



HAL
open science

Quand la surveillance des plans d'eau prendra de la hauteur

Thierry Tormos, Nathalie Reynaud, Pierre-Alain Danis, Tristan Harmel, Morin Guillaume, Jean Michel Martinez, Alice Andral, Arthur Coque, Tiphaine Peroux, Jean-Marc Baudoin

► **To cite this version:**

Thierry Tormos, Nathalie Reynaud, Pierre-Alain Danis, Tristan Harmel, Morin Guillaume, et al.. Quand la surveillance des plans d'eau prendra de la hauteur. Sciences Eaux & Territoires, 2021, 37, pp.114-123. 10.14758/SET-REVUE.2021.4.21 . hal-03616972

HAL Id: hal-03616972

<https://hal.inrae.fr/hal-03616972>

Submitted on 23 Mar 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

Quand la surveillance des plans d'eau prendra de la hauteur

Les outils du spatial, qui ne cessent de progresser, apparaissent aujourd'hui incontournables pour compléter efficacement et à moindre coût les programmes de surveillance des paramètres ciblés par la directive cadre sur l'eau. Plusieurs paramètres peuvent être suivis, comme la température de l'eau, la transparence, la concentration en chlorophylle-a ou le marnage. Cet article propose un aperçu des avancées françaises récentes pour caractériser ces paramètres, à partir de satellites d'intérêts au travers notamment des travaux conduits dans les centres d'expertise scientifique du Pôle national de données et services dédié aux surfaces continentales (THEIA).



évaluation de l'état écologique des plans d'eau, imposée par la directive cadre européenne sur l'eau (DCE), repose majoritairement sur les données acquises *in situ* par les États membres dans le cadre des réseaux de surveillance réglementaires. Les méthodes traditionnelles de surveillance, bien que déjà riches d'information, ne donnent néanmoins qu'une vision partielle dans le temps et dans l'espace des caractéristiques des milieux et des pressions qu'ils subissent. Ce manque d'information peut ainsi conduire à une évaluation erronée de l'état écologique (Soulignac *et al.*, 2016; encadré 1), avec un impact potentiel sur la robustesse des programmes de mesures et de gestion. Par ailleurs, en France, seuls les plans d'eau de plus de cinquante hectares sont concernés par la surveillance réglementaire. Intensifier la surveillance avec les méthodes actuelles étant peu envisageable financièrement, la télédétection satellitaire offre des potentialités remarquables (Papatanasopoulou *et al.*, 2019) pour compléter les données

in situ à moindre coût et consolider ainsi l'évaluation de l'état écologique des plans d'eau.

Aujourd'hui, les nouvelles générations de satellites dont les produits sont accessibles gratuitement, offrent un très bon compromis entre la précision géographique au sol (résolution spatiale) et la fréquence de revisite (résolution temporelle), adapté aux plans d'eau ciblés par la mise en application française de la DCE et au suivi de leurs dynamiques saisonnières. La sensibilité des capteurs embarqués par ces satellites (résolution radiométrique) et leur capacité à décrire les caractéristiques des cibles au sol (résolution spectrale) ont également progressé, bien que la plupart d'entre eux ne soient pas dédiés exclusivement à l'observation des eaux intérieures. Les satellites aux capteurs dédiés (exemple Sentinel-3 et MODIS à 300 et 250 m respectivement) restent quant à eux trop approximatifs spatialement pour cet exercice et les plus résolus spatialement présentent des performances radiométriques et spectrales limitées et un temps de revisite trop faible pour assurer une surveillance adéquate.

1 Caractéristiques des principaux satellites pour l'étude des plans d'eau DCE et paramètres potentiellement mesurables.

La résolution temporelle correspond au temps de revisite d'une même cible ; la résolution spatiale correspond à la taille du pixel ou de l'empreinte au sol ; la résolution spectrale correspond au nombre de bandes et à la plage de longueurs d'onde couverte.

Satellite	Couverture temporelle	Résolution temporelle moyenne	Résolution spatiale	Capteur	Type de capteur*	Résolution spectrale	Paramètre(s) mesurables(s)**
LANDSAT 4-7	1982-présent	16 jours	30-120 m	TM /ETM+	Optique & IRT	8 bandes 0,45-2,35 µm	chl _a , mes, ds, temp
LANDSAT 8	2013-présent	16 jours	30-100 m	OLI & TIRS	Optique & IRT	11 bandes 0,43-12,51 µm	chl _a , mes, ds, temp
SENTINEL-2	2015-présent	5 jours	10-60 m	MSI	Optique	13 bandes 0,43-2,29 µm	chl _a , mes, ds, mar
SENTINEL-1	2015-présent	6 jours	~ 5-90 m	C-SAR	Radar	5,355-5,455 GHz	mar
SWOT	Lancement en 2022	1 à 4 visites sur un cycle de 21 jours	50 m	KaRIn	Interféromètre Radar	35,65-35,85 GHz	mar
TRISHNA	Lancement en 2024	3 jours	57-90 m	IRT	IRT	4 bandes 8,5-12,1 µm	temp

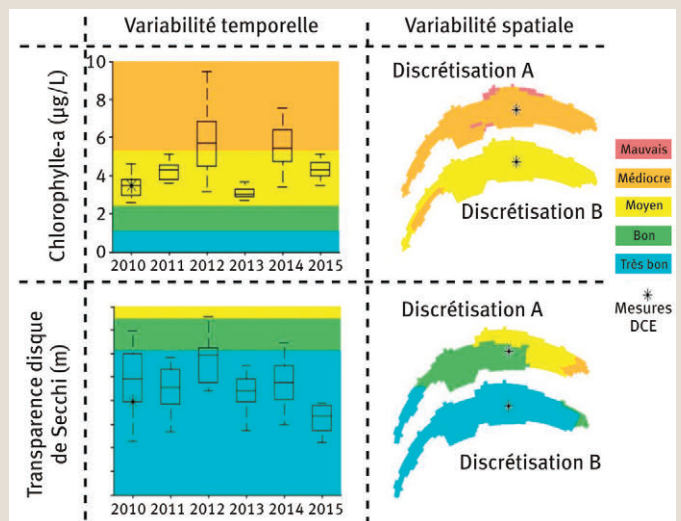
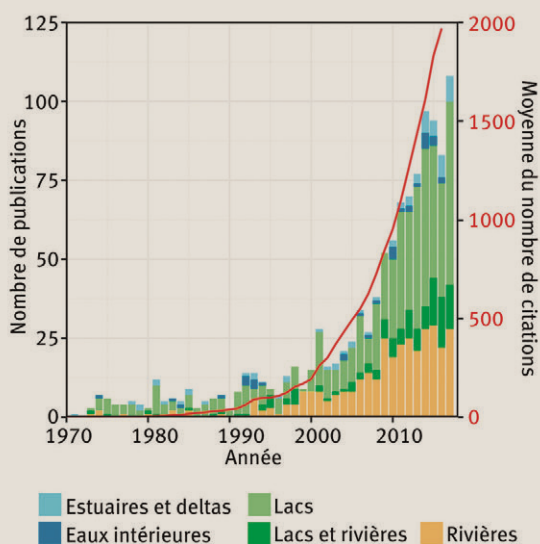
* IRT = infrarouge thermique ; ** chl_a = concentration chlorophylle-a, mes = concentration en matières en suspension, ds = transparence (profondeur du disque de secchi), temp = température de surface de l'eau, mar = marnage.

Plusieurs paramètres soutenant la mise en œuvre de la DCE peuvent ainsi être suivis, comme la température de l'eau, la transparence, la concentration en chlorophylle-a ou le marnage. Compte tenu des fortes potentialités, la littérature internationale sur ce sujet est florissante (figure 1). Cet article se propose de présenter un aperçu des avancées françaises récentes en recherche et développement pour caractériser ces paramètres, à partir des satellites d'intérêts mentionnés dans le tableau 1, au travers notamment des travaux conduits dans les Centres d'expertise scientifique (CES) du Pôle national de données et services dédié aux surfaces continentales (THEIA).

1 UNE ÉVALUATION DE L'ÉTAT ÉCOLOGIQUE DES PLANS D'EAU SENSIBLE ?

Les travaux de Soulignac *et al.* (2016) montrent que l'évaluation DCE de l'état des plans d'eau est significativement sensible aux dates des échantillonnages et à leur localisation (généralement quatre dates tous les trois ans par plan de gestion de six ans à l'aplomb du point le plus profond du lac). Pour quantifier le biais lié à la variabilité temporelle (partie gauche de la figure), les auteurs ont analysé la sensibilité de la classe d'état pour différentes combinaisons de quatre dates, tirées aléatoirement dans les fenêtres temporelles du protocole d'échantillonnage, sur des lacs suivis plus régulièrement (une à deux fois par mois). Pour quantifier l'effet de la localisation (partie droite de la figure), les états écologiques possibles sur l'ensemble du lac ont été calculés au pas journalier, d'après les résultats d'une modélisation de la qualité de l'eau sur un plan de gestion. Les résultats sont illustrés ci-contre sur le lac Léman pour les paramètres chlorophylle-a et transparence. Par exemple, l'état évalué comme moyen en 2010 aurait été évalué médiocre en 2012 et 2014 pour la chlorophylle-a. Pour le paramètre transparence, dans les prédictions les plus pessimistes, la structure spatiale peut engendrer des évaluations différentes selon la localisation du point de surveillance.

1 Articles publiés par année dans le domaine de la télédétection des eaux continentales. La moyenne du nombre de citation correspond à la moyenne de la somme des citations sur le nombre d'année de tous les papiers depuis leur date de publication (d'après Topp *et al.*, 2020).



Pour la variabilité temporelle, la barre horizontale des boîtes à moustache représente la médiane des états possibles. Pour la variabilité spatiale, la discrétisation A donne les résultats des prédictions les plus pessimistes sur la période (2010-2016), la discrétisation B les plus optimistes.

La température de l'eau : IRT Landsat et TRISHNA

La température joue un rôle essentiel et structurant dans le fonctionnement des écosystèmes lacustres. Elle constitue par ailleurs l'un des paramètres physico-chimiques à prendre en compte pour l'évaluation de l'état écologique des plans d'eau au titre de la DCE, parmi les paramètres physico-chimiques généraux dits « soutenant la biologie ». Aucun indicateur n'existe pourtant aujourd'hui pour ce paramètre en France, et à notre connaissance dans les autres États membres, pour les plans d'eau. Ceci s'explique par un besoin d'informations détaillées sur la dynamique spatiale (horizontale et verticale) et temporelle des structures thermiques, y compris durant la période de mélange hivernale (période clé pour l'apport en oxygène dans les parties profondes des plans d'eau). Le réseau national thermie (RNT) plans d'eau a été déployé dans l'objectif de combler ce besoin, mais le nombre de sites échantillonnés n'est pas encore suffisamment représentatif de la diversité nationale et il n'offre pas de vision spatialisée des structures thermiques horizontales. La télédétection peut contribuer, par couplage avec la modélisation, à enrichir les informations acquises.

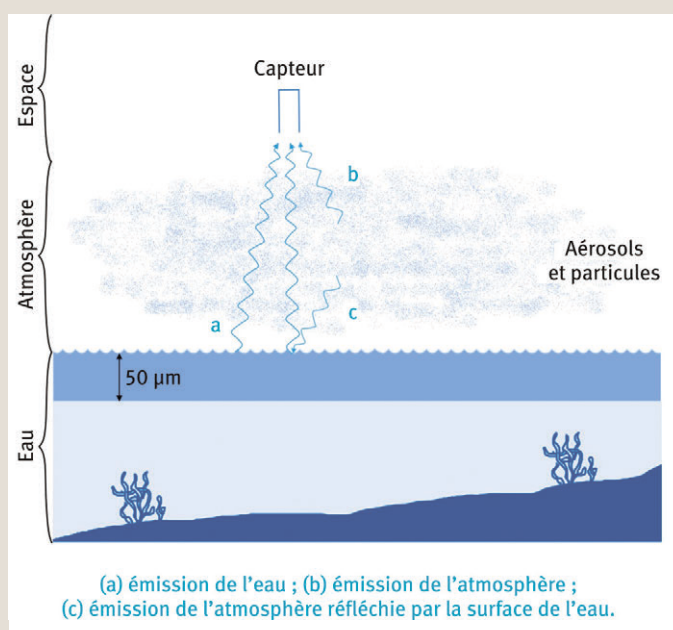
Vue de l'espace, l'estimation de la température de surface de l'eau est mesurable à partir de la télédétection infrarouge thermique (IRT) (encadré ②). Le programme satellitaire Landsat fournit depuis les années 1980 une série continue d'images dans l'IRT qui nous permet aujourd'hui de disposer de chroniques long terme, à cent mètres de résolution spatiale, à raison d'une mesure tous les seize jours dans des conditions d'acquisition idéales

(absence de nuage). Dans le cadre du CES « Température de surface et émissivité », le pôle « Écosystèmes lacustres » (ECLA, OFB-INRAE-USMB) produit des images de température sur l'ensemble des surfaces en eaux continentales de France métropolitaine et d'Outre-mer visibles par l'imagerie Landsat. Cette production mise à jour annuellement est diffusée sur la plateforme de données du pôle ECLA (<https://data.ecla.inrae.fr/>) et très prochainement sur celle du pôle THEIA. La méthode, qui consiste à corriger des effets atmosphériques l'énergie émise dans l'IRT par les surfaces en eau, est régulièrement validée à partir des données *in situ* historiques de la surveillance et des réseaux complémentaires. Cette validation repose actuellement sur une centaine de lacs. L'erreur moyenne sur l'estimation de la température de surface de l'eau est de $\pm 1,2$ degrés Celsius (Simon *et al.*, 2014 ; Prats *et al.*, 2018). Dans les années à venir, cette télésurveillance sera complétée par les observations du satellite TRISHNA (*Thermal infraRed Imaging Satellite for High-resolution Natural resource Assessment*) qui permettra de gagner notamment en résolution spatiale (50 m) et temporelle (revisite tous les trois jours) (tableau ①).

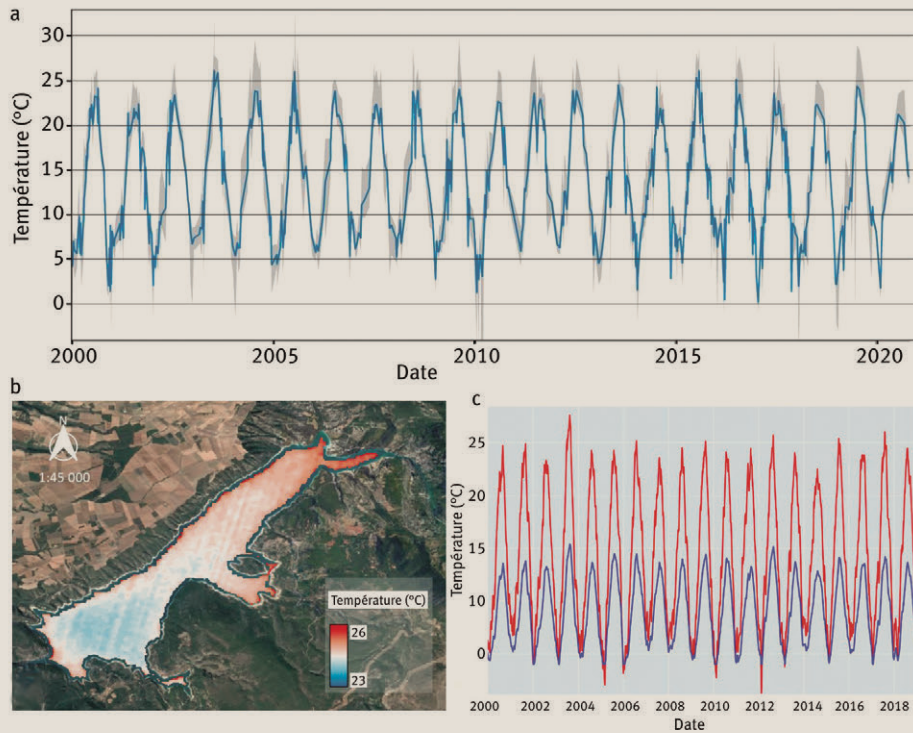
Les informations sur l'évolution temporelle et la distribution spatiale des températures de surface des plans d'eau fournies par la télésurveillance permettent de calibrer des modèles thermodynamiques des plans d'eau français (Prats *et al.*, 2020 ; figure ②). Ces modèles, prédisant les structures thermiques au pas de temps journalier sur l'ensemble de la colonne d'eau, contribueront à terme à la définition de valeurs seuils pour un indicateur DCE sur la température.

② QU'EST-CE QUE LA TÉLÉDÉTECTION IRT POUR LA MESURE DE TEMPÉRATURE DE SURFACE DE L'EAU ?

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique à sa surface (premiers micro-mètres = température de peau), dont la distribution spectrale dépend de la température. Plus un corps est chaud, plus son pic de rayonnement a lieu vers les courtes longueurs d'onde, la température étant inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Les températures des surfaces terrestres (entre -50 et $+50$ °C) sont visibles dans le domaine de l'infrarouge thermique (IRT). La relation entre la distribution spectrale de la lumière et la température est bien connue pour les corps noirs. Un corps noir est un objet théorique qui absorbe parfaitement toute la lumière reçue, sans en réfléchir ni en transmettre. Dans l'IRT, la distribution spectrale de la lumière de l'eau est identique à celle d'un corps noir mais dans un degré moindre (à 98 % environ). Ce sont ces propriétés physiques qui rendent possible la mesure de la température de peau, très bien reliée à la température de surface des plans d'eau (Prats *et al.*, 2018). L'observation satellitaire est réalisée dans la fenêtre IRT comprises entre 8-14 μm pour limiter l'interférence avec les rayonnements atmosphériques, même si des corrections restent nécessaires notamment en présence de vapeur d'eau. La figure ci-dessus illustre les différents rayonnements captés dans l'IRT au-dessus de l'eau.



② **Caractérisation thermique du lac de Sainte-Croix : (a) chronique de température de peau dérivée de l'imagerie satellitaire IRT Landsat (en bleu les températures moyennes à l'échelle du lac et en gris les extremums) ; (b) températures à la surface au 30 août 2015 ; (c) chronique temporelle des profils de température de surface (en rouge) et du fond (en bleu) au pas journalier par le couplage modélisation et télédétection.**



La transparence et la chlorophylle-a : imagerie Landsat et Sentinel-2

La transparence de l'eau est un paramètre physico-chimique couramment utilisé pour estimer la qualité de l'eau et intervient dans l'évaluation réglementaire de l'état écologique des plans d'eau. Elle est habituellement estimée sur le terrain à partir de mesure de la profondeur de disparition du disque de Secchi. La concentration en chlorophylle-a (chl_a) intervient directement dans le calcul d'un des indicateurs biologiques pour la DCE, l'IPLAC (indice phytoplanctonique lacustre) en tant que proxy de l'abondance du phytoplancton. Le protocole standardisé d'échantillonnage pour l'IPLAC préconise une mesure intégrée sur la zone euphotique (zone superficielle dans laquelle pénètre la lumière), soit en laboratoire à partir d'un échantillon prélevé *in situ*, soit directement *in situ* à l'aide de sondes fluorimétriques.

Ces deux paramètres, parfois soumis à des phénomènes locaux et susceptibles d'évoluer ou de présenter des événements très ponctuels dans le temps, ne sont cependant mesurés qu'en un seul point du lac, généralement sur deux années par plan de gestion de six ans. Vue de l'espace, ces paramètres sont mesurables de manière intégrée par télédétection de la couleur de l'eau (encadré ⑤) sur la zone euphotique. Des efforts de R&D restent à fournir pour utiliser à terme cet outil dans la surveillance DCE, notamment pour gagner en généralité et en précision. Trois défis sont actuellement identifiés par la communauté.

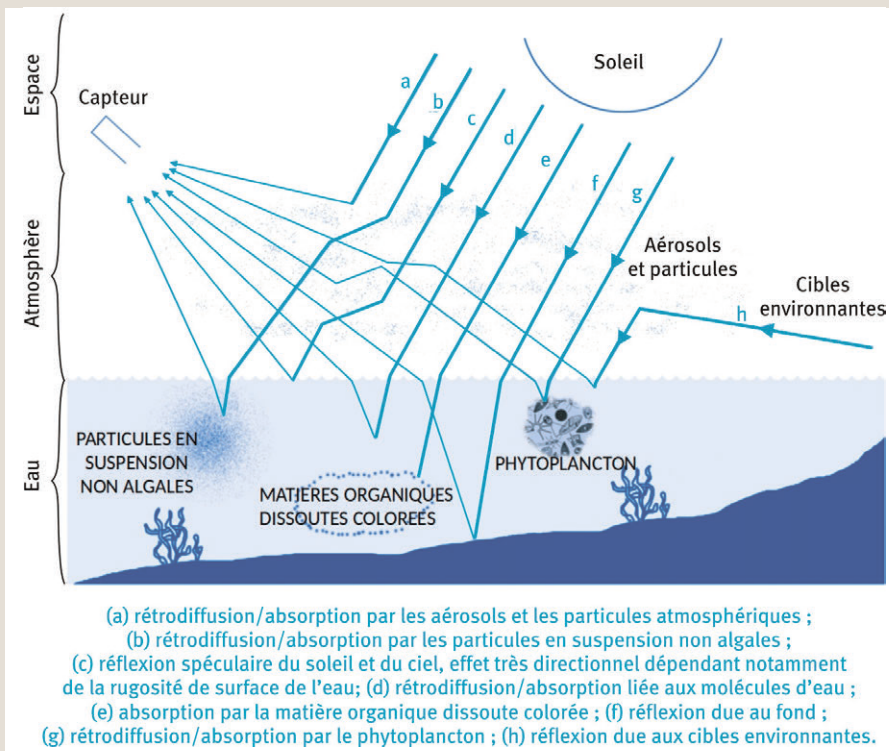
Le premier défi consiste à démêler le signal sortant de l'eau des autres signaux perturbateurs arrivant au capteur satellitaire (encadré ⑥). C'est à partir de ce signal que sont déduits les différents paramètres liés aux matières colorées, dont la transparence et la concentration en chl_a. Le CES « Couleurs des eaux continentales » a développé l'algorithme GRS (Harmel *et al.*, 2018) qui prend notamment mieux en compte les effets du reflet du soleil sur la surface de l'eau. Des progrès restent à apporter sur la quantification des aérosols et les effets d'environnement (Pahlevan *et al.*, 2021).

Le second défi réside dans la localisation des pixels correspondant exclusivement à l'eau, c'est-à-dire pour lesquels le fond n'est pas visible et qui ne sont pas dans l'ombre des nuages. La méthode la plus utilisée repose le seuillage d'un indice de détection d'eau, comme le *Normalized Difference Water Index*, implémenté dans GRS. Elle donne des résultats satisfaisants mais des confusions persistent notamment avec les ombres de nuage. Les méthodes basées sur l'intelligence artificielle, comme l'algorithme WaterDetect (Cordeiro *et al.*, 2021), sont actuellement testées.

Le troisième défi vise à traduire le signal sortant de l'eau capté par les satellites en paramètres de qualité. Plusieurs approches sont possibles (Mishra *et al.*, 2017) : en reliant directement le signal aux mesures *in situ* du paramètre recherché sur un échantillon de sites (approche empirique) ou en reliant les paramètres optiques des constituants de l'eau au signal satellitaire par modélisation (approche analytique). Alors que l'approche empirique

⑤ QU'EST-CE QUE LA TÉLÉDÉTECTION COULEUR DE L'EAU ?

La couleur de l'eau est liée à la présence de matières colorées dans la colonne d'eau qui vont interagir avec la lumière provenant du soleil par des processus d'absorption et de diffusion. Les plans d'eau oligotrophes (peu productifs) sont souvent de couleur bleue, en raison de la prépondérance de la rétrodiffusion de la partie bleue du spectre lumineux par les molécules d'eau et de l'absorption de l'eau dans les autres parties du spectre. Ce processus se complexifie lors de la présence combinée d'autres matières colorées. Les plans d'eau plus eutrophes ont généralement des teintes vertes liées à la présence importante de chlorophylle-a (pigment principal du phytoplancton), qui absorbe les parties bleue et rouge du spectre. De nombreux lacs contiennent également de la matière organique dissoute colorée, des matières minérales ou encore du phytoplancton contenant des pigments spécifiques (la phycocyanine des cyanobactéries par exemple), offrant ainsi une palette de couleurs diversifiée. Au niveau du capteur satellitaire, l'information sortant de l'eau est perturbée à la fois par la lumière diffusée par les molécules et les aérosols atmosphériques, par la lumière réfléctée directement par la surface de l'eau (effet miroir) et par les cibles environnantes (phénomènes d'adjacence). La figure ci-dessous schématise les différentes informations captées par le satellite au-dessus de l'eau. À noter que la couleur de l'eau dépend également de la lumière réfléchie par le fond, cependant les zones impactées ne sont pas étudiées en télédétection couleur de l'eau.

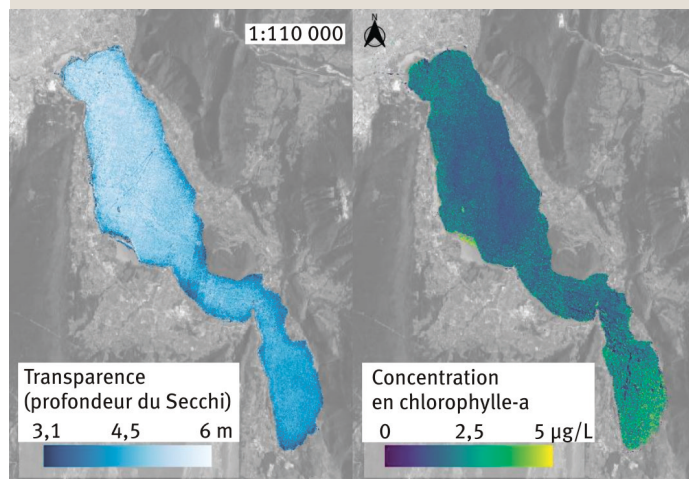


est simple à réaliser mais peu générique car dépendante de l'échantillon, l'approche analytique est à l'inverse plus générique mais plus complexe à mettre en œuvre compte tenu des données optiques nécessaires au calage des modèles. Pour réaliser ce compromis entre généralité et spécificité, le CES construit actuellement, sur la base d'une typologie de la couleur de l'eau (Spyrakos *et al.*, 2018; Neil *et al.*, 2019), un portefeuille d'algorithmes adaptés à la diversité des milieux aquatiques rencontrés dans les eaux intérieures françaises permettant de calculer chacun des paramètres. La figure ⑤ illustre un exemple de résultat obtenu pour la transparence et la concentration en chl a sur le lac d'Annecy (Haute-Savoie) avec les algorithmes dédiés à ce type d'eau.

Le marnage : imagerie Sentinel-1 & 2 et altimétrie SWOT

Les fluctuations du niveau d'eau des plans d'eau (marnage) impactent fortement le fonctionnement des écosystèmes lacustres et la biodiversité qu'ils abritent. Du point de vue de la DCE, le marnage est une caractéristique prise en compte dans les règles de typologie

⑤ Cartographie sur le lac d'Annecy (74) à partir de l'imagerie Sentinel-2 (10 m) de la transparence (profondeur de Secchi) à gauche, le 03 août 2016 ; et de la concentration en chlorophylle-a à droite le 7 juillet 2018.



des plans d'eau. Pour les masses d'eau fortement modifiées, il constitue également une contrainte technique obligatoire à considérer pour l'évaluation du potentiel écologique. Par ailleurs il intervient dans le calcul de l'indice LHYMO, en cours de finalisation, qui propose une l'évaluation globale de l'état hydromorphologique des plans d'eau.

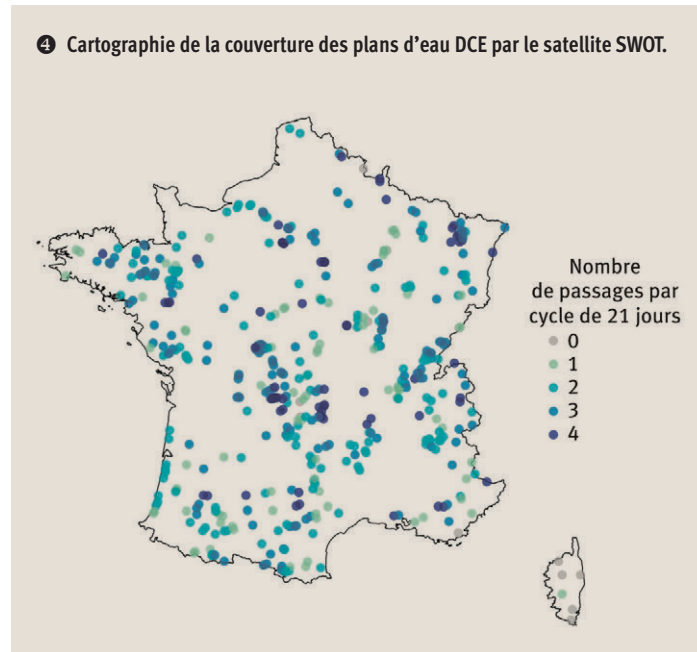
Malgré ces nécessités réglementaires, le marnage des lacs est généralement très peu documenté. S'il est pourtant suivi finement sur les retenues gérées, la donnée reste difficilement accessible. Les méthodes d'observation directe du niveau de l'eau ne permettent pas quant à elles de disposer de mesures suffisamment fréquentes pour caractériser correctement ces fluctuations, en particulier pour les plans d'eau les plus difficiles d'accès. La pose d'enregistreurs automatiques à haute-fréquence est une alternative envisageable mais trop coûteuse pour la surveillance nationale.

Pour combler ce manque de données, la télédétection offre deux possibilités de mesure du marnage : une mesure directe par altimétrie radar et une mesure au travers du suivi des variations de superficie des surfaces en eaux, directement reliées aux variations de hauteurs d'eau (encadré 4).

L'altimétrie radar est déjà utilisée de manière opérationnelle pour le suivi du marnage des grands lacs et fleuves au travers de la base de données Hydroweb (<http://hydroweb.theia-land.fr/>). Néanmoins, les précisions géographiques au sol des altimètres actuels ne permettent pas de couvrir les plans d'eau français (seul le lac Léman est actuellement documenté dans Hydroweb). L'arrivée imminente de l'altimètre radar SWOT (prévu en 2022) améliorera sensiblement cette couverture, avec une mesure altimétrique centimétrique rendue possible sur toute surface en eau de largeur supérieure à 100 m, voire 50 m. La majorité des plans d'eau ciblés par la mise

en application française de la DCE pourront donc être suivis par SWOT, avec une fréquence a minima hebdomadaire pour près de la moitié d'entre eux (figure 4).

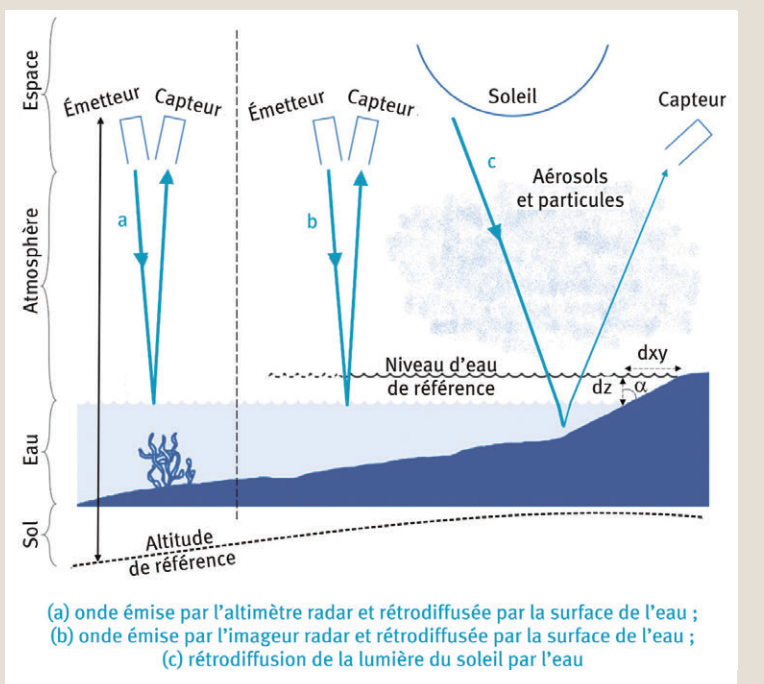
Le suivi en parallèle des superficies des surfaces en eau, par imagerie optique et/ou radar, renforcera cette télésurveillance dans le temps et permettra de caractériser des systèmes de plus petites tailles. Les travaux de Simon *et al.* (2015) ont montré qu'avec des images de résolution spatiale inférieure ou égale à 10 m, la précision de la mesure du marnage est conservée par rapport aux résolutions plus fines. Cependant, la performance de cette méthode reste dépendante de la morphologie



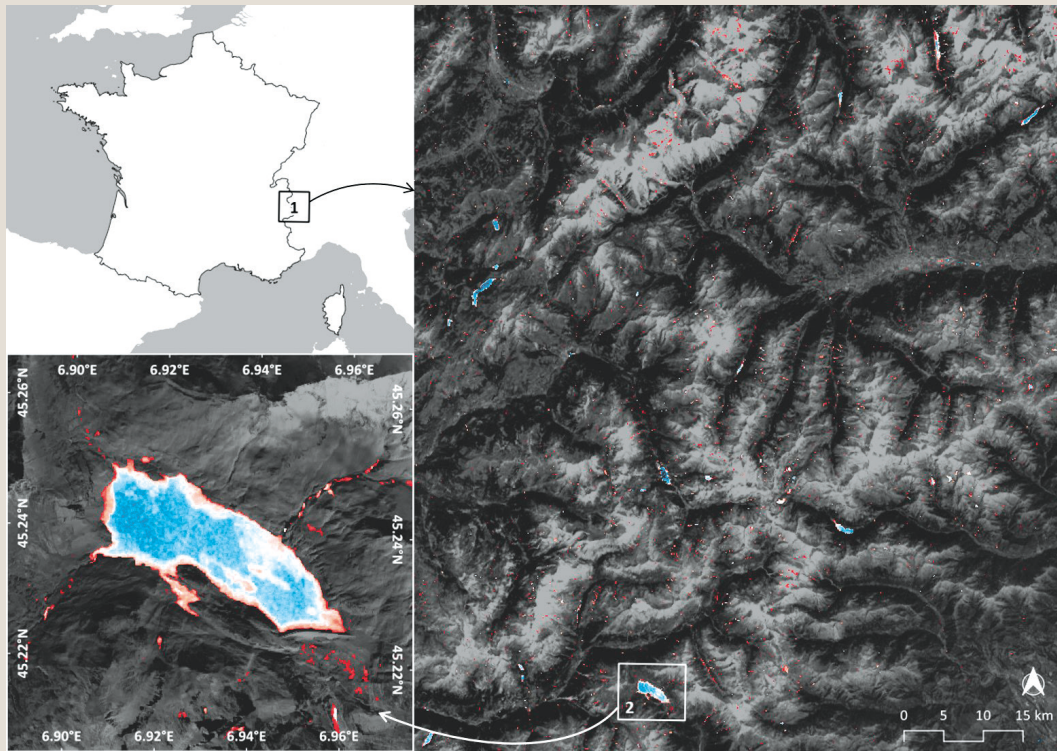
4 QUELLES MÉTHODES DE TÉLÉDETECTION POUR LE SUIVI DU MARNAGE ?

Le marnage peut être mesuré de façon directe par l'altimétrie radar satellitaire. Cette technique active consiste à mesurer le temps de retour d'une onde très haute fréquence (environ 13 GHz) émise depuis le satellite. Le temps de retour dépend de l'altitude du satellite et de l'altitude de la cible au sol. L'altitude du satellite étant connue de façon précise à tout instant grâce aux instruments embarqués, il est possible de calculer l'altitude de la cible au sol. Si la cible se trouve intégralement contenue dans l'emprise de l'onde, la précision de la mesure atteindra le décimètre. Dans le cas contraire, la mesure sera bruitée par les cibles environnantes, diminuant ainsi le niveau de précision.

Le marnage peut également être indirectement mesuré par le suivi de l'évolution des surfaces en eau. L'évolution des superficies est en effet reliée géométriquement aux variations du niveau de l'eau. Plus la pente est douce, plus les variations de superficies sont détectables pour des marnages de faible amplitude. L'extraction des surfaces en eau peut être réalisée par traitement de l'imagerie optique ou radar (voir figure ci-contre). Les deux informations complémentaires permettent de gagner en fréquence de revisite, d'autant plus que la télédétection radar permet d'obtenir une information même en présence de nuages.



⑤ Produit superficie en eau du CES « Cartographie et suivi des surfaces en eau » sur une tuile Sentinel-1 (10 m, une image tous les trois jours) pour l'année 2019 (le zoom en bas à gauche concerne la retenue de Mont-Cenis en Savoie). Le dégradé du rouge vers le bleu donne une indication de la fréquence de détection des pixels en eau sur l'année (en rouge pour les fréquences les plus basses, en bleu pour les fréquences les plus hautes).



des berges: plus la pente est importante, moins les variations de superficies sont détectables à marnage équivalent. Cette analyse de performance reste à mener sur le territoire français. Celle-ci sera facilitée par l'accès aux produits des surfaces en eau du CES « Cartographie et suivi des surfaces en eau » (figure ⑤), issues notamment du couplage de l'imagerie radar Sentinel-1 et l'imagerie optique Sentinel-2, qui sont actuellement en cours d'évaluation et seront diffusés fin 2021 sur la future plateforme HYDROWEB-NG dédiée aux données issues du spatial sur les hydrosystèmes.

Conclusion

Les outils du spatial, qui ne cessent de progresser, apparaissent aujourd'hui incontournables pour compléter efficacement et à moindre coût les programmes de surveillance, notamment réglementaires. À très court terme, la télésurveillance offrira une vision plus détaillée dans le temps et dans l'espace (distribution horizontale) de la température de l'eau, la transparence, la concentration en chlorophylle-a et permettra de mieux suivre le marnage. Elle complétera ainsi les mesures réalisées *in situ*, qui resteront néanmoins indispensables, à la fois pour rendre compte de la dimension verticale de certains paramètres, comme la température et la concentration de la chlorophylle-a et pour continuer de collecter les nombreuses informations nécessaires à l'évalua-

tion, aujourd'hui difficilement estimables par imagerie (richesse spécifique et biomasse du phytoplancton par exemple). En outre, le recours à la télésurveillance agrandira le champ de suivi de ces paramètres aux lacs de taille plus modeste (< 50 ha), qui concentrent eux aussi de nombreux enjeux environnementaux et sociétaux. Des efforts en R&D restent néanmoins à fournir. Ces efforts sont variables en fonction du paramètre étudié: alors que pour la température, les séries temporelles sont déjà en production sur le territoire national, des tests de performances doivent être conduits pour la transparence et la chlorophylle-a, et la phase de prototypage vient de débuter pour le marnage. Les équipes scientifiques associées aux différents CES du pôle THEIA (« Température de surface et émissivité », « Couleurs des eaux continentales », « Cartographie et suivi des surfaces en eau » et « Hauteur des lacs et des rivières »), participent, avec la communauté internationale aussi bien marine que continentale, à ces efforts. Dans cet exercice, la collecte de données de terrain de qualité est indispensable pour le développement des algorithmes et la qualification des produits issus du spatial (encadré ⑤). Mais déjà, pour qu'à terme cette nouvelle information soit utilisée pleinement dans le processus de surveillance voire d'évaluation, il est indispensable que la sphère scientifique s'empare de ces données plus riches dans le temps et dans l'espace et réfléchisse à la manière de les exploiter en complément des mesures *in situ*. ■

5 DES DONNÉES TERRAIN DE QUALITÉ POUR OPÉRATIONALISER LA TÉLÉDÉTECTION SUR LES PLANS D'EAU

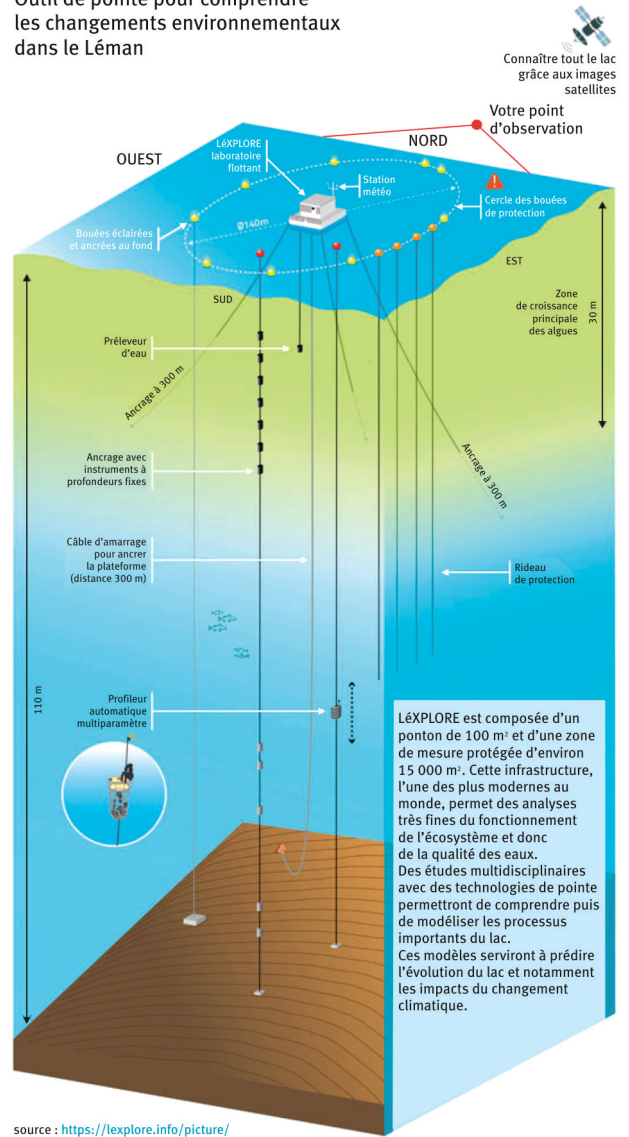
Malgré les progrès grandissant du spatial, les investigations de terrain resteront nécessaires, particulièrement pour récolter les données nécessaires à la calibration des algorithmes (corrections atmosphériques, estimation des paramètres) et à la validation des produits images (détermination et quantification des erreurs). Cet exercice, dit « cal/val », reste un défi majeur en télédétection des eaux intérieures et requiert des données aussi bien optiques (réflectance sortant de l'eau, absorption et diffusion du signal dans la colonne d'eau) qu'écologiques (e.g. transparence, température, concentrations en pigments) acquises avec précision et dans des conditions d'échantillonnage comparables à celles des satellites (aussi bien dans le temps et dans l'espace horizontal et vertical).

Compte tenu de la difficulté de collecter une telle donnée de manière exhaustive sur les différents plans d'eau, des bases de données fédératrices, comme le projet LIMNADES (*Lake Bio-optical Measurements and Matchup Data for Remote Sensing*) au niveau international, ou le projet TELQUEL (TÉLÉdÉtection de QUalité Écologique des Lacs) en France, émergent et feront référence dans les années à venir. Des plateformes de mesure flottantes lacustres voient également le jour. Elles seront à même de collecter ces différentes données quasiment en continu (très haute-fréquence, cf. l'exemple ci-contre de la station LÉXPLORE sur le lac Léman ;

source : <https://lexplore.info/picture/>).

En attendant, la plupart des études, notamment de benchmarking des algorithmes ou faisant appel aux approches d'intelligence artificielle, continuent de se baser essentiellement sur les données de qualité d'eau provenant des réseaux de surveillance réglementaire ou auxiliaires. Cependant, des données réseaux très bruitées par nature compte tenu de la multiplicité des acteurs impliqués rendent encore l'exercice délicat notamment dans l'estimation des erreurs.

LÉXPLORE
Outil de pointe pour comprendre
les changements environnementaux
dans le Léman



Les auteurs

Thierry TORMOS, Pierre-Alain DANIS et Jean-Marc BAUDOIN

Office français de la biodiversité, 510 rue René Descartes, CS 10458, F-13592 Aix-en-Provence Cedex 3, France.
Pôle ECLA, Aix-en-Provence, France.

thierry.tormos@ofb.gouv.fr ; pierre-alain.danis@ofb.gouv.fr ; jean-marc.baudoin@ofb.gouv.fr

Nathalie REYNAUD, Guillaume MORIN, Arthur COQUE et Tiphaine PEROUX

INRAE, UMR RECOVER, 3275 route de Cézanne, CS 40061, F-13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France.
Pôle ECLA, Aix-en-Provence, France.

nathalie.reynaud@inrae.fr / guillaume.p.morin@inrae.fr

arthur.coque@inrae.fr / tiphaine.peroux@inrae.fr

Tristan HARMEL et Jean-Michel MARTINEZ

CNRS, UMR GET, Observatoire Midi-Pyrénées, 14 avenue Édouard Belin, F-31400 Toulouse, France.

tristan.harmel@get.omp.eu / jean-michel.martinez@get.omp.eu

Alice ANDRAL

CNES, 18 avenue Édouard Belin, F-31401, Toulouse Cedex 9, France.

alice.andral@cnes.fr

POUR ALLER PLUS LOIN...

Au niveau national

- 📄 Centre d'Expertise Scientifique THEIA « température de surface et émissivité » : <https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-temperature-de-surface-et-emissivite/>
- 📄 Centre d'Expertise Scientifique THEIA « couleur des eaux continentales » : <https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-couleurs-des-eaux-continentales/>
- 📄 Centre d'Expertise Scientifique THEIA « cartographie et suivi des surfaces en eau » : <https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-cartographie-et-suivi-des-surfaces-en-eau/>
- 📄 Centre d'Expertise Scientifique THEIA « hauteur des lacs et des rivières » : <https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-hauteur-des-lacs-et-rivieres/>
- 📄 Accès aux données en France : <https://data.ecla.inrae.fr/>

Au niveau européen

- 📄 Les données COPERNICUS sur les grands lacs : <https://land.copernicus.eu/global/products/lwq/>

Au niveau international

- 📄 La base de donnée LIMNADES : https://limnades.stir.ac.uk/Limnades_login/index.php
- 📄 Le site de l'IOCCG, groupe de coordination international de la couleur de l'eau : <https://ioccg.org/>

EN SAVOIR PLUS...

- 📄 CORDEIRO, M.C.R., MARTINEZ, J.-M., PEÑA-LUQUE, S., 2021, Automatic water detection from multidimensional hierarchical clustering for Sentinel-2 images and a comparison with Level 2A processors, *Remote Sensing of Environment*, 253:112209, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112209>
- 📄 HARMEL, T., CHAMI, M., TORMOS, T. *et al.*, 2018, Sun glint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands, *Remote Sensing of Environment*, 204:308-321, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.022>
- 📄 PAHLEVAN, N., MANGIN, A., V BALASUBRAMANIAN, S. *et al.*, 2021, ACIX-Aqua: A global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, 258:112366, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112366>
- 📄 PAPATHANASOPOULOU, E., SIMIS, S., ALIKAS, K. *et al.*, 2019, Satellite-assisted monitoring of water quality to support the implementation of the Water Framework Directive, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3556478>
- 📄 PRATS, J., REYNAUD, N., REBIÈRE, D. *et al.*, 2018, LakeSST: Lake Skin Surface Temperature in French inland water bodies for 1999–2016 from Landsat archives, *Earth System Science Data*, 10:727-743, <https://doi.org/10.5194/essd-10-727-2018>
- 📄 PRATS, J., ROUBEIX, V., REYNAUD, N. *et al.*, 2020, The thermal behaviour of French water bodies: From ponds to Lake Geneva, *Journal of Great Lakes Research*, 46:718-731, <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.04.001>
- 📄 MISHRA, D., OGASHAWARA, I., GITELSON, A., 2017, Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters, Elsevier.
- 📄 NEIL, C., SPYRAKOS, E., HUNTER, P.D., TYLER, A.N., 2019, A global approach for chlorophyll-a retrieval across optically complex inland waters based on optical water types, *Remote Sensing of Environment*, 229:159-178, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.027>
- 📄 SIMON, R.N., TORMOS, T., DANIS, P.-A., 2014, Retrieving water surface temperature from archive LANDSAT thermal infrared data: Application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30:247-250, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.005>
- 📄 SIMON, R.N., TORMOS, T., DANIS, P.-A., 2015, Very high spatial resolution optical and radar imagery in tracking water level fluctuations of a small inland reservoir, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38:36-39, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.12.007>
- 📄 SOULIGNAC, F., ANNEVILLE, O., DANIS, P.-A., 2016, *Variabilité dans l'évaluation de l'état écologique des plans d'eau en France : mesure et modélisation*, Rapport, Irstea, <https://hal.inrae.fr/hal-02605523>
- 📄 SPYRAKOS, E., O'DONNELL, R., HUNTER, P.D., *et al.*, 2018, Optical types of inland and coastal waters, *Limnology and Oceanography*, 63:846-870, <https://doi.org/10.1002/lno.10674>
- 📄 TOPP, S.N., PAVELSKY, T.M., JENSEN, D., *et al.*, 2020, Research Trends in the Use of Remote Sensing for Inland Water Quality Science: Moving Towards Multidisciplinary Applications, *Water*, 12:169, <https://doi.org/10.3390/w12010169>



Des capteurs fixés sous les bouées permettent aux chercheurs d'acquérir des données de température précises sur plusieurs années.