



Apport de la télédétection pour le suivi des riziatures dans le bassin versant du fleuve Sénégal

Marie Lefrancq, Mamadou Diarra, Ousmane Hane, Ludovic Lhuissier, Thierno Ndour, Bernard Thumerel, Farouk Toumiat & Mama Yena

To cite this article: Marie Lefrancq, Mamadou Diarra, Ousmane Hane, Ludovic Lhuissier, Thierno Ndour, Bernard Thumerel, Farouk Toumiat & Mama Yena (2020) Apport de la télédétection pour le suivi des riziatures dans le bassin versant du fleuve Sénégal, La Houille Blanche, 106:5, 60-67, DOI: [10.1051/lhb/2020049](https://doi.org/10.1051/lhb/2020049)

To link to this article: <https://doi.org/10.1051/lhb/2020049>



Published online: 21 May 2021.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 920



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

Apport de la télédétection pour le suivi des rizicultures dans le bassin versant du fleuve Sénégal

Marie Lefrancq^{1,*}, Mamadou Diarra¹, Ousmane Hane², Ludovic Lhuissier¹, Thierno Ndour², Bernard Thumerel³, Farouk Toumiate³ et Mama Yena²

¹ CACG, Chemin de Lalette, BP 449, 65000 Tarbes cedex, France

² SOGED, Société de gestion et d'exploitation du barrage de Diama, BP 5048, BP 396, Nouakchott, Mauritanie

³ E2L, 84 rue des fontaines, 31300 Toulouse, France

Reçu le 24 mars 2020 / Accepté le 25 octobre 2020

Résumé – La vallée du fleuve Sénégal constitue une source de vie et de fertilité régionale où se mêlent agro-pastoralisme traditionnel et cultures irriguées plus intensives. Les enjeux primordiaux de l'utilisation des ressources en eau du fleuve Sénégal représentent un défi d'envergure, et ce surtout dans un contexte de changement climatique. Les images satellitaires sont une source de données pertinente et peu chronophage pour observer et suivre les changements du territoire et ainsi aider à sa gestion. C'est dans ce contexte que le projet MOSIS (Mutualiser les observations satellitaires pour l'innovation de services) a vu le jour, issu d'une collaboration menée selon une démarche Living Lab entre la SOGED (Société de gestion et d'exploitation du barrage de Diama), la CACG (Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne) et E2L (Espace et Living Lab). En seulement un an de travail, un outil opérationnel s'appuyant sur le traitement des images satellitaires Sentinel 2 a été co-conçu avec les utilisateurs finaux afin de localiser et quantifier les surfaces rizicoles mises en eau pour améliorer le taux de recouvrement de la redevance liée aux prélèvements d'eau pour l'irrigation. L'utilisation de l'outil WebGIS a déjà montré beaucoup de valeurs ajoutées sur le terrain : meilleure identification des usagers et du foncier, augmentation des recettes de redevance, amélioration de la communication avec les usagers, certification des données, etc. La qualité de la réflexion collaborative entre les membres du consortium a également permis de faire émerger d'autres idées de services potentiels qui viendraient s'appuyer sur les ressources Geo-WEB et la télédétection spatiale afin d'obtenir des indicateurs de gestion spatialisés, fiables et pérennes sur la vallée du fleuve Sénégal.

Mots clés : télédétection / WebGIS / irrigation / redevance / Afrique de l'Ouest

Abstract – Remote sensing in support for monitoring rice in the Senegal catchment. Senegal River catchment represents a vital source for its four riparian countries Guinea, Mali, Mauritania, and Senegal, which cooperate within the interstate agency OMVS (Senegal River Basin Development Authority). The key issue of integrated water resources management addressed major challenges, especially with climate change. Satellite imagery represents thus a relevant and inexpensive source of data for observing land use changes at large scale and thus provides management support. In this context, MOSIS project (Monitoring of Observations from Satellites for Innovative Services) arose based on a “Living Lab” approach between SOGED, CACG and E2L. Based on the needs of end-users, an operational tool was co-designed in a single year to localise and quantify rice producing areas using Sentinel 2 satellite imagery and Web resources. The purpose of the created WebGIS was to improve the recovery rate of the irrigation fee. Many added values have emerged when used in the field: improved identification of water users and land management, an access to water use history, performance of field agents and improved communication with users and other partners. As a first step, the Senegal River Delta alone was investigated where 80% of irrigated surfaces are. Next steps are (1) the functional improvement of the WebGIS and the satellite image processing, (2) capacity building of SOGED, (3) regulatory certification of the tool and (4) extension of the study zone to the catchment area. The created Geo-Web service also aroused a great deal of interest among different partners and state structures. It enabled to bring out several ideas of other potential

*Correspondance : m.lefrancq@cacg.fr

services that would rely on WEB resources and remote sensing in order to estimate spatialised, reliable and permanent management indicators on the Senegal catchment.

Keywords: remote sensing / WebGIS / irrigation charges / West Africa

1 Introduction

Le fleuve Sénégal représente une source régionale d'eau de surface aux enjeux primordiaux. Son bassin s'étend sur quatre pays, que sont d'amont en aval la Guinée, le Mali, le Sénégal et la Mauritanie (Ndiaye, 2003). Dans un contexte de grandes sécheresses au début des années 1970, trois gouvernements frontaliers du fleuve Sénégal (Mali, Sénégal et Mauritanie) ont créé l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS) afin de réfléchir ensemble à des solutions (Duvail *et al.*, 2001 ; Kipping, 2005). En 2005, la Guinée adhère à l'organisation. Ce type de gouvernance internationale est souvent présenté comme une référence mondiale de coopération entre États pour la gestion de la ressource en eau (Auclair et Lasserre, 2013). Dans les années 1980, la construction de deux grands barrages a été lancée pour assurer la disponibilité permanente de l'eau douce pour des usages divers (Tignino et Sangbana, 2016). Le barrage anti-sel de Diama a été mis en fonction en 1986 pour empêcher la remontée des eaux salées marines et le barrage réservoir hydroélectrique de Manantali au Mali a été mis en service en 1988. Ces deux barrages ont permis le développement d'une riziculture irriguée plus intensive (Cormier-Salem *et al.*, 2016 ; Taïbi *et al.*, 2007).

La SOGED (Société de gestion et d'exploitation du barrage de Diama) est une société de l'OMVS. Elle est concessionnaire d'ouvrage et délégataire du service public de l'eau du fleuve Sénégal, destiné à plusieurs usages dont l'agriculture irriguée (cultures irriguées vivrières, agrobusiness), la production d'eau potable, les activités minières, la navigation, les besoins environnementaux (parcs nationaux, remplissage des cuvettes de décrue.). La SOGED fonctionne financièrement sur la base de redevances liées aux prélèvements, à l'exception de la production électrique qui est gérée par la SOGEM (Société de gestion de Manantali) (Séné, 2009). Ces revenus (complétés par la contribution des États) servent à assurer la maintenance de ces ouvrages, d'assurer l'accès libre et gratuit à la ressource en eau pour les usages domestiques et de satisfaire les besoins environnementaux (parcs nationaux) et le remplissage des cuvettes. Depuis la mise en place des redevances pour prélèvements en eau du fleuve, l'OMVS a érigé au rang de priorité, l'agriculture irriguée, particulièrement les cultures vivrières (maraîchage de contre-saison, riziculture en saison des pluies et en contre-saison chaude). La politique tarifaire et social de la SOGED est en cours d'évolution afin d'assurer un équilibre d'exploitation et de tendre vers une autonomie financière de la SOGED (Séné, 2009). L'agriculture irriguée dite vivrière (à la différence des agro-business facturé au volume d'eau) est facturée à la surface cultivée avec une redevance comprise entre 2700 et 11 600 FCFA/ha (approximativement 4–18 €/ha) selon les saisons hivernage, contre-saison chaude et contre-saison froide (tarifs en 2018). La nouvelle grille tarifaire va ajuster, de façon marginale, les tarifs de l'agriculture irriguée vivrière et, d'une manière plus conséquente, les tarifs de redevance applicables aux grands

usagers (périmètres rizicoles supérieurs à 200 ha). Le nouveau règlement prévoit une approche basée sur les emblavures réelles, pouvant être contestées par les clients, à la place de l'approche déclarative actuellement en vigueur.

Cependant, la SOGED est actuellement confrontée à une faiblesse de ses capacités opérationnelles face à l'accroissement continu de la demande en eau et à la diversification des usages, la taille importante de sa clientèle (plus de 5000 usagers répertoriés pour plus de 120 000 ha emblavées par an), l'importance de la zone d'intervention (800 km de Saint-Louis à Manantali) et les difficultés à assurer un suivi en temps réel des emblavures et des prélèvements d'eau avec des contraintes de terrain opérationnelles importantes. Dans ce contexte, les images satellitaires constituent une source de données pertinente et peu chronophage pour observer, évaluer et suivre les emblavures à la fois historiquement et en temps réel. La SOGED, la CACG (Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne) et E2L (Espace et Living Lab) ont lancé en 2017 le projet MOSIS (Mutualiser les observations satellitaires pour l'innovation de services ; <https://mosis-cacg.e2l-coop.eu/>) avec l'implication dynamique et économique de l'Agence de l'eau Adour-Garonne. L'objectif de ce projet est d'accompagner la SOGED afin de construire un système d'information et d'aide à la décision, qui s'appuierait sur des données satellitaires, tout en combinant les mesures de suivi traditionnel afin d'améliorer le recouvrement de la redevance liée à l'irrigation. L'objectif était double :

- produire un service pérenne basé sur la télédétection, qui permettra d'améliorer le taux de recouvrement de la redevance auprès des usagers ;
- développer une plateforme web de cartographie partagée qui permette à la SOGED et à ses partenaires d'interagir sur la base d'informations et d'indicateurs spatialisés.

2 Matériel et méthodes

2.1 Zone d'étude, cultures et type d'irrigation

Le fleuve Sénégal permet en théorie l'irrigation d'environ 248 000 ha (SDAGE, 2009). On estime à environ 4 milliards de m³ d'eau l'usage de l'irrigation et des besoins environnementaux. En hivernage (juillet–décembre) et en contre-saison chaude (février–juin), la principale culture demeure le riz. Par contre, en saison sèche froide (décembre–février), les spéculations vivrières suivantes se développent : oignon, tomate, gombo, patate, maïs, sorgho, pastèque, arachide.

Afin de tester l'approche, le projet s'est concentré sur l'irrigation par submersion pour la riziculture dans la zone du delta du fleuve entre Saint-Louis et Podor. Cette zone concentre 80 % des surfaces irriguées de la vallée (Fig. 1). Vingt-trois aménagements rizicoles de plus de 200 ha ont été pré-ciblés par la SOGED pour être suivis sur les deux campagnes du riz (hivernage et contre-saison chaude). Une fois la preuve de concept validée, l'objectif final sera

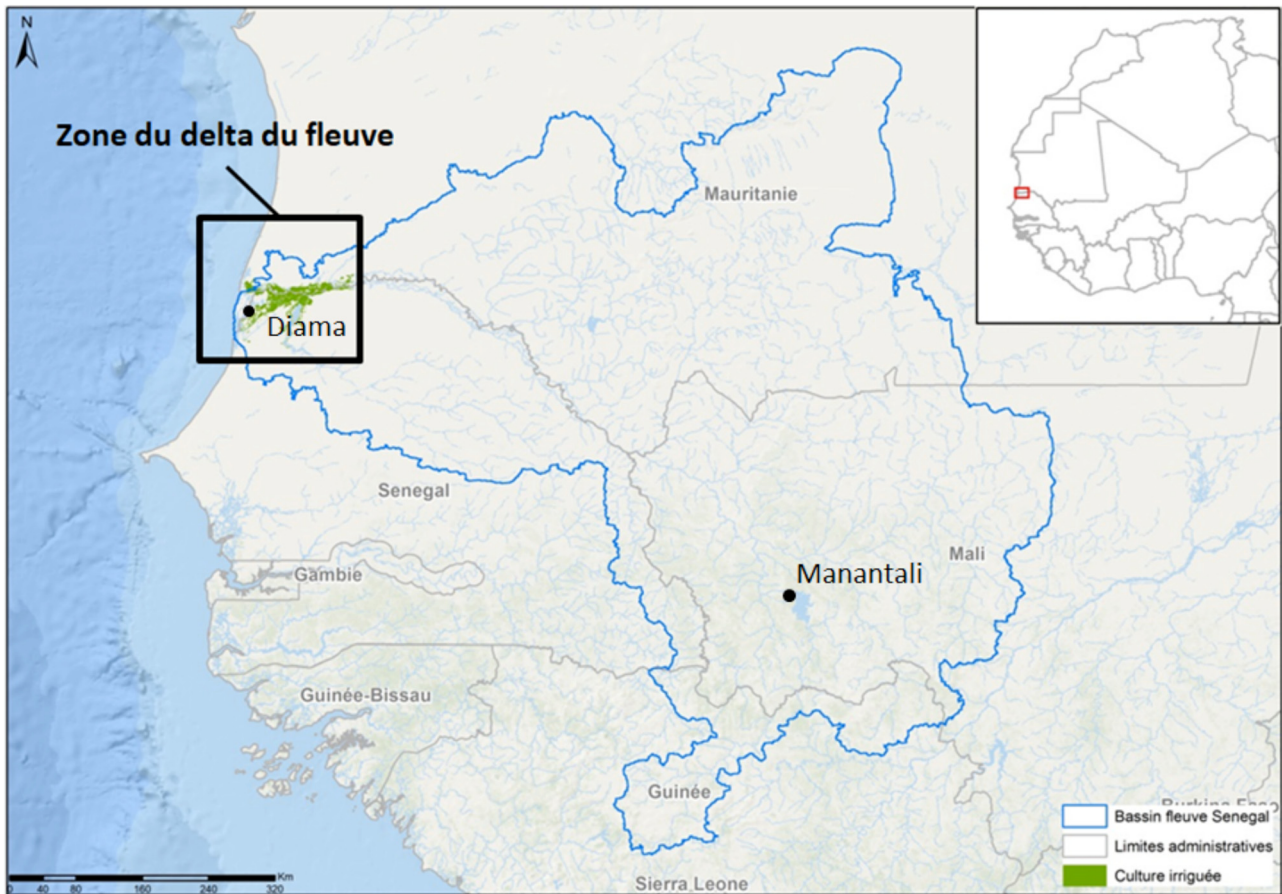


Fig. 1. Cartographie de la zone d'étude.

de couvrir les 800 km de Saint-Louis à Manantali, géré par la SOGED.

2.2 Méthodologie de design de service

Une méthodologie dite de Living Lab et de « design de service » a été mise en place tout au long du projet afin de se concentrer sur les besoins et le contexte des utilisateurs finaux (Bergvall-Kåreborn et Ståhlbröst, 2009 ; Dell'Era et Landoni, 2014). Des ateliers de créativité et de co-conception ont donc été menés dans le but d'analyser correctement les besoins pour les transformer en exigences fonctionnelles et techniques. Une approche avec des cycles itératifs de spécification/programmation/livraison a été menée afin de s'assurer de la cohérence de l'outil avec les besoins de l'utilisateur final. La méthode agile « Scrum » a été utilisée pour le développement informatique (Vlaanderen *et al.*, 2011) en suivant les valeurs de l'agilité :

- interactions régulières avec l'équipe du projet ;
- opérationnalité du logiciel ;
- collaboration avec le client ;
- adaptation au changement.

2.3 Acquisition des données terrain

Des relevés terrain sont nécessaires afin de pouvoir contrôler les analyses produites sur la base des informations

satellitaires et de valider la méthode. Trois campagnes de terrain ont donc été réalisées par la SOGED en mai, septembre et décembre 2018. Elles ont permis d'obtenir les périmètres des aménagements à observer et les surfaces emblavées selon les différentes saisons (contre saison chaude et hivernage) avec des relevés GPS. Ces données ont suivi toute une procédure de caractérisation sur le terrain/validation/certification avec la participation des structures étatiques assermentées (SAED, SONADER). À terme, l'objectif sera d'arriver à confirmer une méthode d'analyse robuste permettant d'optimiser ces relevés terrain.

2.4 Méthodologie de traitement des images satellitaires

Les images de Sentinel 2 ont été utilisées dans le cadre de cette étude pendant les différentes saisons culturales du riz (contre-saison chaude et hivernage). Sentinel 2 est une constellation de deux satellites multispectraux (2A et 2B) développée par l'Agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre du programme de surveillance de la Terre Copernicus financé par l'Union européenne (Tab. 1). Sentinel 2 a été choisi pour trois raisons :

- sa répétitivité temporelle (5–6 jours) ;
- sa résolution spatiale assez précise (10 m) ;
- sa disponibilité sur la plateforme Théia (<http://theia.cnes.fr>), qui fournit gratuitement les images de Sentinel 2,

Tableau 1. Caractéristique des images Sentinel 2A et 2B (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>).

Bandes spectrale	Résolution (m)	Longueur d'onde (nm)	Canal d'observation
B01	60	443	Aérosol
B02	10	490	Bleu
B03	10	560	Vert
B04	10	665	Rouge
B05	20	705	Végétation
B06	20	740	Végétation
B07	20	783	Végétation
B08	10	842	Proche infrarouge
B08A	20	865	Végétation
B09	60	945	Vapeur d'eau
B10	60	1375	Cirrus
B11	20	1610	Moyen infrarouge 1
B12	20	2190	Moyen infrarouge 2

prétraitées des effets atmosphériques sur différentes zones du monde, dont la zone d'étude (Hagolle *et al.*, 2010).

Des chaînes de traitement d'image ont été développées avec le langage Python en utilisant la librairie GDAL (Bouffier, 2015; Du *et al.*, 2016). Une première étape a consisté à homogénéiser le jeu de données dans le cas de données provenant de périodes d'acquisition différentes, mais également à synthétiser l'information pour alléger le temps des traitements. Seulement cinq bandes spectrales ré-échantillonnées à 10 m ont été gardées sur les 13 bandes des images Sentinel 2. À partir de la combinaison linéaire des réflectances dans les différentes longueurs d'onde, deux indices vont être calculés : le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), un indicateur de végétation verte, et le MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*), un indicateur de présence d'eau (eq. (1) et (2)) :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}, \quad (1)$$

où ρ_{PIR} est la réflectance dans le proche infrarouge (*PIR*, bande 08) et ρ_R la réflectance dans le rouge (*R*, bande 04). Le NDVI est un indicateur normalisé, sa valeur varie entre -1 et 1 . Pour un sol nu, le NDVI présente des valeurs proches de 0 (en raison de la faible différence entre le *R* et le *PIR*), pour les formations végétales, le NDVI varie de $0,1$ à $0,8-0,9$ (couvert très dense et vert). Cet indicateur est cependant sensible au type de sol (pour les couverts non couvrants), aux effets atmosphériques, aux conditions de prise de vue et tend à saturer pour des couverts végétaux présentant une importante biomasse (Defries et Townshend, 1994). Le résultat du calcul du NDVI est ensuite croisé avec les images de zone mise en eau pour délimiter les rizières.

$$MNDWI = \frac{\rho_V - \rho_{MIR}}{\rho_V + \rho_{MIR}}. \quad (2)$$

Le *MNDWI* est dérivé du NDVI; celui-ci a été modifié pour la détection optique par l'utilisation du moyen infrarouge (*MIR*, bande 11) à la place du proche infrarouge (bande 08). ρ_V est la réflectance dans le vert (*V*, bande 03) et ρ_{MIR} (bande 11) la réflectance dans le moyen infrarouge. Il permet de mettre en évidence les masses d'eau en supprimant de manière plus efficace que l'indicateur NDVI (*Normalized Difference Water Index*) (Xu, 2006) le bruit des terrains bâtis, ainsi que celui de la végétation et du sol. Les masses d'eau sont ainsi mieux délimitées par discrimination efficace des surfaces en eau et des surfaces sèches. Le seuil de discrimination est situé autour de 0 . À partir de cet indice, une série d'images binaires est créée avec un seuil fixé à $-0,25$ sur des images en niveaux de gris du *MNDWI*. Ces images sont ensuite additionnées pour constituer une carte des temps d'inondation ou de mise en eau des éventuelles parcelles de riz. Plus la valeur du pixel est grande, plus le temps de mise en eau est long.

Le *MNDWI* permet de détecter les lames d'eau dès le début de la saison sur la période de mise en eau : janvier–mars par exemple pour la contre-saison chaude (étape 1–2, Fig. 2). Les pixels détectés comme mis en eau au moins une fois pendant la saison sont validés ensuite en détectant les cultures qui ont germé, par la valeur de l'image du NDVI (étape 3–4, Fig. 2). Cette image est choisie à la période où le riz atteint sa phase de maturation. Elle tombe au mois de mai pour la contre-saison chaude et au mois de novembre pour l'hivernage. L'image *MNDWI* est transformée en raster binaire codé de 0 à 1 . La valeur 0 correspond aux pixels non mis en eau et la valeur 1 aux pixels mis en eau. Le raster binaire est croisé avec l'image NDVI en faisant une multiplication des valeurs. Les deux images sont de taille identique (même nombre de ligne et colonnes, même taille de pixel). À l'issue de la validation, de nombreux pixels isolés sont généralement observés et un filtrage est alors appliqué pour les remplacer par la classe majoritaire observée dans les pixels voisins (tamisage). La dernière étape de la méthodologie est la vectorisation des données au format shapefile afin de les intégrer dans une base de données. La table attributaire du fichier vecteur comporte alors un attribut relatif à la classe d'occupation du sol. Enfin, la cohérence des résultats est ensuite contrôlée grâce à des applications tierces (Sentinel HUB) et des relevés terrain (étape 5, Fig. 2).

2.4.1 Implémentation et déploiement au sein du WebGIS

Une application WebGIS a été implémentée afin que l'utilisateur puisse suivre les résultats issus de la télédétection en temps réel. L'architecture système de la plateforme se décompose (voir Fig. 3) en :

- une chaîne de traitement permettant l'évaluation des surfaces irriguées par télédétection et l'alimentation de la base de données ;
- un backend afin de traiter les demandes du client ;
- un frontend pour visualiser les résultats ;
- une base de données pour historiciser les données ;
- un serveur cartographique.

L'architecture logicielle utilisée est le « MVT » (Modèle-Vue-Template). Le souci d'ergonomie et de facilité d'usage de l'outil nous a amenés à mettre en place des outils pour recevoir

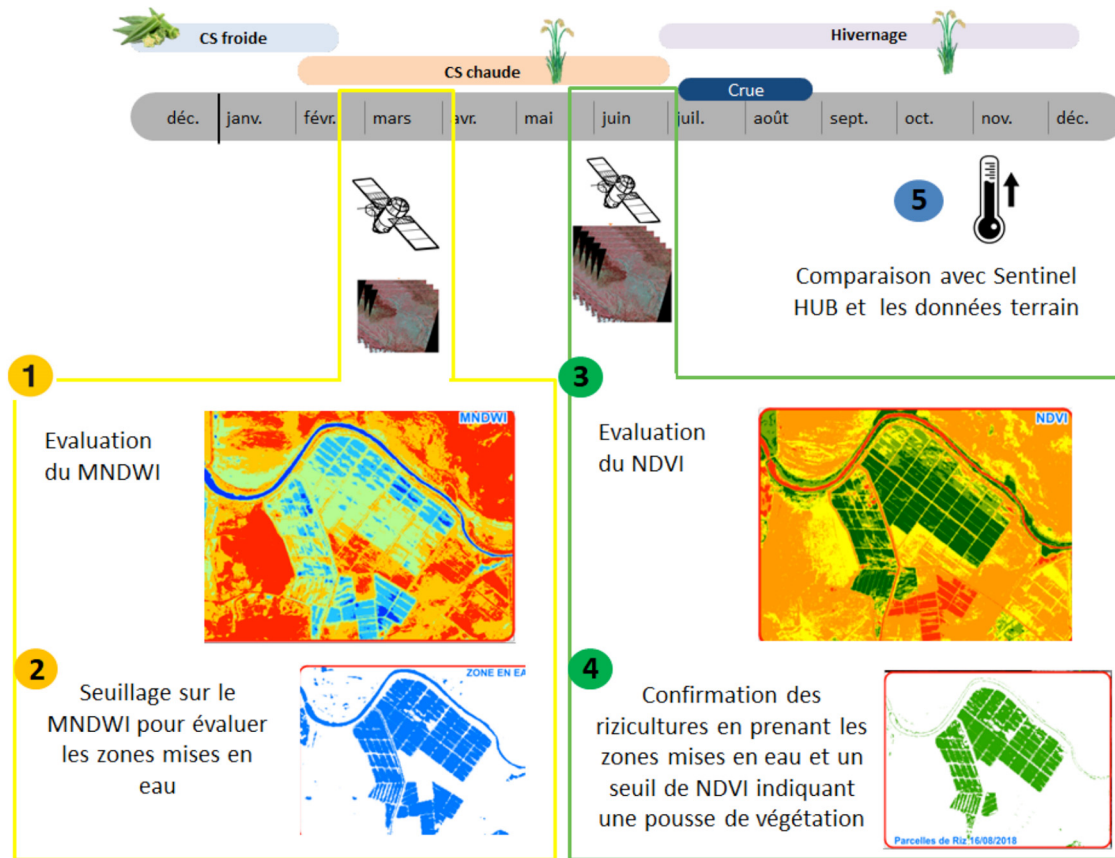


Fig. 2. Étapes de la méthode de traitement des images pour la contre saison chaude.

les retours d'expériences des utilisateurs directement *via* la plateforme. Pour le côté serveur applicatif, nous avons utilisé le framework GeoDjango/Django v2.0 avec un serveur applicatif WSGI (Web Server Gateway Interface), du fait de sa compatibilité avec la bibliothèque de traitement de données spatiales, sa souplesse, sa rapidité et sa sécurité. Nous avons choisi le serveur géographique Geoserver et le serveur de base de données spatiales PostgreSQL v9.6 avec l'extension spatiale PostGIS v2.3. Nous avons développé la partie front end avec les technologies classiques : HTML 5, CSS 3 et JQuery v1.11.3. D'autres bibliothèques et outils de développements ont été utilisés, HighCharts JS v8.1.2 pour visualiser les statistiques, et OpenLayers v4.5.0 pour la cartographie, et Materialize v0.100.2 pour l'interface utilisateur.

3 Resultats et discussion

3.1 La plateforme cartographique MOSIS

Un outil opérationnel a donc été développé s'appuyant sur le traitement d'images satellitaires pour localiser et quantifier les surfaces rizicoles mises en eau. Les principales fonctionnalités de l'outil sont : l'authentification de l'utilisateur, les fonctionnalités de manipulation cartographique classiques, la consultation des statistiques synthétiques concernant les surfaces rizicoles en fonction des échelles choisies, le suivi des évolutions des zones mises en eau par saison (Fig. 4), la mise à jour des données concernant les attributaires, les

fonctionnalités d'export de fiche de négociation ou des résultats sous forme vectorielle.

La SOGED peut donc suivre aménagement par aménagement les mises en eau des parcelles et la confirmation de la pousse du riz *via* la plateforme. Elle peut comparer ensuite les surfaces télédétections avec celles qui ont été déclarées et exporter une fiche de négociation avec toutes les informations nécessaires afin de l'envoyer aux clients ou de s'en servir de base pour discuter.

3.2 Les retours de l'utilisation sur le terrain

Le consortium s'était préparé à un comportement un peu réfractaire des usagers vis-à-vis de l'application de cet outil pour payer les redevances liées à l'irrigation. Finalement, les retours terrain ont été surprenants et positifs. Les usagers ont apprécié le fait que les données terrain soient homogènes pour tous et cette base permet d'instaurer un dialogue entre les différents usagers et les agents impliqués dans la gestion des redevances. L'outil permet aussi de renforcer la communication avec les partenaires étatiques de type SONADER, SAED, ADRS, etc. Ces partenaires locaux se sont montrés intéressés par l'utilisation de l'outil avec des services associés potentiels à développer (suivi des rendements agricoles, suivi des plantes envahissantes etc.). Ils ont demandé une formation en géomatique à la SOGED afin de mieux réaliser les missions terrain de caractérisation des contours d'aménagements et des surfaces emblavées.

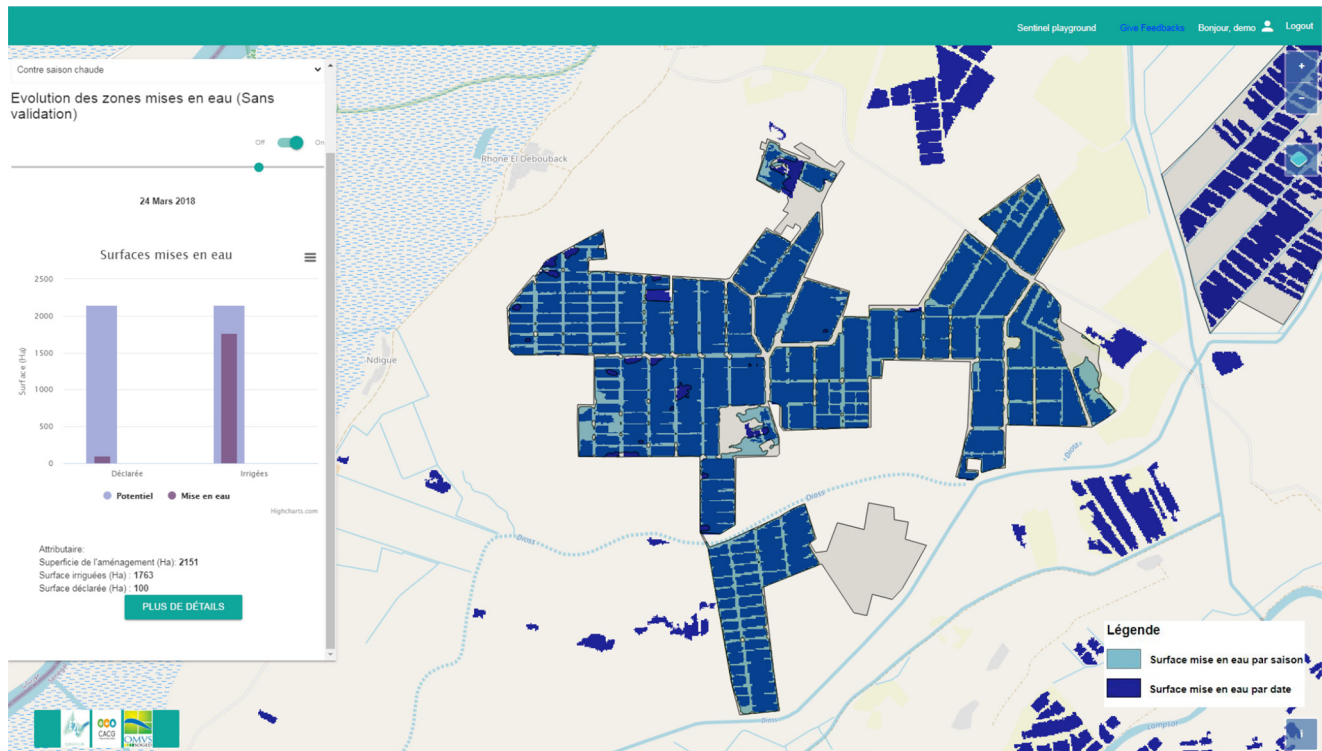


Fig. 4. Exemple de l'interface WebGIS de l'outil MOSIS (<http://soged.cacg.fr/>).

des informations sur les images optiques. L'étape finale consistera à pérenniser l'utilisation de ce service et à le certifier réglementairement afin de faciliter la facturation de la redevance à l'aide de la télédétection.

En travaillant de manière concertée sur ce projet et à l'écoute des besoins des utilisateurs finaux, des idées de nouveaux services pouvant s'appuyer sur la télédétection et les ressources WEB ont vu le jour pour différents utilisateurs (OMVS, SOGED, partenaires, structures relais, attributaires et/ou irrigants) ainsi qu'à différentes échelles spatiales (bassin du fleuve Sénégal, régions, aménagements, parcelles) et temporelles (de 15 ans à une campagne agricole). Ces services concernent des thématiques variées : environnementales, hydrologiques ou encore agronomiques. Des exemples concrets de services opérationnels pourraient être le suivi des inondations contrôlées ou non, le suivi des zones les plus exploitées pour coordonner la maintenance, le suivi de la réalité des exploitations agricoles et des rendements ou encore le suivi de plantes envahissantes. Le développement de ces services sur tout le bassin versant du fleuve Sénégal devra contribuer à une meilleure gestion intégrée de l'eau et de l'agriculture afin d'anticiper les situations de crise et les impacts du changement climatique.

Remerciements. Le consortium tient à remercier l'Agence de l'eau Adour Garonne qui a financé le projet à hauteur de 50 %, ainsi que le CNES qui a participé financièrement au développement de l'outil. Le CESBIO, et en particulier Gérard Dedieu, ainsi que le pôle de données et de services surfaces continentales Theia sont remerciés pour leur participation technique au projet.

Références

- Auclair A, Lasserre F. 2013. Aménagements, politiques et conflits sur l'eau en Afrique de l'Ouest. *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement* 13(2). Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/vertigo.13994>.
- Bergvall-Kåreborn B, Ståhlbröst A. 2009. Living lab: an open and citizen-centric approach for innovation. *International Journal of Innovation and Regional Development* 1: 356–370.
- Bouffier J. 2015. Guide technique Cerema. Mise en place d'une couche d'occupation des sols, à partir d'images satellites. Rhônes: Cerema direction territoriale Sud Ouest, n°=ISRN Cerema DterSo-15-18 Fr.
- Cormier-Salem M-C., Toure L, Fabre M, Bouaita Y, Abass BBME, Habert E. 2016. SIRENA, une plateforme participative au service de la gouvernance du delta transfrontalier du fleuve Sénégal. *Revue d'ethnoécologie* 9: 2653. Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.2653>.
- Defries RS, Townshend JRG. 1994. NDVI-derived land cover classifications at a global scale. *International Journal of Remote Sensing* 15: 3567–3586. Disponible sur : <https://doi.org/10.1080/01431169408954345>.
- Dell'Era C, Landoni P. 2014. Living Lab: a methodology between user-centred design and participatory design. *Creativity and Innovation Management* 23: 137–154. Disponible sur : <https://doi.org/10.1111/caim.12061>.
- Du Y, Zhang Y, Ling F, Wang Q, Li W, Li X. 2016. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing* 8: 354. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/rs8040354>.

- Duvail S, Mietton M, Gourbesville P. 2001. Gestion de l'eau et interactions société-nature le cas du delta du Sénégal en rive mauritanienne. *Nature Sciences Sociétés* 9: 5–16.
- Hagolle O, Huc M, David VP, Dedieu G. 2010. A multi-temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT-2, VENμS, LANDSAT and SENTINEL-2 images. *Remote Sensing of Environment* Elsevier 114(8): 1747–1755. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.002>.
- Kipping M. 2005. Conflits et coopération liés à l'eau du fleuve Sénégal. *Géocarrefour* 80: 335–347. Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.1314>.
- Ndiaye EHM. 2003. Le fleuve Sénégal et les barrages de l'OMVS : quels enseignements pour la mise en œuvre du NEPAD ? *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement* 4(3). Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/vertigo.3883>.
- SDAGE. 2009. Rapport de phase 1–État des lieux et diagnostic pour le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du fleuve (SDAGE).
- Séné AM. 2009. Développement durable et impacts des politiques publiques de gestion de la vallée du fleuve Sénégal : du régional au local. *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement* 9(3). Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/vertigo.9221>.
- Taïbi AN, Barry M el H, Jolivel M, Ballouche A, Baba MLO, Moguedet G. 2007. Enjeux et impacts des barrages de Diama (Mauritanie) et Arzal (France) : des contextes socio-économiques et environnementaux différents pour de mêmes conséquences. *Noréis* 203: 51–66. Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/noréis.1536>.
- Tignino M, Sangbana K. 2016. Le statut d'ouvrages communs et le partage des bénéfices dans les bassins du fleuve Sénégal et Niger. *Geneva Water Hub* 1–7.
- Vlaanderen K, Jansen S, Brinkkemper S, Jaspers E. 2011. The agile requirements refinery: applying SCRUM principles to software product management. *Information and Software Technology* 53: 58–70. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2010.08.004>.
- Xu H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27: 3025–3033. Disponible sur : <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.

Citation de l'article : Lefrancq M, Diarra M, Hane O, Lhuissier L, Ndour T, Thumerel B, Toumiat F, Yena M. 2020. Apport de la télédétection pour le suivi des rizicultures dans le bassin versant du fleuve Sénégal. *La Houille Blanche* : 60–67