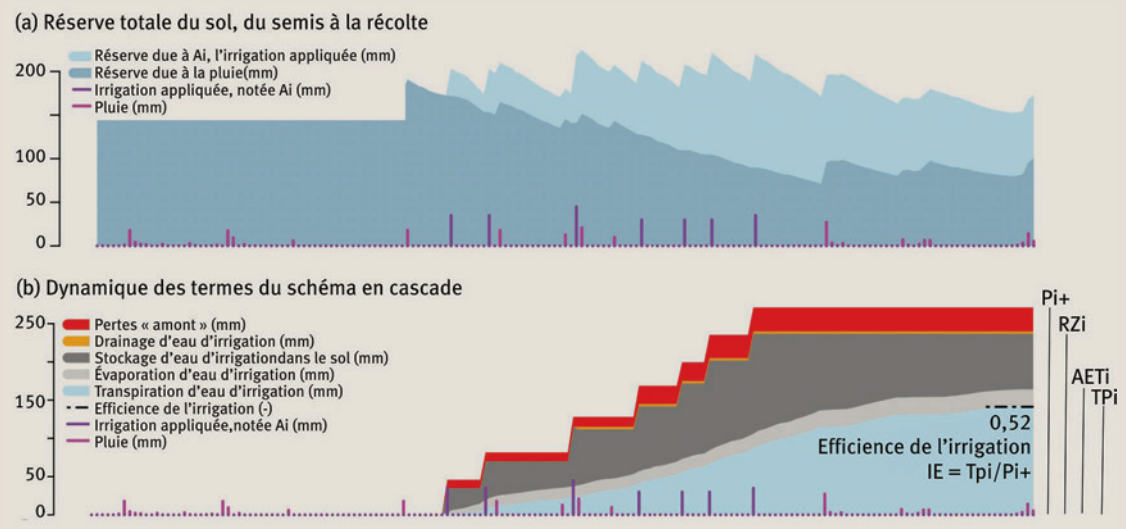
Les hypothèse « mélange complet » et « pas de stratification » dans les réservoirs du sol (R1, R2, R3, figure 1) permettent de définir des fractions volumiques (f_1, f_2, f_3) pour chaque réservoir, avec par exemple $f_1 = R11/R1$ où R11 est la réserve d'eau d'irrigation et R1 la réserve totale, avec des définitions similaires pour f_2 et f_3 . Par cohérence, nous supposons que tous les processus physiques (drainage, évaporation, prélèvement par les racines) mobilisent les mêmes fractions volumiques. Par exemple, si TP21 est la transpiration d'eau d'irrigation depuis le réservoir R2, alors $TP21/TP2 = f_2$.

Codage des hypothèses dans Optirrig

L'effort de codage est d'abord de formuler toute la série de nouvelles variables liées à l'efficacité comme un module d'Optirrig, à brancher sur la boucle hydro-agronomique, sans en modifier les calculs. Ensuite, il faut forcer la règle des « fractions égales » pour toutes les variables reliées à l'efficacité, pour préserver la conservation de la masse, ce qui nécessite des astuces de programmation à présenter ailleurs, avec les détails de la structure du modèle.

Une fois qu'il est possible d'avoir les fractions l-irrigation et R-pluie pour toutes les variables, toutes les quantités du schéma en cascade (figure 2) deviennent accessibles au pas de temps journalier, pour évaluer l'efficacité des processus. Il est possible, par exemple, d'identifier que la pluie de 50 mm tombée le 4 avril a rempli les réservoirs R1 et R2 pour donner des proportions de 90 % d'eau de pluie et de 10 % d'eau d'irrigation, et provoqué un drainage de 10 mm, composé de 90 % d'eau de pluie (9 mm) et de 10 % d'eau d'irrigation (1 mm).

3 (a) Dynamique de la réserve totale du profil de sol, depuis le semis jusqu'à la récolte, en séparant la fraction due à l'irrigation (bleu clair) de la fraction due à la pluie (bleu moyen) pour les épisodes d'irrigation (violet) et de pluie (rose) indiqués.
 (b) Dynamique associée des termes du schéma en cascade de l'efficacité (figure 2) indiquant l'efficacité globale de l'irrigation ainsi que les valeurs des termes de perte : amont de la parcelle, drainage, stockage excessif et évaporation. Ce graphique provient d'un exemple semi-fictif construit sur des données réelles de sol et de culture (maïs, sur la station expérimentale de Lavalette, à Montpellier, France) avec des données de pluie et d'irrigation modifiées.



Sorties du modèle

La figure 3a montre les évolutions de la réserve du sol due à irrigation (bleu clair) et à la pluie (bleu moyen) en réponse à l'irrigation (violet) et à la pluie (rose), dans un cas d'école (cas réel légèrement modifié). Au premier coup d'œil, la stratégie d'irrigation suivie vise à maintenir une réserve totale suffisamment haute, sur le profil du sol, ce qui est très classique. Un autre élément bien visible est la fraction croissante d'eau d'irrigation, apporter pour compenser (surcompenser ?) le manque de pluie durant les mois chauds.

La figure 3b donne des indications complémentaires et propose une vue d'ensemble de la dynamique des variables de l'efficience, en montrant leurs valeurs cumulées. Des pertes « amont » sous forme d'incidents matériels ont été supposés survenir durant les 1^{re}, 4^e et 7^e irrigations, en décrivant par « amont » ce qui se trouve avant le terme Si dans le schéma en cascade (ce qui permet d'étendre l'analyse aux termes de pompage, de transport et de livraison de l'eau à la parcelle). Ces pertes (en rouge, figure 3b) sont des pertes affectant l'eau disponible initialement à la parcelle (Pi) voire plus en amont (Pi+).

Dans cet exemple, du drainage d'eau d'irrigation (orange, figure 3b) se produit après l'épisode de pluie qui survient juste après la 3^e irrigation. Par contraste, une grande quantité d'eau d'irrigation (gris moyen, figure 3b) est progressivement stockée dans le sol, qui culmine après la 7^e irrigation puis décroît progressivement jusqu'à une valeur finale probablement excessive. Il n'était sans doute pas nécessaire d'effectuer les deux dernières irrigations de la saison culturale. Néanmoins, l'évaporation de l'eau d'irrigation (gris clair, figure 3b) reste limitée et son ratio à la transpiration d'eau d'irrigation (bleu

clair, figure 3b) décroît avec le temps, ce qui est satisfaisant. Finalement, une valeur correcte de l'efficience de l'irrigation est atteinte (IE=0,52) et les valeurs des variables liées à l'irrigation, dans le schéma en cascade, sont reportées dans la partie droite de la figure 3b, pour identifier les pertes.

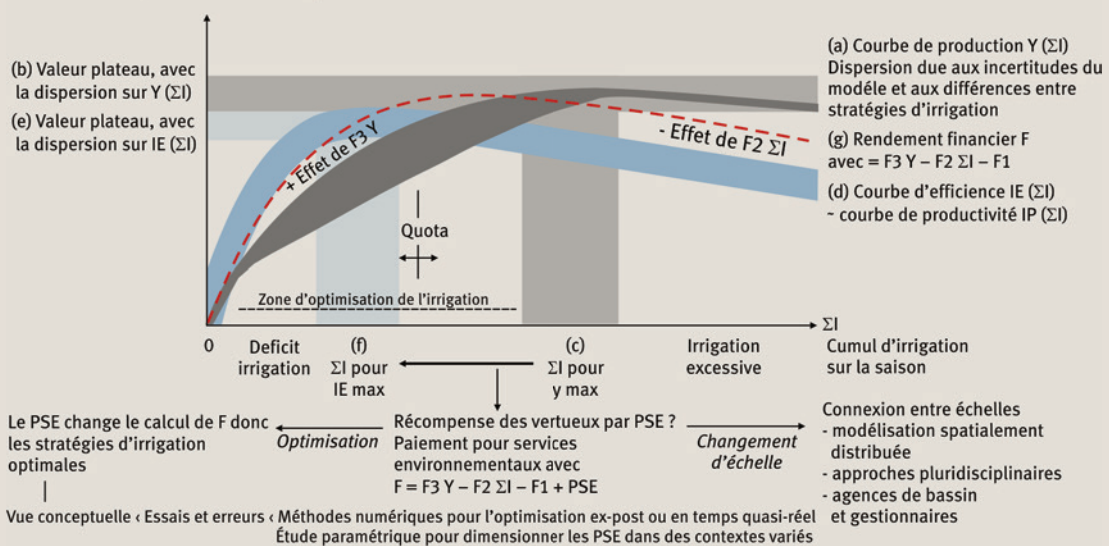
L'efficience de l'irrigation dans les problèmes d'optimisation

Un problème typique d'optimisation est de trouver les scénarios qui maximisent le rendement financier (disons F) avec suffisamment de rendement agricole ($Y > Y^*$) mais moins d'irrigation qu'un certain quota ($\Sigma I < \Sigma I^*$), et avec des contraintes additionnelles sur la formulation des scénarios d'irrigation (ex. : tour d'eau et limitations techniques, disponibilité limitée des ressources sur certaines périodes, décrets préfectoraux). Il y a une interaction claire entre ces variables, liées par la courbe de production $Y(\Sigma I)$ et l'écriture du rendement financier $F = F_3 Y(\Sigma I) - F_2 \Sigma I - F_1$ où F_3 est le prix de vente de la récolte, F_2 donne les coûts de l'eau et de l'énergie par volume d'irrigation et F_1 rassemble les coûts fixes. Les limitations attendues pour la disponibilité de la ressource (quotas d'irrigation sur la saison, décrets préfectoraux pour restreindre les prélèvements) incitent à la recherche d'alternatives durables et si possibles vertueuses, par exemple l'inclusion de l'efficience de l'irrigation parmi les cibles de l'optimisation, avec des récompenses dédiées. La figure 4 tente d'illustrer ceci, à lire pas à pas en suivant les notes (a) à (g).

La figure 4a montre l'enveloppe des courbes de production avec (i) les inévitables incertitudes de modélisation dans la relation entre ΣI et Y (biais de modélisation, processus ignorés ou mal décrits, calage sur des don-

4 Essai d'illustration du lien entre le rendement agricole Y (a, b, c), l'efficience globale de l'irrigation IE (d, e, f) et le rendement financier F (g) pour différents cumuls d'irrigation ΣI . Les scénarios d'optimisation de l'irrigation peuvent modifier le lien entre Y, IE et F, et s'avérer particulièrement pertinents pour les conditions d'irrigation déficitaire, d'autant plus en présence de quotas d'irrigation ou de disponibilité limitée des ressources pendant certaines périodes. On ajoute un peu de complexité et un degré de liberté supplémentaire en considérant le paiement pour services environnementaux comme une rétribution possible pour les stratégies d'irrigation vertueuses ou/et parcimonieuses.

Rendement Y, efficience de l'irrigation IE et rendement financier F



nées incertaines) et (ii) des différences importantes entre stratégies d'irrigation (règles de décision plus ou moins pertinentes) donc entre scénarios d'irrigation (chroniques et cumuls d'irrigation). Ces éléments favorisent la dispersion de la courbe de production, en particulier dans les conditions d'irrigation déficitaires propices à l'optimisation (ventre de la courbe). *A contrario*, toutes les stratégies tendent à converger quand très peu d'eau est disponible ou si beaucoup trop d'irrigation est appliquée, avec un rendement affecté par les conditions d'anoxie du sol. La dispersion de la courbe de production s'accompagne d'un maximum flou pour le rendement Y , et d'une valeur plateau mal déterminée, figure 4b. La valeur de ΣI qui correspondrait au maximum de Y ne peut pas non plus être déterminée de manière unique, figure 4c.

Comme évoqué précédemment, une forte corrélation existe entre la productivité de l'irrigation (IP) et son efficience (IE). Les formes des courbes de IE, figure 4d, et de IP (non représentée) sont donc supposés être similaires, avec comme caractéristique connue le fait que la productivité maximum de l'irrigation soit obtenue pour des niveaux d'irrigation bien inférieurs à ceux nécessaires pour obtenir le rendement maximum. En traduisant ceci en termes d'efficience, les figures 4e et 4f indiquent la valeur maximale de IE et la valeur de ΣI associée, avec leurs incertitudes.

En gardant la description aussi simple que possible, le rendement financier F en figure 4g augmente fortement avec Y (étant donné les prix relativement bas de l'eau et de l'énergie) puis atteint un maximum, avant de décroître quand Y sature, alors que ΣI continue d'augmenter et que l'eau est visiblement gaspillée. Une manière de changer la donne serait l'introduction de l'efficience de l'irrigation parmi les variables de l'optimisation, et la récompense des stratégies vertueuses, d'irrigation déficitaire, qui réaliseraient un bon score d'efficience. Le paiement pour services environnementaux (PSE) offre un levier d'action et pourrait être introduit comme un terme additionnel dans le calcul de F . Ceci aurait deux implications majeures : les scénarios optimaux d'irrigation ne seraient

certainement pas les mêmes à l'échelle de la parcelle, et le passage à l'échelle du bassin s'avèrerait nécessaire, avec une vision pluridisciplinaire (simulations multi-agents, économie, politiques de l'eau) et spatialement distribuée pour cartographier les pratiques (téléédétection), les ressources (hydrologie, hydrogéologie), et éventuellement le rétrocontrôle entre les prélèvements pour l'irrigation et la disponibilité des ressources. ■

Les auteurs

Bruno CHEVIRON, Claire SERRA-WITTLING, Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ, Bruno MOLLE, Madiop LO et Yassin ELAMRI
G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, 361 Rue Jean-François Breton, BP 5095, F-34196 Montpellier Cedex 5, France.

✉ bruno.cheviron@inrae.fr
✉ claire.serra-wittling@inrae.fr
✉ juan-david.dominguez-bohorquez@inrae.fr
✉ bruno.molle@inrae.fr
✉ madiop.lo@inrae.fr
✉ yassin.elamri@inrae.fr

Magalie DELMAS^{1,2}

1. G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, 361 Rue Jean-François Breton, BP 5095, F-34196 Montpellier Cedex 5, France.
2. Université de Montpellier, L'institut Agro, UMR G-Eau, F-34060 Montpellier, France.
✉ magalie.delmas@supagro.fr

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Jean-Claude Mailhol et les collègues de l'équipe OPTIMISTE pour les précédentes versions du modèle et la collection de données, ainsi que le groupe de développement d'Optirrig. Merci à Yves Coquet (AgroParisTech) et Rafaël Angulo-Jaramillo (ENTPE) pour les éclairages et discussions sur la partie physique du sol de cet article.

EN SAVOIR PLUS...

- ✉ **CARSLAW, H.S., JAEGER, J.C.**, 1959, *Conduction of heat in solids*, Oxford, Clarendon Press, 517 p.
- ✉ **CHALHOUB, M., COQUET, Y., VACHIER, P.**, 2013, Water and Bromide dynamics in a soil amended with different urban composts, *Vadose Zone Journal*, 12 (1), p. 1-11, ✉ <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00853615>
- ✉ **CHEVIRON, B., VERVOORT, R. W., ALBASHA, R., DAIRON, R., LE PRIOL, C., MAILHOL, J.-C.**, 2016, A framework to use crop models for multi-objective constrained optimization of irrigation strategies, *Environmental Modelling & Software*, vol. 86, p. 145-157, ✉ <https://hal.inrae.fr/hal-02604719/>
- ✉ **CRANK, J.**, 1956, *The mathematics of diffusion*, London, Oxford University Press, 347 p.
- ✉ **FLÜHLER, H., DURNER, W., FLURY, M.**, 1996, Lateral solute mixing processes – A key for understanding field-scale transport of water and solutes, *Geoderma*, vol. 70, p. 165-183, ✉ [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00079-8](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00079-8)
- ✉ **KIRKHAM, D., POWERS, W.L.**, 1972, *Advanced soil physics*, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New-York, 552 p.
- ✉ **MAILHOL, J.-C., ALBASHA, R., CHEVIRON, B., LOPEZ, J.-M., RUELLE, P., DEJEAN, C.**, 2018, The PILOTE-N model for improving water and nitrogen management practices: Application in a Mediterranean context, *Agricultural Water Management*, vol. 204, p.162-179, ✉ <https://hal.inrae.fr/hal-02607450>
- ✉ **MILLINGTON, R.J., QUIRK, J.P.**, 1961, Transport in porous media [in Soil Science], *Transactions of the International Congress of Soil Science*, 7 (1), p. 97-106.
- ✉ **SERRA-WITTLING, C., MOLLE, B.**, 2017, *Évaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation*, Rapport pour le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 150 p., ✉ <https://bit.ly/3jIWD2Y>
- ✉ **SERRA-WITTLING, C., MOLLE, B., CHEVIRON, B.**, 2019, Plot level assessment of irrigation water savings due to the shift from sprinkler to localized irrigation systems or to the use of soil hydric status probes. Application in the French context, *Agricultural Water Management*, 223, ✉ <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.017>

Focus

Irré-LIS[®], exemple d'outil d'aide à la décision en irrigation

Conçu par ARVALIS-Institut du végétal, Irré-LIS[®] est un modèle simple de bilan hydrique qui permet le pilotage de l'irrigation en tenant compte des conditions météorologiques et des données parcellaires fournies par l'agriculteur. L'outil en ligne a permis de piloter trente cinq mille hectares de culture irriguée, en 2019. Il est opérationnel aujourd'hui sur la pomme de terre, le maïs grain et fourrage, le maïs semence, le blé tendre, le blé dur, l'orge de printemps, le tabac et le soja.



Le manque d'eau est un facteur majeur de production en France. L'agriculture prélève environ quatre milliards de m³ d'eau par an, soit entre 10 et 15 % des prélèvements totaux mais en consomme trois milliards de m³ soit 50% des consommations totales (Roy, 2013). L'augmentation des températures moyennes ainsi que la stagnation des pluies entraînent de plus en plus de situations de crises. L'ensemble des prévisionnistes s'accordent pour dire que les besoins en eau des plantes vont continuer à croître dans le futur proche (Gendre *et al.*, 2019). Le changement climatique affectera également la répartition des eaux pluviales avec des projections futures prévoyant des hivers plus humides et des étés plus secs en France (Boé *et al.*, 2008 ; Terray et Boé, 2013 ; Vidal *et al.*, 2012). Cela se cumulera aux besoins

en eau d'irrigation induits par l'augmentation du besoin alimentaire lié à l'accroissement de la population mondiale (Gerland *et al.*, 2014).

L'importance pour les agriculteurs de gérer l'eau au plus près des besoins de la plante devient donc primordiale. Quand apporter l'eau et en quelle quantité ?

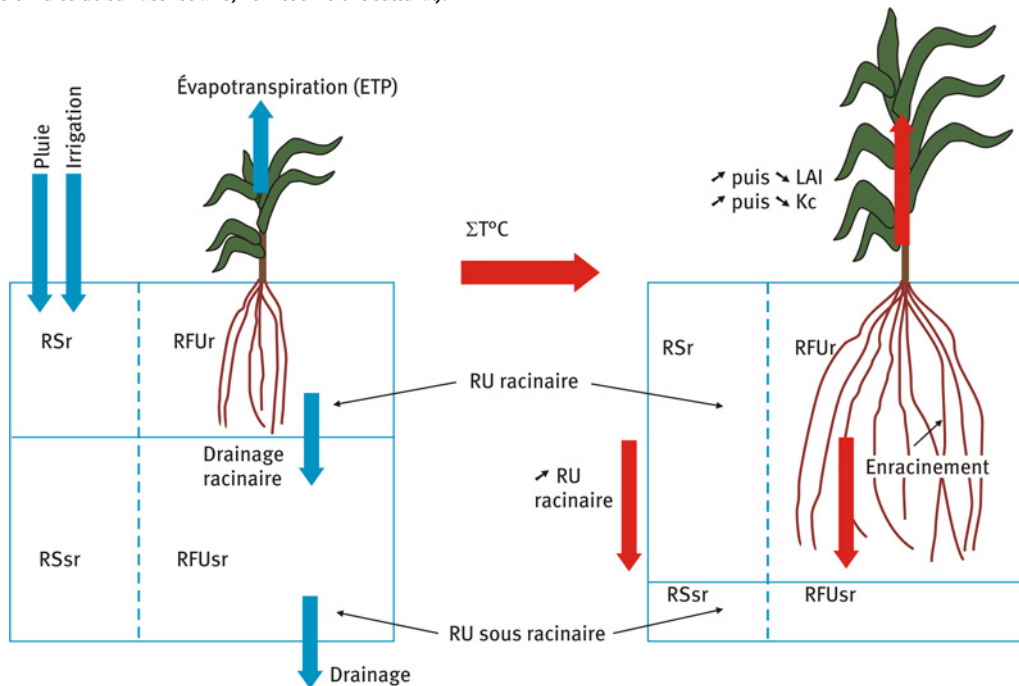
Afin de répondre à cet enjeu, l'un des leviers est le pilotage de l'irrigation. Il existe des outils d'aide à la décision qui permettent à l'agriculteur de raisonner son irrigation à la parcelle sur des critères agro-pédo-climatiques précis. Deux grandes familles d'outils existent : les outils basés sur la modélisation ou bilan hydrique et les outils basés sur les mesures à la parcelle. Les deux grandes familles d'outils ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients, qui peuvent être résumés dans le tableau 1.

1 Avantages et inconvénients des deux grandes familles d'outils d'aide à la décision pour le pilotage de l'irrigation.

Période	Bilan hydrique calculé	Mesures au champ : tensions (sondes tensio) ou humidité (sondes capacitatives)
Hiver à levée	Initialisation nécessaire du bilan hydrique pour évaluer l'état de la RFU* en début de campagne.	Évaluation directe de l'état de la RFU en début de cycle cultural. La mesure intègre les effets antérieurs : précédent, hiver et évaporation au printemps. Attention à la profondeur de mesure si déficit profond.
Levée à couverture complète du sol par la végétation	Pertinence du calcul du bilan hydrique dépendant de la croissance du couvert et de la surface du sol (texture, couleur, structure).	Mesure intégrant directement les effets de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes : période où la mesure au champ est la plus pertinente car elle intègre des situations particulières non prises en compte par les outils de bilan hydrique (croissance faible de la culture...).
Couverture complète du sol à sénescence	Période de calcul le plus pertinent sous condition de précision correcte des données d'entrée (pluie, irrigation, ETP**) et couvert normalement développé (pas de stress azoté, ou de problèmes sanitaires).	Interprétation délicate des mesures en cas d'enracinement limité. En forte restriction, les sondes tensiométriques sont mal adaptées (plafonnent à 150 cbars). Attention à la profondeur des mesures en sols profonds. Vigilance sur la représentativité du site du fait des irrigations.
Précision et représentativité	Dépend de la précision des données d'entrée : ETP, pluie, irrigation, estimation de RFU et RU***.	Représentativité du site de mesure : sol, position dans le tour d'eau, matériel d'irrigation (zone de recoupement). Mesure locale de l'irrigation indispensable (pluviomètre).
En cas d'orage ou de pluie importante	Nécessité d'estimer la pluie efficace.	La mesure intègre la pluie efficace... localement.

* RFU : Réserve en eau facilement utilisable ; ** ETP : évapotranspiration potentielle ; *** RU : réserve utile.

- ❶ Fonctionnement schématisé de l'outil Irré-LIS® (RSr = réservoir de survie racinaire, RSsr = réservoir de survie sous-racinaire, RFUr = réservoir facilement utilisable racinaire, RFUsr = réservoir facilement utilisable sous-racinaire, LAI = leaf area index, soit indice de surface foliaire, kc = coefficient cultural).



Dans la famille des outils de modélisation, plusieurs moteurs de calcul existent. Les plus connus sont :

- AquaCrop, modèle développé par la FAO¹, disponible en accès libre en ligne pour orge, coton, haricot sec, maïs, riz, pomme de terre, quinoa, sorgho, soja, betterave, canne à sucre, tournesol, teff, tomate et blé ;
- Opt'irrig, modèle développé par INRAE² (ex-Irstea) pour les grandes cultures et le maraîchage, ainsi que sur le foin de la plaine de Crau ;
- MOUSTICS, modèle développé par INRAE (ex-INRA), disponible en accès libre sur demande pour blé tendre, blé dur, maïs, tournesol, colza, pois printemps, pois hiver, orge printemps, orge hiver, sorgho, soja, luzerne, rye-grass, moutarde, vesce, vigne, miscanthus, canne à sucre, riz, betterave ;
- AqYield, modèle développé par INRAE (ex-INRA) disponible en accès libre sur demande pour blé tendre, colza, maïs, pois hiver, pois printemps, soja, sorgho, tournesol, prairie, culture intermédiaire, ray-gras ;
- SAFYE, modèle développé par le CESBIO³ disponible en accès libre sur demande pour maïs, blé, tournesol et soja.

Irré-LIS® appartient à la première catégorie d'outil. C'est un modèle simple de bilan hydrique. Le modèle a été conçu par Arvalis-Institut du végétal. Arvalis est un

institut technique agricole spécialisé dans les grandes cultures (céréales à paille, maïs, fourrage, pomme de terre, tabac, lin fibre), financé et géré par les agriculteurs français.

Dans l'outil, la plante n'est modélisée que comme un bloc évapotranspirant (il n'y a pas de séparation évaporation/transpiration), à la différence des modèles biophysiques plus complexes comme STICS, AquaCrop ou encore Pilote. L'objectif du modèle est de nécessiter peu de paramétrage pour faciliter son utilisation par les agriculteurs. C'est un outil propriétaire payant. Mis en œuvre sur le terrain depuis 2008, c'est un modèle de bilan hydrique à deux réservoirs. Le sol est découpé en réservoir utile racinaire et réservoir utile sous-racinaire. Cela signifie qu'il prend en compte la croissance des racines au fur et à mesure du cycle et considère que le réservoir utile accessible à la plante en début de cycle est inférieur à celui en fin de cycle (figure ❶).

Le paramétrage de l'outil a été réalisé à partir des expérimentations terrain Arvalis dans différentes régions françaises et sur plus de dix ans. L'agriculteur accède à l'outil via une plateforme web et saisit les informations de sa parcelle (localisation, culture, variété, date de semis/plantation, présence d'une culture intermédiaire, type de sol ou valeur du réservoir utile). La localisation de la parcelle est utilisée pour spatialiser les données météo.

1. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (en anglais : *Food and Agriculture Organization*).

2. INRAE, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement est issu de la fusion en 2020 entre l'Inra, Institut national de la recherche agronomique, et Irstea, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture.

3. Centre d'études spatiales de la biosphère.

En effet, pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'outil prend en compte les cinq stations météo les plus proches de la parcelle et estime l'ETP au prorata de la distance de chaque station. Pour la pluie, ce sont également les cinq stations météo les plus proches qui sont prises en compte mais une étape supplémentaire est prévue. La pluie n'est comptabilisée que s'il a plu sur la station la plus proche. Si c'est le cas, elle est ensuite calculée au prorata de la distance des cinq stations comme pour l'ETP. Néanmoins, il est complexe d'estimer les pluies estivales qui sont souvent très localisées. C'est pour cette raison qu'il est possible pour l'agriculteur de modifier les pluies dans l'outil. Depuis 2020, il lui est maintenant possible de raccorder une station météo connectée à sa parcelle afin de prendre en compte les pluies réelles. En tenant compte du sol, des conditions météorologiques et de la culture, l'outil calcule en temps réel :

- les dates prévisionnelles des stades physiologiques des différentes espèces,
- l'état de la réserve en eau du sol et l'état prévisionnel à sept jours (hors pluies éventuelles),
- les prévisions ETP.

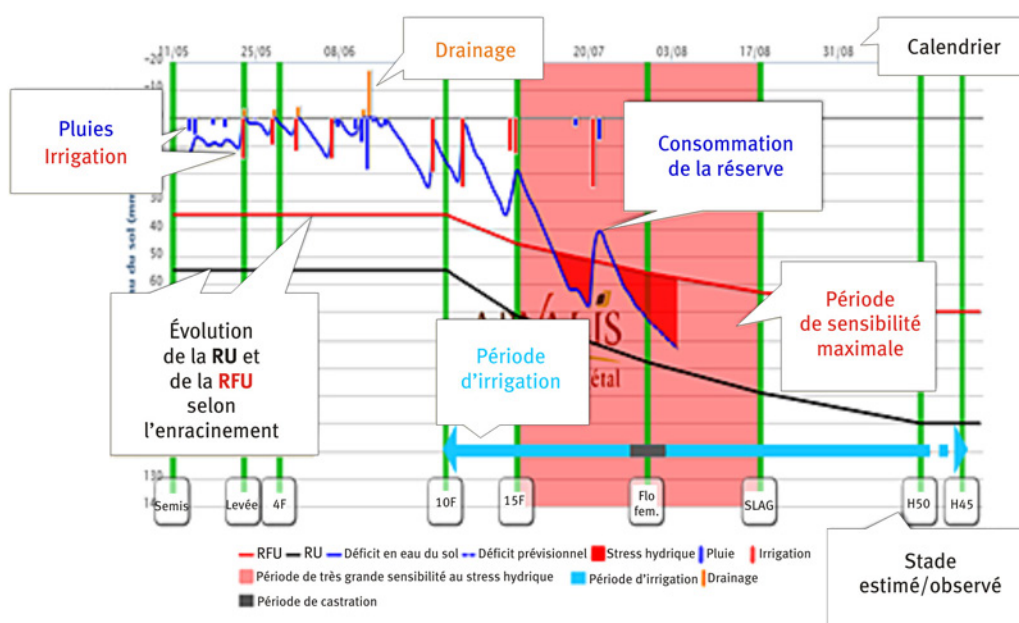
Toutes les informations renseignées permettent également à l'outil de générer un graphique (figure 2) qui facilite la prise de décision de l'agriculteur. Il suit la courbe bleue (déficit en eau du sol calculée) et son objectif est qu'elle reste au-dessus de la ligne rouge (bas de réservoir facilement utilisable par la plante). Si son déficit en eau est de 0 (atteinte de l'humidité à la capacité au champ), l'outil calcule du drainage (barre orange). L'outil Irré-LIS ne décide pas du moment d'irriguer, la décision de lancer ou non le système d'irrigation revient toujours à l'agriculteur qui doit prendre en compte les résultats de l'outil mais également les prévisions de pluie et la capacité de son matériel d'irrigation.

L'outil fonctionne aujourd'hui sur pomme de terre, maïs grain et fourrage, maïs semence, blé tendre, blé dur, orge de printemps, tabac et soja (culture mise en œuvre en partenariat avec Terres Inovia). En 2019, l'outil a permis aux agriculteurs de piloter 35 000 ha de culture.

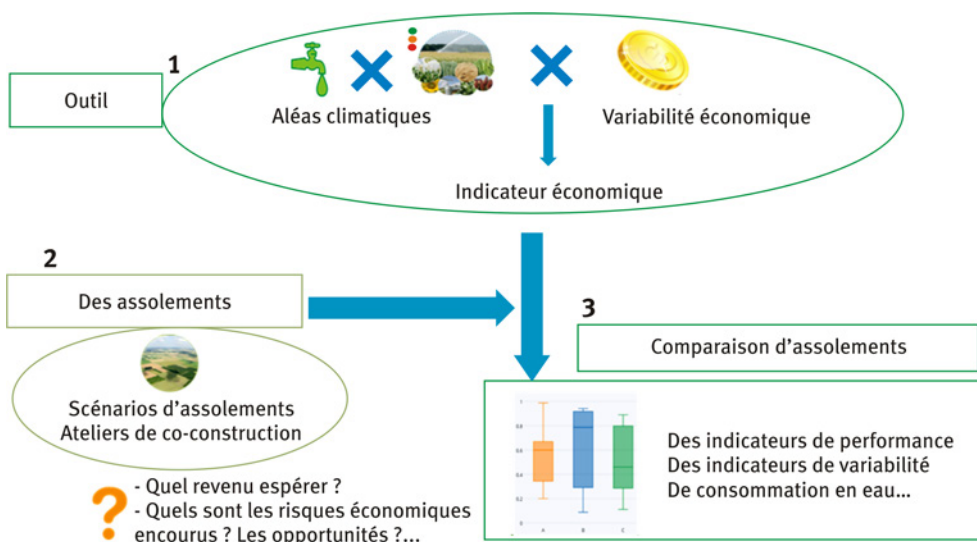
Le modèle est également utilisé à une échelle plus large que la parcelle. En effet, au-delà de l'utilisation pour un pilotage de l'irrigation à la parcelle, parce que la gestion quantitative de l'eau se raisonne également à l'échelle de l'exploitation agricole, le moteur de calcul Irré-LIS a été intégré à l'outil ASALEE, également conçu par ARVALIS – Institut du végétal en partenariat avec Terres Inovia, INRAE, les Chambres d'agriculture de Charente-Maritime et des Deux-Sèvres. Issu du besoin émergeant de caractériser l'impact des aléas climatiques sur le résultat économique des exploitations de type « grandes cultures », ASALEE est un outil d'aide à la décision pour la comparaison des stratégies d'assolement (figure 3). L'objectif d'ASALEE est de permettre à un agriculteur et/ou un conseiller de comparer différents choix d'assolement en intégrant divers facteurs de risques tels que la variabilité du prix des productions agricoles, le changement climatique et l'accès à la ressource en eau. Ces choix, orientés par les capacités techniques relatives à une exploitation donnée, permettront de déterminer la prise de risque acceptable pour que chacun puisse identifier ses propres solutions.

L'outil ASALEE est notamment utilisé dans le cadre du projet CLIMASSOL en Nouvelle Aquitaine (projet financé par le conseil régional Nouvelle Aquitaine, 2020) pour appréhender l'effet du changement climatique sur les assolements actuels et réfléchir aux adaptations possibles via la co-construction d'assolements en rupture avec les pratiques actuelles.

2 Visuel agriculteur bilan hydrique Irré-LIS® pour un maïs grain.



③ Schéma conceptuel du fonctionnement d'ASALEE.



Irré-LIS est un modèle de culture simple (pas de simulation d'indice foliaire ni de rayonnement intercepté par exemple), ce qui permet une intégration de nouvelles cultures peu coûteuse en paramètres d'entrée. C'est un outil de plus en plus utilisé à l'échelle parcellaire par les agriculteurs. Les nouvelles utilisations du modèle à l'échelle de l'exploitation agricole permettent de répondre aux questionnements des agriculteurs sur les assolements vis-à-vis de la disponibilité en eau. ■

L'auteur

Sophie GENDRE

ARVALIS - Institut du végétal,
Station Inter-Instituts,
6 Chemin de la Cote Vieille,
F-31450 Baziege, France.✉ s.gendre@arvalis.fr

EN SAVOIR PLUS...

- 📖 BOÉ, J. ET AL., J., 2008, Uncertainties in European summer precipitation changes: role of large scale circulation, *Clim. Dyn.*, 33, p. 265-276, ✉ <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0474-7>
- 📖 GENDRE, S., FONTAINE, B., SOENEN, B., DEUDON, O., 2019, Besoins en eau du maïs : l'irrigation doit s'adapter au réchauffement, *Perspectives Agricoles*, n°462, p. 44-45.
- 📖 GERLAND, P., RAFTERY, A.E., SEVCIKOVA, H., LI, N., GU, D., SPOORENBERG, T., ALKEMA, L., FOSDICK, B.K., CHUNN, J., LALIC, N., BAY, G., BUETTNER, T., HEILIG G.K., WILMOTH, J., 2014, World population stabilization unlikely this century, *Scienceexpress*, vol. 346, n° 6206, p. 234-237, ✉ <https://doi.org/10.1126/science.1257469>
- 📖 ROY, L., 2013, Gestion quantitative de l'eau et irrigation en France, *Sciences Eaux & Territoires*, n°11, p. 4-5, ✉ <http://www.set-revue.fr/avant-propos-gestion-quantitative-de-leau-et-irrigation-en-france>
- 📖 TERRAY, L., BOÉ, J., 2013, Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties, *Comptes Rendus Geosci*, vol. 345, n° 3, p. 136-149, ✉ <https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.02.003>
- 📖 VIDAL, J.-P., MARTIN, E., KITOVA, N., NAJAC, J., SOUBEYROUX, J.-M., 2012, Evolution of spatiotemporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, p. 2935-2955, ✉ <https://doi.org/10.5194/hess-16-2935-2012>



NOUVEAU REGARD

Quelles nouvelles pistes sont explorées pour améliorer les technologies et le pilotage de l'irrigation au regard des économies d'eau potentielles ? Sont-elles toutes aussi prometteuses qu'elles n'y paraissent ? Après avoir fait un état des lieux de quelques solutions technologiques et numériques proposées par les industriels, cette dernière partie pose un regard critique sur certaines évolutions en cours, leur application sur le terrain et leurs éventuels effets indésirables.

- 78 **Le point sur – Économies d'eau en irrigation : quelques solutions techniques proposées par les entreprises**
Bruno MOLLE et Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ
- 82 **Analyse des méthodes d'évaluation de l'état hydrique de la vigne**
Thibaut SCHOLASCH et Markus RIENTH
- 86 **Efficiences de l'irrigation et économie d'eau : effet d'échelle et effet rebond**
Luciano MATEOS
- 90 **Point de vue – La recherche de l'efficacité maximum de l'eau, un objectif à ne pas déconnecter d'une vision intégrée du système de production**
François GONTARD

LE POINT SUR...

Économies d'eau en irrigation : quelques solutions techniques proposées par les entreprises

Ce focus fait le point des différentes innovations présentées par les entreprises lors du colloque « Économies d'eau en irrigation » les 13 et 14 novembre 2019 à Montpellier. Ces solutions relèvent du domaine technique pour notamment limiter les pertes en eau lors de la distribution, mais également de celui du numérique pour suivre au plus près les besoins en eau des cultures et les performances du système d'irrigation à l'échelle de la parcelle.

La question des économies d'eau en irrigation est centrale dans l'ensemble des discours des industriels. S'il y a souvent confusion entre économie et amélioration de la productivité de l'eau, il n'en reste pas moins que le résultat des innovations proposées se traduit toujours par une amélioration de la situation locale (économie à la parcelle) ou plus globale (économie à l'échelle régionale). Cependant on assiste souvent à des effets rebonds qui font par exemple qu'une économie à un endroit peut se traduire par une extension de la surface arrosée, donc par un accroissement de la consommation nette localement, qui privera les utilisateurs placés en aval d'une part de la ressource qu'ils avaient à disposition antérieurement.

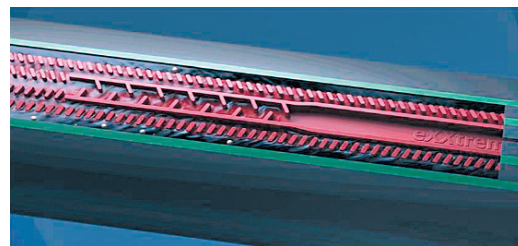
Les entreprises qui se sont livrées à l'exercice de présentation flash (cinq minutes) de leurs innovations au cours du colloque « Économies d'eau en irrigation » à Montpellier les 13 et 14 novembre 2019 ont concentré leur discours sur les matériels, outils et technologies permettant d'améliorer les performances de distribution ou d'utilisation de l'eau, le suivi des performances de la conduite de l'arrosage et la définition du juste besoin en irrigation des plantes. Chacune de ces entreprises poursuit un objectif de meilleure utilisation de la ressource en eau au travers de l'amélioration de l'efficacité de l'eau, d'économies sur le pompage de la ressource et d'une meilleure gestion des situations climatiques extrêmes, le tout en préservant la qualité de la production.

Matériel de distribution de l'eau d'irrigation

La société **Irritec** a présenté la gaine de micro-irrigation **EXXtreme tape™** (figure 1) capable de fonctionner avec des eaux pouvant contenir des particules en suspension au moyen d'un double filtre interne à la gaine de très grande surface. Cette caractéristique permet de conserver une efficacité d'application proche de 100%, même en cas d'accumulation importante de particules dans le

réseau. De plus, grâce à cette capacité de conserver une bonne efficacité, il est possible d'épandre des engrais hydrosolubles¹. Toujours dans le domaine du matériel de distribution, **Lindsay** propose la solution intégrée **FieldNet Advisor** de maîtrise des apports d'eau sous pivot ou rampe frontale. Cette solution tient compte des conditions locales (météorologie, profondeur et type de sol) et de l'évolution du couvert (stade de développement) pour calculer le besoin en eau à court terme (figure 2). Elle permet jusqu'à 15% d'économies d'eau², par rapport à une solution de conduite standard avec des sondes capacitatives et un bilan hydrique local, sans pénaliser voire en augmentant le rendement.

1. Gaine de micro-irrigation avec labyrinthe continu EXXtreme (Irritec).



2. Pilotage d'un pivot à distance au moyen d'un smartphone avec le système FieldNet Advisor (Lindsay).



1. <https://pdf.agriexpo.online/fr/pdf/irritec/exxtreme-tape/169375-23315.html>

2. https://www.lindsay.com/uploads/files/sections/1029-lindsay_fieldnet_whitepaper_advisor_0118_web.pdf

Enfin, **Aqua4D® Water Solutions** a présenté la technologie **Aqua4D®** (photo ❶) qui par un traitement de l'eau avec des champs de résonance électromagnétique à très basse fréquence, permet d'améliorer la capacité de stockage du sol (jusqu'à 3,5 %, CIT, 2018³). Des améliorations de l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes ont été mis en évidence par de nombreux retours terrain. Ce dispositif semble favoriser la pénétration et le stockage de l'eau dans le sol et limiter les effets de la salinité, grâce à un effet sur la micro et macro porosité du sol mis en avant par une récente publication scientifique⁴, sans qu'il soit possible actuellement d'en expliquer les mécanismes.

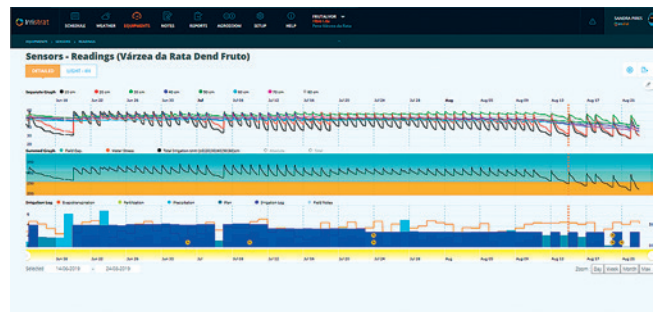
Analyse des performances de distribution ou d'application d'eau

Les diverses solutions proposées s'appuient sur des suivis grâce à des capteurs associés de diverses manières. **Hydrosoph** présente la plateforme **Irristrat™** (figure ❸) un service web pour la gestion de l'irrigation qui combine plusieurs suivis en temps réel : climat, développement de la culture et humidité dans le sol, qu'il croise avec des cartes d'index de végétation géo-référencées pour élaborer un calendrier d'irrigation et au-delà diagnostiquer la performance du système d'irrigation à l'échelle de la parcelle. Cette plateforme traite et simplifie les informations en les mettant à disposition de façon accessible sous forme de cartes, graphiques, SMS et rapports⁵. Le système proposé par la **Société du Canal de Provence (SCP)** en partenariat avec **Fruitions Sciences** concerne la plateforme personnalisable **SCP-AgriData** (figure ❹) qui est capable d'intégrer et traiter facilement un grand nombre de sources d'informations numériques publiques ou non (météorologie, sols, maturité...). Ces informations sont mises sous une forme commune et croisées avec des données de capteurs d'humidité ou de capteurs sur la plante qui en révèle l'état physiologique, ou encore de cartes de végétation. Ces informations sont autant de données d'entrées pour la mise en œuvre d'une aide à la décision à court terme ou de diagnostic spatialisé de l'irrigation. **Agroressources** propose également une solution d'amélioration du pilotage de l'irrigation, principalement pour l'arboriculture et la viticulture, appuyée sur la méthode **Pepista**, qui évalue la disponibilité de l'eau dans le sol pour la plante, au moyen de capteurs de tension de l'eau dans le sol (tensiomètres, photo ❷) et évalue aussi, de manière précise, l'état hydrique de la plante et sa croissance journalière à l'aide de dendromètres de précision (pepista, photo ❸). Ce couplage permet d'optimiser l'irrigation, de réduire les apports d'eau sans affecter les rendements (jusqu'à -30%), de faire un diagnostic des parcelles à problème (faible croissance des arbres...) et d'étudier les réactions de la plante lors de variations climatiques extrêmes (canicules), ou l'effet de l'ombrage, entre autres. Ces mêmes outils sont utilisables pour aborder la question de la gestion de l'eau à la parcelle sous un angle plus stratégique pour des études prospectives.

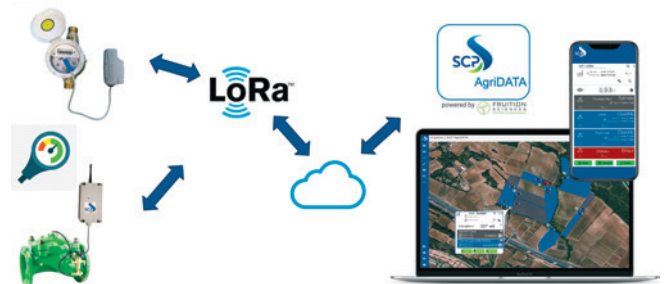
❶ Unités de traitement du système Aqua4D mises en place pour l'irrigation du melon au Brésil.



❸ Interface du service web Irristrat™ (Hydrosoph).



❹ Plateforme intégrative de données SCP-AgriData (SCP-Fruitions Sciences).



❷ Tensiomètres et monitor utilisés pour le suivi de la disponibilité de l'eau dans le sol.

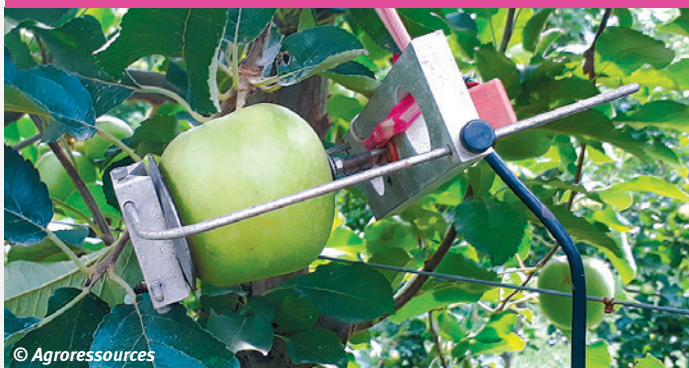


3. <https://aqua4d-irrigation.com/fr>

4. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198720304724?via%3Dihub>

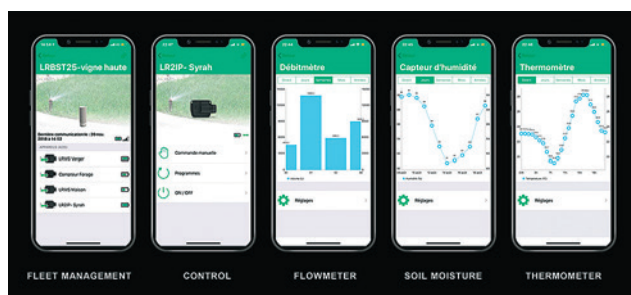
5. http://www.hydrosoph.com/FR/style/pdf/irrisrat_en.pdf

④ Capteur micro-morphométrique ou dendromètre de précision Pepista.

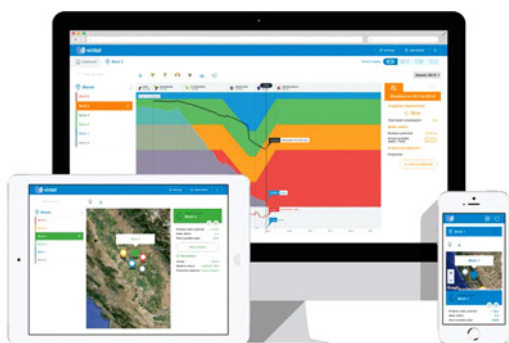


© Agroressources

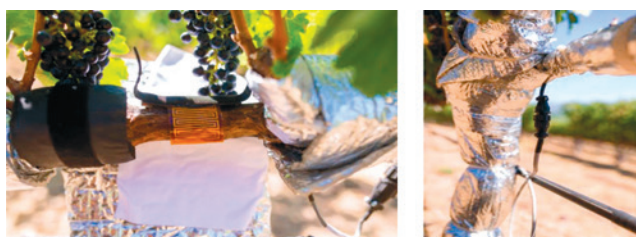
⑤ Plateforme de programmation et contrôle des irrigations en temps réel du système SoLoRa (Solem).



⑥ Plateforme pour le suivi de l'état hydrique d'une parcelle avec le logiciel Vintel (ITK).



④ Capteurs de flux de sève utilisés pour l'application 360viti.



© Fruition Science

Suivi des besoins en eau des parcelles

Solem a développé des programmeurs d'irrigation **SoLoRa** connectés à des capteurs géo-localisés via un réseau de communication bas débit dédié Lora (portée 20 km). Ce programmeur s'adapte sur n'importe quel type d'électrovanne et de débitmètre. Les données servent à déterminer le niveau de satisfaction des besoins de la culture pour prédire les futures irrigations et bien sûr surveiller l'ensemble des capteurs/actionneurs via un tableau de bord (figure ⑤). Dédié aux productions viticoles, **ITK** a conçu **Vintel**, une suite logicielle qui modélise de façon dynamique le bilan hydrique et azoté à l'échelle d'un bloc d'irrigation (figure ⑥). Elle simule le potentiel hydrique de la plante (potentiel de base et potentiel au midi solaire), recalé à partir de données mesurées (potentiel hydrique, contenu d'eau dans le sol...) afin d'orienter le pilotage de l'irrigation en fonction des critères de qualité du vin que l'on s'est fixés, sur une période de cinq jours. L'originalité de ce modèle est sa capacité à prendre en compte les données historiques d'une parcelle et le couvert inter-rangs. L'utilisation de cet outil d'aide à la décision permet de réelles économies d'eau (jusqu'à 200 euros/ha dans le Gard sur un essai 2019). Dans le même domaine **Fruition-Science** développe l'application **360viti** autour du suivi de la transpiration de la plante par la mesure du flux de sève, dont les capteurs sont intégrés dans un réseau Lora (photo ④). L'entreprise a développé un logiciel d'aide à la décision d'irrigation dont l'objectif est de régler l'irrigation pour répondre à des critères de qualité œnologique au travers d'un réglage d'un indice de confort hydrique. Ce mode de conduite aboutit à des irrigations plus espacées que les méthodes classiques à base de capteurs sol et donc des économies dans les apports d'eau (jusqu'à 50% de la ressource en eau économisée⁶). Il permet en particulier d'accroître la résilience des vignes lors de vagues de chaleur.

Notons que les innovations et solutions proposées par les entreprises présentes ne sont pas universelles mais adaptables à chaque situation spécifique. Cela signifie qu'une amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau en irrigation pourra être atteinte de façon différente suivant la situation et le contexte, donnant lieu à des décisions adaptées, appuyées par les outils présentés. Ce choix résulte de compromis entre plusieurs critères parfois difficilement compatibles.

En conclusion, on peut dire que les différentes solutions techniques et logicielles proposées par les industriels sont orientées de telle sorte qu'elles vont plutôt favoriser :

- l'efficacité d'utilisation de l'eau grâce au pilotage ou à une meilleure uniformité (Fieldnet, Irritec, Hydrosoph),
- favoriser les économies d'eau et d'énergie de pompage (Fieldnet, Irritec, Fruition, Solem, Hydrosoph, Aqua4D),
- aider à mieux gérer les pics de chaleur et les périodes de besoin de pointe (Fruition)
- améliorer la qualité et la production (Agroressources, Fruition, SCP, ITK, Fieldnet). ■

6. <http://www.set-revue.fr/recherche-et-developpement-une-plateforme-web-de-centralisation-et-danalyse-des-donnees-numeriques>



ENTREPRISES ET PRÉSENTATEURS

- Irritec (Italie) : Andrea RISSO
- Lindsay (Étas-Unis avec succursale en France) : Yvain MIRABAL
- AQUA4D® Water Solutions (Suisse) : Charles-Henri FAURE
- Hydrosoph (Portugal) : Sandra PIRES
- SCP (France) : Alice RACTMADOUX
- Agroressources (France) : Nathalie BROUSSARD
- Solem (France) : Frédéric COMTE
- ITK (France) : Damien FUMEY

Les auteurs

**Bruno MOLLE et
Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ**
G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD,
Montpellier SupAgro, Univ Montpellier,
361 Rue Jean-François Breton, BP 5095,
F-34196 Montpellier Cedex 5, France.
✉ bruno.molle@inrae.fr
✉ juan-david.dominguez-bohorquez@inrae.fr

Analyse des méthodes d'évaluation de l'état hydrique de la vigne

L'évaluation de l'état hydrique de la vigne est cruciale pour optimiser les pratiques culturales et les stratégies d'irrigation tout en garantissant une viticulture durable sur les plans environnemental et économique. Au regard des résultats les plus récents de la littérature, cet article fait un point critique des principales méthodes de mesures effectuées directement sur les plantes.

Observation visuelle

La façon la plus simple d'évaluer l'état hydrique d'une vigne est l'observation directe sur le terrain. La perte de turgescence d'abord perceptible dans les vrilles, suivie par le ralentissement de la croissance végétative, est l'une des premières réponses d'une plante détectant une limitation de l'approvisionnement en eau. Ce ralentissement de la croissance des rameaux peut être constaté par la simple observation du méristème apical des rameaux primaires ou secondaires des rameaux de la vigne. Toutefois, cette méthode ne peut pas être appliquée pour estimer les besoins en eau d'irrigation après la fin de la croissance des rameaux, la coupe du méristème (via la pratique classique de l'écimage) ou une fois que le méristème est desséché.

Mesure en chambre de pression

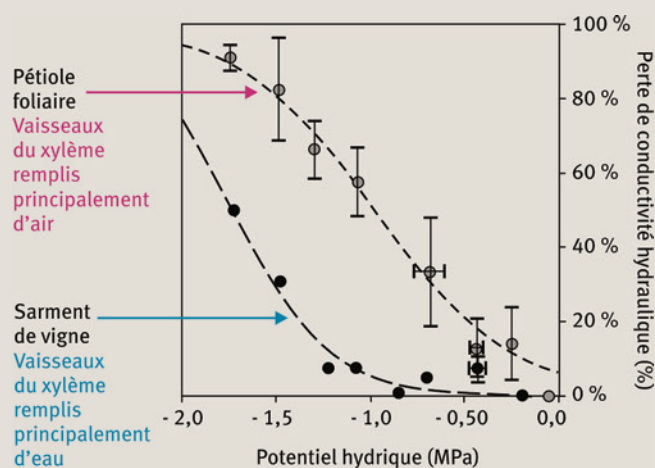
Le potentiel du xylème de la vigne (Ψ) est la tension (c'est-à-dire une pression négative) sous laquelle l'eau (ou xylème) circule des racines à l'interface feuille-air où elle se vaporise. Le potentiel du xylème peut être mesuré au niveau du pétiole pour refléter le potentiel hydrique de la feuille ou de la tige.

Pour maintenir un flux d'eau continu des racines aux feuilles, où il est transpiré à travers les stomates, la tension de la colonne d'eau à l'intérieur de la vigne augmente progressivement de l'interface sol-racines à l'interface feuilles-air (donc le potentiel hydrique diminue progressivement). Lorsque la tension du xylème devient trop élevée, des bulles d'air se forment à l'intérieur des vaisseaux du xylème, ce qui a pour conséquence de déconnecter progressivement les pétioles des feuilles de la pousse. Ce phénomène est appelé cavitation et il est mesuré par la perte de conductivité hydraulique (Hochberg *et al.*, 2017 ; Charrier *et al.*, 2016). Lorsque le potentiel du xylème diminue, la déconnexion hydraulique entre le pétiole et le rameau augmente, comme le montrent les courbes de vulnérabilité du xylème (figure 1).

La figure 1 montre que lorsque le potentiel du xylème est proche de -12 bars au niveau du pétiole, seuls 50 % des vaisseaux du xylème restent remplis d'eau. Les 50 % restants ne contribuent plus à la conductivité de l'eau entre la feuille et le rameau. Comme les feuilles se déconnectent progressivement du rameau, la cavitation induite par la haute tension de l'eau ne se propage pas au rameau, la feuille agit comme un « fusible hydraulique ». Le potentiel hydrique des feuilles est utile pour évaluer le stress hydrique perçu au niveau des feuilles. Cependant, en raison de la segmentation hydraulique entre rameau et feuilles, l'état hydrique de la feuille n'est pas nécessairement en équilibre avec l'état hydrique des autres organes comme par exemple les rameaux (figure 1).

Malgré la limite « physiologique » du potentiel foliaire pour l'estimation des besoins en eau de l'ensemble de la plante, la mesure en chambre à pression est très utilisée, en raison notamment de la simplicité mécanique de la méthode. Elle se subdivise en trois protocoles de mesure.

1 Courbe de vulnérabilité du xylème du pétiole et des rameaux (adapté de Charrier *et al.*, 2016).



Potentiel hydrique foliaire Ψ_f

La mesure est habituellement prise à midi solaire, sur une feuille adulte bien exposée. Bien que très rapide à effectuer et intervenant à un moment de la journée compatible avec le travail humain (par contraste avec les mesures de potentiel foliaire effectuées au vignoble avant le lever du soleil), cette évaluation présente un biais important pour le contrôle de l'irrigation. En effet, il n'existe pas nécessairement d'homéostasie entre le potentiel hydrique des feuilles et le potentiel hydrique des autres organes ou du sol. La valeur lue fluctue rapidement (ie. en quelques minutes) en fonction des conditions environnementales (comme le passage des nuages).

Potentiel hydrique de tige Ψ_t

Il est déterminé en enfermant une feuille dans un sac en aluminium pendant quarante-cinq à cent-vingt minutes avant la mesure. De cette façon, la feuille réduit sa transpiration et équilibre son potentiel hydrique par rapport au potentiel hydrique de la tige (mais pas nécessairement par rapport au potentiel hydrique du rameau car celui-ci varie en fonction de la perte de conductivité hydraulique du pétiole). Le potentiel hydrique des tiges est sensible au déficit de pression de vapeur et intègre l'effet combiné de la disponibilité en eau du sol et des tissus d'une part et de la demande climatique d'autre part.

Potentiel hydrique foliaire de base Ψ_b

Il est mesuré juste avant le lever du soleil sur les feuilles adultes lorsque Ψ_b atteint son niveau maximum quotidien avant l'aube. On suppose que le potentiel hydrique de tous les organes de la plante et du sol atteint un équilibre pendant la nuit. Cependant, l'atteinte de cet équilibre par Ψ_b reste affecté par la transpiration nocturne, les transferts d'eau entre organes et le déficit en vapeur d'eau (VPD). (Coupel-Ledru *et al.*, 2016 ; Rogiers *et al.*, 2009). Par conséquent, Ψ_b reflète l'effet de l'eau disponible entre les différents organes sur le potentiel xylémien avant que la transpiration diurne n'augmente. Ψ_b ne reflète pas nécessairement la quantité d'eau disponible dans le sol, particulièrement pendant les nuits chaudes.

Ψ_b , Ψ_t et Ψ_f peuvent représenter des méthodes tout aussi robustes d'évaluation de l'état hydrique des feuilles. Cependant, ces mesures peuvent être déconnectées de l'état hydrique de la vigne entière, en particulier dans les situations semi-arides sujettes à la cavitation, et ne fournissent pas au viticulteur une information toujours fiable sur le stock d'eau restant dans le sol ni sur la quantité d'eau à appliquer.

Dans le tableau 1, les valeurs couramment observées du potentiel hydrique des feuilles de vigne et l'estimation empirique du stress hydrique qui y est associée sont résumées à partir de différentes études (van Leeuwen *et al.*, 2009 ; Carbonneau, 1998 ; Lovisolo *et al.*, 2010, 2016).

Analyse de la composition isotopique du carbone

Ce paramètre est mesuré sur les sucres des organes végétaux, baies, moût ou des vins, et montre une corrélation avec les potentiels hydriques mesurés au cours de la saison. Il est généralement effectué à la fin de la saison et n'est donc pas bien adapté à la gestion quotidienne de l'irrigation en cours de saison.

C'est un outil pertinent pour évaluer l'effet des stratégies de gestion du vignoble, du sol et du climat sur l'assimilation du carbone. L'assimilation du carbone est liée aux déficits en azote et en eau.

Mesure basée sur les flux de sève

Le flux de sève est le mouvement de l'eau à l'intérieur du xylème, des racines aux feuilles, où elle est transpirée à travers les stomates. Le flux de sève mesure directement la quantité d'eau utilisée au niveau de la vigne. Il existe deux méthodes de mesure.

Méthode de la sonde de dissipation thermique

Cette méthode utilise des sondes insérées comme des aiguilles dans la vigne. Vergenst *et al.* (2014) ont montré que la variation circonférentielle et radiale de la densité du flux de sève peut entraîner à la fois une sous-estimation et une surestimation du flux de sève. De plus, le flux de sève peut être sous-estimé lorsque l'aiguille chauffée est en contact avec des tissus non conducteurs. Par conséquent, la méthode de la sonde de dissipation thermique n'est pas adaptée à un usage commercial.

1 Gros plan sur un capteur de flux de sève posé sur un rameau latéral de vigne. La languette chauffante entoure toute la section du rameau. Des capteurs de température permettent de mesurer la quantité de chaleur déplacée par la sève.



1 Valeur du potentiel hydrique (Ψ) pour apprécier l'état hydrique de la vigne à feuilles. Adapté de Carbonneau (1998), Lovisolo *et al.* (2010, 2016) and van Leeuwen *et al.* (2009).

	Ψ_{PD} (MPa)	Ψ_{Stem} (MPa)	Ψ_{Leaf} (MPa)
Aucun déficit en eau	> -0,2	> -0,6	> -0,9
Léger déficit en eau	-0,2 à -0,3	> -0,6 à -0,9	-0,9 à -1,1
Déficit hydrique modéré	-0,3 à -0,5	-0,3 à -0,5	-1,1 à -1,3
Déficit hydrique modéré à stress hydrique sévère	-0,5 à -0,8	-1,1 à -1,4	-1,3 à -1,4
Stress hydrique grave	< -0,8/0,9	< -1,4	< -1,4

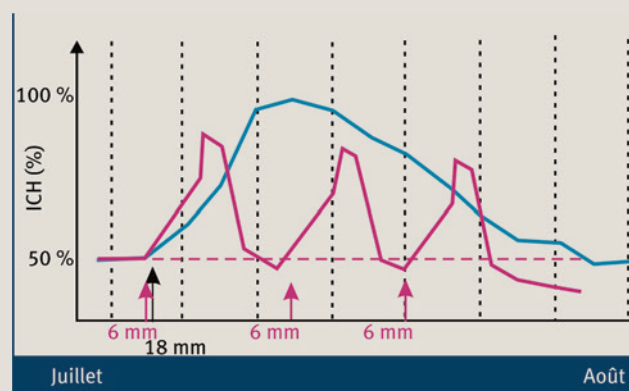
La méthode du bilan thermique de la tige

La conception du capteur de flux de sève consiste en une languette chauffée qui est enroulée autour de la tige (Lascano *et al.*, 2014a). La chaleur est fournie uniformément et radialement sur toute la section de la tige ; le manchon est flexible et maintient un bon ajustement entre la tige et le thermocouple pendant les contractions diurnes de la tige (photo ❶). Les capteurs peuvent être appliqués sur des tiges légèrement courbées ou même partiellement nécrosées, comme on l'observe parfois en réponse à des plaies de taille. Comme toute la section de la tige est chauffée, la méthode du bilan thermique peut être appliquée même si la trajectoire de l'écoulement de la sève à travers la tige est tortueuse. Les résultats (Zhang *et al.*, 2011) montrent que le bilan thermique de la tige est une méthode fiable pour calculer l'utilisation de l'eau de la vigne (c'est-à-dire la transpiration) séparément des autres composants de l'évapotranspiration (tels que l'évaporation du sol ou la transpiration des plantes couvrant le sol entre les rangs). Pour ces raisons, des capteurs de débit de sève non intrusifs ont été adoptés avec succès comme pratique pour orienter les stratégies d'irrigation (Ginestar *et al.*, 1998 ; Scholasch, 2018) (figure ❷).

Conclusion

Les mesures de potentiel hydrique ne sont pas toujours les plus adaptées pour contrôler l'effet de l'irrigation. En effet, l'impact des fluctuations climatiques sur la valeur lue ou sur la conductivité hydraulique entre la feuille et le rameau ne permet pas de relier systématiquement le potentiel hydrique avec le besoin d'irrigation perçu par l'ensemble des organes. Cette limite méthodologique est particulièrement aiguë dans un contexte de réchauffement de la température et d'aridité accrue où l'irrigation doit être gérée avec plus de précision. Comme les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes,

❷ Effet d'un petit et d'un grand volume d'irrigation sur l'utilisation de l'eau de la vigne.



ICH est l'indice de confort hydrique. Ce ratio se calcule quotidiennement comme le rapport entre la transpiration réelle effectivement mesurée et la transpiration potentielle (attendue d'après l'analyse climatique). Lorsque l'ICH est bas, la capacité de refroidissement du feuillage est faible. Par conséquent, pendant les vagues de chaleur, les risques de brûlures et de perturbation du fonctionnement photosynthétique sont plus importants. La courbe rose montre que l'ICH atteint plus fréquemment des valeurs basses susceptibles de perturber le fonctionnement de la plante et la maturation du fruit. La courbe rose montre les variations du ratio ICH lorsque des petits volumes sont appliqués (6 mm) ; la courbe bleue montre les variations du ratio ICH lorsqu'un gros volume (18 mm) est appliqué.

la stratégie d'irrigation devrait intégrer l'influence des variations du déficit de pression de vapeur de l'air sur la consommation réelle de l'eau par la vigne. En outre, la stratégie d'irrigation devrait idéalement être dépendante de la variété pour mieux s'adapter aux spécificités de la régulation hydraulique en fonction du stade de développement (Scholasch, 2019). ■

EN SAVOIR PLUS...

- ❶ CHARRIER, G., TORRES-RUIZ, J.M., BADEL, E., BURLETT, R., CHOAT, B., COCHARD, H., DELMAS, C.E.L., DOMEQ, J.-C., JANSEN, S., KING, A., LENOIR, N., MARTIN-STPAUL, N., GAMBETTA, G.A., DELZON, S., 2016, Evidence for Hydraulic Vulnerability Segmentation and Lack of Xylem Refilling under Tension, *Plant Physiology*, 172(3), p. 1657-1668.
- ❷ COUPEL-LEDRU, A., LEBON, E., CHRISTOPHE, A. *et al.*, 2016, Reduced nighttime transpiration is a relevant breeding target for high water-use efficiency in grapevine, *PNAS*, 113 (32), p. 8963-8968
- ❸ GINESTAR, C., EASTHAM, J., GRAY, S., ILAND, P., 1998, Use of Sap-Flow Sensors to Schedule Vineyard Irrigation. I. Effects of Post-Veraison Water Deficits on Water Relations, Vine Growth, and Yield of Shiraz Grapevines, *American Journal of Enology and Viticulture*, 49(4), p. 413-420.
- ❹ HOCHBERG, U., BONEL, A.G., DAVID-SCHWARTZ, R. *et al.*, 2017, Grapevine acclimation to water deficit: the adjustment of stomatal and hydraulic conductance differs from petiole embolism vulnerability, *Planta*, 245, p. 1091-1104, <https://doi.org/10.1007/s00425-017-2662-3>
- ❺ LASCANO R., GOEBEL, T.S., BOOKER, J., BAKER, J.T., GITZ, D.C., 2016a, The stem heat balance method to measure transpiration: evaluation of a new sensor, *Agricultural Sciences*, 7(9), p. 604-620.
- ❻ ROGIERS, S., GREER, D.H., HUTTON, R.J., LANDSBERG, J.L., 2009, Does night-time transpiration contribute to anisohydric behaviour in a *Vitis vinifera* cultivar? Does night-time transpiration contribute to anisohydric behaviour in a *Vitis vinifera* cultivar?, *Journal of Experimental Botany*, vol. 60, n° 13, p. 3751-3763, <https://doi.org/10.1093/jxb/erp217>
- ❼ SCHOLASCH, T., 2018, Improving winegrowing with sap flow driven irrigation - a 10-year review, *Acta Hort.*, n° 1222, p. 155-168, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1222.21>
- ❽ SCHOLASCH, T., RIENTH, M., 2019, Technical and physiological considerations to optimize vineyard irrigation strategies? *OENO One*, vol. 53, n°3, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.3.2407>
- ❾ VERGEYNST, L.L., VANDEGEHUCHTE, M.W., MCGUIRE, M.A., TESKEY, R.O., STEPPE, K., 2014, Changes in stem water content influence sap flux density measurements with thermal dissipation probes, *Trees*, 28(3), p. 949-955.
- ❿ ZHANG, Y., KANG, S., WARD, E.J., DING, R., ZHANG, X., ZHENG, R., 2011, Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in northwest China: Dynamics and influential factors, *Agricultural Water Management*, 98(8), p. 1207-1214, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.03.006>

Les auteurs

Thibaut SCHOLASCH

Fruition Sciences, MIBI,
672 rue du Mas de Verchant, F-34000 Montpellier, France.

[✉ thibaut@fruitionsciences.com](mailto:thibaut@fruitionsciences.com)

Markus RIENTH

Haute école de viticulture et œnologie de Changins,
Route de Duillier, 1260 Nyon, Suisse.

[✉ markus.rienth@changins.ch](mailto:markus.rienth@changins.ch)

L'évaluation de l'état hydrique de la vigne est cruciale pour optimiser les pratiques culturales et les stratégies d'irrigation.

Efficiences de l'irrigation et économie d'eau : effet d'échelle et effet rebond

Améliorer l'efficacité de l'eau d'irrigation dans les exploitations agricoles présente de nombreux avantages tant sur les plans économiques qu'environnementaux. Cependant, comme le démontre l'auteur de cet article, cela peut induire des effets négatifs, dont notamment des « effets rebonds » bien connus dans le domaine des économies d'énergie, qui peuvent induire en erreur les politiques visant à accroître la disponibilité de l'eau à l'échelle des bassins versants.

L'efficacité de l'irrigation est associée à une échelle d'analyse spécifique

La préservation de l'eau d'irrigation peut être abordée à différentes échelles et avec des objectifs différents. L'agriculteur peut avoir un approvisionnement en eau limité, chercher à réduire ses coûts énergétiques ou encore être confronté à des capacités de drainage limitées. L'efficacité de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation peut être améliorée par diverses solutions techniques pour réduire la consommation d'eau. L'irrigation goutte-à-goutte ou l'irrigation de précision à débit variable en sont des exemples. Cependant, les performances du système sont affectées par le degré de réutilisation des flux de retour, qui dépend de l'agencement hydraulique du système et des performances des unités élémentaires d'irrigation (Mateos, 2008). Un accroissement des performances d'irrigation des unités aura plus d'effet sur l'efficacité du système si les unités sont disposées en parallèle que si elles sont en série (figure 1). Dans un système en série, il y a une seule source d'eau en tête. Cette source alimente l'unité amont qui, à son tour, alimente l'unité aval suivante, et ainsi de suite. L'efficacité de l'irrigation du système augmente rapidement à mesure que le nombre d'unités d'irrigation augmente (la taille des unités doit diminuer puisque chaque unité consomme une partie de son approvisionnement en eau sous forme d'évapotranspiration) (figure 1). Ainsi, une augmentation de l'efficacité de l'unité a peu d'effet sur l'efficacité du système si le nombre d'unités en série est supérieur à trois. Au contraire, dans un système en parallèle, où toutes les unités reçoivent l'eau directement d'une source d'eau commune (par exemple, une rivière ou un canal d'irrigation),

l'excès d'eau d'irrigation reçue par une unité d'irrigation s'écoule hors du système. Dans ce cas, l'efficacité de l'irrigation du système est égale à celle des unités individuelles et une meilleure efficacité au niveau de l'unité d'irrigation aurait un effet équivalent sur l'efficacité du système (figure 2). La situation la plus courante, cependant, est une disposition intermédiaire (mixte), où les flux de retour des unités d'irrigation peuvent être utilisés de différentes manières. En fonction de la circulation de l'eau et du degré de réutilisation, l'efficacité de l'irrigation du système augmentera avec le nombre d'unités à un rythme ou à un autre (figure 1). En résumé, les solutions techniques de conservation de l'eau au niveau des exploitations ne se traduisent pas nécessairement par des économies d'eau à l'échelle du bassin versant (Mateos, 2008). Mateos *et al.* (2000) et Vivas *et al.* (2016) ont donné des exemples de cas réels où l'efficacité globale de l'irrigation était nettement supérieure à l'efficacité des unités d'irrigation individuelles. Dans le premier cas, il a été démontré qu'une efficacité d'irrigation à l'échelle de l'exploitation comprise entre 60 et 70 % peut conduire à une efficacité globale supérieure à 90 % avec un taux de réutilisation des eaux de drainage optimal, comme dans le cas du périmètre irrigué de Tululake dans le nord de la Californie. Vivas *et al.* (2016) ont démontré que les systèmes d'irrigation de montagne développés à l'époque médiévale dans le sud de l'Espagne intégraient déjà une telle notion de gestion intégrée de l'eau. Le corollaire est que les politiques favorisant les performances d'irrigation à l'échelle de l'exploitation peuvent ne pas aboutir à l'augmentation attendue de la disponibilité de l'eau à l'échelle du bassin.

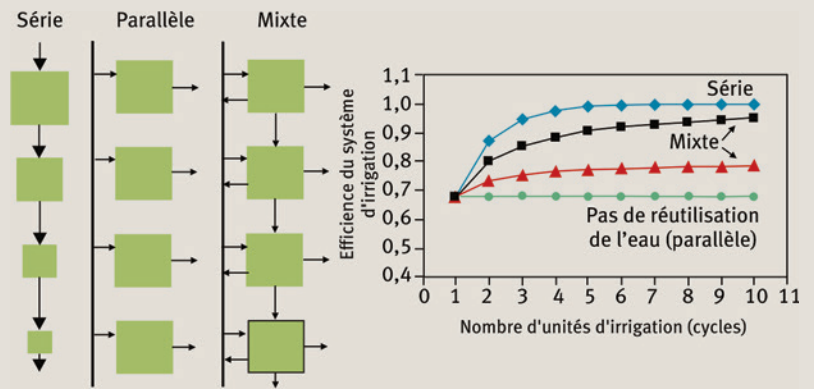
Les effets rebond résultant d'une meilleure efficacité d'irrigation

La figure 2 montre la relation entre le coefficient de déficit (défini comme la proportion de la zone racinaire du sol qui n'est pas mouillée pendant l'irrigation), l'efficacité d'application et l'uniformité de la distribution (UD) ainsi que la trajectoire d'un processus de modernisation de l'irrigation (UD = 70 % à UD = 95 %) découlant de cette relation. L'introduction de l'irrigation sous pression dans les exploitations (c'est-à-dire des systèmes localisés ou par aspersion) a amélioré l'uniformité de distribution et donc permis une plus grande efficacité d'application avec moins de déficit. Les systèmes modernes, qui peuvent appliquer l'eau avec une uniformité de distribution supérieure à 90 %, ont un potentiel d'efficacité d'application approchant 100 % tout en irrigant toute la zone des racines (figure 2).

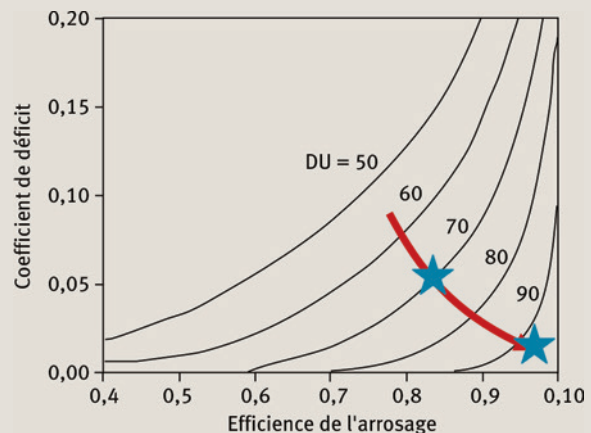
Cependant, l'introduction de systèmes d'irrigation qui dispensent l'eau de manière plus uniforme peut en fait augmenter l'évapotranspiration et donc l'épuisement de la ressource en eau des bassins versants. La figure 3 présente la réponse du rendement à l'irrigation et à l'évapotranspiration dans deux conditions, représentant la situation avant et après la modernisation (c'est-à-dire l'introduction de systèmes d'irrigation sous pression qui ont augmenté l'uniformité de la distribution, UD, de 70 % à 95 %). La réponse du rendement à l'évapotranspiration est généralement une fonction linéaire. Cependant, la réponse à l'irrigation est une courbe, avec une courbure qui augmente à mesure que l'uniformité de la distribution diminue. Pour un rendement donné, la distance horizontale entre la droite (la réponse à l'évapotranspiration) et la courbe représente les pertes en eau. Celles-ci sont nettement plus importantes pour la courbe UD = 70 % que pour la courbe UD = 95 % (figure 3), ce qui est le résultat attendu de la modernisation des systèmes d'irrigation. Cependant, la figure 2 indique que le coefficient de déficit avant modernisation était considérablement supérieur à zéro, ce qui signifie que l'évapotranspiration des cultures dans ces conditions était légèrement limitée (figure 3). Par conséquent, si la modernisation a entraîné une diminution de l'utilisation de l'eau, elle a également engendré une augmentation de l'évapotranspiration, la principale utilisation de l'eau dans les systèmes agricoles irrigués. Il s'agit là de l'une des facettes de ce que l'on appelle « l'effet rebond » (Berbel et Mateos, 2014).

De plus, si le foncier n'est pas un facteur limitant, une amélioration de l'efficacité de l'irrigation peut provoquer une expansion de la surface irriguée en utilisant les « économies d'eau ». Ce serait la réponse des agriculteurs qui cherchent à maximiser leur profit. La figure 4 présente la réponse en matière de revenus et de coûts de l'eau appliquée et indique le bénéfice maximal dans des conditions de limitation de l'eau du foncier (English, 1990). Il est à noter que le bénéfice maximal sous des conditions limitantes du foncier est plus important que sous des conditions limitantes en eau et qu'il est obtenu avec plus d'eau appliquée. Par conséquent, si l'agriculteur possède des terres arides qui ne peuvent pas être irriguées en raison de la limitation des ressources en eau, une amélioration de l'efficacité de l'irrigation pourrait

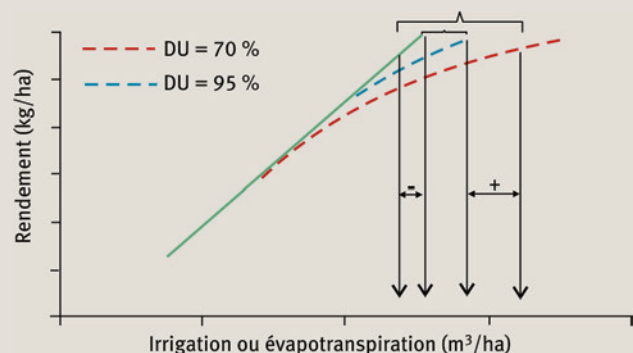
1 Disposition idéale des unités d'irrigation (carrés verts) dans un système d'irrigation (projet, bassin) : en série, en parallèle et mixte. Efficacité du système d'irrigation en fonction du nombre de cycles (ou unités d'irrigation) et de la disposition des unités d'irrigation : en série (losanges bleus), en parallèle (cercles verts), et deux exemples de systèmes mixtes avec différents types et degrés de réutilisation (carrés noirs et triangles rouges). Adapté de Mateos (2008).



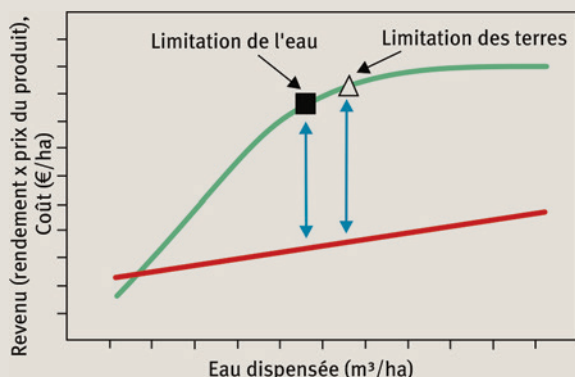
2 Relation entre le coefficient de déficit (défini comme la proportion de la zone racinaire du sol qui n'est pas mouillée pendant l'irrigation), l'efficacité d'application et l'uniformité de la distribution (UD, %) dans les systèmes d'irrigation d'une exploitation et la trajectoire d'amélioration de UD = 70 % à UD = 95 %.



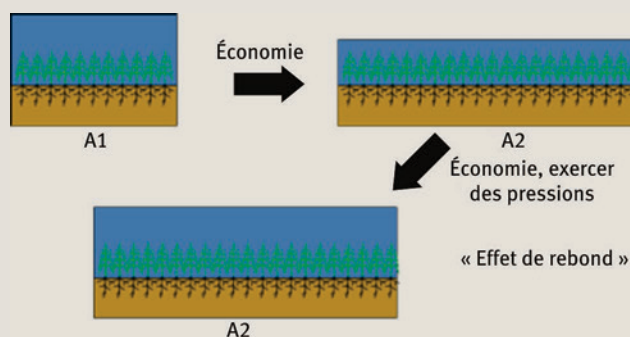
3 Réponse du rendement à l'évapotranspiration et à l'irrigation avec une uniformité de distribution, UD, de 70 % et de 95 %. La droite verte représente la réponse du rendement à l'évapotranspiration et les lignes pointillées bleues et rouges représentent la réponse du rendement à l'irrigation avec une uniformité de distribution (UD) de 95 % et 70 %, respectivement. Les accolades représentent la différence entre l'eau appliquée et l'eau évapotranspirée pour des scénarios d'irrigation modernisée idéale (UD = 95 %) et traditionnelle (UD = 70 %), respectivement. Le signe positif (+) indique une réduction de l'eau d'irrigation (gain positif) due à la modernisation ; le signe négatif (-) indique une augmentation de l'évapotranspiration (gain négatif) due à la modernisation.



④ Réponses en matière de revenus (courbe verte) et de coûts (ligne rouge) à l'eau appliquée dans des conditions de limitation en eau et de limitation en foncier. Le carré noir et le triangle blanc indiquent le revenu en fonction de l'eau appliquée qui donne un bénéfice maximum dans les situations de limitation de l'eau et des terres, respectivement. Les flèches bleues indiquent les bénéfices maximaux respectifs.



⑤ Représentation de la spirale négative de l'extension des terres irriguées grâce aux « économies d'eau » résultant de l'amélioration de l'efficience de l'irrigation et de « pressions » pour obtenir des ressources en eau supplémentaires. Des raisons économiques conduisent à transformer les terres arides en terres à irrigation déficitaire pour utiliser les économies d'eau dues à la modernisation (première flèche de la figure). Les bénéfices augmenteraient en réduisant le degré de déficit, ce qui permettrait aux agriculteurs de faire pression pour obtenir des ressources en eau supplémentaires (deuxième flèche de la figure).



libérer une partie de l'eau et permettre l'extension de la surface irriguée et donc du bénéfice. Cette extension impliquerait une augmentation de l'évapotranspiration, la deuxième facette de « l'effet rebond ». En outre, le rendement et le bénéfice augmentant, si une quantité supplémentaire d'eau d'irrigation était allouée à la nouvelle zone irriguée, les agriculteurs seraient tentés de faire pression dans le but d'obtenir davantage de ressources en eau. C'est le début d'une spirale qui peut expliquer l'augmentation constante des surfaces irriguées (figure 5) observée dans de nombreuses régions, par exemple en Espagne. Cette troisième facette de « l'effet rebond » est probablement la principale cause de la surexploitation des ressources en eau observée dans le monde.

Conclusions

- L'effet d'une meilleure efficience des unités d'irrigation sur l'efficience de l'irrigation à l'échelle des bassins versants dépend fortement de la disposition hydrologique des unités d'irrigation.
- Dans les bassins fermés, l'eau est conservée uniquement en réduisant l'évapotranspiration.
- L'amélioration de l'efficience de l'irrigation peut entraîner une augmentation de la consommation d'eau (« effet rebond »).
- Il serait tentant d'investir les « économies d'eau » dans l'extension de la surface irriguée, ce qui augmente encore la consommation d'eau (« effet rebond »).
- Toutefois, il existe de bonnes raisons d'améliorer l'efficience de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation qui n'ont pas été abordées dans le présent article. ■

L'auteur

Luciano MATEOS
Institut d'agriculture durable,
CSIC, Cordoue, Espagne.
✉ luciano.mateos@ias.csic.es

EN SAVOIR PLUS...

- BERBEL, J., MATEOS, L., 2014, Does investment in irrigation technology necessarily generate rebound effects? A simulation analysis based on an agro-economic model, *Agricultural Systems*, vol. 128, pp. 25-34, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.04.002>
- ENGLISH, M., 1990, Deficit irrigation. I: analytical framework, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 116, pp. 399-412, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1990\)116:3\(399\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:3(399)).
- MATEOS, L., 2008, Identifying a new paradigm for irrigation system performance, *Irrigation Science*, vol. 27, pp. 25-34, <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0118-z>
- MATEOS, L., YOUNG, C.A., WALLENDER, W.W., CARLSON, H.L., 2000, Simulating spatially distributed water and salt balances, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 126, pp. 288-295, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:5\(288\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:5(288))
- VIVAS, G., GIRÁLDEZ, J.V., MATEOS, L., 2016, Water management in an ancestral irrigation system in southern Spain: a simulation analysis, *Irrigation Science*, vol. 34, pp. 343-360, <http://doi.org/10.1007/s00271-016-0507-7>



Canal d'irrigation en Espagne.

POINT DE VUE

La recherche de l'efficacité maximum de l'eau, un objectif à ne pas déconnecter d'une vision intégrée du système de production

Le goutte-à-goutte, et plus encore le goutte-à-goutte enterré, sont des techniques particulièrement plébiscitées pour irriguer les cultures dans les régions où la ressource en eau est une contrainte majeure. Pour autant, comme en témoigne François Gontard de la société BRL Exploitation, le seul fait d'installer ce matériel n'est pas un gage d'efficacité maximale de l'eau et seuls des irrigants pointus sauront en exploiter le potentiel.

Le goutte-à-goutte, un matériel très efficace et très répandu

L'objectif de réalisation d'économies d'eau est essentiel, dans un contexte où la demande climatique augmente en même temps que les tensions sur les ressources. Un des leviers pour ces économies est celui du choix du matériel d'irrigation. Cet aspect a été abordé dans une étude Irstea¹, qui a permis de produire un référentiel sur les économies d'eau potentiellement réalisables par un changement de matériel d'irrigation. Ce travail met en évidence que le goutte-à-goutte et plus encore le goutte-à-goutte enterré, sont les techniques permettant potentiellement le plus d'économies d'eau.

Dans les départements littoraux de la région Occitanie, on constate le développement très majoritaire du goutte-à-goutte en maraîchage, viticulture et arboriculture (photo 1). Ce développement s'explique à la fois par la bonne adéquation technique de ce matériel aux cultures concernées et également sa performance en termes d'efficacité de l'eau.

Quelques contre exemples sur l'efficacité du goutte-à-goutte

Cependant, des situations concrètes rencontrées dans le contexte agricole régional, illustrent le fait que le goutte-à-goutte peut présenter des limites en termes d'efficacité de l'eau.

L'apport d'eau par goutte-à-goutte peut être responsable d'un moindre développement du système racinaire, notamment sur les vergers dont les besoins en eau sont élevés. De ce fait, ces vergers qui n'explorent pas un grand volume de sol, ne sont pas capables de valoriser totalement l'eau apportée par les pluies. En pratique, les irrigations reprennent rapidement après des pluies, voire ne sont pas suspendues, ce qui engendre une consommation supplémentaire par rapport à un verger mieux enraciné. Pour la même raison, ces vergers sont moins résilients en cas de d'interruption accidentelle des irrigations.

Par ailleurs, l'irrigation par goutte-à-goutte est assez indissociable de la fertirrigation, afin d'assurer une efficacité

1. Évaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation, Irstea, 2017, https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/DP_Irstea_Economies_deau_en_irrigation.pdf

des apports en engrais. En effet, l'apport d'eau localisé ne permet pas toujours une bonne dissolution des engrais minéraux apportés au sol. Il n'est pas rare que la fertilisation de printemps se fasse alors qu'il n'est pas nécessaire d'irriguer, du fait d'une pluviométrie suffisante à cette saison. Autrement dit, l'eau apportée ne sert qu'à véhiculer les éléments fertilisants, mais ne bénéficie pas à la culture.

Dans le cas particulier du goutte-à-goutte enterré, il est nécessaire de se prémunir contre les intrusions racinaires à l'intérieur des goutteurs. Ce type de problème a par exemple été rencontré sur des pêchers conduits selon un mode d'irrigation proche du rationnement (photo 2). Une des préconisations pour éviter ce problème est de pratiquer des apports très réguliers et plutôt confortables pour maintenir une zone d'anoxie autour du goutteur, répulsive des racines. Cette logique conduit à ne pas réduire les irrigations une fois la récolte passée et à maintenir des apports d'arrière-saison au-delà de ce qui se pratique avec du matériel d'aspersion.

Ces trois difficultés, qui peuvent se cumuler, font qu'en pratique le goutte-à-goutte n'est pas la technique la plus efficace pour l'eau dans un certain nombre de situations.

Pas facile d'être au maximum de l'efficacité en goutte-à-goutte !

Les études menées dans le cadre de la recherche et en stations d'expérimentation ont permis de chiffrer les économies d'eau potentiellement réalisables grâce au goutte-à-goutte. Il est important de relever que ce niveau de performance n'est atteint qu'au prix d'une forte technicité de la part des irrigants. Il s'agit de déterminer avec précision les besoins en eau des cultures et de maîtriser tout aussi précisément les apports, grâce à divers outils d'aide à la décision (figure 1).

La conduite fine des irrigations est assez difficile à assurer avec des capteurs « sol » classiquement employés (tensiomètres, sondes capacitatives), car le positionnement de ces capteurs par rapport aux goutteurs va influencer sur la maîtrise des apports d'eau. Le recours à des outils complémentaires (dendromètres, mesures de potentiel de base, flux de sève...) n'est pas à la portée de toutes les exploitations, que ce soit pour des raisons techniques ou économiques. Dans ce contexte, la pratique va s'orienter vers un certain niveau de confort dans les irrigations, pour se mettre à l'abri d'un accident cultural lié à une sous-irrigation.

Par ailleurs, le goutte-à-goutte est sensible au colmatage, dépendamment de la qualité de l'eau. Un entretien très régulier est indispensable (purges des rampes, injection d'acide et de javel) pour maintenir la performance du matériel. Un contrôle régulier des apports est également nécessaire (surveillance du débit des postes d'irrigation, vérification de l'homogénéité du débit des goutteurs). Tout défaut d'entretien se traduira par une hétérogénéité des apports et généralement une augmentation globale des irrigations pour satisfaire les zones défavorisées.

Au final, la technicité de l'irrigation de précision par goutte-à-goutte ne fait pas toujours bon ménage avec les contingences quotidiennes sur les exploitations agricoles.

1 Équipement d'une parcelle de goutte-à-goutte sur vigne.



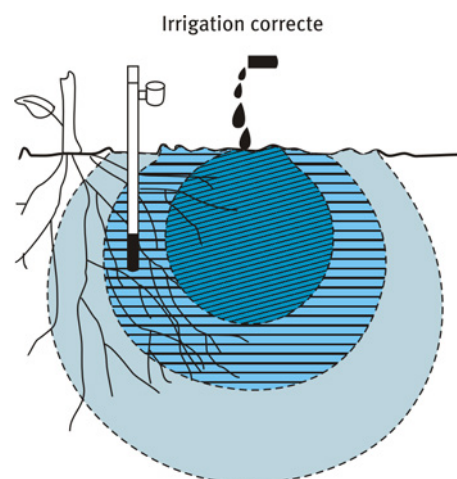
© BRLE - 2015

2 Intrusion racinaire dans un goutteur sur un verger de pêchers.



© BRLE - 2016

1 Importance du bon positionnement des capteurs d'humidité (source : Guide pratique Irrigation, Cemagref, 2003).



La zone très humide n'évolue pas, la tension reste stable : l'irrigation est donc correcte.

Cela se traduit dans un certain nombre de situations par une irrigation pas plus efficace en goutte-à-goutte qu'avec des techniques d'aspersion.

L'efficacité de l'eau au détriment de bénéfices collatéraux d'une irrigation en plein comme l'aspersion

Le goutte-à-goutte est caractérisé par un apport localisé de l'eau, par opposition aux systèmes d'aspersion. Cette particularité est à la base de l'excellente efficacité des apports en eau, mais en revanche elle constitue un facteur limitant vis-à-vis d'autres services rendus par l'irrigation.

En agriculture biologique, où il est quasi impossible de trouver des engrais solubles ou liquides applicables par goutte-à-goutte, se pose le problème de la minéralisation des produits organiques en l'absence de pluie. Seuls des systèmes d'irrigation par aspersion permettent leur humectation correcte et leur décomposition par les micro-organismes.

De nombreux motifs conduisent à promouvoir la présence d'un enherbement sur les cultures pérennes, par opposition à un désherbage intégral² :

- lutte contre l'érosion des sols ;
- mise en place et maintien des cultures de service (par exemple : implantation de légumineuses contribuant à l'alimentation azotée de la culture principale) ;
- portance et lutte contre le tassement des sols. C'est un sujet essentiel par exemple sur certaines variétés de pommiers qui se récoltent tardivement en période souvent pluvieuse ;
- création de biodiversité (photo 3) ;
- atténuation des températures extrêmes dans les parcelles. Des pommiers en goutte-à-goutte ont ainsi souffert des températures extrêmes fin juin 2019 avec des brûlures sur les fruits et feuilles du bas. Le problème a semble-t-il été moindre sur des vergers irrigués par micro-jet, avec un enherbement bien développé. Les phénomènes de brûlure auraient été atténués à la fois par une dissipation de l'énergie lors de la transpiration par l'enherbement et une moindre réflexion d'énergie par le sol.

Pour conclure

Dans des systèmes où la ressource en eau est la contrainte majeure, la recherche de l'efficacité maximum de l'eau est indispensable et le goutte-à-goutte présente la meilleure performance de ce point de vue. Pour autant, le seul fait d'installer ce matériel n'est pas un gage d'efficacité et seuls des irrigants pointus sauront en exploiter le potentiel.

Par ailleurs, il demeure une agriculture qui bénéficie d'un contexte moins contraint, avec une ressource en eau d'irrigation suffisante. Dans ces contextes, il devient possible de poursuivre des objectifs complémentaires à la stricte satisfaction des besoins en eau de la culture, tels que :

- le développement du système racinaire et l'exploration maximum du sol, pour l'eau et les nutriments ;
- la stimulation de la vie du sol, la minéralisation de la matière organique et des apports d'amendements ;
- le développement de cultures associées (cultures de service) ;
- la lutte contre l'érosion de sols ;
- le choix d'un matériel d'irrigation plus simple à entretenir et piloter que le goutte-à-goutte.

Il sera alors nécessaire de recourir à du matériel d'irrigation de type micro-jet ou aspersion, moins efficace en théorie que le goutte-à-goutte. Les apports d'eau seront également un peu majorés pour satisfaire les besoins du couvert végétal de service. ■

L'auteur

François GONTARD

BRL Exploitation,
1105 avenue Pierre Mendès France,
BP 94001, F-30001 Nîmes Cedex 5, France.
✉ Francois.Gontard@brl.fr

2. Le désherbage intégral est en effet souvent préconisé en irrigation par goutte à goutte pour limiter la concurrence pour l'eau entre la culture et la bande enherbée.



5 Haie composite.

Sciences Eaux & Territoires
est la revue de transfert d'INRAE

**Son objectif est de proposer une information claire et lisible
de haute qualité scientifique et technique**

qui permette de nourrir le processus de l'action et/ou de la décision
des différents intervenants publics et privés
dans le domaine du développement rural et de l'environnement.

La revue développe un lien entre la recherche et l'action.

Elle est envisagée comme un outil d'aide à la décision
et à l'accompagnement de l'action sur le terrain, en diffusant une information structurée
sur des méthodologies d'action, des synthèses sur les innovations techniques ou
technologiques et les dernières avancées de la recherche finalisée dans une optique
interdisciplinaire, dans les domaines couverts par INRAE et ses partenaires.

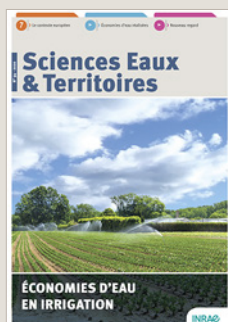
Le lectorat de la revue

Le lectorat visé est un public d'ingénieurs, de gestionnaires et de cadres des services
techniques des collectivités territoriales, des services déconcentrés de l'État,
des instituts techniques, des établissements d'enseignement technique et supérieur,
et des entreprises intervenant à leurs côtés.

De manière plus générale, cette revue s'adresse à tous les acteurs et praticiens
intervenant sur la gestion des espaces ruraux et périurbains,
qu'ils soient publics ou privés.

www.set-revue.fr

Télécharger librement les articles
sur le site de la revue Sciences Eaux & Territoires



Directeur de la publication : Philippe Mauguin

Coordination scientifique du numéro : Claire Serra-Wittling, Juan David Dominguez Bohorquez, Bruno Molle et Sami Bouarfa

Comité éditorial : Stéphanie Gaucherand, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Ghislain Huyghe, Emmanuelle Jannès-Ober, Nicolas de Menthière, Sébastien Michel, Thierry Mougey, Christophe Roturier et Michel Vallance

Coordination éditoriale : Sabine Arbeille

Secrétariat de rédaction, mise en page et suivi d'édition : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Contact édition et administration :

INRAE-DipSO – 1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030 – 92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – E-mail : set-revue@inrae.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution

Impression : Jouve Mayenne

Illustration de couverture : sarenac77 (Adobe Stock).

Illustrations du sommaire : lucid_dream (Adobe Stock), jollier (Adobe Stock), Andrew Norris (Adobe Stock).

Numéro 34, année 2020
N°ISSN : 2109-3016





Cette action est cofinancée par
le Fonds européen agricole
pour le développement rural :
l'Europe investit dans les zones
rurales.

