HAL open science

Quels sont les capteurs et les méthodes disponibles en télédétection pour aider à la gestion de l'eau ?

Dominique Courault, Michel Le Page, Said Khabba, Lionel Jarlan

To cite this version:

Dominique Courault, Michel Le Page, Said Khabba, Lionel Jarlan. Quels sont les capteurs et les méthodes disponibles en télédétection pour aider à la gestion de l'eau ?. L'eau en milieu agricole : outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale, Éditions Quae, 288 p., 2020, Synthèses. hal-03543656

HAL Id: hal-03543656

https://hal.inrae.fr/hal-03543656

Submitted on 26 Jan 2022

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Chapitre 10

Quels sont les capteurs et les méthodes disponibles en télédétection pour aider à la gestion de l'eau ?

Dominique Courault, Michel Le Page, Saïd Khabba et Lionel Jarlan

Aujourd'hui, il existe une disponibilité sans précédent de produits dérivés d'observations satellitaires, notamment sous l'impulsion de la constellation Copernicus[1] (Lacaze *et al.*, 2015). Ce programme européen de surveillance de la terre comprend une composante spatiale qui délivre gratuitement des images à hautes résolutions spatiale et temporelle couvrant un large domaine spectral. Parmi les missions les plus récentes, Sentinel 1 fournit des images tous les six jours dans le domaine des hyperfréquences et Sentinel 2 tous les cinq jours dans l'optique et le moyen infrarouge, les deux à dix mètres de résolution.

Des portails d'accès à ces données sont disponibles sur internet. Citons en France :
– le pôle Theia[2] permet de télécharger des images brutes et des produits à valeur ajoutée comme la classification de l'occupation des sols (Inglada *et al.*, 2015) et des cartes d'humidité de surface sur certaines régions à 20 m de résolution depuis 2016 ;
– l'équipex Géosud[3] propose des couvertures de la France à très fine résolution à partir d'images Spot6/7 et Pléiades (pixel de 70 cm) ;
– Sen2-agri-system[4] fournit des outils de traitement des images Sentinel 2 adaptés pour le suivi des cultures.

Lorsque l'on s'intéresse à la gestion de l'eau pour l'agriculture, soit sur de grandes étendues pour planifier les ressources en fonction des besoins, soit au niveau parcellaire pour assurer une meilleure gestion de l'irrigation, il est utile :
– d'identifier le type de culture (irriguée ou non) et son stade de développement ;
– de connaître les conditions météorologiques qui influent sur l'évapotranspiration réelle (ETR) ;
– de disposer de renseignements sur le type de sol (profondeur et texture qui conditionnent la réserve utile en eau accessible pour la plante) et son état hydrique ;
– de quantifier les volumes d'eau apportés ;
– de connaître la technique d'irrigation utilisée.

1. www.esa.int/Our_Activities/Operations/Sentinels.
2. www.theia-land.fr
3. http ://ids.equipex-geosud.fr/images-disponibles
4. www.esa-sen2agri.org/

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 149 06/05/2020 12:46

Certaines variables, liées à la description de la structure des couverts telles que la fraction de végétation (fCover – *fraction of green vegetation cover*) et l'indice foliaire (LAI – *Leaf area index*), permettent de suivre le développement des cultures lorsque l'on considère des images à haute répétition temporelle. Actuellement, ces variables sont calculées en routine à partir de données de divers capteurs pour différentes résolutions spatiales et largement utilisées pour des applications opérationnelles dans des modèles climatiques ou de fonctionnement (Lacaze *et al.*, 2015). En revanche, les variables renseignant sur l'état hydrique des surfaces et sur les besoins en eau des cultures (détection des surfaces irriguées, des zones stressées, humidité de la zone racinaire, contenu en eau de la végétation, évapotranspiration, niveau de la nappe, etc.) ne font pas encore partie des produits délivrés en routine avec une précision suffisante pour permettre une gestion intégrée des ressources en eau aux échelles parcellaires, de l'exploitation et de la région agricole (Le Page *et al.*, 2012).

Ce chapitre a pour objectifs de présenter une brève synthèse sur les principaux capteurs satellitaires utilisés dans le domaine de l'agriculture, de lister les variables dérivées des images pertinentes pour la gestion de l'eau et d'illustrer quelques méthodes et outils développés actuellement pour des applications opérationnelles. Un focus sera fait sur l'estimation de l'évapotranspiration et les approches permettant de suivre le stress hydrique et les surfaces irriguées. La présentation d'un outil d'aide à la décision pour la gestion de l'irrigation terminera ce chapitre. En conclusion, les points importants à retenir seront rappelés.

Les différents capteurs et leurs caractéristiques

Une pléthore de satellites d'observation de la terre est actuellement en orbite (voir parmi les plus récents du programme Copernicus[5]). La figure 10.1 présente les plus couramment utilisés dans le domaine agricole, en fonction de leur résolution spatiale et temporelle.

On distingue classiquement les capteurs à haute résolution spatiale (pixel ≤ 30 m, cases vertes), des capteurs à moyenne résolution (pixel ≥ 250 m) ou à faible résolution spatiale (pixel > 1 km, en rose).

Des archives déjà relativement longues sont disponibles à haute résolution spatiale avec les capteurs Landsat depuis 1972[6] et Spot depuis 1987. À plus faible résolution, les archives sont disponibles avec Modis depuis 2000, Spot-VGT-ProbaV de 1998 à 2018 et ERS+Ascat de 1992 à 2018. Ces séries temporelles permettent d'évaluer les impacts des changements globaux (modifications de surface et effet des variations du climat) sur certaines variables d'intérêt telles que l'indice de végétation par exemple aux échelles régionale et globale (Justice *et al.*, 1998 ; Pena-Arancibia *et al.*, 2016).

Quelle variable à quelle longueur d'onde ?

Les capteurs illustrés dans la figure 10.1 relèvent des mesures dans des bandes spectrales variées. Différentes informations sont collectées sur les caractéristiques des surfaces du sol (tableau 10.1).

5. https ://spaceflightnow.com/soyuz/vs07/images/airbus_infographic.jpg [consulté le 31/01/2020).
6. www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat.

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 150 06/05/2020 12:46

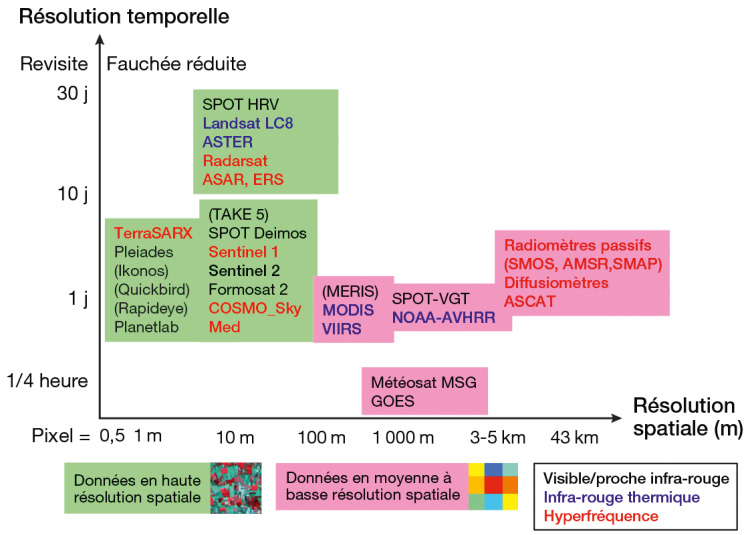

Figure 10.1. Classement des capteurs satellitaires les plus fréquemment utilisés dans le domaine agricole en fonction de leurs résolutions spatiale (taille du pixel en abscisse) et temporelle (temps de revisite en ordonnée).

Les capteurs ayant des bandes spectrales dans l'infrarouge thermique sont en bleu et dans les hyperfréquences en rouge. Les capteurs en noir couvrent le domaine optique jusqu'au moyen infrarouge pour certains (IR – infrarouge). Les capteurs notés entre parenthèses ont terminé leurs missions, mais leurs historiques d'images sont encore exploitables.

Dans le domaine des longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge, le capteur mesure l'énergie solaire réfléchie par la surface terrestre dans la direction du capteur. 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 est le plus souvent utilisé pour cartographier les cultures et suivre leurs stades phénologiques par l'estimation des variables biophysiques telles que l'indice foliaire (LAI) et la fraction de végétation (fCover). À présent, les méthodes proposées sont relativement robustes et opérationnelles à différentes résolutions spatiales. Ce domaine spectral permet également de bien distinguer les surfaces enneigées, de délimiter les lacs et les grandes retenues d'eau.

Le domaine spectral de l'infrarouge thermique permet d'accéder à la température de surface, qui est indirectement liée au statut hydrique des surfaces. Différentes approches de modélisation sont basées sur l'utilisation de ces données thermiques combinées à des données optiques pour estimer l'évapotranspiration des surfaces.

Le domaine des micro-ondes passives et actives permet d'accéder à la température de brillance et au coefficient de rétrodiffusion, variables sensibles aux propriétés diélectriques des surfaces. Ces propriétés sont principalement gouvernées par le contenu en eau de la végétation ou des premiers centimètres du sol et par ses propriétés structurales (rugosité du sol, densité et géométrie du couvert végétal). Des cartes d'humidité de la couche superficielle du sol, les cinq premiers centimètres environ, sont disponibles sur tout le globe tous les trois jours depuis 2010. Elles sont dérivées des données Smos (pixel de 43 km) ou issues de Smap (résolution

de 40 km à 9 km depuis 2015). L'interprétation du signal est rarement directe et passe par divers traitements. Par ailleurs, la résolution spatiale reste encore très large. Des algorithmes de désagrégation ont été développés en s'appuyant sur l'utilisation combinée de données optiques acquises à plus fine résolution pour obtenir des informations à plus fine échelle spatiale (Merlin *et al.*, 2013). Un des principaux avantages du domaine des micro-ondes est qu'il permet d'obtenir des images, même lorsque le temps est couvert. Jusqu'en 2017, une difficulté était la faible résolution spatiale de la plupart des produits d'humidité de surface. Elle est en passe d'être comblée avec l'arrivée de Sentinel 1 depuis 2015. De plus l'exploitation du contraste de rugosité entre les surfaces naturelles et les surfaces en eau permet d'estimer les surfaces d'eau libre, notamment les surfaces inondées pendant une crue.

Enfin, certains radars à visée verticale tels que les altimètres permettent de mesurer le niveau d'eau des rivières et des lacs.

Tableau 10.1. Synthèse des principales variables dérivées des données de télédétection et des produits opérationnels les plus couramment utilisés.

Domaine spectral (intervalle spectral) / Variable estimée	Visible-proche infrarouge (0,4-1,5 μm) Référence	Infrarouge thermique (3-15 μm) Référence	Micro-ondes passives (1 mm-1 m) Référence	Micro-ondes actives (1 mm-1 m) Référence	Produits opérationnels (résolution spatiale et temporelle)
Occupation de surface	++++ (Inglada *et al.*, 2015)		++	+	France : 17 classes 1 carte/an sous Theia à 20 m) Global : Modis MCD12Q1 (17 classes, à 500 m, 1 carte/an)
Structure végétation (LAI, fCover, FAPAR)	++++ (Baret *et al.*, 2007)	+	+	+	Global : MOD15A-Myda Global : MCDA (500 m/8 j)
Albédo	+++ (Schaaf *et al.*, 2002)				Global : MDC43A (500 m/j)
Contenu en eau de la végétation	++ (Zhang *et al.*, 2018)	++	++	++	
Température de surface Emissivité		++++ (Mira *et al.*, 2014)	+	+	Landsat products : LST-LC8 (60 m/16 j minimum) LC8-LST Aster (90 m) Global : MOD11 (1 km/j)
Humidité du sol	++ (Zhang et Zhou, 2016)	+++ (Mohanty *et al.*, 2017; Zhang et Zhou, 2016)	++++ (Brocca *et al.*, 2017; Wigneron *et al.*, 1998; McCabe *et al.*, 2017; Srivastava, 2017)	+++ (El Hajj *et al.*, 2014, 2017; Baghdadi et Zribi, 2017)	Global : Smap (40 km/3j) Global : Catds-Smos (43 km/3j) Sentinel 1 Occitanie Theia (10 m/6j)

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 152 06/05/2020 12:46

Domaine spectral (intervalle spectral) / Variable estimée	Visible-proche infrarouge (0,4-1,5 µm) Référence	Infrarouge thermique (3-15 µm) Référence	Micro-ondes passives (1 mm-1 m) Référence	Micro-ondes actives (1 mm-1 m) Référence	Produits opérationnels (résolution spatiale et temporelle)
Rugosité du sol	++ (Begue *et al.*, 2018)	+	+++	++	Global : Smos products (25 km, 1 carte/an)
Texture sol	++				Global soil mapping
Réserve utile en eau du sol	++ (Sreelash *et al.*, 2017)		++		
Surfaces irriguées	++ (Ozdogan *et al.*, 2010)	++	++ (Ferrant *et al.*, 2017)	++	Global : produit Giam (10 km)
Précipitation	+	++	+++	+++	TRMM, GPM products toutes les 3 h
Évapotranspiration	++ (Glenn *et al.*, 2010)	+++ (Courault *et al.*, 2005, Kalma *et al.*, 2008			MOD16 (1 km/16 jours) Wapor (Afrique) EEFlux (États-Unis)
Indices de stress hydrique	++ (Baret et Guerif, 2006 ; Svoboda et Fuchs, 2016)	+++ (Khanal *et al.*, 2017 ; Maes et Steppe, 2012)	++	++	L4SDI Smos Drought index (km) http ://osr-cesbio.ups-tlse.fr/medi/
Inondations, crues	+++ http ://sertit.u-strasbg.fr/RMS/		+++ (Wang et Xie, 2018)	+++	Global : Smos_Grace products
Couverture neigeuse	+++ (Masson *et al.*, 2018 ; Gascoin *et al.*, 2018)	+++	+	+	Global : Modis Moda (250 m) France : Sentinel 2, 20 m/5j
Retenues, lacs	++	+	+++	++	Global : ERS/Topex Envisat/1-30 j

Le nombre de plus (+) correspond au degré d'opérationnalité et de précision des algorithmes permettant d'estimer la variable, j correspond à jour et h à heure. De nombreux produits sont accessibles gratuitement *via* différents portails dont Theia, ou pour des produits à l'échelle globale *via* https ://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table.
FAPAR : fraction de rayonnement absorbé par la plante photosynthétiquement active
Emissivité : capacité d'une surface à absorber et à émettre l'énergie rayonnée.

À noter que dans le tableau 10.1, certaines variables n'ont pas encore de production opérationnelle en accès libre, la réserve utile des sols par exemple. Toutefois, des méthodes sont proposées dans la littérature pour l'estimer de façon indirecte en combinant les données optiques et les données micro-ondes (Sreelash *et al.*, 2017)[7].

7. Voir aussi les résultats du projet ANR RUEdesSOLS à www.researchgate.net/project/RUEdesSOLS-Available-Water-Capacity-of-Soils.

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 153 06/05/2020 12:46

Méthodes et outils pour la gestion de l'eau

Pour que les données de télédétection contribuent de manière opérationnelle à la gestion de l'eau, plusieurs méthodes et outils ont été développés. Les méthodes dites « d'assimilation de données de télédétection » tiennent une place particulière. En effet, elles permettent de réduire, au moyen d'ajustement de variables ou de paramètres, la distance entre la valeur simulée par un modèle de fonctionnement et la valeur mesurée *in situ* ou par satellite.

Parmi ces méthodes, on peut définir :
– le forçage. Cette méthode consiste à alimenter en entrée le modèle avec des données de télédétection ;
– la calibration. Il s'agit dans ce cas d'ajuster, sur une période donnée, certains paramètres constants du modèle de fonctionnement qui sont généralement difficiles à mesurer ;
– le contrôle ou l'estimation optimale. Cette méthode consiste à ajuster conjointement à un instant donné ou pour une période donnée les variables d'état et les paramètres du modèle de fonctionnement de ces variables. Cette approche regroupe différentes techniques qui requièrent des temps de calcul pouvant être importants, parmi lesquelles les méthodes d'assimilation variationnelles (3D-4DVar), les filtres particulaires ou de Kalman ou ensemblistes (Scholze *et al.*, 2017).

Le forçage et la calibration sont utilisés de manière opérationnelle ou quasi opérationnelle, comme l'illustrent les exemples présentés ci-après : forçage pour l'estimation de l'évapotranspiration et calibration pour l'estimation du coefficient cultural. Les approches de contrôle optimal restent encore du domaine de la recherche pour un suivi opérationnel à l'échelle de la parcelle agricole.

Estimation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration réelle (ETR) qui représente la consommation en eau réelle des plantes est l'une des variables clé pour le suivi du bilan hydrique des surfaces. L'ETR n'est pas directement observable par télédétection. Néanmoins, plusieurs variables régissant sa dynamique peuvent être déduites des signatures radiométriques des couverts. Le forçage et la calibration sont utilisés pour cartographier l'évapotranspiration à partir de données de télédétection, comme l'illustrent les deux approches suivantes qui se distinguent par le type de données requises (Chirouze *et al.*, 2014 ; Courault *et al.*, 2005 ; Kalma *et al.*, 2008).

Dans une première approche, des données thermiques et optiques sont utilisées en entrées de modèles pour simuler le bilan d'énergie de surface, dont l'ETR est une des sorties. Divers modèles permettent de reproduire les échanges entre le sol, la plante et l'atmosphère (Lagouarde *et al.*, 2017). Une chaîne de traitement Evaspa a été développée pour fournir des cartographies journalières d'ETR de résolution kilométrique à partir de données modis (Gallego-Elvira *et al.*, 2013). Cette chaîne regroupe différents modèles qui permettent d'associer une estimation d'erreur à chaque pixel. La chaîne fonctionne aussi avec des données à plus haute résolution (90 m) telles que Landsat (figure 10.2), mais dans ce cas elle ne délivre des images que tous les 16 jours au mieux lorsqu'il n'y a pas de nuages. Un projet franco-indien est à l'étude pour évaluer le lancement d'une nouvelle mission satellitaire à haute

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 154 06/05/2020 12:46

résolution spatio-temporelle pour le suivi de l'environnement, Trishna, opérant notamment dans le domaine thermique en proposant un temps de revisite de trois jours à une résolution proche de 50 m (Lagouarde *et al.*, 2017).

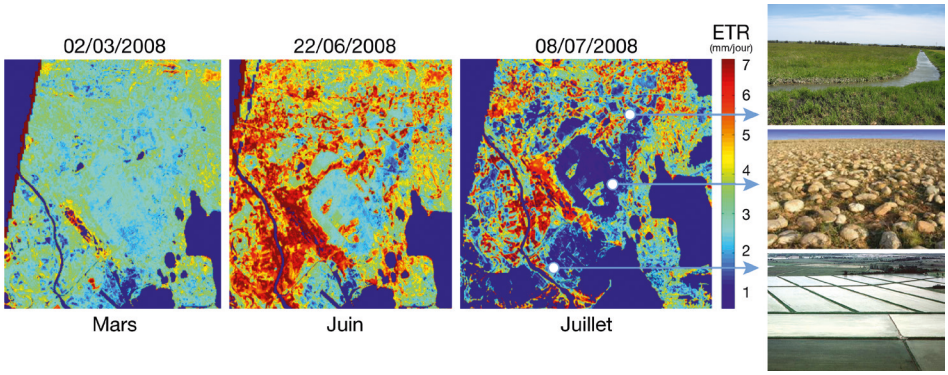

Figure 10.2. Cartographies d'évapotranspiration (exprimée en mm/jour) obtenues à partir de la chaîne de traitement Evaspa appliquée à des images Landsat-7 acquises sur la région Crau-Camargue en 2008 (Courault *et al.*, 2017).

Les fortes valeurs d'évapotranspiration correspondent aux prairies irriguées en gravitaire et aux rizières de Camargue, bien développées en juin-juillet. La zone centrale de l'image, correspondant à une steppe sèche montre des valeurs faibles d'évapotranspiration toute l'année.

Dans la seconde approche, l'estimation de l'évapotranspiration réelle est basée sur la résolution du bilan hydrique des couverts, dont les évolutions de certaines caractéristiques sont estimées par télédétection. Par exemple, l'ETR calculée suivant la méthode FAO-56 nécessite l'estimation d'un coefficient cultural. Ce coefficient peut être dérivé d'indices de végétation obtenus à partir de données optiques (Allen, 2000). Cette méthode a été appliquée avec succès dans de nombreux contextes grâce à sa simplicité de mise en œuvre (Er-Raki *et al.*, 2007 ; Ghaleb *et al.*, 2015 ; Saadi *et al.*, 2015).

Estimation du stress hydrique et des surfaces irriguées

La détection des stress hydriques est cruciale pour les gestionnaires des ressources en eau. Plusieurs auteurs ont réalisé une revue des différents indices de sécheresse calculés à partir de données de télédétection (Hazaymeh et Hassan, 2016 ; Maes et Steppe, 2012). Beaucoup d'indices sont basés sur des écarts de température entre la surface et l'air, ou entre les zones sèches et humides. Certains s'appuient sur des produits opérationnels tels que la température de surface délivrée à partir de Landsat (LST-LC8 température de surface à 60 m de résolution) et Modis (produit MOD11 à 1 km). D'autres indices se basent sur les produits dérivés de Smos (Catds L4) cités dans le tableau 10.1. La principale limite reste toujours la résolution spatiale et temporelle des données thermiques qui n'est pas suffisamment fine pour la gestion de parcelles agricoles.

Pour les gestionnaires de l'eau en charge de la distribution de cette ressource sur de grands territoires, il est également important de connaître les surfaces irriguées. Actuellement, il n'existe pas de méthode opérationnelle qui délivre cette information à fine résolution chaque année. Le centre d'Expertise scientifique (CES) « surfaces

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 155 06/05/2020 12:46

irriguées » proposé dans le pôle Theia regroupe diverses équipes de recherche. Le rôle de ces équipes est de développer des méthodes opérationnelles permettant de détecter les zones irriguées et d'évaluer leurs performances sur des régions et des pratiques d'irrigation différentes. Ainsi, les récents travaux de Ferrant *et al.* (2017) ont montré que pour cartographier les cultures irriguées en Inde, les performances étaient significativement améliorées lorsque l'on combinait les images radar et optiques de Sentinel 1 et de Sentinel 2, plutôt que de les considérer séparément dans un algorithme de classification de type Random forest, basé sur des techniques d'apprentissage.

Élaboration d'un outil d'aide à la décision pour la gestion de l'eau

Piloter l'irrigation d'une parcelle de blé en temps réel, en tenant compte du besoin réel de la plante estimé à partir de la télédétection, a été expérimenté par Le Page *et al.* (2014). Pour un pilotage à l'échelle d'un périmètre irrigué, les contraintes du réseau d'irrigation sont également prises en compte : structure, débit des canaux, personnel disponible et distances géographiques. Belaqziz *et al.* (2014) ont proposé une méthode de pilotage tenant compte de ces contraintes et visant à optimiser le tour d'eau, grâce à un indice de priorisation de l'irrigation (IPI). Cet indice évalue, pour chaque parcelle, si le moment auquel la parcelle est irriguée (au sein du tour d'eau) est adapté à son état de stress hydrique (Belaqziz *et al.*, 2013).

Le coefficient de stress hydrique de chaque parcelle est obtenu en utilisant le modèle de bilan hydrique Samir (Simonneaux *et al.*, 2009) calibré à partir de séries temporelles d'indices de végétation. Dans l'étude d'un périmètre irrigué au Maroc, cette méthode a permis de mieux cibler le moment opportun pour les parcelles (figure 10.3). Dans ce cas, l'utilisation des données de télédétection dans la prise de décision a conduit à une économie d'eau d'environ 25 %.

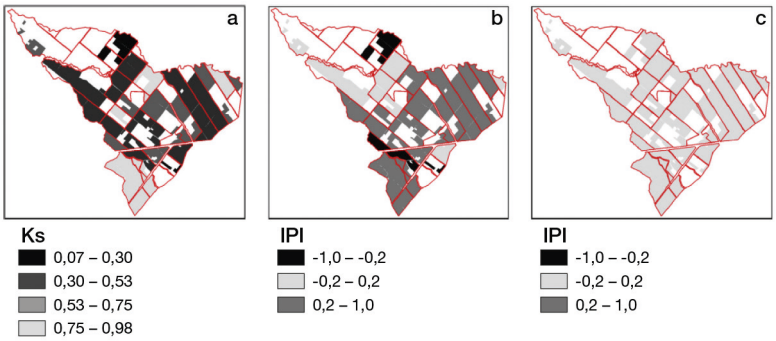

Figure 10.3. Cartographie du stress hydrique par télédétection et adaptation de l'irrigation.

Cette figure montre que la télédétection permet de (a) cartographier le stress hydrique des parcelles ; (b) d'optimiser la configuration du tour d'eau pour passer d'une situation dans laquelle l'indice de priorisation de l'irrigation (IPI) met en évidence que de nombreuses parcelles ne sont pas irriguées au bon moment (valeurs d'IPI éloignées de zéro) à une situation (c) où toutes les parcelles sont irriguées à un moment adéquat (d'après Belaqziz *et al.*, 2014).

Ces travaux ont conduit au développement de l'application en ligne Sat-irr[8] (*Satellitte for irrigation scheduling)* destinée à l'exploitant agricole. Cette application a pour

8. http ://osr-cesbio.ups-tlse.fr/Satirr

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 156 06/05/2020 12:46

but d'estimer le bilan hydrique de parcelles irriguées quasiment en temps-réel à partir des images Sentinel 2. L'objectif est de fournir quotidiennement un certain nombre d'informations essentielles des parcelles à chaque client :
– l'état de développement de la parcelle, notamment l'indice NDVI synthétisé à la parcelle, calculé à partir d'images satellitaires (Gao *et al.*, 2017) ;
– les mesures météorologiques de la station la plus proche ;
– le cumul de degrés-jour depuis le démarrage de la saison agricole ou la date de semis pour les cultures annuelles ;
– la prévision météorologique à huit jours ;
– le bilan hydrique antérieur et futur de la parcelle en tenant compte des prévisions climatiques et la détection de stress conduisant à des alertes pour l'irrigation.

Pour les gestionnaires de l'eau, il est en outre essentiel de prévoir les apports d'eau aux parcelles. Cependant, cette information reste encore difficile à estimer précisément sur de grandes étendues. Les travaux de recherche actuels portent sur l'amélioration de l'estimation des apports en eau en utilisant, par exemple, la combinaison de données satellitaires acquises dans des domaines spectraux complémentaires, radar et optiques (Gao *et al.*, 2017), ou visible et moyen infrarouge (voir les projets de recherche cités sur le site Theia). Le domaine de l'optique permet de suivre l'évolution de la végétation. Le domaine du radar permet d'accéder à des informations sur l'humidité de surface et présente aussi l'intérêt d'obtenir des suivis de la surface, même lorsque la couverture nuageuse est importante (Fieuzal *et al.*, 2011 ; Gao *et al.*, 2017).

Conclusion

Ce qu'il faut retenir :
– une large panoplie de capteurs satellitaires est actuellement disponible. Les résolutions spatiales et temporelles de ces capteurs sont de plus en plus fines (Sentinel 1 et Sentinel 2) et compatibles pour un suivi des ressources aux résolutions de la parcelle et de l'exploitation agricole, ainsi que sur des étendues compatibles avec des approches ou problématiques régionales ;
– la combinaison d'informations spectrales issues de différents domaines (optique, radar et thermique) semble prometteuse. À l'avenir, elle pourra apporter plus d'informations spatialisées aux gestionnaires de l'eau ;
– des produits dérivés de ces images, tels que l'occupation du sol et des indices de végétation, sont fournis gratuitement de façon opérationnelle *via* différents portails web, dont le pôle Theia pour la France ;
– des archives relativement longues permettent de calculer des anomalies et d'évaluer des tendances ;
– l'utilisation de différents modèles d'estimation de l'évapotranspiration (par exemple, Evaspa) permet de cartographier les besoins en eau des cultures en y joignant une estimation de l'erreur associée ;
– de nombreuses applications combinant images et modèles de fonctionnement ont été proposées dans la littérature pour aider au pilotage de l'irrigation. Parmi elles, l'outil Sat-irr peut aider à économiser des quantités d'eau significatives ;
– les premières cartographies de l'humidité de surface obtenues à partir d'images radar Sentinel 1 sont disponibles sur quelques régions. La méthode reste à étendre et à évaluer sur l'ensemble de la France ;

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 157 06/05/2020 12:46

Á présent, on arrive à bien suivre le développement des couverts à une résolution parcellaire, en particulier dans le domaine spectral de l'optique. Cependant, la cartographie des zones irriguées et l'estimation des volumes apportés par l'irrigation restent encore des sujets de recherche pour de nombreuses équipes.

Références bibliographiques

Allen R.G., 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of hydrology*, 229(1-2): 27-41.

Baghdadi N., Zribi M., 2017. Characterization of soil surface properties using radar remote sensing. *In:* Baghdadi N., Zribi M., (eds). *Land surface remote sensing in continental hydrology*. Amsterdam: Elsevier, 1-39.

Baret F., Guerif M., 2006. Remote detection and quantification of plant stress: opportunities remote sensing observations. *Comparative biochemistry and physiology a-molecular and integrative physiology*, 143(4): S148-S148.

Baret F., Hagolle O., Geiger B., Bicheron P., Miras B., Huc M., Berthelot B., Nino F., Weiss M., Samain O., Roujean J.L., Leroy M., 2007. LAI, FAPAR and fCover cyclopes global products derived from vegetation. Part I. Principles of the algorithm. *Remote sensing of environment*, 110(3): 275-286.

Begue A., Arvor D., Bellon B., Betbeder J., De Abelleyra D., Ferraz R.P.D., Lebourgeois V., Lelong C., Simoes M., Veron S.R., 2018. Remote sensing and cropping practices: a review. *Remote sensing*, 10(1).

Belaqziz S., Khabba S., Er-Raki S., Jarlan L., Le Page M., Kharrou M.H., El Adnani M., Chehbouni A., 2013. A new irrigation priority index based on remote sensing data for assessing the networks irrigation scheduling. *Agricultural water management*, 119: 1-9.

Belaqziz S., Mangiarotti S., Le Page M., Khabba S., Er-Raki S., Agouti T., Drapeau L., Kharrou M.H., El Adnani M., Jarlan L., 2014. Irrigation scheduling of a classical gravity network based on the covariance matrix adaptation: evolutionary strategy algorithm. *Computers and electronics in agriculture*, 102: 64-72.

Brocca L., Crow W.T., Ciabatta L., Massari C., De Rosnay P., Enenkel M., Hahn S., Amarnath G., Camici S., Tarpanelli A., Wagner W., 2017. A Review of the applications of Ascat soil moisture products. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 10(5): 2285-2306.

Chirouze J., Boulet G., Jarlan L., Fieuzal R., Rodriguez J.C., Ezzahar J., Er-Raki S., Bigeard G., Merlin O., Garatuza-Payan J., Watts C., Chehbouni G., 2014. Intercomparison of four remote-sensing-based energy balance methods to retrieve surface evapotranspiration and water stress of irrigated fields in semi-arid climate. *Hydrology and earth system sciences*, 18(3): 1165-1188.

Courault D., Seguin B., Olioso A., 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and drainage systems*, 19(3/4): 223-249.

Courault D., Demarez V., Guérif M., Le Page M., Simonneaux V., Ferrant S., Veloso A., 2017. Fonctionnement des surfaces agricoles : apports de la télédétection. *In :* Baghdadi N., Zribi M. (eds). *Observation des surfaces continentales par télédétection. 1. Agriculture et forêt*. Londres : ISTE, (Système Terre-Environnement : Série Télédétection pour l'observation des surfaces continentales) 3 : 123-183.

El Hajj M., Baghdadi N., Belaud G., Zribi M., Cheviron B., Courault D., Charron F., Ieee, 2014. Soil moisture retrieval over grassland using x-band sar data. *In: 2014 IEEE International geoscience and remote sensing symposium*, 3638-3641.

Er-Raki S., Chehbouni A., Guemouria N., Duchemin B., Ezzahar J., Hadria R., 2007. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural water management*, 87(1): 41-54.

Ferrant S., Selles A., Le Page M., Herrault P.A., Pelletier C., Al-Bitar A., Mermoz S., Gascoin S., Bouvet A., Saqalli M., Dewandel B., Caballero Y., Ahmed S., Marechal J.C., Kerr Y., 2017.

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 158 06/05/2020 12:46

Detection of irrigated crops from sentinel-1 and sentinel-2 data to estimate seasonal groundwater use in South India. *Remote sensing*, 9(11).

Fieuzal R., Duchemin B., Jarlan L., Zribi M., Baup F., Merlin O., Hagolle O., Garatuza-Payan J., 2011. Combined use of optical and radar satellite data for the monitoring of irrigation and soil moisture of wheat crops. *Hydrology and earth system sciences*, 15(4): 1 117-1 129.

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.

Gao Q., Zribi M., Escorihuela M.J., Baghdadi N., 2017. Synergetic use of sentinel-1 and sentinel-2 data for soil moisture mapping at 100 m resolution. *Sensors*, 17(9).

Gascoin, S., Deschamps-Berger, C., Berthier, E., Dumont, M., Gutmann, E., & Deems, J. 2018. Evaluation of Pleaides-derived snow height map using Airborne Snow Observatory data. In, *AGU Fall Meeting Abstracts.*

Ghaleb F., Mario M., Sandra A.N., 2015. Regional landsat-based drought monitoring from 1982 to 2014. *Climate*, 3(3): 563-577.

Glenn E.P., Nagler P.L., Huete A.R., 2010. Vegetation index methods for estimating evapotranspiration by remote sensing. *Surveys in geophysics*, 31(6): 531-555.

Hazaymeh K., Hassan Q.K., 2016. Remote sensing of agricultural drought monitoring: A state of art review. *Aims environmental science*, 3(4): 604-630.

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(9): 12 356-12 379.

Justice C.O., Vermote E., Townshend J.R.G., Defries R., Roy D.P., Hall D.K., Salomonson V.V., Privette J.L., Riggs G., Strahler A., Lucht W., Myneni R.B., Knyazikhin Y., Running S.W., Nemani R.R., Wan Z.M., Huete A.R., Van Leeuwen W., Wolfe R.E., Giglio L., Muller J.P., Lewis P., Barnsley M.J., 1998. The Moderate resolution imaging spectroradiometer (Modis): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 36(4): 1 228-1 249.

Kalma J.D., Mcvicar T.R., Mccabe M.F., 2008. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in geophysics*, 29(4-5): 421-469.

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.

Lacaze R., Smets B., Baret F., Weiss M., Ramon D., Montersleet B., Wandrebeck L., Calvet J.C., Roujean J.L., Camacho F., 2015. Operational biophysical products of the copernicus global land service for agriculture monitoring. *In:* Schreier G., Skrovseth P.E., Staudenrausch H., (eds). *36th International symposium on remote sensing of environment*. Göttingen: Copernicus Gesellschaft, 53-56.

Lagouarde J.P., Boulet G., Olioso A., Merlin O., Simonneaux V., Rivalland V., Roujean J.L., Hagolle O., Demarty J., Kerr Y., Bégué A., 2017. *L'apport des données spatiales pour la gestion de l'eau en agriculture : vers une mission IRT nouvelle*. Présentation orale, 2e colloque Tosca, Paris, 21-22 mars 2017. www.tosca2017.fr/programme/index.html.

Le Page M., Berjamy B., Fakir Y., Bourgin F., Jarlan L., Abourida A., Benrhanem M., Jacob G., Huber M., Sghrer F., Simonneaux V., Chehbouni G., 2012. An Integrated DSS for groundwater management based on remote sensing. The Case of a semi-arid aquifer in Morocco. *Water resources management*, 26(11): 3 209-3 230.

Le Page M., Toumi J., Khabba S., Hagolle O., Tavernier A., Kharrou M.H., Er-Raki S., Huc M., Kasbani M., El Moutamanni A., Yousfi M., Jarlan L., 2014. A life-size and near real-time test of irrigation scheduling with a sentinel-2 like time series (Spot4-Take5) in Morocco. *Remote sensing*, 6(11): 11 182-11 203.

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 159 06/05/2020 12:46

Maes W.H., Steppe K., 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of experimental botany*, 63(13): 4671-4712.

Masson T., Dumont M., Dalla Mura M., Sirguey P., Gascoin S., Dedieu J.P., Chanussot J., 2018. An assessment of existing methodologies to retrieve snow cover fraction from Modis data. *Remote sensing*, 10(4).

McCabe M.F., Rodell M., Alsdorf D.E., Gonzalez Miralles D., Uijlenhoet R., Wagner W., Lucieer A., Houborg R., Verhoest N., Franz T.E., 2017. The future of earth observation in hydrology. *Hydrology and earth system sciences*, 21 (7), 3879-3914.

Merlin O., Escorihuela M.J., Mayoral M.A., Hagolle O., Al Bitar A., Kerr Y., 2013. Self-calibrated evaporation-based disaggregation of SMOS soil moisture: An evaluation study at 3 km and 100 m resolution in Catalunya, Spain. *Remote sensing of environment*, 130: 25-38.

Mira M., Olioso A., Rivalland V., Courault D., Marloie O., Guillevic P., IEEE, 2014. Quantifying uncertainties in land surface temperature due to atmospheric correction: application to landsat-7 data over a mediterranean agricultural region. *In: 2014 IEEE International geoscience and remote sensing symposium*, 2375-2378.

Mohanty B.P., Cosh M.H., Lakshmi V., Montzka C., 2017. Soil moisture remote sensing: state-of-the-science. *Vadose zone journal*, 16(1).

Ozdogan M., Yang Y., Allez G., Cervantes C., 2010. Remote sensing of irrigated agriculture: opportunities and challenges. *Remote sensing*, 2(9): 2274-2304.

Pena-Arancibia J.L., Mainuddin M., Kirby J.M., Chiew F.H.S., McVicar T.R., Vaze J., 2016. Assessing irrigated agriculture's surface water and groundwater consumption by combining satellite remote sensing and hydrologic modelling. *Science of the total environment*, 542: 372-382.

Saadi S., Simonneaux V., Boulet G., Raimbault B., Mougenot B., Fanise P., Ayari H., Lili-Chabaane Z., 2015. Monitoring irrigation consumption using high resolution NDVI image time series: calibration and validation in the Kairouan plain (Tunisia). *Remote sensing*, 7(10): 13005-13028.

Schaaf C.B., Gao F., Strahler A.H., Lucht W., Li X., Tsang T., Strugnell N.C., Zhang X., Jin Y., Muller J.P., Lewis P., Barnsley M., Hobson P., Disney M., Roberts G., Dunderdale M., Doll C., D'Entremont R.P., Hu B., Liang S., Privette J.L., Roy D., 2002. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from Modis. *Remote sensing of environment*, 83(1-2): 135-148.

Scholze M., Buchwitz M., Dorigo W., Guanter L., Shaun Q.G., 2017. Reviews and syntheses: systematic earth observations for use in terrestrial carbon cycle data assimilation systems. *Biogeosciences*, 14(14) : 3401-3429.

Simonneaux V., Lepage M., Helson D., Metral J., Thomas S., Duchemin B., Cherkaoui M., Kharrou H., Berjami B., Chehbouni A., 2009. Spatialized estimates of evapotranspiration of irrigated crops using remote sensing: application to irrigation management in the Haouz plain (Marrakech, Morocco). *Sécheresse*, 20 (1): 123-130.

Sreelash K., Buis S., Sekhar M., Ruiz L., Tomer S.K., Guerif M., 2017. Estimation of available water capacity components of two-layered soils using crop model inversion: effect of crop type and water regime. *Journal of hydrology*, 546: 166-178.

Srivastava P.K., 2017. Satellite Soil Moisture: Review of Theory and Applications in Water Resources. *Water Resources Management*, 31 10 : 3161-3176.

Svoboda M., Fuchs B., 2016. *Handbook of drought indicators and indices*. Geneva: World meteorological organization, Global water partnership, (coll. Integrated drought management tools and guidelines series 2), 45 p.

Wang X.W., Xie H.J., 2018. A Review on applications of remote sensing and geographic information systems (GIS) in water resources and flood risk management. *Water*, 10(5).

Zhang C., Liu J.G., Shang J.L., Cai H.J., 2018. Capability of crop water content for revealing variability of winter wheat grain yield and soil moisture under limited irrigation. *Science of the total environment*, 631-632: 677-687.

Zhang D.J., Zhou G.Q., 2016. Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: a review. *Sensors*, 16(8).

2018-16-Synthèses-L'eau en milieu agricole_160x240.indd 160 06/05/2020 12:46