



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

Contribution de la télédétection pour caractériser les zones irriguées et les prélèvements d'eau pour l'irrigation

Dominique Courault¹, Gilles Belaud², Valérie Demarez³, Nicolas Baghdadi⁴, Jean-Stéphane BAILLY⁵

¹ UMR EMMAH, INRAE-Avignon Université, 84914 Avignon Cedex 9, France.

² G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, Univ. Montpellier, 34196 Montpellier Cedex 5, France.

³ CESBIO, 31401 Toulouse Cedex 9, France.

⁴ UMR TETIS, AgroParisTech, CIRAD, CNRS, INRAE, 34196 Montpellier Cedex 5, France.

⁵ UMR LISAH, Univ. Montpellier, AgroParisTech, INRAE, Institut Agro, IRD, 34060 Montpellier Cedex 5, France.

Correspondance : Dominique COURAULT, dominique.courault@inrae.fr

L'agriculture, en tant que principal consommateur d'eau, est particulièrement vulnérable à la diminution des ressources hydriques, notamment en période de forte évapotranspiration. Cet article présente les apports de la télédétection à la caractérisation des usages de l'eau par l'agriculture. Les opportunités offertes par les nouvelles missions d'observation et les méthodes de calcul sont introduites et discutées.

Les changements globaux impactent directement les ressources en eau et leurs usages, au premier plan l'agriculture qui est une des activités les plus consommatrice d'eau et qui génère la majeure partie des volumes évaporés vers l'atmosphère. Parmi les leviers d'adaptation de l'agriculture, l'irrigation permet de compenser le déficit hydrique, mais elle se heurte à la disponibilité réduite de la ressource lors des périodes de forte évapotranspiration, engendrant d'ores-et-déjà des conflits d'usages qui risquent de s'aggraver avec les sécheresses à venir (réduction des débits de 30 % en moyenne d'ici 2050, résultats de projet Explore 2¹).

Face à cette situation critique, nous avons besoin de mieux comprendre les consommations et les besoins en eau des cultures, qu'elles soient irriguées ou non. En complément de réseaux d'observations ponctuelles au sol, fournissant des données plus ou moins facilement accessibles, la télédétection offre une couverture spatiale des surfaces sur l'ensemble du globe, avec une répétition dans le temps de plus en plus élevée. Diverses informations peuvent être dérivées des images satellitaires, comme des cartes d'occupation des sols, d'humidité par exemple, qui sont de plus en plus accessibles via des plateformes ouvertes au grand public. Est-ce une opportunité pour mieux évaluer les usages de l'eau par l'agriculture et gérer les crises ?

La télédétection, un outil opérationnel pour le suivi des surfaces agricoles

La télédétection fournit depuis plus d'une cinquantaine d'années des informations spatio-temporelles à différentes échelles pour caractériser les sols nus et les cultures. Ces informations sont téléchargeables gratuitement à partir de la plateforme Theia² qui offre un catalogue d'images de satellites variés et de cartes thématiques dérivées de ces observations. Depuis 2016, grâce au programme européen Copernicus de surveillance de la terre, un certain nombre de services opérationnels délivre notamment des images des satellites Sentinel (1 et 2) à hautes résolutions spatiale et temporelle couvrant un large domaine spectral³. Sentinel 1 fournit des images tous les six jours dans le domaine des hyperfréquences (bande C avec deux polarisations VV et VH) et Sentinel 2 des réflectances tous les trois à cinq jours dans l'optique et le moyen infrarouge. Les deux satellites ont des pixels à dix mètres de résolution, ce qui permet de distinguer les parcelles.

1. Explore 2 : <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>

2. Plateforme Theia : <https://www.theia-land.fr/>

3. Sentinel 1 et 2 (programme Copernicus) :

https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinels

Suivant le domaine spectral considéré, différentes informations sont accessibles pour caractériser les agrosystèmes (Courault *et al.*, 2020). Ainsi dans le domaine optique, la signature spectrale de la végétation verte se distingue nettement par une absorption du signal mesuré dans le rouge et une forte réflectance dans le proche infrarouge. Ce domaine optique, dont on extrait un indice normalisé (*Normalized Difference Vegetation Index*, ou NDVI) est le plus souvent utilisé pour cartographier les cultures (Inglada *et al.*, 2015) et suivre leurs stades phénologiques *via* l'estimation des variables biophysiques telles que l'indice foliaire (LAI), ou encore la fraction de végétation qui couvre le sol (FCover). Les méthodes proposées sont à présent relativement robustes et opérationnelles à différentes résolutions spatiales (Weiss *et al.*, 2020). Ce domaine spectral permet également de bien distinguer les surfaces enneigées et délimiter les lacs et grandes retenues d'eau (Delenne *et al.*, 2021).

Le domaine de l'infra-rouge thermique permet d'accéder à la température de surface qui est indirectement liée au statut hydrique des surfaces. Une surface bien alimentée en eau aura une température de surface inférieure à une surface stressée. Différentes approches de modélisation sont basées sur l'utilisation de ces données thermiques combinées à des données optiques pour estimer l'évapotranspiration des surfaces (Khanal *et al.*, 2017). Une chaîne de traitement opérationnelle « EVASPA », développée par les équipes INRAE de l'unité mixte de recherche Environnement méditerranéen et modélisation des agro-hydrosystèmes (EMMAH) et du Centre d'études spatiales de la biosphère (Cesbio), combinant des images dans les domaines optiques et thermiques inclut différents modèles suivant une approche ensembliste⁴ pour produire des cartes d'évapotranspiration associées à leur incertitude sur de larges territoires (Gallego-Elvira *et al.*, 2013). Jusqu'à présent, les satellites ayant des bandes spectrales thermiques ne permettaient pas de combiner haute fréquence temporelle et fine résolution spatiale (par exemple, le satellite MODIS délivre une image tous les jours à un kilomètre de résolution dans le domaine thermique Landsat une image tous les seize jours s'il n'y a pas de nuages avec une résolution de l'ordre de cent mètres). À partir de 2026, une nouvelle mission franco-indienne soutenue

par le Centre national d'études spatiales (CNES), la mission TRISHNA, offrira des données optiques et thermiques tous les trois jours à cinquante mètres de résolution et des cartes d'évapotranspiration (ET) dérivées d'EVASPA seront fournies sur tout le globe. Ces produits seront particulièrement utiles pour aider à la gestion de l'eau d'irrigation (Roujean *et al.*, 2021). S'il y a des nuages, il n'est pas possible d'exploiter ces images optiques ou thermiques. Le temps de revisite d'une même zone doit être élevé pour pouvoir interpoler les données entre deux dates d'acquisition, sinon il faut utiliser des données radar qui délivrent des données quel que soit l'état du ciel.

Le domaine des micro-ondes, qu'il soit passif ou actif, génère des signaux qui sont influencés par les propriétés diélectriques des surfaces, c'est-à-dire par leur capacité à conduire et à pénétrer les ondes électromagnétiques. En micro-ondes passives, ces signaux prennent la forme de températures de brillance, tandis qu'en micro-ondes actives, ils se manifestent par des coefficients de rétrodiffusion. Ces signaux sont particulièrement sensibles à la teneur en eau de la végétation et des premiers centimètres du sol, ainsi qu'à des caractéristiques structurales comme la rugosité du sol et la densité ou la géométrie du couvert végétal. Des cartes de l'humidité de la couche superficielle du sol (sur environ les cinq premiers centimètres) sont disponibles à l'échelle globale tous les trois jours depuis 2010, à partir de différents capteurs radar tels que SMAP, SMOS, MODIS (Molero *et al.*, 2016) et plus récemment sur certaines parties de la France à partir de Sentinel 1 à l'échelle parcellaire *via* la plateforme Theia (Bazzi *et al.*, 2021).

De nombreuses variables d'intérêt liées à l'eau (synthétisées dans le tableau 1) sont à présent en libre accès et permettent d'identifier les différents types de cultures, suivre les humidités de surface et la dynamique des couverts. En revanche les cartographies des zones irriguées réactualisées chaque année sur tout le territoire ne sont pas encore disponibles même si différentes méthodes pré-opérationnelles ont déjà été évaluées sur un certain nombre de régions (Demarez *et al.*, 2019a, 2019b). L'estimation des dates d'irrigation et des volumes d'eau apportés est encore au stade de recherche. Les sections suivantes décrivent les avancées sur ces points.

Tableau 1 – Produits opérationnels utiles pour suivre les cultures et aider à la gestion de l'eau (voir aussi les autres produits disponibles sous Theia : <https://www.theia-land.fr/produits-thematiques/>).

Variable d'intérêt	Produits (source) détails
Identification des cultures	Cartographie OSO Theia ⁵ , France + DOM (Sentinel) 24 classes échelle pixel et parcelle.
Humidité des sols	Copernicus products SM ⁶ daily 1 km, SMP Theia (plot) ⁷ échelle parcelle tous les 6 jours Sentinel 1.
Variables biophysiques	Copernicus products LAI ⁸ , FCOVER, F APAR (300 m – 1 km) (Sentinel 2), à venir 2025 (10 m Theia).
Évapotranspiration	MODIS16 ⁹ (8 jours) 500-1km NASA, (à venir 2026 cartes ET sorties EVASPA pour TRISHNA).
Réservoirs, étendues d'eau	ASTWBD ¹⁰ (30 m ASTER), MYD28C3 ¹¹ (MODIS 1 km) SWOT ¹² .

4. Basée sur la théorie des ensembles, branche fondamentale des mathématiques qui étudie les ensembles (collection d'éléments). Ici, les éléments sont différents modèles d'estimation de l'évapotranspiration.

5. <https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-occupation-des-sols/>

6. <https://land.copernicus.eu/en/map-viewer>

7. <https://www.theia-land.fr/product/humidite-du-sol-a-tres-haute-resolution-spatiale/>

8. <https://land.copernicus.eu/global/products/lai>

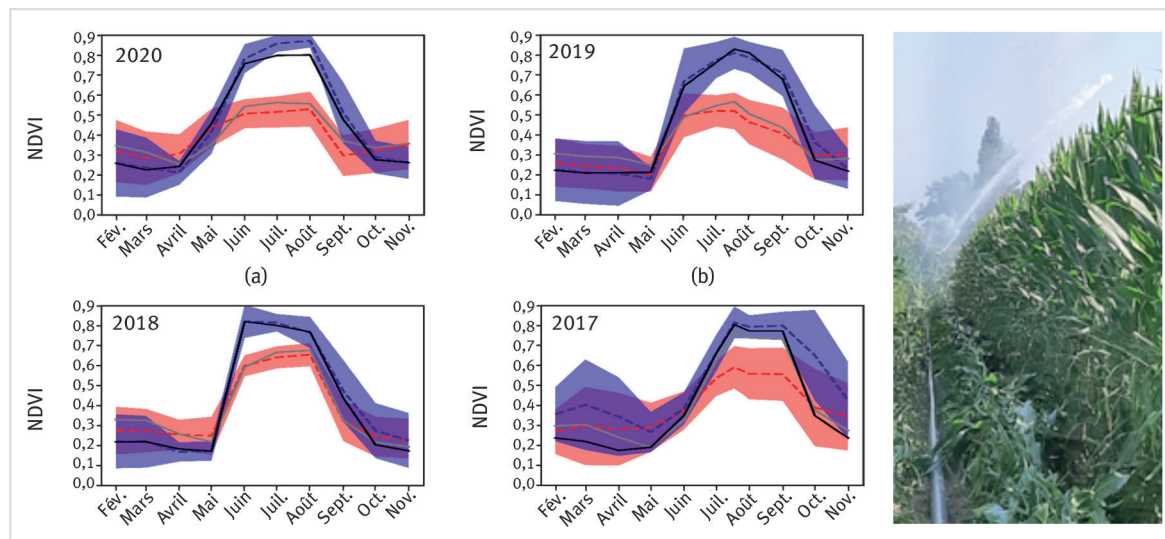
9. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod16.php>

10. <https://lpdaac.usgs.gov/products/astwbv001/>

11. <https://lpdaac.usgs.gov/products/myd28c2v061/>

12. <https://www.theia-land.fr/product/surfwater-suivi-dynamique-de-surfaces-en-eau/>

Figure 1 – Profils temporels de NDVI calculés sur des cultures irriguées dans le Sud-Ouest de la France pour différentes années à partir d'images Sentinel 2 (la ligne pointillée rouge représente les parcelles non irriguées sélectionnées, la ligne grise les parcelles in situ non irriguées, la ligne pointillée bleue, les parcelles irriguées sélectionnées (les zones ombrées l'écart-type) (Bazzi et Baghdadi, 2024).



Les produits issus de la télédétection disponibles et en cours de développement utiles pour la gestion de l'eau en agriculture

Cartes des cultures

Pour la gestion territoriale de l'eau, il est important de connaître les consommations d'eau pour chaque espèce cultivée qui dépendent bien évidemment du type de culture, de son stade de développement et des réserves du sol. La connaissance de l'ensemble des cultures à l'échelle territoriale ou d'un bassin versant, est souvent très incomplète. Il existe des déclarations de cultures faites par les agriculteurs pour recevoir des subventions PAC¹³ qui sont répertoriées dans le registre parcellaire graphique (RPG), mais qui ne couvrent pas toutes les cultures et ces informations sont délivrées avec un certain délai quelques mois après la fin de l'année déclarée. L'utilisation d'images satellitaires permet une mise à jour plus fréquente, avec des précisions parfois très élevées pour certaines cultures, sans pour autant garantir une précision absolue, compte tenu de la période d'acquisition des images et de la proximité des signatures spectrales entre certaines cultures. La carte annuelle délivrée par la plateforme Theia distingue actuellement vingt-quatre classes, dont, dans les cultures d'été, le maïs, tournesol, sorgho, riz, soja et cultures de type tubercules/racines. Cette carte est fournie en format raster sur l'ensemble de la France et des départements d'outre-mer. Elle est aussi disponible en format vecteur moyenné selon le parcellaire. Généralement accessible au début du premier trimestre de l'année suivante, elle permet de créer une couche d'occupation du sol, en complément du RPG. Des améliorations sont en cours pour sortir des cartes à une fréquence plus élevée et prendre notamment en compte les rotations intra-annuelles et les intercultures (développement en cours au Cesbio). Par ailleurs, BPI France et le CNES financent actuellement des projets coordonnés par des entreprises privées (KERMAP¹⁴ et MEOOS¹⁵) incluant une expertise recherche

(INRAE EMMAH et Cesbio), pour produire régulièrement à plus haute fréquence à l'échelle de la France des cartographies des intercultures et des surfaces irriguées. Les sorties opérationnelles sont attendues pour 2026. La mise à disposition des données Sentinel 2 corrigées via Theia, ainsi que d'algorithmes pour la cartographie des surfaces, facilite de plus en plus l'adoption de méthodes pour créer des cartographies spécifiques. Cela inclut, par exemple, l'utilisation combinée des images Sentinel 1 et 2, l'application de multiples indices composites et l'emploi d'algorithmes de classification accessibles sur des plateformes en ligne (voir par exemple Orieschnig *et al.*, 2021).

Cartographie des surfaces irriguées

L'utilisation d'indices de végétation

De nombreuses études ont montré que les indices de végétation calculés à partir de bandes spectrales dans le domaine de l'optique permettent de distinguer des cultures irriguées des cultures pluviales (Pageot *et al.*, 2020). Suivant l'importance des apports d'eau d'irrigation par rapport aux apports naturels, les différences de développement des cultures seront plus ou moins marquées. Ainsi, la distinction sera plus ou moins précise selon les cultures, les régions et les années. La figure 1 illustre la variation des indices de végétation pour des parcelles de maïs (irriguées en mauve et non irriguées en rose) dans le Sud-Ouest de la France, pour quatre années successives. Suivant les périodes de l'année, l'écart est plus marqué. L'été, où les apports d'eau sont importants, permet de mieux identifier les parcelles irriguées.

Ren *et al.* (2021) ont utilisé le NDVI de MODIS et de Landsat en évaluant trois algorithmes de classifications (*Random Forest*, *Support Vector Machine* et réseau de neurones) pour cartographier du maïs irrigué et pluvial

13. Politique agricole commune.

14. <https://kermap.com/>

15. <https://meoss.net/>

dans le Nebraska et obtenu une précision élevée variant entre 89 et 90 %. La précision est très dépendante du jeu d'observations utilisé pour l'entraînement de ces méthodes. Plus les données sont nombreuses et représentatives de la variabilité de la zone d'étude, plus les scores sont élevés.

Algorithmes, combinaison d'images, multi-temporalité : les recherches en cours

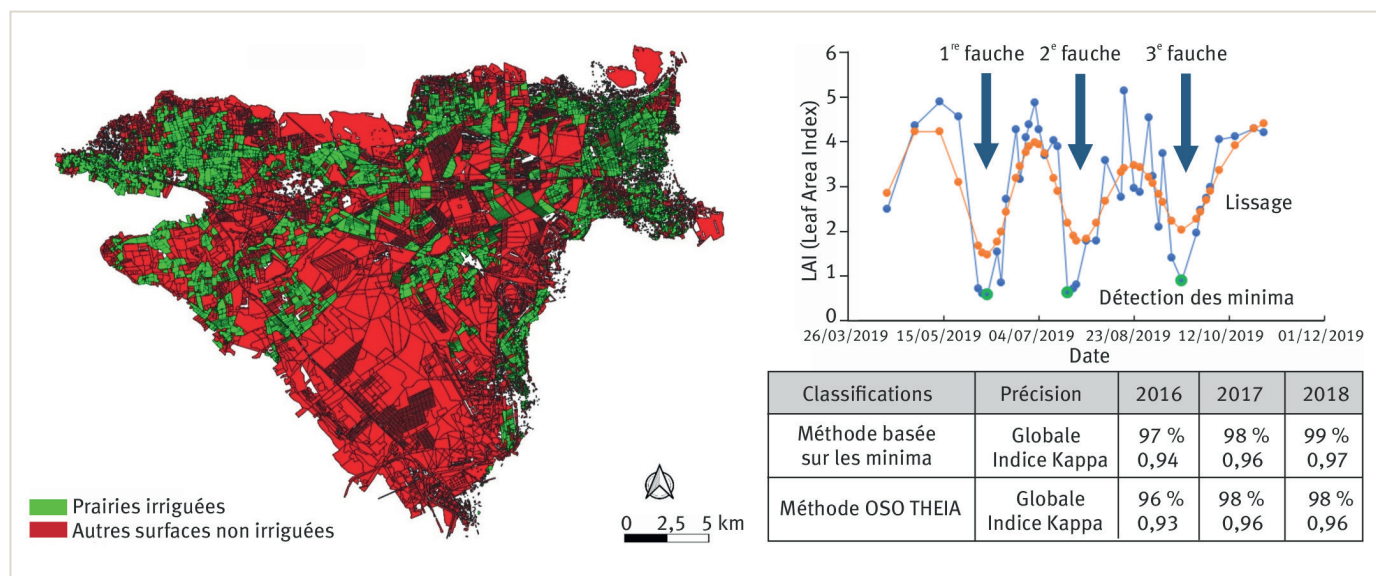
Une façon de s'affranchir de l'acquisition de données au sol (souvent lourde et coûteuse) est de se baser sur l'utilisation de points caractéristiques issus de l'analyse des séries temporelles calculées à l'échelle des parcelles individualisées. Cette méthode a été utilisée par Abubakar *et al.* (2022) pour cartographier les prairies irriguées de Crau et a donné de très bonne précision de détection des surfaces irriguées variant suivant les années entre 96 et 98 %, supérieure à la classification OSO fournie par Theia. Les prairies irriguées se distinguent par trois fauches en cours d'année, faisant chuter la surface foliaire. La méthode repose sur la détection des minima de LAI sur une période définie par des seuils calibrés à partir d'un jeu restreint de parcelles connues (figure 2). Bazzi *et al.* (2019a) ont proposé une autre méthode basée sur l'utilisation de métriques dérivées de l'analyse du profil temporel du rapport de signaux radar Sentinel 1 (VV/VH, rapport des deux polarisations reçues suivant une cible verticale et horizontale) pour cartographier le riz en Camargue. Une classification de type Random Forest utilise ensuite ces métriques pour cartographier les cultures. La précision obtenue est élevée, de l'ordre de 96 % de parcelles irriguées bien classées sur l'ensemble de la région. Afin de couvrir un panel plus diversifié de cultures, Bazzi *et al.* (2019b) ont développé une approche combinant données optiques (NDVI issu de Sentinel 2) et radar (VV et VH) pour distinguer les cultures irriguées de différentes régions. La méthode se décompose en plusieurs étapes selon un arbre de déci-

sion avec une structure hiérarchique. Elle considère les écarts de polarisation VV (bande considérée souvent plus sensible à l'humidité de surface) entre deux dates successives en comparant deux résolutions spatiales 10 m et 10 km. Suivant la variation observée pour les deux résolutions 10 m et 10 km, des hypothèses sont posées en considérant que la pluie affecte une plus grande zone que l'irrigation. Cette méthode a été appliquée avec succès sur le bassin de la Durance (figure 3) et a été comparée à la méthode Iota2 développée par le Cesbio (Pageot *et al.*, 2020), reposant sur une classification Random Forest considérant un grand nombre d'observations pour la calibration. Les précisions de détection des zones irriguées sont élevées pour les deux méthodes (> 75 %) avec des variations suivant les secteurs du territoire analysé et suivant les années. Si la méthode Iota2 donne plutôt des meilleurs scores sur l'ensemble du bassin et permet de couvrir toutes les cultures, elle demande néanmoins un échantillonnage spatial représentatif suffisant et les années humides peuvent conduire à des cultures irriguées moins bien identifiées par rapport aux cultures pluviales. La première méthode semi-supervisée (Bazzi *et al.*, 2019b) présente l'avantage de caler un certain nombre de seuils en fonction d'un échantillon de parcelles réduit, mais elle ne peut pas s'appliquer pour l'instant aux vignes/vergers sur lesquels l'algorithme n'est pas encore adapté. Une des limites majeures lors de l'utilisation des données radar en bande C pour la détection de l'irrigation est la pénétration limitée du signal en bande C (longueur d'onde ~ 6 cm) pour les couverts très développés.

Estimation par télédétection des dates d'irrigation et des quantités d'eau apportées

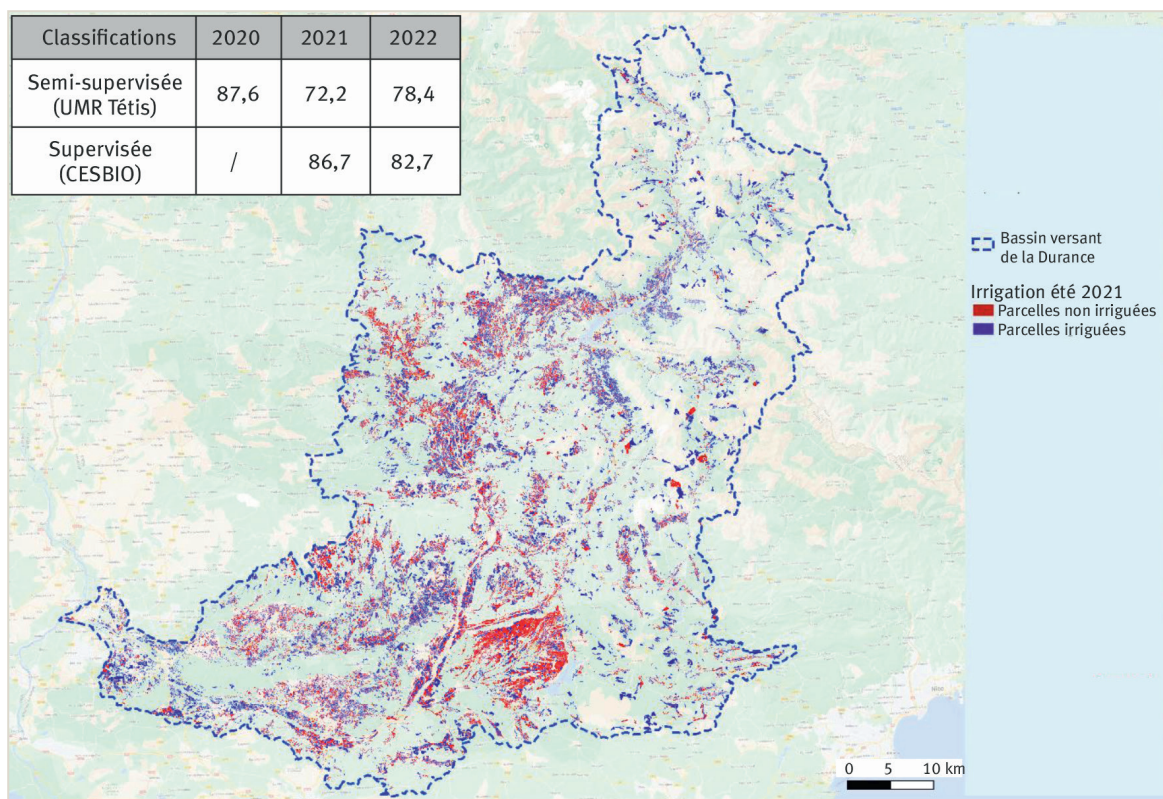
Une première catégorie de méthodes repose uniquement sur des données de télédétection, principalement radar telles que celle proposée par El Hajj *et al.* (2014). Ces auteurs ont utilisé les données radar SAR¹⁶, TerraSAR

Figure 2 – Cartographie des prairies irriguées en Crau (zones vertes) basées sur la détection des minima détectés sur le profil temporel du LAI dérivé de Sentinel 2 calculé pour chaque parcelle (courbe bleue, ou courbe orange pour les valeurs lissées). Les performances ont été comparées à la classification OSO fournie par Theia pour différentes années (Abubakar *et al.*, 2022).



16. Radar SAR (Synthetic Aperture Radar) est une technologie de radar avancée qui permet d'obtenir des images en deux dimensions.

Figure 5 – Résultats de cartographies des cultures irriguées sur le bassin de la Durance obtenus suivant deux méthodes : méthode semi-supervisée développée à l'UMR Tétis (Bazzi *et al.*, 2020b), et méthode supervisée, Iota2 développée au Cesbio (Pageot *et al.*, 2020) et précisions de cultures bien classées (%) calculées sur trois années (travail réalisé dans le cadre du projet LIFE Eau supervisé par le Syndicat mixte d'aménagement de la Durance (SMAVD¹⁷)).



17. https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/C3-SMAVD_Teledec%26Irrigation_RAPPORT%20FINAL_vdef.pdf

en bande X pour détecter des dates d'irrigation de prairies en Crau et montré que les arrosages pouvaient être identifiés jusqu'à trois jours avant l'acquisition SAR. Si les images TerraSAR sont intéressantes notamment pour leur fine résolution (1 m), elles couvrent une superficie plus limitée et sont moins fréquentes pour un suivi opérationnel. La méthode a été améliorée par Bazzi *et al.* (2020a) qui ont construit un algorithme d'arbre de décision capable de détecter les événements d'irrigation à l'échelle de la parcelle à partir de données Sentinel 1 plus accessibles (notamment en utilisant la bande VV). L'algorithme, appelé IEDM (*Irrigation Events Detection Model*) a été appliqué sur différentes cultures de prairies en Crau et céréales en Catalogne, Occitanie, et région Provence-Alpes-Côte d'Azur en France (Baghdadi *et al.*, 2019). La méthode compare le signal VV rétrodiffusé à l'échelle de la parcelle à celui obtenu à l'échelle du bassin (10 km x 10 km) en supposant que ce dernier n'est affecté que par les précipitations tandis que le premier est affecté à la fois par les précipitations et l'irrigation. Sur la Crau, l'irrigation est gravitaire avec des arrosages tous les huit à dix jours de mars à octobre (figure 4). La précision globale obtenue est de 82 % d'épisodes correctement détectés. La méthode a été appliquée dans différents contextes agroclimatiques notamment sur des céréales en Grèce et au Liban (Bazzi *et al.*, 2022, 2020b). La précision globale est plus faible de l'ordre de 67 %. Elle varie en fonction des conditions climatiques des

zones étudiées (généralement plus élevée dans les régions semi-arides 85 % et plus faible dans les zones tempérées, 53 %) (Bazzi *et al.*, 2022).

D'autres approches d'estimation des volumes d'eau d'irrigation s'appuient sur la réponse de la culture aux apports d'eau, en combinant modèles de culture et données de télédétection pour retrouver les dates et doses apportées (Hamze *et al.*, 2023a; Hamze *et al.*, 2023b). Dans Hamze *et al.* (2023b), les LAI dérivés des données Sentinel 2 sont confrontés aux prédictions simulées à partir du modèle de culture Optirrig. Le modèle réalise autant de simulations que de combinaisons couplant dates d'irrigation et doses définies. La comparaison des LAI simulés aux LAI observés permet de retrouver la combinaison la plus probable en utilisant un algorithme d'optimisation. L'application de cette méthode (illustrée sur la figure 5, à gauche) à des couverts de maïs en région Occitanie a montré que la plupart des dates d'irrigation a été correctement détectée avec des erreurs comprises entre zéro et trois jours, tandis que les doses apportées (20, 30 ou 40 mm) sont aussi globalement bien identifiées dans plus de 80 % des cas. La méthode a été améliorée en considérant dans le même modèle (Optirrig) les humidités de surface dérivées de données Sentinel 1 qui sont comparées aux simulations. La précision est de 86 % de dates d'irrigation retrouvées (Hamze *et al.*, 2023) Les résultats obtenus sur deux sites sont présentés en figure 5, à droite).

Le problème d'équifinalité peut compliquer la détermination des dates d'irrigation, plusieurs combinaisons de date et dose pouvant donner des résultats quasi identiques. L'information satellitaire peut en revanche être utilisée pour définir l'état du couvert dans un modèle de culture. L'outil SATIRR, par exemple, a été conçu pour l'aide à la décision d'irriguer à partir du modèle SAMIR (Simonneaux *et al.*, 2009). Il est calibré avec des séries temporelles d'indices de végétation. Il a été appliqué au Maroc pour piloter l'irrigation d'une parcelle de blé en temps réel en tenant compte du besoin réel de la plante, estimé à partir d'un coefficient de stress calculé à l'échelle de la parcelle (Le Page *et al.*, 2014). L'outil développé au CESBIO a été transféré à des entreprises privées (Terranis (Wago) et E_Tumba) pour des applications commerciales.

Vers une estimation des prélèvements d'eau par l'agriculture à l'échelle de bassins ?

La capacité des méthodes de télédétection pour estimer les consommations en eau des cultures à large échelle (bassins versants, territoires, régions) est bien sûr limitée par la précision des caractérisations obtenues à l'échelle parcellaire (occupation du sol, recours ou non à l'irrigation, calendriers d'irrigation...). Toutefois, considérer un ensemble de parcelles permet de lisser les erreurs et espérer des estimations assez précises des consommations en eau par l'agriculture, à partir de modèles agro-hydrologiques agréant les bilans hydriques calculés à l'échelle parcellaire.

L'utilisation des observables de télédétection dans la modélisation agro-hydrologique présente un double intérêt : d'une part prendre en compte la variabilité des

Figure 4 – Résultats des irrigations détectées (points bleus) sur une prairie de Crau irriguée en gravitaire tous les dix jours, selon la méthode développée par Bazzi *et al* (2020) basée sur l'utilisation de données Sentinel 1 (trait pointillé en noir, signal VV ascendant à une résolution de 10 m) et de données Sentinel 2 (NDVI en vert). La ligne pointillée rouge correspond au signal VV agrégé à 10 km.

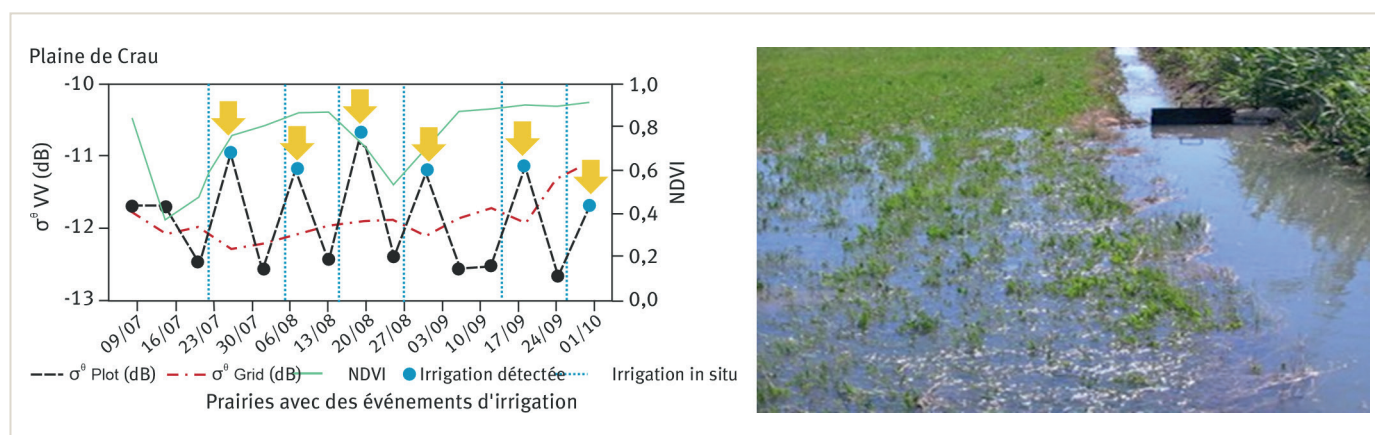
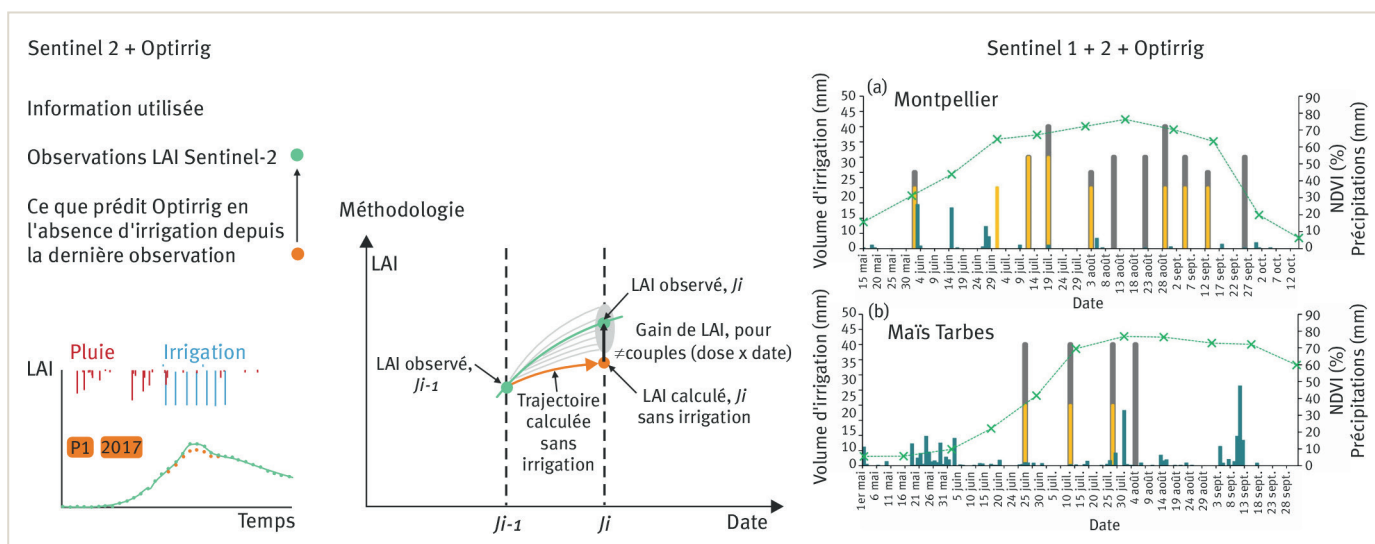


Figure 5 – Approches inverses combinant modélisation et télédétection pour retrouver les dates d'irrigation et les quantités d'eau apportées (résultats issus de Hamze *et al.*, 2023a ; Hamze *et al.*, 2023b).

Graphique de droite : les barres jaunes correspondent aux quantités d'eau simulées apportées par irrigation ; en gris, les données réelles ; en vert : les pluies, la courbe verte avec les croix au NDVI.



caractéristiques de surface (identification des zones irriguées, proximité des ressources en eau potentielles); d'autre part, pouvoir caler et/ou valider certains paramètres (ou variables d'intérêt) à partir d'observations ou produits issus des données satellites (LAI/FCOVER, humidité des sols, évapotranspiration réelle).

L'utilisation d'indices de végétation (comme le NDVI), obtenus à partir de Sentinel 2, permet par exemple de caler les paramètres représentant le développement des cultures (dates d'émergence, FCOVER, coefficient cultural), spatialisés à l'échelle d'un territoire. Brochet *et al.* (2024) montrent ainsi, sur le bassin de la Gimone (Garonne amont), l'intérêt de cette spatialisation obtenue à partir de données Sentinel 2 sur ce bassin de 800 km², où les dates d'émergence observées pour le maïs sont échelonnées sur deux mois. L'ajustement des phases de développement permet ainsi de bien reconstituer les prélèvements d'eau d'irrigation à l'échelle du bassin (figure 6).

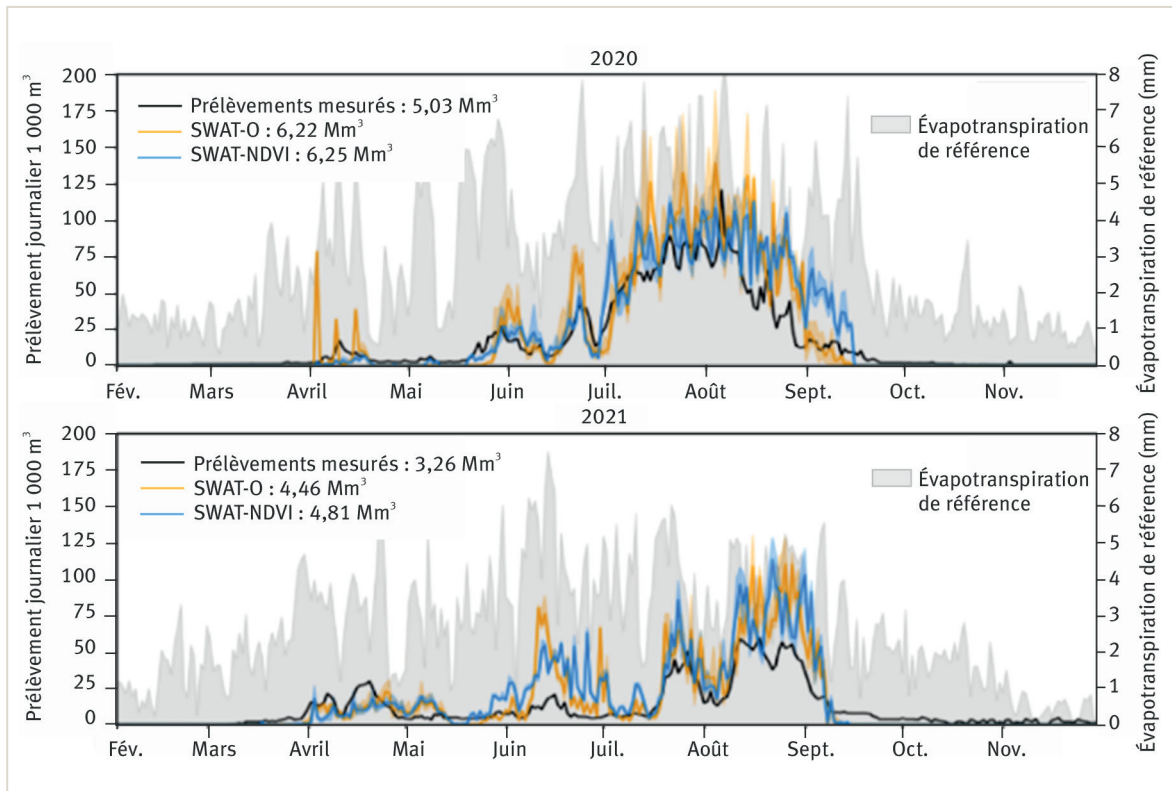
Un autre exemple de plateforme de modélisation couplant modèle de culture (STICS), modèle hydrologique (MODCOU) et intégrant de la télédétection pour cartographier les cultures irriguées est le simulateur spatialisé qui a été appliqué sur la Crau, et qui permet de reproduire les productions de prairies et d'évaluer l'impact des irrigations sur la recharge de la nappe (Trolard *et al.*, 2020). L'introduction des produits dérivés de satellites tels que le LAI, la date de coupe dans le modèle STICS a montré une amélioration significative des simulations de production des prairies (Courault *et al.*, 2020). Ces modèles lorsqu'ils

sont bien calibrés, permettent de simuler des scénarios de changements de pratiques, notamment de diminution de l'irrigation et de quantifier les impacts sur les ressources (Baillieux *et al.*, 2015; Trolard *et al.*, 2020).

Conclusion

La télédétection, couplée à l'utilisation de modèles agro-hydrologiques, représente un potentiel important pour le suivi et la gestion des volumes d'eau utilisés par l'agriculture. Certaines méthodes sont maintenant suffisamment matures pour être utilisées de manière opérationnelle, comme les cartes d'occupation du sol (produit OSO de Theia, le suivi du développement de couverts végétaux via l'analyse de séries temporelles d'indices de végétation et sous certaines conditions la détection des surfaces irriguées. Ces différentes informations peuvent permettre d'adapter les apports d'eau suivant les réels besoins des cultures et ainsi d'optimiser les ressources, surtout en période critique l'été. Il reste certains verrous à lever, comme la détection de cultures associées ou intermédiaires, ou encore la capacité à détecter les techniques d'irrigation et les volumes d'eau apportés par irrigation pour les cultures pérennes comme la vigne ou les vergers. L'estimation des volumes utilisés en est encore à ses débuts et doit faire l'objet de recherches avant d'espérer des méthodes opérationnelles sur ce type de cultures. L'estimation à l'aide de la télédétection de la réserve utile des sols, élément déterminant des stratégies d'irrigation, est également une piste de recherche essentielle.

Figure 6 – Calcul des prélèvements agricoles simulés à partir du modèle SWAT versus prélèvements mesurés, Gimone et Marcaoué, comparaison pour deux années de simulations avec apport (en bleu) et sans apport de la télédétection (en jaune) (Brochet *et al.*, 2024).



L'accès à de plus en plus de nouvelles informations, couplées à des méthodes d'assimilation de données multi-capteurs dans les modèles agro-hydrologiques, d'usages de modèles basés sur l'intelligence artificielle devrait permettre de grandes avancées pour accéder à ces variables d'intérêt. La mission franco-indienne TRISHNA, avec notamment un suivi à haute résolution spatiale et temporelle des températures de surface, ouvre aussi de nouvelles perspectives pour le suivi des systèmes irrigués et la détection de zones touchées par des stress hydriques. Ces données seront capitales dans les années futures pour aider les gestionnaires de l'eau à l'échelle des territoires et diminuer les conflits entre usagers.

NOTE DES AUTEURS

Cette synthèse des travaux en télédétection des surfaces irriguées s'appuie sur les réflexions menées par le consortium GI-EAU financé par le métaprogramme « CLIMAE » d'INRAE.

RÉFÉRENCES

- Abubakar, M., Chanzy, A., Pouget, G., Flamain, F., & Courault, D. (2022). Detection of irrigated permanent grasslands with sentinel-2 based on temporal patterns of the leaf area index (LAI). *Remote Sensing*, 14(13), 3056. <https://doi.org/10.3390/rs14133056>
- Baghdadi, N., Bazzi, H., El Hajj, M., & Zribi, M. (2019). Analysis of Sentinel-1 derived soil moisture maps over Occitanie, South France. In "IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium", pp. 6275-6278. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8899078>
- Bailleux, A., Olioso, A., Trolard, F., Chanzy, A., Lecerf, R., Lecharpentier, P., Ruget, F., & Ruy, S. (2015). Changement global : quels impacts sur l'aquifère de la crau ? *Revue Société géologique de France : géologues*, numéro 187, ISSN0016.7916, 6 p.
- Bazzi, H., Baghdadi, N., El Hajj, M., Zribi, M., Minh, D. H. T., Ndikumana, E., Courault, D., & Belhouchette, H. (2019a). Mapping Paddy Rice Using Sentinel-1 SAR Time Series in Camargue, France. *Remote Sensing* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11070887>
- Bazzi, H., Baghdadi, N., Ienco, D., El Hajj, M., Zribi, M., Belhouchette, H., Escorihuela, M. J., & Demarez, V. (2019b). Mapping Irrigated Areas Using Sentinel-1 Time Series in Catalonia, Spain. *Remote Sensing* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11151836>
- Bazzi, H., Baghdadi, N., Fayad, I., Charron, F., Zribi, M., & Belhouchette, H. (2020a). Irrigation events detection over intensively irrigated grassland plots using Sentinel-1 data. *Remote Sensing* 12, 4058. <https://doi.org/10.3390/rs12244058>
- Bazzi, H., Baghdadi, N., Fayad, I., Zribi, M., Belhouchette, H., & Demarez, V. (2020b). Near real-time irrigation detection at plot scale using sentinel-1 data. *Remote Sensing* 12, 1456. <https://doi.org/10.3390/rs12091456>
- Bazzi, H., Baghdadi, N., Amin, G., Fayad, I., Zribi, M., Demarez, V., & Belhouchette, H. (2021). An Operational Framework for Mapping Irrigated Areas at Plot Scale Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data. *Remote Sensing* 13, 2584. <https://doi.org/10.3390/rs13132584>
- Bazzi, H., Baghdadi, N., Najem, S., Jaafar, H., Le Page, M., Zribi, M., Faraslis, I., & Spiliotopoulos, M. (2022). Detecting irrigation events over semi-arid and temperate climatic areas using Sentinel-1 data: case of several summer crops. *Agronomy* 12, 2725. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112725>
- Bazzi, H., & Baghdadi, N. (2024). Irrigation Monitoring Using High Spatial and Temporal Resolutions Remote Sensing Time Series. *Multitemporal Earth Observation Image Analysis: Remote Sensing Image Sequences*, 123-149.
- Brochet, E., Grusson, Y., Sauvage, S., Lhuissier, L., & Demarez, V. (2024). How to account for irrigation withdrawals in a watershed model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(1), 49-64. <https://doi.org/10.5194/hess-28-49-2024>
- Courault, D., Le Page, M., Jarlan, L., & Khabba, S. (2020). Quels sont les capteurs et les méthodes disponibles en télédétection pour aider à la gestion de l'eau. *L'eau en milieu agricole*, Éditions Quae.
- Delenne, C., Bailly, J. S., Rousseau, A., Hostache, R., & Boutron, O. (2021). Endorheic waterbodies delineation from remote sensing as a tool for immersed surface topography. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 19, 1-5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3079718>
- Demarez, V., Helen, F., Marais-Sicre, C., and Baup, F. (2019). In-Season Mapping of Irrigated Crops Using Landsat 8 and Sentinel-1 Time Series. *Remote Sensing* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11020118>
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Belaud, G., Zribi, M., Cheviron, B., Courault, D., & Charron, F. (2014). Irrigated grassland monitoring using a time series of TerraSAR-X and COSMO-SkyMed X-band SAR data, *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 10002-10032, <https://doi.org/10.3390/rs61010002>
- Gallego-Elvira, B., Olioso, A., Mira, M., Reyes-Castillo, S., Boulet, G., Marloie, O., Garrigues, S., Courault, D., Weiss, M., Chauvelon, P., & Boutron, O. (2013). EVASPA (Evapotranspiration Assessment from SPace) tool: An overview. Four Decades of Progress in Monitoring and Modeling of Processes in the Soil-Plant-Atmosphere System. *Applications and Challenges* 19, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.035>
- Hamze, M., Cheviron, B., Baghdadi, N., Lo, M., Courault, D., & Zribi, M. (2023a). Detection of irrigation dates and amounts on maize plots from the integration of Sentinel-2 derived Leaf Area Index va& lues in the Optirrig crop model. *Agricultural Water Management*, 283, 108315. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108315>

RÉFÉRENCES (SUITE)

- Hamze, M., Cheviron, B., Baghdadi, N., Courault, D., & Zribi, M. (2023b). Plot-Scale Irrigation Dates and Amount Detection Using Surface Soil Moisture Derived from Sentinel-1 SAR Data in the Optirrig Crop Model. *Remote Sensing* 15, 4081. <https://doi.org/10.3390/rs15164081>
- Inglada, J., Arias, M., Tardy, B., Hagolle, O., Valero, S., Morin, D., Dedieu, G., Sepulcre, G., Bontemps, S., Defourny, P., & Koetz, B. (2015). Assessment of an Operational System for Crop Type Map Production Using High Temporal and Spatial Resolution Satellite Optical Imagery. *Remote Sensing* 7, 12356-12379. <https://doi.org/10.3390/rs70912356>
- Khanal, S., Fulton, J., & Shearer, S. (2017). An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 139, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.001>
- Le Page, M., Toumi, J., Khabba, S., Hagolle, O., Tavernier, A., Kharrou, M. H., ... & Jarlan, L. (2014). A life-size and near real-time test of irrigation scheduling with a sentinel-2 like time series (SPOT4-Take5) in Morocco. *Remote Sensing*, 6(11), 11182-11203. <https://doi.org/10.3390/rs6111182>
- Molero, B., Merlin, O., Malbêteau, Y., Al Bitar, A., Cabot, F., Stefan, V., Kerr, Y., Bacon, S., Cosh, M., & Bindlish, R. (2016). SMOS disaggregated soil moisture product at 1 km resolution: Processor overview and first validation results. *Remote Sensing of Environment* 180, 361-376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.045>
- Orieschnig, C. A., Belaud, G., Venot, J. P., Massuel, S., & Ogilvie, A. (2021). Input imagery, classifiers, and cloud computing: Insights from multi-temporal LULC mapping in the Cambodian Mekong Delta. *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), 398-416. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.1948356>
- Pageot, Y., Baup, F., Inglada, J., Baghdadi, N., & Demarez, V. (2020). Detection of irrigated and rainfed crops in temperate areas using Sentinel-1 and Sentinel-2 time series. *Remote Sensing* 12, 3044. <https://doi.org/10.3390/rs12183044>
- Ren, J., Shao, Y., Wan, H., Xie, Y., & Campos, A. (2021). A two-step mapping of irrigated corn with multi-temporal MODIS and Landsat analysis ready data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 176, 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.04.007>
- Roujean, J. L., Bhattacharya, B., Gamet, P., Pandya, M., Boulet, G., Olivos, A., Singh, S., Shukla, M., Mishra, M., & Babu, S. (2021). TRISHNA: an Indo-French space mission to study the thermography of the earth at fine spatio-temporal resolution. In "2021 IEEE International India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS)", pp. 49-52. IEEE. <https://doi.org/10.1109/InGARSS51564.2021.9791925>
- Simonneaux, V., Le Page, M., Helson, D., Metral, J., Thomas, S., Duchemin, B., ... & Chehbouni, G. (2009). Estimation spatialisée de l'Evapotranspiration des cultures irriguées par télédétection. Application à la gestion de l'Irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 20(1), 123-130. <https://ird.hal.science/ird-00389327v1>
- Trolard, F., Alcazar, C., Bailleux, A., Bourrié, G., Chanzy, A., Cognard, A. L., Courault, D., Guillon, M., Olivos, A., Ruy, S. (2020). Influence des changements globaux sur l'évolution quantitative des ressources en eau en plaine de Crau. Chapitre 20. In Leenhardt, D., Voltz, M., Barreteau, O., L'eau en milieu agricole. Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale, Versailles, Éditions Quae, 288p, (coll synthèses ouvrage) ISTE INRA, pp261-270
- Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote sensing of environment* 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>