

Mieux connaître pour mieux gérer

COMPLÉMENTARITÉ ENTRE DONNÉES DE TERRAIN
ET DONNÉES SATELLITAIRES

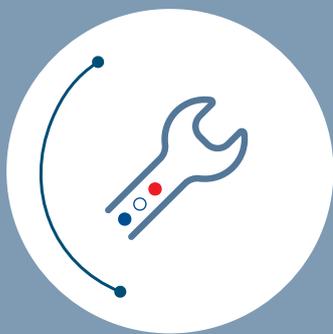
Vers une meilleure connaissance
de l'hydrologie de terrain

Sommaire

Lédito	p.3
Avant-Propos	p.4
PARTIE 1 - Le suivi quantitatif des ressources en eau	p.6
ENJEUX	p.7
SAVOIR-FAIRE	p.8
PARTIE 2 - La qualité des eaux, suivi écologique et biodiversité	p.12
ENJEUX	p.12
SAVOIR-FAIRE	p.13
PARTIE 3 - Les usages agricoles de l'eau	p.19
ENJEUX	p.19
SAVOIR-FAIRE	p.21
Glossaire	p.27

PICTOGRAMMES DE LA COLLECTION EXPERTISE





LES SAVOIR-FAIRE

1 p.8

Suivre les sécheresses par assimilation de données issues d'observations satellitaires

2 p.9

Allier données spatiales et modélisation pour compléter l'information hydrométéorologique *in situ* lorsqu'elle est difficile à acquérir (Amazone et Ouganda)

3 p.9

Renforcer le suivi des ressources en eau avec le programme spatial SWOT

4 p.10

Compléter l'information hydrologique *in situ* grâce à l'hydrologie spatiale : EXEMPLE DU BASSIN DU CONGO

5 p.11

Applications pour l'hydroélectricité et la navigation sur le bassin du Congo

6 p.11

Une nouvelle méthode de mesure par satellite de la hauteur de neige en montagne

7 p.13

Suivre la qualité des eaux fluviales et des plans d'eaux : EXEMPLE DE LA CATASTROPHE MINIÈRE AU BRÉSIL

8 p.14

Accéder à la variabilité spatio-temporelle des flux hydro-sédimentaires pour mieux comprendre le cycle saisonnier des crues : EXEMPLE DU LAC DE TONLÉ SAP

9 p.15

Caractériser la turbidité naturelle des eaux côtières par satellite : EXEMPLE PRÈS DE LA ROCHELLE

10 p.16

Suivre les écosystèmes lacustres & changements climatiques : EXEMPLE DES LACS FRANÇAIS

11 p.17

Suivre les zones humides méditerranéennes : EXEMPLE DE LA RÉGION MÉDITERRANÉENNE

12 p.18

Détecter et prévoir la dérive des blooms de cyanobactéries : EXEMPLE D'UNE APPLICATION OPÉRATIONNELLE EN MER BALTIQUE

13 p.21

Localiser et quantifier des surfaces rizicoles mises en eau : EXEMPLE DE LA VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL

14 p.22

Cartographier les cultures irriguées

15 p.23

Calculer un bilan hydrique à l'échelle de la parcelle agricole pour qualifier un stress hydrique et apporter un conseil d'irrigation

16 p.24

Estimer et cartographier l'humidité des sols à l'échelle sub-parcellaire

17 p.25

Identifier les paramètres biophysiques des cultures pour l'agriculture de précision

18 p.26

Un modèle de culture spatialisé

L'édito

Compte tenu des menaces qui pèsent sur les populations, les ressources en eau et les écosystèmes, il est urgent de mettre en place des mesures concrètes nécessaires pour l'atteinte collective des objectifs fixés par l'Accord de Paris sur le climat et l'Agenda 2030.

Le Partenariat Français pour l'Eau (PFE), fort de son vivier d'experts, a identifié dès 2016, la connaissance comme étant une des thématiques majeures pour la gestion de l'eau et des milieux aquatiques, l'adaptation au dérèglement climatique et la modélisation du climat. Il s'est ainsi mobilisé et a lancé sa collection thématique « expertise » en 2016 et ainsi son premier volet. Ce dernier présente notamment l'expertise des acteurs français publics et privés dans ce domaine, qu'il s'agisse de l'acquisition de données hydrologiques et météorologiques, de la mise en place de systèmes d'information sur l'eau fonctionnels ou du développement de modèles hydro-climatiques qui nous aideront à mieux faire face aux enjeux à venir. Il fait également le constat de la diminution de réseaux d'acquisition de données sur l'eau dans de nombreux pays, notamment ceux en développement.

Depuis, le rapport spécial 1,5°C du GIEC a révélé que la confiance donnée à l'information relative aux eaux douces est qualifiée de « moyenne ». Les connaissances sur ce sujet ont en effet peu progressé depuis le 5ème rapport dû à un manque de données, d'expertises régionalisées et de données de terrain. Face à ces constats, le PFE avec ses membres a proposé de poursuivre le travail sur la connaissance avec un deuxième volet. Ce dernier a pour but de donner des clés aux décideurs des pays en développement ou émergents pour renforcer la connaissance sur l'hydrologie et la qualité des milieux aquatiques par l'intermédiaire des données satellitaires, complémentaire aux données de terrain.

Vous retrouverez ainsi dans ce volet un panorama des grands enjeux liés à la connaissance ainsi que la présentation d'un grand nombre de réalisations des acteurs français autour de trois thèmes majeurs qui sont : le suivi quantitatif des ressources en eau ; la qualité des eaux, suivi écologique et biodiversité ; les usages agricoles de l'eau. Les réalisations choisies reflètent le large panel d'expertise des acteurs français et leur capacité d'innovation collective autour des grands défis de notre siècle.



Jean Launay,
Président du Partenariat Français pour l'Eau

AUTEURS

PARTIE 1

Christophe Brachet, Adjoint au Directeur Général, Office International de l'Eau, OIEau
Blaise Dhont, Chargé d'étude, Office International de l'Eau, OIEau

PARTIE 2

Alice Andral, Spécialiste en Hydrologie Spatiale – Programme SWOT-aval, Centre national d'études spatiales, CNES

PARTIE 3

Etienne Dressayre, Directeur adjoint, agriculture et irrigation, BRL Ingénierie

COORDINATION

Jennifer Fernando, Chargée de mission, Partenariat Français pour l'Eau, PFE
Jean Luc Redaud, Président du groupe de travail Eau et Climat, Partenariat Français pour l'Eau, PFE

CONCEPTION GRAPHIQUE

Anne-Charlotte de Lavergne, www.ancharlotte.fr

IMPRESSION

Reprotechnique

NOVEMBRE 2019

Avant-propos

L'eau est essentielle au développement de nos sociétés car elle est indispensable à la santé, l'agriculture, l'énergie, la biodiversité, et sa sécurité est un vecteur de paix. Cependant, les ressources en eau restent **encore mal connues, mal gérées et peu protégées** des activités humaines. Elles subissent une **pression anthropique de plus en plus importante** sous l'effet d'un grand nombre de facteurs tels que l'accroissement démographique, l'urbanisation rapide, l'industrialisation, la pollution, l'intensification de l'agriculture et l'évolution des modes de vie, qui menacent de plus en plus les ressources en eau.

La parution des trois derniers rapports spéciaux du GIEC a permis de sonner une nouvelle fois l'alerte sur les risques liés à un réchauffement global de 1,5°C et notamment sur les impacts du dérèglement climatique sur la ressource en eau, déjà fragilisée. Le réchauffement global, même de +1,5°C à la fin du siècle par rapport à la période préindustrielle, contribuera à la **modification du climat et plus particulièrement du cycle de l'eau**.

Sur le continent, **ces différentes pressions anthropiques, qui pèsent autant sur la quantité que la qualité de la ressource**, affectent les bassins versants de la source à la mer en passant par les différents milieux tels que les montagnes, les lacs et rivières, les zones humides et les eaux souterraines.

Le grand cycle de l'eau

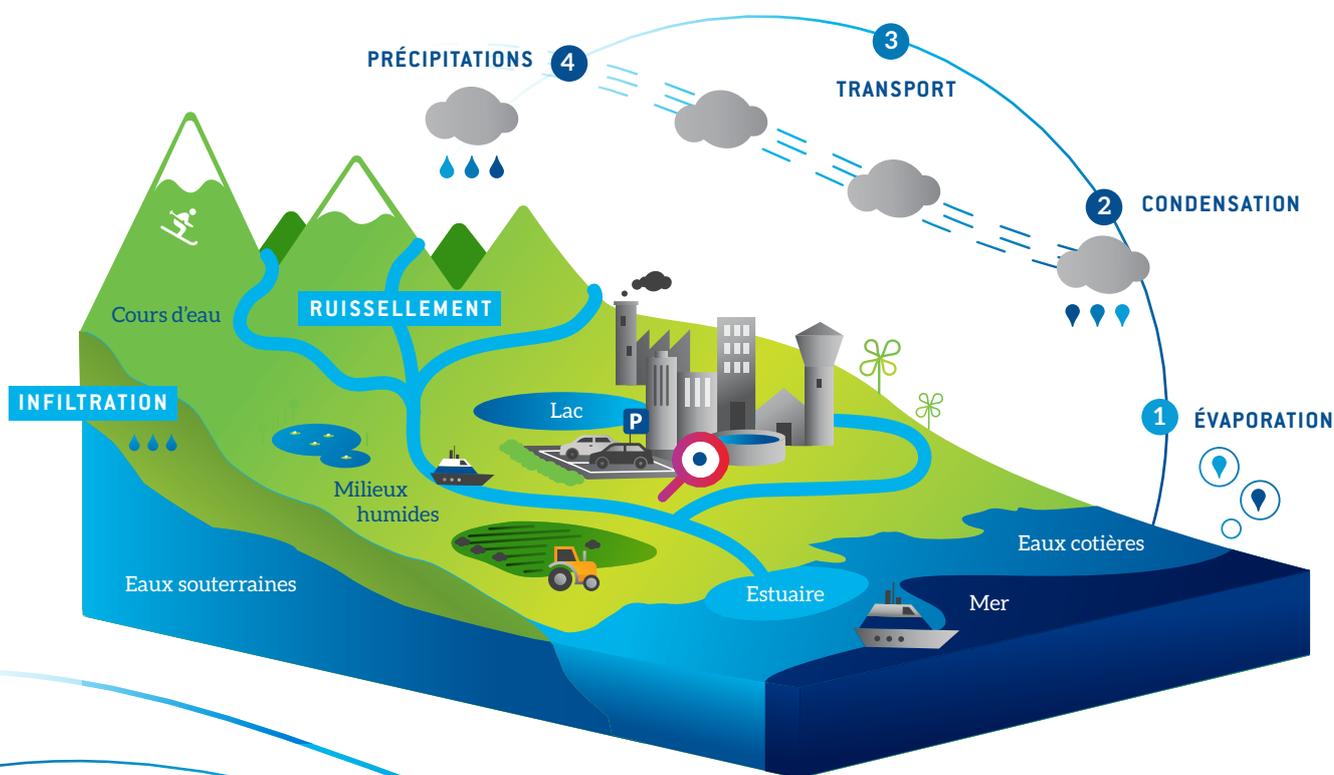


Figure 1 - Cycle de l'eau

De plus, la **biodiversité connaît aujourd'hui une crise majeure** : selon l'IPBES, près d'un million d'espèces animales et végétales sont menacées, soit une espèce sur huit pourrait disparaître dans les prochaines décennies. Les facteurs directs de changement identifiés sont, par ordre décroissant : les changements d'usage des terres et de la mer ; l'exploitation directe de certains organismes ; le changement climatique ; la pollution et les espèces exotiques envahissantes.

Dans ce contexte actuel de réchauffement climatique, de croissance démographique mondiale et d'érosion de la biodiversité, **des mesures concrètes doivent être mises en œuvre afin de tendre vers une gestion intégrée et durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques**. Ce sont également les objectifs de l'Accord de Paris sur le climat et de l'Agenda 2030 avec ses 17 Objectifs de Développement Durable, dont le sixième est consacré à l'eau propre et à l'assainissement, et dont les autres, via 12 cibles liées à l'eau, soulignent son caractère transversal.

Une bonne connaissance et compréhension des ressources en eau est cruciale pour agir efficacement. Cela nécessite ainsi de **renforcer la connaissance sur le climat et le cycle de l'eau à l'échelle régionale et locale**, notamment celle des eaux douces pour laquelle la confiance est qualifiée de « moyenne » par le GIEC en raison du manque de données, d'expertises régionalisées et de données de terrain.

L'acquisition de données sur l'hydrologie et la qualité des milieux aquatiques (rivières, lacs, zones humides, etc.) constitue donc une activité indispensable dans la prise de décision et plus particulièrement pour l'élaboration de plans d'actions, leur mise en œuvre et leur suivi. En effet, l'information hydrologique est nécessaire car elle permet une meilleure planification des ressources en eau et des investissements, une meilleure gestion sectorielle de cette dernière, un meilleur aménagement du territoire ou encore un soutien dans les opérations lors d'un événement majeur (gestion de crises en urgence).

Malgré le besoin accru de données, une expertise conduite par le PFE via son premier volet¹ fait cependant le constat de la **baisse de la densité des réseaux de mesures hydrométriques sur le terrain voire même leur manque à travers le monde et plus particulièrement dans les pays en développement**.

Grâce au développement du spatial depuis les années 60, **l'observation de la Terre depuis l'espace permet de suivre quasi en temps réel les phénomènes naturels ou anthropiques en différents lieux de la planète et à différents instants**. Elles permettent de **compléter, reconstruire et densifier les jeux de données in situ existants et d'en extraire via des modèles et des outils de traitement et d'analyse des paramètres physico-chimiques du milieu** (turbidité, hauteur d'eau, ...) pour mieux éclairer la prise de décision. De plus, par le caractère synoptique des observations spatiales (couverture spatiale, fréquence de revisite, ...), la couverture des plans d'eau a ainsi pu être améliorée. Les données satellitaires permettent ainsi d'atteindre des zones où les données terrain sont inexistantes, et à moindre coût que des instrumentations in situ. Elles sont moins précises, mais cette précision s'améliore, les rendant suffisantes dans de plus en plus d'applications.

Dans ce qui suit, des exemples concrets de l'utilisation des données satellitaires sont présentés dans l'objectif d'appuyer les décideurs autour de 3 grands enjeux majeurs de la ressource en eau et des milieux aquatiques :

- le suivi quantitatif des ressources en eau ;
- la qualité des eaux, suivi écologique et biodiversité ;
- les usages agricoles de l'eau.

¹<https://www.partenariat-francais-eau.fr/wp-content/uploads/2018/03/Mieux-conna%C3%A0tre-pour-mieux-g%C3%A9rer-EAU-CLIMAT-ET-D%C3%89VELOPPEMENT.pdf>

Le suivi quantitatif des ressources en eau

DÉFINITION

Qu'est-ce que l'altimétrie et l'hydrologie spatiale ?

L'hydrométrie s'intéresse à la mesure du débit des eaux continentales, superficielles ou souterraines. Le plus souvent, cette discipline concerne la mesure du débit des cours d'eau, c'est-à-dire de la quantité d'eau qui s'écoule à travers une section donnée d'un fleuve ou d'une rivière par unité de temps. Néanmoins, le suivi quantitatif des ressources en eau ne se limite pas à l'écoulement des eaux de surface et inclut d'autres activités comme la mesure de l'humidité du sol ou du couvert neigeux.

La mesure directe du débit étant une opération complexe, la majorité des stations hydrométriques enregistrent la hauteur d'eau qui est ensuite transformée en débit à l'aide d'une courbe de tarage (relation débit-hauteur) propre à chaque site de mesure.

La mesure des hauteurs d'eau a pendant longtemps consisté en des lectures visuelles (typiquement quotidiennes) sur des échelles graduées. Le processus s'est au fil du temps automatisé par la mise en place de capteurs permettant un suivi plus fin des variations de hauteur, adapté aux différents types de régime hydrologique des cours d'eau.

Plus récemment, avec le développement des outils spatiaux, de nouvelles techniques de mesure par satellite sont apparues : l'altimétrie spatiale.

Cette méthode repose sur les satellites équipés d'un appareil radar (altimètre) et survolant régulièrement une série de mêmes points à la surface du globe (orbite basse). Le temps écoulé entre l'émission du signal à très haute fréquence du radar et la réception de l'écho permet en effet de mesurer la distance entre le satellite et les masses d'eau (océans, lacs, grands cours d'eau), et donc l'altitude de ces dernières. L'altimétrie spatiale s'avère ainsi être une technologie extrêmement prometteuse, en complément de l'hydrométrie « classique » in situ, pour le suivi des ressources en eau.

Les données satellitaires issues des programmes spatiaux pour l'observation de la Terre (comme le programme européen Copernicus) sont également utilisées pour la mesure de variables autres que la hauteur d'eau. Elles permettent aussi de suivre l'évolution des surfaces en eau, des surfaces enneigées, ou encore de l'humidité du sol, avec une couverture globale et des résolutions spatio-temporelles sans cesse améliorées : c'est l'hydrologie spatiale. Il ne faut pas la confondre avec l'hydrologie distribuée spatialisée, où le mot spatial ici est vu comme une prise en compte des hétérogénéités au sol.



ENJEUX

L'ALTIMÉTRIE SPATIALE, UN OUTIL CLÉ POUR L'HYDROLOGUE DE DEMAIN

La connaissance des hauteurs d'eau et des débits des cours d'eau est essentielle à la compréhension de leur dynamique ainsi que pour leur gestion durable et raisonnée. Ainsi, les stations hydrométriques d'une rivière sont nécessaires pour :

- La connaissance du régime hydrologique et des risques naturels liés (crues, sécheresses) par la constitution de longues séries chronologiques (plus de 100 ans pour certaines) ;
- Les systèmes d'alerte en situation de crue pour la protection des biens et des personnes ;
- Le dimensionnement des aménagements hydrauliques ;
- La gestion opérationnelle des aménagements hydrauliques (production hydroélectrique, écrêtement des crues, soutien des étiages, etc.) ;
- Le contrôle réglementaire, notamment en ce qui concerne les obligations de restitution de débit (par exemple les débits objectifs d'étiages à l'aval des ouvrages) ;
- Le suivi du bon état écologique des cours d'eau et des zones humides en dépendant.

L'intérêt pour l'hydrométrie est aujourd'hui renforcé par les défis que posent l'accroissement des usages de l'eau (domestique, irrigation, industriel, hydroélectrique, récréatif, etc.) et de la pression associée sur la ressource, le changement climatique et la vulnérabilité accrue des populations, ainsi que la restauration et la préservation des milieux naturels et de leur biodiversité.

On compte aujourd'hui en France métropolitaine environ 3 500 stations hydrométriques dont plus de 80 % sont télétransmises en temps réel, ce qui correspond à la moyenne européenne. En revanche, dans d'autres parties du monde, le nombre de stations hydrométriques est limité et a tendance à décliner (notamment en raison du coût de leur maintenance). C'est par exemple le cas en Afrique subsaharienne alors que cette région est particulièrement exposée au changement climatique et à son impact sur le cycle de l'eau. Dans de telles zones géographiques, caractérisées par de grands fleuves et des régions difficiles d'accès comme dans le bassin du fleuve Congo, le potentiel de l'altimétrie spatiale est particulièrement fort.



FOCUS

Le groupe de travail sur l'hydrologie spatiale : une initiative française

Un groupe de travail sur l'hydrologie spatiale a été créé en 2014 puis consolidé par un accord de groupe signé lors de la COP22 à Marrakech en 2016. Il est aujourd'hui animé par l'OIEau et regroupe les institutions françaises suivantes : CNES, IRD, AFD, IRSTEA, BRIL, CNR et CLS. Les travaux du groupe s'intéressent à l'utilisation des données satellitaires pour le suivi des ressources en eau, notamment par l'établissement de stations virtuelles. En effet, toute intersection d'un plan d'eau continental avec la trace au sol d'un satellite équipé d'un altimètre constitue, après correction de la mesure, une station hydrologique virtuelle susceptible d'être utilisée pour suivre dans le temps l'évolution de l'altitude du plan d'eau. La calibration des stations virtuelles s'effectue à l'aide des stations in situ et le passage des altitudes aux débits est un des chantiers importants en cours au sein du groupe. Avec le service Hydroweb (<http://hydroweb.theia-land.fr>), une base de données de variations des niveaux d'eau sur les lacs et les fleuves du monde à partir de l'altimétrie satellitaire a été progressivement mise en place depuis 2003. Plusieurs milliers de stations virtuelles sont suivies et disponibles sur la plateforme, en temps réel ou en mode différé. Par ailleurs, plus de 150 lacs sont suivis et les variations d'étendue et de volume sont mesurées pour un grand nombre d'entre eux. Le service Hydroweb est destiné à renseigner les utilisateurs, scientifiques ou autres, sur des variables d'état liées à l'hydrologie des surfaces continentales à partir de diverses données satellite. La plupart de ces variables font partie de la liste des Essential Climate Variables établies par le Global Climate Observing System. Le service est hébergé sur la plateforme du pôle national THEIA et est opéré par la société CLS sous la coordination du LEGOS, de l'IRD et du CNES.

SAVOIR-FAIRE



1

Suivre les sécheresses par assimilation de données issues d'observations satellitaires

Jean-Christophe Calvet (CNRM)

Le Centre National de Recherches Météorologiques (Université de Toulouse, Météo-France, CNRS) a développé un système d'assimilation de données pouvant fonctionner à l'échelle mondiale pour tout type de végétation (prairies, cultures, forêts, savanes). Cet outil est appelé LDAS-Monde (www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1022). Il intègre des observations satellitaires de la végétation et de l'humidité des sols dans un modèle du système sol- plante, le modèle Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA). ISBA permet de disposer d'une information continue dans le temps et de produire de nombreuses variables cohérentes entre elles (biomasse de la végétation, déficit ou excès en eau du sol, évapotranspiration, flux de carbone, température de surface). Les observations satellitaires, quant à elles, sont utilisées pour améliorer la qualité des variables simulées. Le modèle est alimenté par des données météorologiques disponibles à basse résolution spatiale à l'échelle mondiale (de 10 à 25 kilomètres). A l'échelle régionale, l'information météorologique est disponible à plus haute résolution spatiale. Par exemple, le système numérique de prévision du temps AROME-France de Météo-France produit cette information à une résolution de 1,3 km sur une grande partie de l'Europe de l'ouest. LDAS-Monde utilise des données produites par le service Copernicus Global Land : l'indice de surface foliaire et un indice d'humidité du sol. Ces produits étant disponibles depuis plusieurs années, il est possible de calculer des anomalies d'humidité du sol et de la croissance de la végétation. Mis en œuvre à l'échelle mondiale, LDAS-Monde permet de détecter des épisodes de sécheresse ; le système est alors utilisé à plus haute résolution spatiale sur la ou les régions concernée(s).

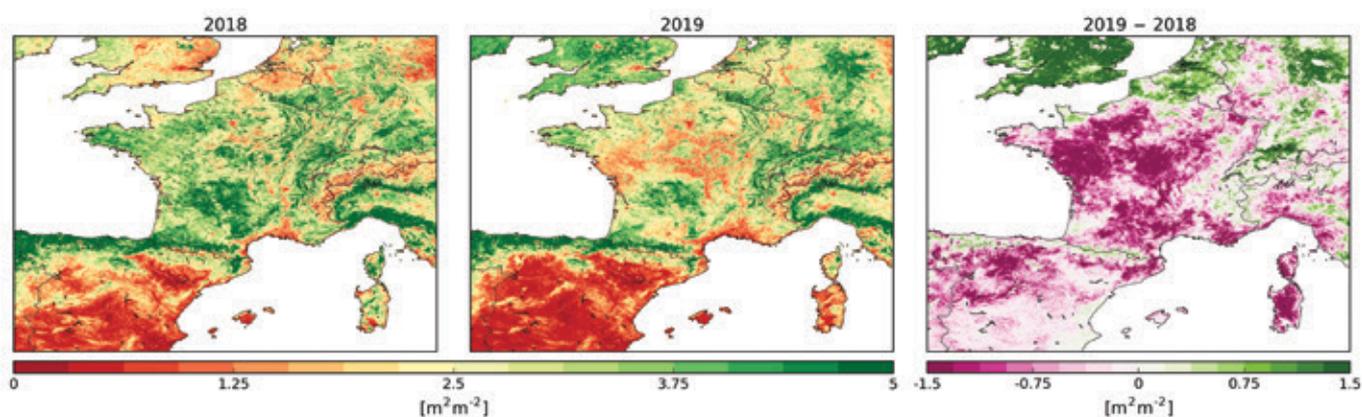


Figure 2 - Effet des vagues de chaleur de 2018 et de 2019 sur la végétation. L'indice de surface foliaire de la végétation pour le mois de juillet est présenté pour les années 2018 et 2019. Il s'agit d'une valeur simulée par le modèle ISBA de Météo-France après intégration de données satellitaires du service Copernicus Global Land. La différence entre ces deux cartes illustre les sécheresses très marquées ayant affecté le sud de l'Angleterre, la Belgique, les Pays-Bas et la Basse Saxe en 2018 (en vert), et la quasi-totalité de la France, le nord de l'Espagne et la Sardaigne en 2019 (en violet).



Allier données spatiales et modélisation pour compléter l'information hydrométéorologique in situ lorsqu'elle est difficile à acquérir (Amazone et Ouganda)

Laurent Tocqueville (BRLI), Yoann Aubert (BRLI), Thomas Legay (BRLI), Julien Verdonck (BRLI)

Combiner données d'altimétrie et de pluviométrie spatiales, à des outils de modélisation hydrologique, et les associer à un réseau métrologique in situ optimisé pour corréliser «vérité terrain» et résultats de simulation, tels sont les objectifs d'« HydroSIM Amazone » et « Smart Basin Ouganda ». Ces deux projets assurent un service « temps réel » de suivi et de prévision des hauteurs d'eau et de débit sur de grands bassins et offrent ainsi à un gestionnaire de bassin, l'information hydrométéorologique essentielle à la gestion stratégique de ses ressources en eau. Ce service Smart Basin s'appuie sur les données historiques et temps réel acquises par les différents satellites altimétriques (Jason 2 et 3, Sentinel-3A et -3B) et la constellation météorologique Global Precipitation Measurement (GPM). Déployé pour partie sur les bassins de l'Amazone, du Nil et du Congo, Smart Basin pourrait, dans un futur proche, être enrichi plus encore par l'arrivée du satellite SWOT. Porté par la plateforme de services Water Information Management Ecosystem and Services (WIMES) développée par BRLI, Smart Basin offre ainsi tout un panel de fonctions hydrométéorologiques pour l'exploitation du réseau, et propose différents webservices pour assurer son intégration aisée dans le système d'information du gestionnaire. Smart Basin produit les données de hauteur et de débit via les modèles hydrologiques GR (modèles pluie-débit développés par IRSTEA), et certains paramètres de qualité des eaux, comme la turbidité (via le modèle agro-écologique Soil and Water Assessment Tool – SWAT), donnée essentielle au barragiste pour anticiper l'arrivée d'apports sédimentaires et éventuellement by-passer le barrage, pour limiter ainsi la sédimentation de sa retenue.



Renforcer le suivi des ressources en eau avec le programme spatial SWOT

Philippe Maisongrande (CNES)

Le suivi des ressources en eau à l'échelle planétaire est un enjeu de société majeur pour lequel les techniques spatiales ont un rôle déterminant à jouer. En effet, la description de plus en plus précise du cycle de l'eau sur les terres émergées permet un contrôle affiné des ressources en eau de la planète (activités humaines telles que l'eau potable et l'assainissement, l'irrigation, la navigation fluviale, l'urbanisation, la production d'énergie hydroélectrique...). Dans un paysage programmatique international de l'observation de la Terre, de nombreuses missions renseignent plus ou moins directement chacune des composantes du cycle de l'eau, parmi lesquelles la future mission CNES/NASA SWOT (Surface Water Ocean Topography) dont le lancement est prévu en 2021. Le principal objectif de SWOT est de réunir les besoins des hydrologues et des océanographes en un seul satellite, avec notamment un recueil de données hydrographiques inédites, à l'échelle planétaire, comme par exemple la frange littorale et les systèmes estuariens. Pour les surfaces continentales, la mission SWOT mesurera les hauteurs d'eau des fleuves, des lacs et des zones inondées à partir d'un nouveau concept technique : l'altimétrie interférométrique à large fauchée. Celle-ci fournira des images de hauteurs d'eau de précision centimétrique, les pentes des plans d'eau et leur largeur – pour les fleuves d'une largeur supérieure à 100 mètres et rivières et les lacs et réservoirs de plus de 250 x 250 mètres – avec une résolution temporelle de l'ordre de la semaine.



Compléter l'information hydrologique in situ grâce à l'hydrologie spatiale : EXEMPLE DU BASSIN DU CONGO

Christophe Brachet (OIEau), Blaise Dhont (OIEau), Pierre-Olivier Malaterre (Irstea), Stéphane Debard (IRD), Stéphane Delichère (BRLI), Sébastien Chazot (BRLI), Damien Barral (BRLI)

Le programme préparatoire SWOT-aval vise à faciliter l'usage des produits issus du spatial en hydrologie, notamment en prévision des données SWOT bientôt disponibles, et susciter le développement de services et applications. Le bassin du Congo a été choisi comme bassin pilote dès 2016 et un accord entre 7 institutions françaises (formant le « Groupe de travail sur l'hydrologie spatiale » et réunissant le CNES, l'IRD, Irstea, l'AFD, l'OIEau, BRLI et la CNR) a été signé lors de la COP22 à Marrakech dans le but d'initier une collaboration avec la Commission Internationale du Bassin Congo-Oubangui-Sangha (CICOS), l'agence de bassin transfrontalier du fleuve Congo. Avec le soutien de l'AFD, ces travaux ont permis de co-construire avec la CICOS un Système d'Information Hydrologique (SIH). Ce système d'information est un des premiers qui intègre à la fois des données in situ et issues de l'altimétrie spatiale au sein d'un environnement unique. Le SIH a été pensé pour accueillir des services avals de la façon la plus automatisée possible et l'architecture choisie permet l'échange d'information et le développement de modules complémentaires. Les données issues de l'altimétrie spatiale sont intégrées dans le SIH sous la forme de stations virtuelles extraites de la plateforme Hydroweb qui donnent les hauteurs d'eau à l'intersection des traces altimétriques et des plans d'eau (le bassin du Congo comprenait 518 stations virtuelles en février 2019). Les données satellitaires complétées par des données issues de bases de données globales ainsi que quelques rares stations in situ ont permis de générer des modèles hydrauliques de ces fleuves et des courbes de tarages permettant de calculer des débits à partir de données satellitaires altimétriques. Les défis actuels pour la CICOS sont de faire connaître le SIH auprès des acteurs concernés dans les différents pays, d'organiser les échanges de données avec les services hydrologiques nationaux, de pérenniser l'outil et de le faire évoluer avec notamment le développement de services aval.



Figure 3 - Stations virtuelles dans le bassin du Congo accessibles depuis le service Hydroweb (hydroweb.theia-land.fr, novembre 2019).



Applications pour l'hydroélectricité et la navigation sur le bassin du Congo

Sébastien Legrand [CNR]

CNR [Compagnie Nationale du Rhône] est concessionnaire du fleuve Rhône avec 3 missions : production d'hydroélectricité, navigation et irrigation. La CNR valorise son savoir-faire sur d'autres fleuves, et a ainsi développé, pour la CICOS [Commission Internationale du Bassin Congo-Oubangui-Sangha], des services relatifs à la navigation et à l'hydroélectricité utilisant l'altimétrie spatiale. Concernant le volet hydroélectricité, la CNR a calculé puis cartographié un indicateur permettant d'identifier les tronçons présentant les meilleures conditions de débit et de pente pour le développement hydroélectrique sur les bassins du Congo et de l'Ogooué. Cet indicateur est établi sur l'altimétrie spatiale pour le calcul de la pente, des données de débit in situ ou reconstituées, des données de pluviométrie et un Modèle Numérique de Terrain [MNT].

Cette méthode est utile actuellement dans la recherche de projets hydroélectriques de plusieurs dizaines de MW. Dans le futur, le satellite SWOT permettra d'améliorer cette méthode. Le volet navigation a permis la mise en place d'un service opérationnel pour améliorer la navigation sur la Sangha, affluent du Congo. L'échelle hydrométrique d'Ouessou sur la Sangha constituant un indicateur de navigabilité suivi quotidiennement, CNR a développé un modèle de prévision des hauteurs d'eau à cette échelle, utilisant en entrée les hauteurs d'eau des jours précédents et des données de précipitations. L'apport des données d'altimétrie spatiale, acquises par le satellite Jason-2 et intégrées au modèle, a également été évalué.



Une nouvelle méthode de mesure par satellite de la hauteur de neige en montagne

Simon Gascoin [CNRS, CESBIO]

L'eau issue de la fonte du manteau neigeux est souvent utilisée pour la production d'hydroélectricité et alimente les canaux d'irrigation dans les zones cultivées en aval. Pour les gestionnaires de barrages en particulier il est donc important de connaître le stock de neige accumulé à la fin de l'hiver dans les bassins versants de montagne. Pour estimer cette quantité, le réseau de mesure au sol est généralement insuffisant au regard de la variabilité naturelle de la hauteur de neige. Récemment, une nouvelle méthode pour mesurer le volume annuel de neige disponible en montagne a été mise au point à partir des observations satellite à très haute résolution comme Pléiades ou WorldView. Une carte de la hauteur de neige est établie par pixel de 2 mètres de résolution. Pour cela, des couples d'images stéréoscopiques sont acquis en été et à la fin de l'hiver. Chaque couple stéréo permet de générer un modèle numérique d'élévation [MNE] qui donne l'altitude par pixel de 2 mètres. La hauteur de neige est obtenue par la différence entre les deux MNE. Le MNE d'été peut servir de référence pour plusieurs années si bien qu'il suffit d'acquérir un couple stéréo chaque année à la fin de l'hiver pour connaître le stock de neige disponible avant la saison de fonte. La méthode a été validée en France avec des images Pléiades sur un bassin pyrénéen à l'aide de mesures de hauteur de neige obtenues par sondage manuel et par drone. Les résultats indiquent que la carte de hauteur de neige produite à 2 mètres de résolution a une précision de l'ordre de 50 centimètres sur la hauteur de neige. Des études sont en cours pour mieux caractériser l'incertitude de ce nouveau produit à partir de campagnes Lidar [télé-détection par laser] aéroportée. En attendant, plusieurs équipes se sont lancées dans l'exploitation de cette méthode, la seule méthode existante à ce jour, pour déterminer la hauteur de neige en montagne depuis l'espace.



Figure 4 - Campagne de terrain dans les Pyrénées pour mesurer les hauteurs de neige (sondage manuel et mesure par drone) en vue de valider les résultats de la méthode reposant sur l'analyse des images satellitaires Pléiades.

La qualité des eaux, suivi écologique et biodiversité

DÉFINITION

Quels paramètres de qualité de l'eau peuvent être suivis par satellite ?

Les paramètres de qualité de l'eau qui peuvent être évalués par les imageurs optiques sont la turbidité, la température de surface, la chlorophylle (un indicateur de la biomasse du phytoplancton, le statut trophique et nutritionnel), les matières organiques dissoutes colorées (utilisé comme indicateur de la matière organique et du carbone aquatique) et les matières en suspension et les particules non algales.

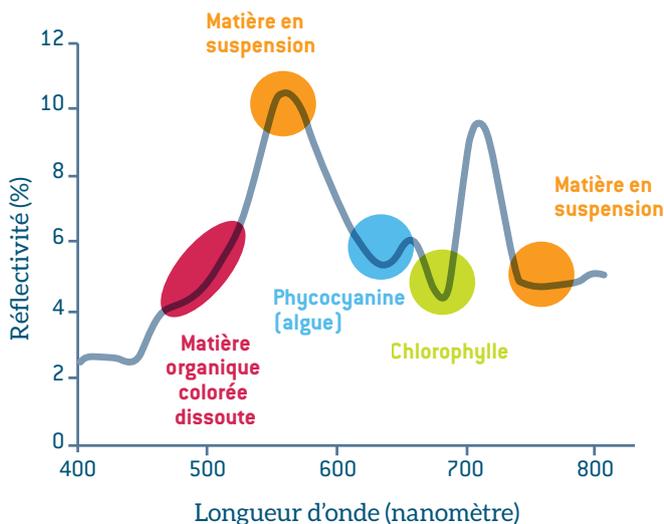


Figure 5 - Réflectivité (rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente totale) en fonction de la longueur d'onde typique d'eau continentale et les signatures spectroscopiques des paramètres de qualité de l'eau.

ENJEUX

SUIVI DE LA QUALITÉ DE L'EAU ET DU SUIVI ÉCOLOGIQUE POUR MIEUX COMPRENDRE, ANTICIPER LES CHANGEMENTS DE BIODIVERSITÉ ET CLIMATIQUES

Les activités humaines exercent sur l'environnement des pressions qui modifient le climat, perturbent le cycle hydrologique et affectent les bassins versants et la biodiversité. Face à ces enjeux, il est nécessaire d'assurer un suivi régulier des eaux continentales pour anticiper les changements et définir des axes d'amélioration. Cependant, le déclin de la qualité de l'eau continentale et côtière est devenu et continuera à être un problème majeur tant environnemental, que sociétal ou économique. Le suivi de la qualité de l'eau constitue donc l'un des éléments les plus importants de la gestion environnementale des écosystèmes aquatiques. En Europe, il est défini par la Directive Cadre sur l'Eau qui impose le bon état des masses d'eau.

En observant la couleur de l'eau, les satellites fournissent une information sur les concentrations des constituants à l'origine de ces couleurs. Plus généralement, l'observation de la Terre permet aujourd'hui de suivre en temps quasi réel et avec des résolutions temporelles et spatiales de plus en plus fines (environ 10-30 mètres) différents paramètres de qualité de l'eau (voir Définition p.12) et autres caractéristiques environnementales optiques (turbidité, clarté de l'eau), de détecter les changements d'occupations du sol qui affectent les zones humides et la biodiversité. Ces observations et mesures viennent en complément du réseau in situ pour un suivi écologique global.

Ce chapitre présente des exemples concrets de l'usage de l'observation de la Terre pour le suivi de la qualité des eaux continentales et côtières, le suivi écologique et les enjeux de préservation des zones humides. Les techniques et outils issus du spatial sont maintenant suffisamment matures pour des applications opérationnelles, que ce soit pour le soutien à la gestion de crise, la préservation des écosystèmes littoraux et des zones humides et la qualité de baignade. Un focus sera également fait sur le suivi des zones lacustres, véritables sentinelles du climat : le lac du Tonlé Sap au Cambodge où les pressions anthropiques sont importantes et en France où le suivi des écosystèmes lacustres est un réel enjeu pour répondre à la Directive Cadre sur l'Eau.

SAVOIR-FAIRE



Suivre la qualité des eaux fluviales et des plans d'eau : EXEMPLE DE LA CATASTROPHE MINIÈRE AU BRÉSIL

Jean-Michel Martinez, Guillaume Morin, Gérard Cochonneau, William Santini (GET, Université Paul Sabatier, IRD, CNRS)

Au cours des dernières années, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), avec le laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET) et le soutien du CNES, développe des chaînes de traitement automatisées pour le suivi de la qualité de l'eau par satellite qui sont ensuite validées avec les partenaires finalisés. Un partenariat a notamment été développé avec l'Agence de l'Eau du Brésil afin de suivre les plus grands bassins versants du pays par imagerie satellite, incluant le développement d'un portail internet dédié (<http://hidrosat.ana.gov.br>). Les premiers travaux de développement et de validation ont commencé dès 2009 avec l'exploitation d'images optiques de la NASA MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) qui permettent un suivi journalier de grands plans d'eau. Ces chaînes permettent d'exploiter l'information de réflectivité de l'eau afin d'extraire des paramètres de qualité des eaux grâce à différents prétraitements visant à corriger les images satellite brutes (corrections atmosphérique, des effets de pente, des effets 'miroirs' de l'eau, etc.). Les images sont exploitées pour détecter l'eutrophisation dans des lacs artificiels ou estimer les flux sédimentaires dans les fleuves pouvant être un soutien à la gestion de crise en cas de catastrophes environnementales. Les données satellite ont ainsi été utilisées lors de la catastrophe minière au Brésil en Janvier 2019 qui a causé plus de 300 morts et rejeté plusieurs millions de tonnes de rejets miniers dans l'environnement. Les images des satellites Landsat et Sentinel-2 ont permis de suivre sur plus de 200 kilomètres, au plus fort de la crise, la progression des rejets dans la rivière drainant la région. Dans un second temps, ces mêmes images sont ensuite utilisées afin de mesurer la récupération du milieu plusieurs mois après la catastrophe. Actuellement, les travaux se portent sur la nouvelle génération d'images satellites libres d'accès, comme ceux de la série Sentinel du programme Copernicus. Comparées aux images du satellite MODIS, ils permettent de suivre des plans d'eau de taille réduite (quelques dizaines de mètres) et avec une précision inédite. Ces nouvelles images constituent une avancée majeure et permettent d'envisager un système de suivi de la qualité des eaux des rivières et lacs à large échelle sur tous les continents. Les premiers produits de suivi de la qualité des eaux par satellite sont disponibles sur plusieurs sites dans le monde sur le site THEIA, portail français des surfaces continentales.

POUR PLUS D'INFORMATION :
<https://theia.cnes.fr>



Accéder à la variabilité spatio-temporelle des flux hydro-sédimentaires pour mieux comprendre le cycle saisonnier des crues : EXEMPLE DU LAC DE TONLÉ SAP

Charles Verpoorter (LOG, Université de Lille, Université du Littoral Côte d'Opale, CNRS, UMR 8187), Frédéric Frappart (LEGOS, Université de Toulouse, IRD, CNES, CNRS, UPS), Sylvain Biancamaria (LEGOS, Université de Toulouse, IRD, CNES, CNRS, UPS), Thomas Combes (LOG, Université de Lille, Université du Littoral Côte d'Opale, CNRS, UMR 8187) et Jules Greusard (LEGOS, Université de Toulouse, IRD, CNES, CNRS, UPS ; ISPA, INRA, Bordeaux Sciences Agro)

Depuis les années 1990, le bassin du Tonlé Sap au Cambodge a vu sa population augmenter avec plus de 16 millions de personnes vivant aux abords du lac. Cet hydrosystème est soumis à de nombreuses pressions d'origine anthropiques (urbanisation, déforestation, surpêche, pollution des sols et impact des barrages en amont). La compréhension de leurs processus hydrologiques et sédimentaires qui les gouvernent et de leurs caractéristiques bio-géo-chimiques est une étape indispensable au suivi de ces ressources en eau et plus largement à la compréhension globale. Plus grand lac d'eau douce d'Asie du Sud-Est, le lac de Tonlé Sap s'étend sur une surface minimum d'environ 2 500 km². Il est soumis à un climat subtropical de mousson et de forts régimes de précipitation (environ 1 400 mm/an). Il présente la particularité d'être lié directement aux crues et décrues du fleuve majeur auquel il est relié : le Mékong. En saison humide, c'est le Mékong qui alimente le lac, tandis qu'en saison sèche le lac s'écoule vers le fleuve. Le lac agit donc comme un « tampon » sur l'hydrologie du Mékong en aval de la confluence avec la rivière Tonlé. Ainsi, des chercheurs du LOG et du LEGOS soutenus par le CNES étudient la variabilité hydro-sédimentaire du lac de Tonlé Sap par télédétection spatiale multi-capteurs (Sentinel-2, MERIS, SeaWiFS). Ces travaux ont permis de cartographier les matières en suspension, la chlorophylle-a, les cotes d'eau du lac, son étendue et ses variations de volume permettant ainsi de retracer finement la variabilité hydro-sédimentaire de 2002 à 2019 (Figure 6).

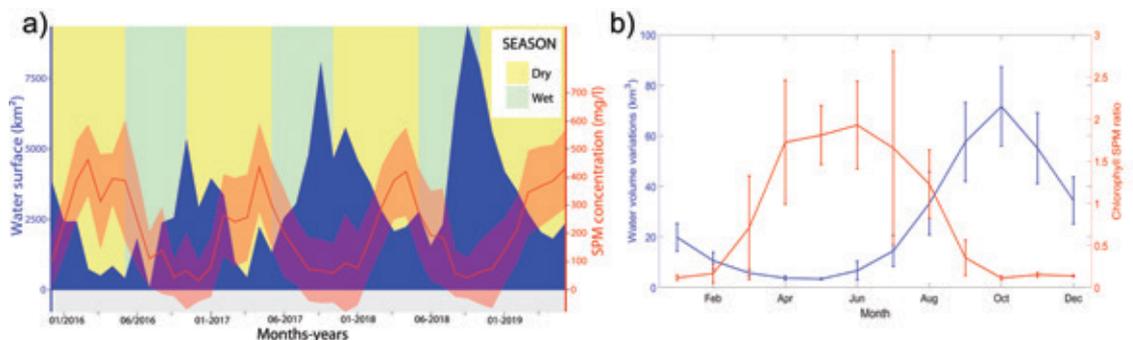


Figure 6 - Mise en évidence des cycles saisonniers des flux hydro-sédimentaires (matières en suspension, Chlorophylle-a surface en eau, volume), en réponse aux crues/décrues du lac de Tonlé Sap par analyse d'images : a) multi-spectrales Sentinel-2 et b) OC-CCI (Ocean Color Climate Change Initiative) et altimétriques.

Les cycles saisonniers de crues/décrues (Figure 6) aux intensités et rythmes marqués régissent les variations de concentrations en matières en suspension et chlorophylle. Le lien entre ces variations de volume et les indices climatiques « El Niño Southern Oscillation » et « Pacific Decadal Oscillation » a été mis également en évidence, ainsi qu'un effet mémoire du volume du lac de l'année précédente sur ses variations. La continuité de ces suivis sur des sites 'sentinel' tel que le Tonlé Sap s'avère être essentielle pour appréhender à plus long terme les impacts des flux hydro-sédimentaires tant du point de vue hydrologique, écologique qu'économique et d'anticiper les modifications significatives de ces milieux sensibles.



Caractériser la turbidité naturelle des eaux côtières par satellite : EXEMPLE PRÈS DE LA ROCHELLE

Virginie Lafon, Stéphane Kervella, Aurélie Dehouck, Olivier Regniers (i-Sea)

En amont de la réalisation de travaux maritimes, des études doivent être réalisées pour prévoir les effets potentiels des remises en suspension sur l'environnement marin, en particulier sur les compartiments biologiques les plus sensibles, comme les espèces fixées. En appui à ces études d'impact, il est nécessaire de définir finement les gammes de turbidités naturelles qui caractérisent le site. Dans ce contexte, l'outil satellite vient compléter les dispositifs traditionnels par une vision réelle et dynamique de la situation sur l'ensemble de la zone de chantier et les littoraux adjacents. En effet, les images satellite, acquises plusieurs fois par jour, permettent de constituer une archive de cartes des teneurs en matière en suspension ou de turbidité de plusieurs centaines de km² d'emprise. Pour obtenir la meilleure estimation possible de ces deux paramètres, les lois physiques qui en permettent le calcul sont étalonnées directement sur le terrain. Concrètement, plusieurs années d'archives d'images VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), MODIS, Sentinel-3 sont traitées pour fournir des moyennes quotidiennes de turbidité. Une analyse statistique de cette base de données, en fonction des forçages hydrodynamiques et météorologiques locaux, permet de déterminer les climats de turbidité et d'extraire les niveaux de turbidité moyens et extrêmes caractéristiques des différentes masses d'eau en présence. Ces résultats sont directement exploités pour contribuer à établir des seuils d'alerte à respecter en phase de chantier. En complément de cette étape de caractérisation initiale, les images Sentinel-2 et Landsat, de résolution au sol plus fine, sont exploitées pour contribuer à maîtriser les turbidités générées en cours de chantier et limiter leur impact. Là encore, des séries d'images sont converties en turbidité pour déterminer statistiquement les zones les plus propices à l'implantation des sondes qui seront exploitées pendant le chantier dans le cadre de dispositifs de suivi et d'alerte en temps réel. Ces approches innovantes ont reçu le prix Port du Futur 2019 catégorie « Numérique », décerné conjointement à i-Sea et à Port Atlantique La Rochelle, pionnier dans l'appropriation de cette nouvelle technologie.

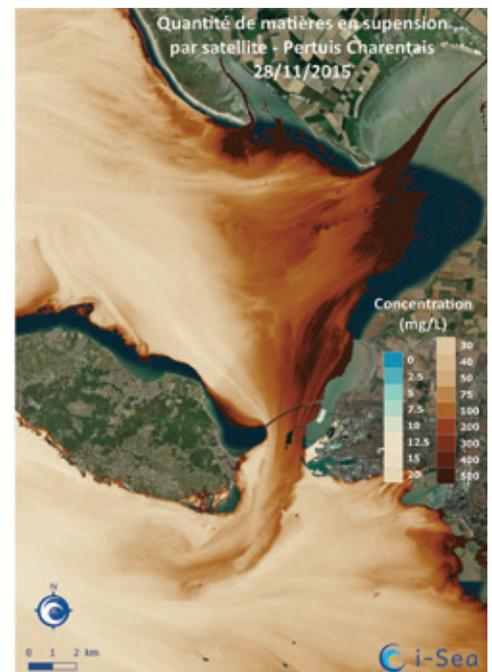


Figure 7 - Campagne de mesure bateau (ci-dessus) et carte de matières en suspension (concentration en mg/L) générée par satellite le 28 novembre 2015 dans les Pertuis Charentais (à droite).



Suivre les écosystèmes lacustres & changements climatiques : EXEMPLE DES LACS FRANÇAIS

Thierry Tormos, Pierre-Alain Danis (AFB, pôle R&D ECLA (Ecosystèmes Lacustres))

Le fonctionnement des écosystèmes lacustres, la qualité de l'eau tout comme les biens et les services qui en dépendent sont étroitement liés à la température de l'eau. Avec le changement climatique en cours, il est indispensable de prendre en compte les trajectoires thermiques des plans d'eau pour (i) l'élaboration des stratégies d'atténuation des impacts anthropiques ; et (ii) le maintien de la biodiversité de ces écosystèmes. L'Agence Française pour la Biodiversité (AFB), porte une attention particulière aux impacts de ce changement sur ces écosystèmes. Il est l'instigateur de la mise en place du RNT, réseau de surveillance continu (fréquence horaire) et à long terme de la température des plans d'eau. Ce type de suivi n'étant que ponctuel spatialement, des outils de suivi par télédétection satellitaire et de modélisation sont développés en complément du RNT pour mieux caractériser les trajectoires thermiques et thermodynamiques des masses d'eau dans leur globalité et ceci sur plusieurs décennies passées et futures. L'estimation de la température de surface par télédétection est réalisée à partir de l'imagerie infra-rouge Landsat. La méthode, qui consiste à corriger l'énergie émise par les surfaces en eau (aussi bien continentales que marines) des effets atmosphériques, est validée continuellement à partir des données in situ anciennes (scientifiques ou de gestionnaires) ou acquises via le RNT. Aujourd'hui, cette validation repose sur une centaine de lacs. L'erreur moyenne sur l'estimation de la température de surface à partir de l'imagerie Landsat est de $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$. Cette donnée est produite en routine sur l'ensemble des surfaces en eaux continentales (visibles par l'imagerie Landsat) de la France métropolitaine et des départements et régions d'Outre-mer. Elle fournit l'évolution temporelle et la distribution spatiale des températures de surface des plans d'eau et sert de donnée de calibration/validation pour les modèles de trajectoires thermiques des plans d'eau français.

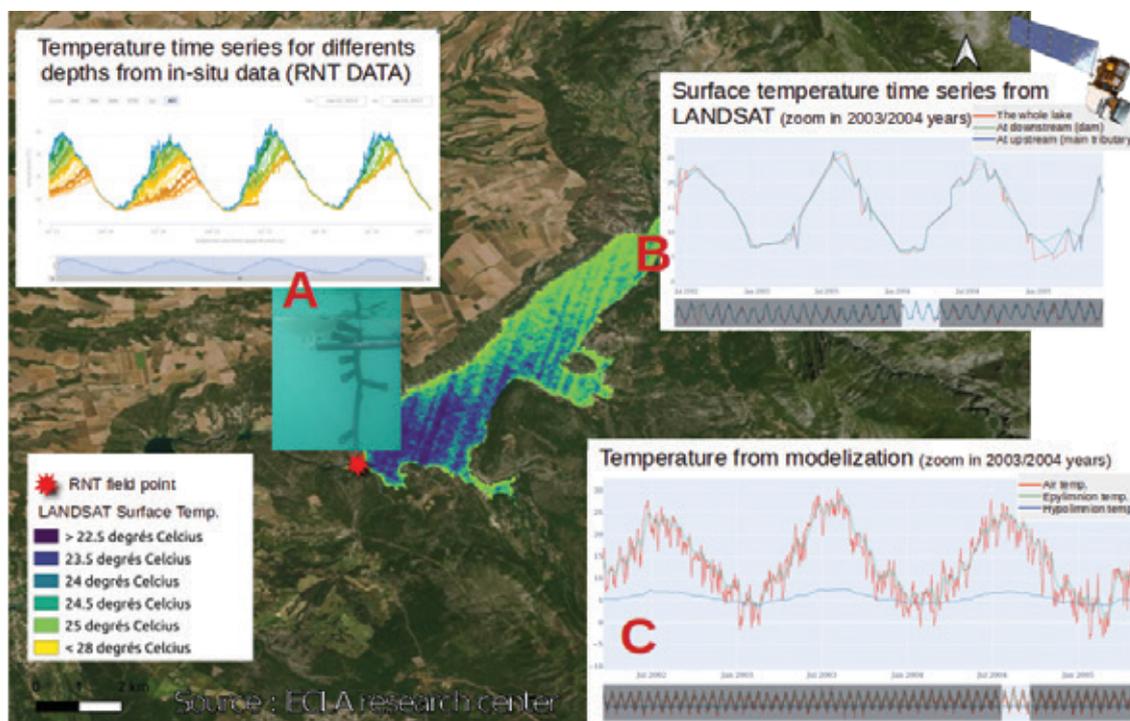


Figure 8 - Le lac de Sainte-Croix : (A) série temporelle de températures in situ issues du RNT à différentes profondeurs, (B) série temporelle de températures de surface issues de l'imagerie satellitaire Landsat, et (C) résultats de modélisation des strates thermiques du lac (épilimnion au-dessus de la thermocline et hypolimnion en dessous) (C).



Suivre les zones humides méditerranéennes :

EXEMPLE DE LA RÉGION MÉDITERRANÉENNE

Guelmami Anis (Institut de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes (Tour du Valat))

Les zones humides méditerranéennes sont considérées comme les écosystèmes les plus productifs de cette région, abritant une des biodiversités les plus remarquables dans le monde. Mais ce sont aussi ceux qui subissent le plus les pressions anthropiques et on estime la perte de leurs habitats naturels à près de 48% entre 1970 et 2013 (OZHM, 2018).

Dès 2012, l'Observatoire des Zones Humides Méditerranéennes (OZHM) a mis en place un système de suivi de ces habitats, basé sur la cartographie diachronique de l'occupation du sol à partir des données issues de l'Observation de la Terre (OT), pour un échantillon de plus de 300 sites (Figure 9). L'outil cartographique utilisé a été développé dans le cadre des projets GlobWetland-II (GW-II, 2010-2014) et Satellite-based Wetlands Observation Service (SWOS, 2015-2018). Ceci a permis, dans un premier temps, de mettre en place une base de données spatialisée, couvrant 3 périodes annuelles (1975, 1990 et 2005) issues des séries temporelles d'images Landsat. Cette dernière étant en cours de mise à jour, avec l'intégration de nouvelles cartes développées à partir des images Sentinel-2, couvrant la période annuelle 2018.

L'approche méthodologique comprend deux composantes : (1) la télédétection permettant le traitement des images satellite et la cartographie de l'occupation du sol (basée sur une nomenclature hybride combinant CORINE Land Cover et Ramsar) avec une classification supervisée orientée objet par segmentation (Figure 10) et ; (2) le Système d'Information Géographique (SIG) pour le calcul automatisé d'indicateurs spatialisés (les surfaces totales en habitats humides, les pressions urbaines et agricoles, leurs évolutions dans le temps, etc.).

Les tendances observées pour les 3 premières périodes analysées (1975, 1990 et 2005) démontrent que malheureusement beaucoup d'habitats humides naturels continuent à disparaître. Principalement en raison de leur conversion en zones urbaines ou agricoles (respectivement +294% et 42%) ou encore à cause du développement important des barrages et autres sites de stockage de l'eau dans certains pays (plus de 64% des nouvelles zones humides artificielles créées entre 1975 et 2005 l'ont été au détriment des habitats humides naturels).

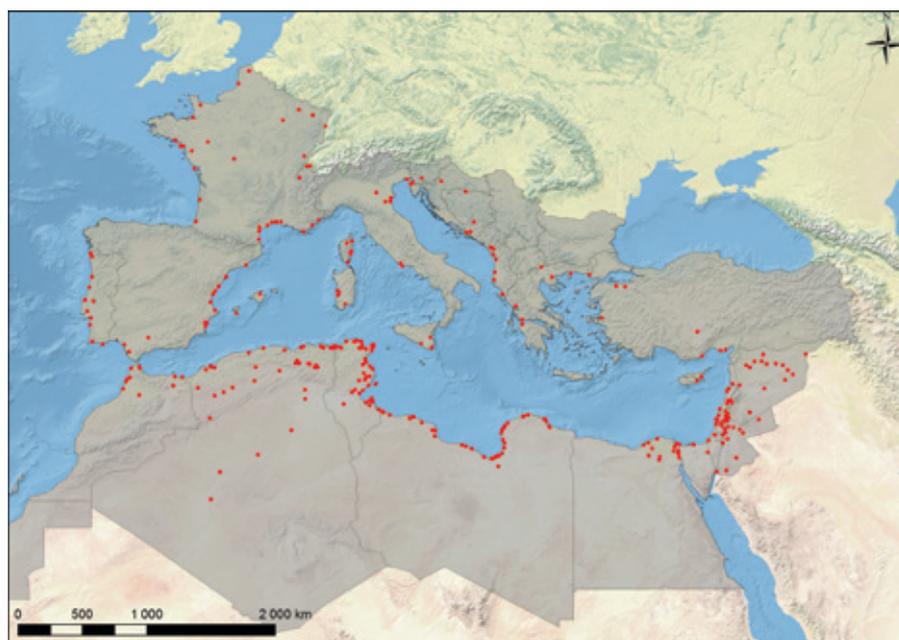


Figure 9 - En rouge, distribution des sites dont l'occupation du sol est suivie par l'OZHM.

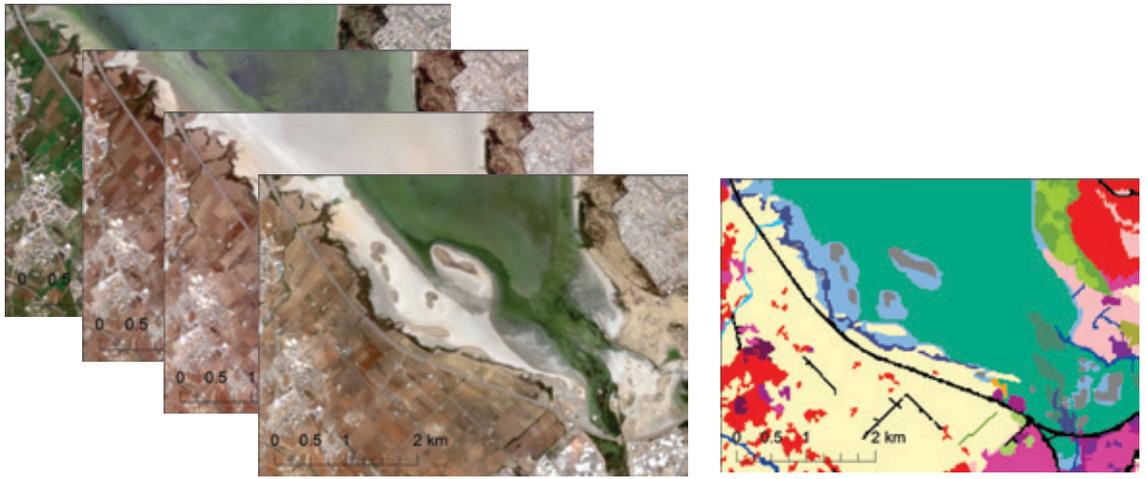


Figure 10 - Cartographie de l'occupation du sol à partir de séries temporelles Sentinel-2 couvrant l'année 2018 (de gauche à droite : acquisition des images multi-dates, segmentation et classification orientée objet de l'occupation du sol).



Détecter et prévoir la dérive des blooms de cyanobactéries : EXEMPLE D'UNE APPLICATION OPÉRATIONNELLE EN MER BALTIQUE

Virginie Lafon, Olivier Regniers, Nicolas Debonnaire (i-Sea)

Les cyanobactéries, en forte recrudescence à l'échelle mondiale, se développent dans les eaux douces et marines sous forme de colonies très abondantes, souvent visibles depuis l'espace. L'association de toxines à de nombreuses espèces de cyanobactéries conduit souvent à la fermeture d'eaux de baignades lorsque des proliférations surviennent, pour éviter tout risque sanitaire. La Baltique est particulièrement affectée par des blooms intenses et fréquents tout au long de l'été. Dans le cadre d'une étude basée sur le service européen de surveillance de l'environnement marin de Copernicus (CMEMS), un consortium de petite et moyenne entreprise (PME) européennes a construit le service HAB Risk qui fournit un état des lieux quotidien ainsi que des prévisions à 3 jours de dérive des blooms détectés sur l'ensemble de la Baltique. La méthode de détection repose sur l'analyse de données Sentinel-3. Un algorithme calibré in situ permet de calculer la concentration en phycocyanine, pigment caractéristique des cyanobactéries. Ce paramètre est étalonné pour estimer l'abondance en cyanobactéries. Chaque jour, dans les heures suivant l'acquisition d'une image Sentinel-3 sur la mer Baltique, un serveur de traitement de données récupère l'image et calcule la concentration en phycocyanine partout où il n'y a pas de nuages. Simultanément, des champs de courant simulés sont téléchargés depuis le serveur CMEMS afin de prédire la trajectoire des blooms pour les trois jours à venir et de produire un indicateur de risque que ces blooms impactent des zones de baignade. L'ensemble des produits est mis en ligne sur le Web et une application smartphone 3 heures seulement après que l'image est rendue accessible. Ainsi, les usagers bénéficient quotidiennement, en fin de journée, d'une appréciation du risque de bloom pour la journée du lendemain sur la plage qu'ils fréquentent ou dont ils décident de l'ouverture à la baignade.

Le pilote est pour l'instant configuré et testé sur le littoral polonais. HAB Risk a également vocation à servir l'aide à la décision pour la gestion des zones fermes aquacoles.

POUR PLUS D'INFORMATION :

SITE INTERNET :

<http://habrisk.planetek.it/demo/#/>

APPLICATION :

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.n7mobile.habrisk&hl=fr>

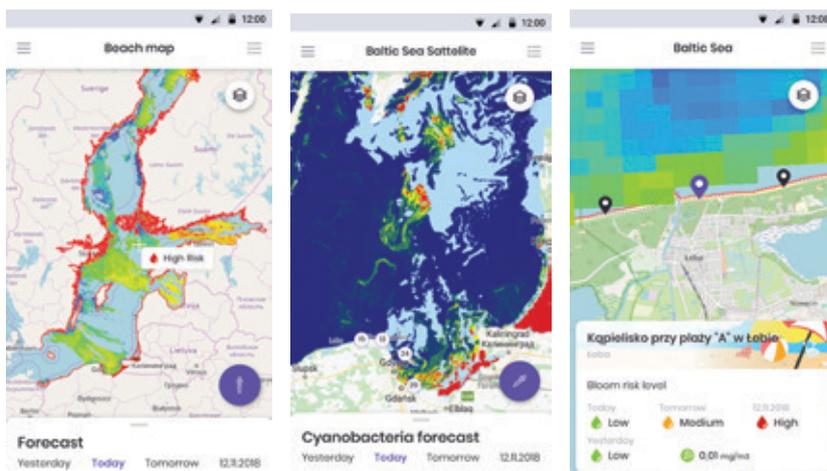


Figure 11 - Exemples de l'application HAB Risk sur smartphone présentant les seuils d'alerte sur la mer baltique et les plages polonaises.

Les usages agricoles de l'eau

DÉFINITION



Qu'est-ce que les usages de l'eau agricoles ?

Par « usage agricole de l'eau » nous comprenons les prélèvements humains liés à l'agriculture (irrigation). La consommation de l'eau météorique par l'agriculture, de même que par l'ensemble de la biosphère n'est pas prise en compte ici. Une autre problématique de l'eau liée à l'agriculture est le drainage et les zones humides associées. Cet aspect est encore très peu étudié par télédétection, et nous ne l'avons pas intégré dans ce document.

ENJEUX



L'AGRICULTURE EST LE PRINCIPAL PRÉLEVEUR D'EAU

L'agriculture occupe quelques 1,5 milliards d'hectares de terres, soit environ 11 % de la superficie en terres de la planète. A ces superficies s'ajoutent les prairies et pâturages permanents qui représentent quant à eux 21%. Au total, un tiers de la surface terrestre de la planète est donc occupée par des usages agricoles. La plus grande partie de ces surfaces est alimentée en eau par les seules précipitations, mais dans les zones où celle-ci ne suffisent pas, des systèmes d'irrigation prélèvent les ressources en eau pour apporter l'eau nécessaire aux cultures. Malgré cette utilisation importante de l'espace et des ressources, le besoin de production agricole augmente pour faire face aux enjeux de sécurité alimentaire (au moins 1,5 milliard de personnes souffrent aujourd'hui de la faim dans le monde) et aux enjeux énergétiques de substitution des énergies fossiles. L'agriculture est ainsi le plus gros consommateur d'eau sur la planète (70 % de l'eau prélevée l'est à des fins agricoles). Cette part est encore plus importante dans les pays où les ressources en eau sont limitées. L'irrigation se développe actuellement surtout dans les pays en développement où la part des surfaces irriguées était de 202 millions d'hectares en 1997-99 et devrait atteindre 242 millions d'ici 2030.

Si la part des ressources en eau renouvelables consommée par l'irrigation reste relativement modeste à l'échelle globale de la planète, elle présente de très fortes différences selon les régions (Figure 12) et les saisons. De plus, sous un certain nombre de climats, la période de plus fort besoin en eau agricole correspond avec la période où la ressource en eau est la moins importante. Ces phénomènes pourraient être amplifiés par le changement climatique qui agit à la fois en réduisant la ressource disponible et en augmentant les besoins agricoles. Il y a donc un fort risque d'augmentation des pénuries d'eau et de concurrence entre les différents usages de la ressource.

Eau renouvelable et prélèvement d'eau (km³)

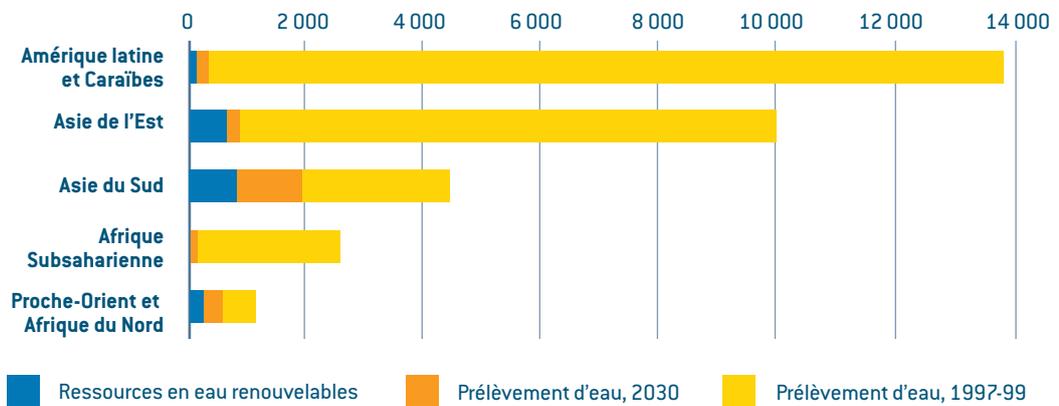


Figure 12 - Part des prélèvements dans les ressources en eau renouvelable pour différentes régions du globe (Source : données et projections FAO).

On voit donc la place de l'agriculture dans la consommation d'eau planétaire et sa prévisible augmentation dans les années à venir. La concurrence avec les autres usages et les enjeux des risques de pénurie sur la sécurité alimentaire imposent de doter les instances dirigeantes d'outils de suivi, de contrôle et éventuellement de prédiction et d'optimisation de la consommation en eau agricole.

Les moyens récents de la télédétection apportent un complément essentiel d'information aux données de terrain et aux données statistiques qui permettent de :

- Identifier les plantes cultivées, leur stade de croissance, leur état végétatif, etc. ;
- Dédire de ces informations les besoins en eau ;
- Mieux gérer les apports en fonction des besoins et de la disponibilité de la ressource.

Ces méthodes sont appliquées à différentes échelles, pouvant aller de l'intra-parcellaire dans un cadre d'agriculture de précision, à l'échelle de parcelle(s) pour permettre une gestion de l'exploitation plus proche des besoins malgré l'absence de données précises de terrain, jusqu'à des échelles plus larges, en permettant de gérer une ressource en eau en fonction des besoins des cultures et de leur état à l'échelle d'une région ou d'un bassin versant.

SAVOIR-FAIRE



13



Localiser et quantifier des surfaces rizicoles mises en eau : EXEMPLE DE LA VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL PROJET MOSIS

Marie Lefrancq (CACG), Françoise Goulard (Agence de l'Eau Adour-Garonne)

Organisations associées au projet : SOGED-OMVS, CACG, E2L, Agence de l'Eau Adour-Garonne, CNES

L'objectif de l'approche développée est de suivre les surfaces rizicoles par télédétection dans le bassin versant du fleuve Sénégal pour instaurer un dialogue entre les différents usagers de l'eau afin d'améliorer la gestion des volumes d'eau prélevés et le taux de recouvrement de la redevance liée à l'irrigation. Les images optiques multi-temporelles de Sentinel-2 fournies et prétraitées par le pôle Théia ont été traitées et valorisées afin d'évaluer les surfaces rizicoles sur le bassin du fleuve Sénégal tous les 5 jours avec une résolution spatiale de 10 mètres. Les surfaces mises en eau sont détectées grâce à un indicateur de présence d'eau (MNDWI) et validées ensuite par la présence de cultures (NDVI). Deux campagnes de terrain ont permis d'évaluer la cohérence des résultats sur les deux saisons culturales du riz (contre-saison chaude et hivernage). Ce projet a été mené dans l'esprit des démarches « Living Lab » où l'usage est au cœur de la réflexion. Une plateforme web de cartographie partagée a donc été co-construite avec le gestionnaire local, la SOGED (société de l'Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal, OMVS), basée sur une méthodologie innovante dite de « design de service » afin de se concentrer sur les besoins et le contexte des futurs utilisateurs. Cette plateforme lui permet d'agir sur la base d'informations et d'indicateurs spatialisés. Concrètement, elle permet de visualiser en fonction du temps les surfaces cultivées en lien avec la base de données des usagers afin d'estimer les équivalents théoriques de volumes d'eau prélevés pour l'irrigation ainsi que le recouvrement de la redevance potentielle. La plateforme est aujourd'hui opérationnelle. Son utilisation a déjà montré beaucoup de valeurs ajoutées sur le terrain : meilleure identification des usagers et du foncier et augmentation des recettes de redevance. Les enjeux à venir sont le déploiement de cet outil sur d'autres thématiques telles que le suivi des plantes envahissantes ou des phénomènes d'érosion.

POUR PLUS D'INFORMATION :
<https://mosis-cacg.e2l-coop.eu/>

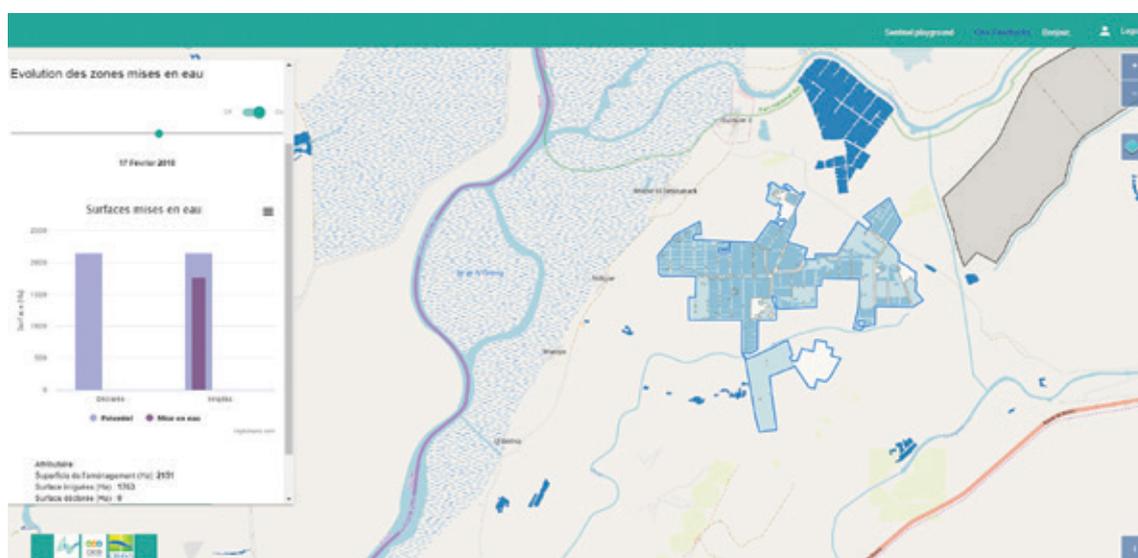


Figure 13 - Exemple de l'interface WEBGIS de l'outil MOSIS montrant l'évolution des zones en eau.



Cartographier les cultures irriguées

PROJET CES THEIA IRRIGATION

Valérie Demarez (CESBIO)

Organisations associées au projet : CESBIO, CES Theia

Afin de permettre aux gestionnaires de bassin de connaître et d'anticiper les besoins en eau des cultures pour gérer plus finement la ressource en eau, une méthode de traitement (classification) des images Sentinel (Sentinel-1 et -2) a été mise en point pour la cartographie des cultures irriguées en cours et en fin de saison. L'outil utilisé est la chaîne de traitement opérationnelle *iota*² développée au CESBIO et disponible en libre accès. Des cartes de cultures irriguées à 10 mètres de résolution ont été produites sur le Sud-Ouest de la France (Figure 14). Les résultats montrent ainsi que dès fin juillet la distinction entre cultures d'été et d'hiver peut être faite avec 85% de précision. A partir de fin juillet, la distinction peut être faite entre les cultures irriguées et non irriguées (précision=75%) permettant ainsi d'anticiper les décisions pour l'estimation de la production ou pour la gestion de l'eau à l'échelle du département.

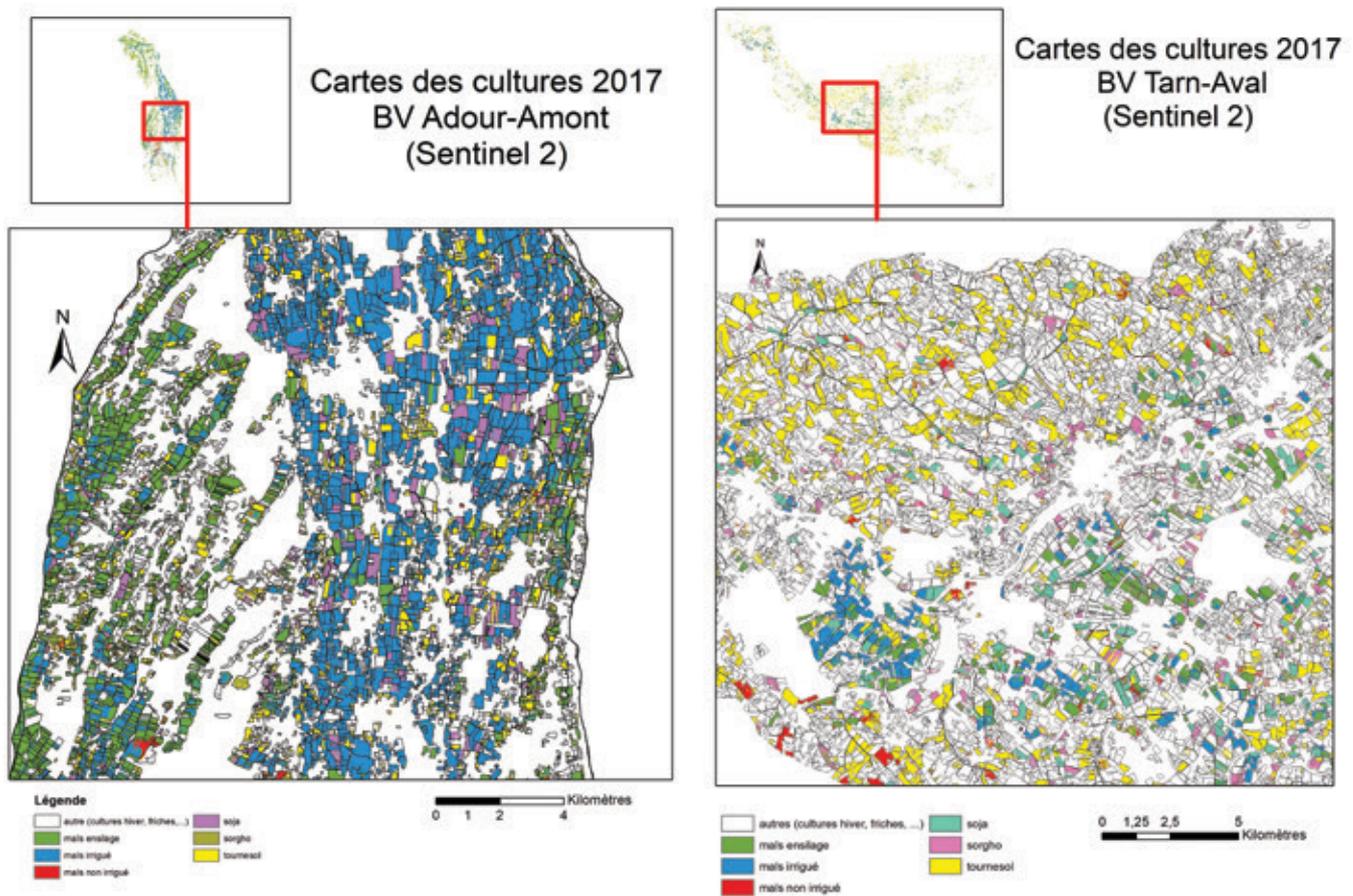


Figure 14 - Carte des cultures irriguées du bassin versant de l'Adour-Amont (gauche) et du Tarn-Aval (droite) obtenue à partir de 20 images Sentinel-2 acquises entre mars et octobre 2017 (projet SIMULTEAU,



Calculer un bilan hydrique à l'échelle de la parcelle agricole pour qualifier un stress hydrique et apporter un conseil d'irrigation PROJET SAT-IRR ("SATELLITE FOR IRRIGATION SCHEDULING")

Guillaume Rieu (TerraNIS)

Organisations associées au projet : TerraNIS, CESBIO

Apporter un conseil d'irrigation aux agriculteurs en fonction des véritables besoins de leurs cultures est l'objectif de l'approche présentée ci-après. Pour calculer le bilan hydrique à l'échelle de la parcelle agricole, l'outil développé se base sur une plateforme web et permet à l'utilisateur de : (i) saisir les données d'entrée : contour parcellaire, type de culture, date de semis et type de sol, (ii) visualiser des cartes sur le développement de la végétation tout au long de la campagne culturale et des indicateurs sur le stress hydrique (teneur en eau dans le compartiment racinaire par exemple). L'application utilise les images optiques multi-temporelles de Sentinel (L2A) avec une fréquence de 5 jours et une résolution de 10 mètres et applique la méthode FAO du bilan hydrique. Elle permet ainsi (i) d'estimer les pertes en eau par évapotranspiration à partir de données spatiales (estimation de la biomasse et de la fraction de sol nu) et de données météo (évapotranspiration de référence), (ii) d'intégrer des apports en eau dans le "système parcelle" : pluie et irrigation, (iii) de modéliser le compartiment "sol" du "système parcelle" en estimant sa réserve utile. L'application est aujourd'hui opérationnelle et en cours d'industrialisation.



Figure 15 - Capture d'écran de la plateforme internet SAT-IRR montrant l'évolution temporelle de l'indice de végétation sur une parcelle.



Estimer et cartographier l'humidité des sols à l'échelle sub-parcellaire

Nicolas Baghdadi (IRSTEA, UMR TETIS Maison de la télédétection)

Organisations associées au projet : Maison de la télédétection, CES Theia

Afin de permettre aux agriculteurs d'adapter leurs dose et fréquence d'irrigation à l'état d'humidité du sol, les données radar sont utilisées pour estimer et cartographier l'humidité de surface des sols nus (premiers 5-10 centimètres). Estimer l'humidité d'un sol couvert demande de coupler aux données radar, des données optiques pour prendre en compte les caractéristiques de la végétation. Les données utilisées sont issues des séries d'images Copernicus radar (Sentinel-1) et optique (Sentinel-2). L'algorithme d'inversion du signal radar utilise les réseaux de neurones. Il est appliqué sur les parcelles agricoles extraites des cartes d'occupation des sols élaborées par le CES Occupation des sols de Theia. Le produit final est proposé à une échelle intra-parcellaire (à partir de 0,2 hectare). Grâce à une grande campagne de terrain près de la ville de Montpellier (près de 500 mesures in situ), l'estimation de l'humidité des sols sur ces cartes atteint une précision de l'ordre de 6 vol.%. D'autres sites ont été testés notamment à l'étranger (Liban, Maroc, Italie, ...).

POUR PLUS D'INFORMATION :
<https://www.theia-land.fr>

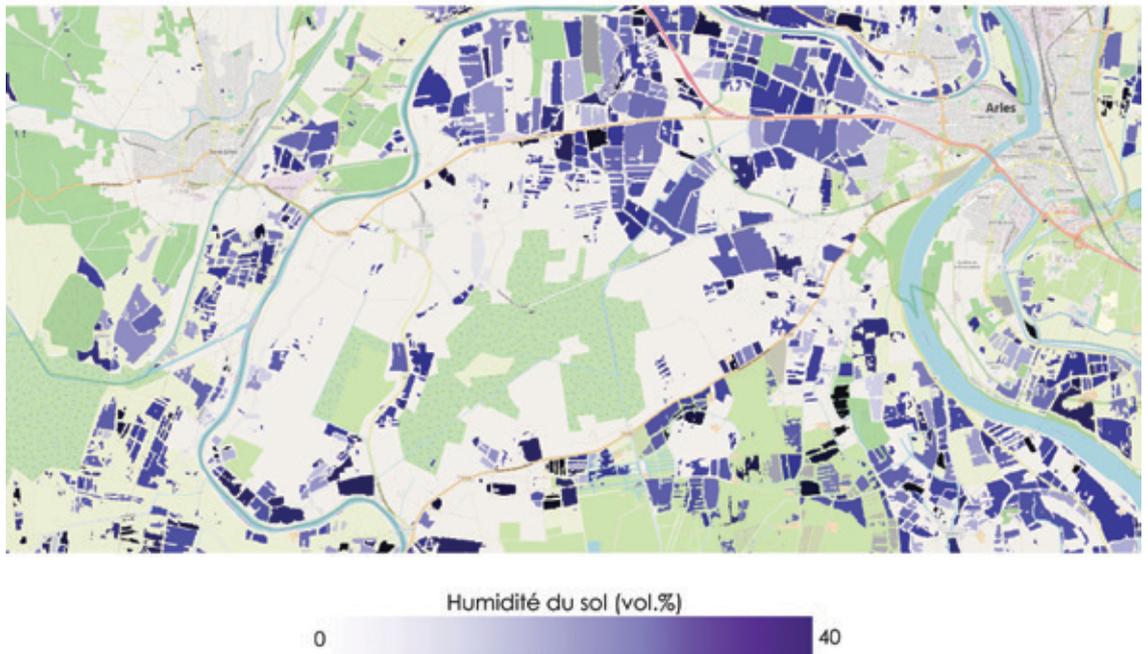


Figure 16 - Carte de l'humidité du sol (volume en %) pour les parcelles (plus sombres quand plus humides) dans la région d'Arles, le 19 septembre 2018.



Identifier les paramètres biophysiques des cultures pour l'agriculture de précision

PROJET VERDE

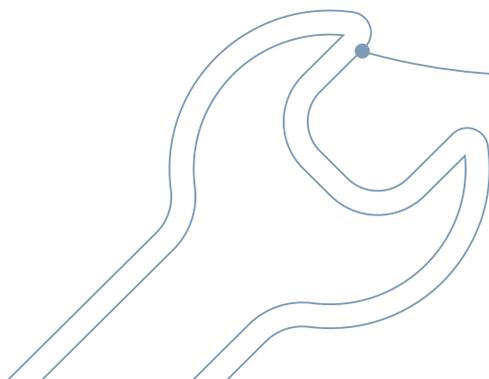
Charlotte Gabriel-Robez (AIRBUS Defense and Space)

POUR PLUS D'INFORMATION :
<https://www.intelligence-airbusds.com/monitoring-services-for-agriculture/#verde>

Permettre aux agriculteurs de connaître plus précisément l'état de leurs cultures et d'adapter les traitements ou l'irrigation en fonction des besoins à l'échelle intra-parcellaire, est l'objectif du projet Verde. Verde fournit automatiquement des cartes caractérisant la végétation, clippées à la parcelle, à l'aide d'une vaste gamme d'images satellitaires et véhicule aérien motorisé (UAV). L'interface de programmation d'application (API) permet une analyse clé en main basée sur l'extraction d'informations biophysiques caractérisant le statut des cultures (couvert brun, couvert vert, indice foliaire, teneur en chlorophylle...). L'API peut être appelée de n'importe quel portail de l'agriculture de précision. Le service Airbus Verde utilise le processeur Overland, une suite de traitement d'image optique développée par Airbus afin de générer des cartes de végétation telles que l'indice de surface foliaire ou le contenu en chlorophylle de la feuille. Les premiers algorithmes ont été développés au début des années 2000 et ont été constamment améliorés depuis cette date. Overland est capable de traiter une large gamme d'images multi-spectrales, couvrant des domaines spectraux allant de 0,4 à 2,5 microns, provenant de diverses sources (satellite, aéroporté, UAV) et de résolutions spatiales. Les besoins en eau de chaque culture sont alors précisés par extraction des coefficients de culture à partir de la fraction de couvert vert qui est dérivé des images satellites et offre ainsi un meilleur ajustement au cycle de culture que la méthode FAO56. L'API est opérationnelle et fournit ainsi des séries temporelles de paramètres biophysiques dérivés d'images satellite pour mieux comprendre l'état des cultures tout au long de la saison culturale et leurs besoins en eau en particulier.



Figure 17 - Application sur smartphone et tablette.





Un modèle de culture spatialisé

PROJET SARRA-0

Christian Baron (CIRAD, UMR TETIS Maison de la télédétection)

L'objectif du Projet Sarra-0 est de fournir aux décideurs et agriculteurs des services climatiques durant la saison des cultures : alerte précoce sur l'état des cultures, prévisions de rendements, permettant notamment d'optimiser les stratégies de semis et/ou d'irrigation. Il permet aussi d'analyser l'impact de la variabilité et du changement climatique sur les cultures et pratiques agricoles.

SARRA-0 est la version spatialisée, multi-scalaire, du modèle de culture SARRA-H, qui vise à surveiller l'état des cultures, effectuer des prévisions de rendement et à fournir des services climatiques : de l'échelle territoriale à régionale. Il peut utiliser différentes sources de données météorologiques et de précipitations estimées à partir d'images satellite. Ses cartes en sortie permettent de détecter et de qualifier en temps semi-réel des zones présentant de fortes anomalies, d'estimer les stocks d'eau, de tester différentes stratégies de semis et/ou d'irrigations... Initialement développé pour les principales céréales des pays tropicaux, il a été paramétré et vérifié pour différents cultivars de mil, de sorgho et de maïs. Il a aussi été calibré sur le riz, le blé, le soja et enfin le coton. Il est utilisé dans : (i) un large éventail de thématiques allant de la parcelle à la région : suivi des cultures, estimation et prévision des rendements, système d'alerte précoce, impacts et adaptation au changement climatique... et (ii) un large éventail d'environnements et d'applications : principalement dans les pays tropicaux d'Afrique [système d'alerte précoce], au Brésil [zonage agro-climatologique et sécurisation d'emprunts] mais aussi dans les pays plus tempérés à froids : en France, en Allemagne, aux USA. Il permet de prendre en compte les stratégies paysannes : i) choix de cultivars [photopériodique ou non], ii) densité de semis, iii) date de semis ou stratégies de semis, iv) doses d'irrigations ou stratégies d'irrigation et v) niveau d'intensification [technique et fertilisation] variant de très faible à optimal.

Plus de 60 publications, SARRA-0 est utilisé depuis 2016 par l'AGRHYMET, Niger, dans leur système d'alerte précoce couvrant 17 pays de l'Afrique de l'Ouest. Des formations ont été effectuées pour 8 pays de l'Afrique de l'Ouest.

POUR PLUS D'INFORMATION : <http://sarra-h.teledetection.fr/>

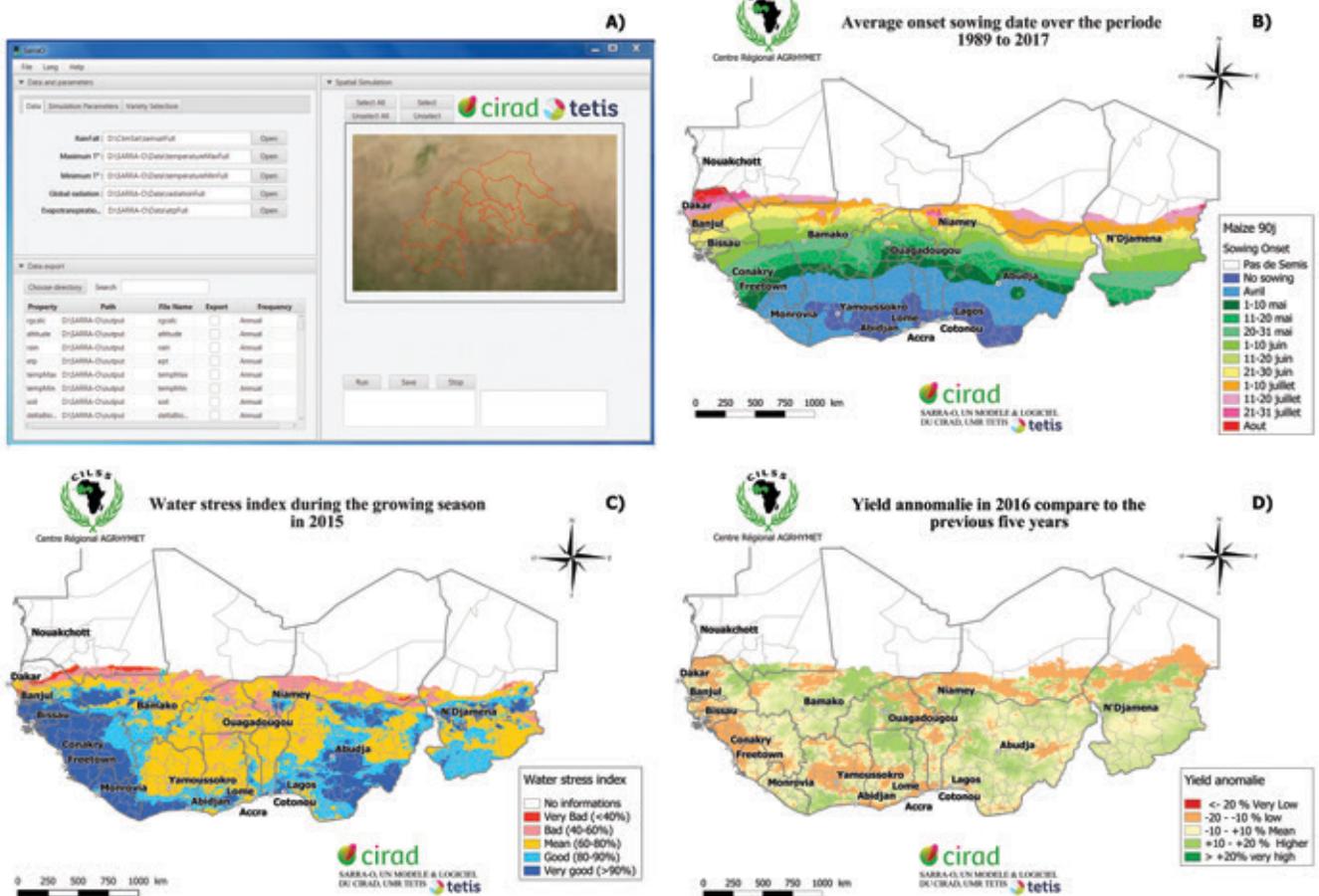


Figure 18 - Le logiciel SARRA-O et différents types de sorties : A) Interface utilisateur, B) Estimation des dates de semis moyennes, C) Indice de stress hydrique de la culture durant la saison, D) Anomalie des rendements à la récolte comparé aux 5 années précédentes.



Glossaire

AFB : Agence Française pour la Biodiversité

AFD : Agence Française de Développement

BRLI : BRL Ingénierie

CES : Centres d'Expertise Scientifique

CESBIO : Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère

CICOS : Commission Internationale du Bassin Congo-Oubangui-Sangha

Cirad : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

CNR : Compagnie Nationale du Rhône

CLS : Collecte Localisation Satellites

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

COP : Conférence de Parties

FAO : Food and Agriculture Organisation

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IPBES : Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

ISBA : Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère

LEGOS : Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales

MNE : Modèle Numérique d'Élévation

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ODD : Objectifs de Développement Durable

OIEau : Office International de l'Eau

OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal

SIG : Système d'Information Géographique

SIH : Système d'Information Hydrologique

SWOT : Surface Water Ocean Topography

Alors que l'eau est essentielle au développement de nos sociétés, elle subit aujourd'hui une pression anthropique de plus en plus importante sous l'effet d'un grand nombre de facteurs tels que l'accroissement démographique, l'urbanisation rapide, l'industrialisation, la pollution et l'évolution des modes de vie.

Dans ce contexte, des mesures concrètes doivent être mises en œuvre afin de tendre vers une gestion intégrée et durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques. Cependant, une bonne connaissance et compréhension des ressources en eau est cruciale pour agir efficacement. L'acquisition de données hydrologiques constitue donc une activité indispensable dans la prise de décision.

Après un premier numéro de la collection « expertise du PFE » sur les enjeux liés à la connaissance, les expertises développées pour répondre à ces enjeux en France et à l'international, ce nouveau numéro fait un focus sur l'acquisition de données hydrologiques spatiales et présentent diverses réalisations des acteurs français du domaine de l'eau, mettant en avant la complémentarité des données satellitaires dans l'amélioration de nos connaissances de l'information hydrologique de terrain.

Le Partenariat Français pour l'Eau est la plateforme de référence des acteurs français de l'eau publics et privés, actifs à l'international. Elle porte depuis plus de 10 ans un plaidoyer au niveau international pour que l'eau constitue une priorité dans les politiques du développement durable et favorise les échanges entre les savoir-faire français et ceux des autres pays. Elle porte avec ses différents membres (Etat et établissements publics, collectivités, ONGs, entreprises, Instituts de recherche et de formation ainsi que des experts qualifiés) des messages collectifs pour l'eau dans des enceintes internationales telles que les Nations unies, les Conventions climat et biodiversité, les Forums politiques de haut niveau et la Semaine mondiale de l'eau de Stockholm. En savoir plus : www.partenariat-francais-eau.fr



En collaboration avec :



Réalisé grâce au soutien de :



51 rue Salvador Allende
92027 Nanterre / France

+33 (0) 1 41 20 19 49
+33 (0) 1 41 20 16 09

www.french-water-partnership.fr
www.partenariat-francais-eau.fr