

École doctorale « Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace »

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

présenté et soutenu publiquement par

Sylvain FERRANT

Le 12 janvier 2026

Agro-Hydrologie et Télédétection,  
Enjeux, Limites et Perspectives

Jury

Marie-Paule BONNET  
Thierry PELLARIN  
Yves TRAMBLAY  
Cécile CORNOU  
Valérie DEMAREZ  
Lionel JARLAN

Directrice de recherche  
Directeur de recherche  
Directeur de recherche  
Directrice de recherche  
Professeure des universités  
Directeur de recherche

Rapporteuse  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examinatrice  
Examinatrice  
Correspondant

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>5</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>8</b>
<b>1 L'avènement de l'agro-hydrologie spatialisée</b>	
<b>Mieux contraindre les dynamiques agricoles par satellite</b>	<b>10</b>
1.1 Introduction du chapitre	10
1.1.1 L'agro-hydrologie, sous-discipline de l'hydrologie	10
1.1.2 La modélisation agro-hydrologique	11
1.1.2.1 Les approches de modélisation	11
1.1.2.2 Les représentations spatiales et temporelles	12
1.1.3 Finalité de la modélisation agro-hydrologique	12
1.1.4 L'équifinalité dans les modèles agro-hydrologiques	12
1.1.5 Données d'observation de la terre : quelles résolutions, pour quelles bénéfices ?	14
1.2 Apport des données optiques multi-temporelle sur la modélisation du cycle de l'azote	14
1.2.1 Problématiques initiales et rôle des observations satellitaires	14
1.2.2 Réajustement des dates de semis	15
1.2.3 Calibration de la réserve utile	16
1.2.4 Perspectives sur la modélisation agronomique spatialisée	19
1.3 Modélisation de l'impact de l'irrigation du riz en Inde du Sud	20
1.3.1 Problématiques initiales et rôle des observations satellitaires	20
1.3.1.1 Une irrigation massive par pompage de l'eau souterraine	20
1.3.1.2 Vulnérabilité aux sécheresses consécutives	20
1.3.1.3 Domination des flux verticaux	21
1.3.1.4 Choix d'un modèle semi-distribué	21
1.3.1.5 Occupation du sol par satellite, en 2010	22
1.3.2 Modélisation verticale du cycle de l'eau en zone irriguée (84 km <sup>2</sup> )	22
1.3.3 Modélisation de l'impact des changements climatiques sur le pompage (1000 km <sup>2</sup> )	23
1.3.3.1 Projections climatiques 2045-2065	23
1.3.3.2 Impacts du CC sur les stocks souterrains	24
1.3.3.3 Impacts du CC sur les pompages	24
1.3.4 Stratégies d'adaptation des agriculteurs	24
1.4 Perspectives sur la modélisation régionale de l'irrigation	25

<b>2</b>	<b>L'agro-hydrologie spatiale</b>	
	<b>Tirer parti de l'explosion des observations satellitaires de la Terre</b>	<b>26</b>
2.1	Introduction du chapitre . . . . .	26
2.1.1	Les missions satellites pour l'agro-hydrologie spatiale . . . . .	26
2.1.1.1	Les missions institutionnelles . . . . .	26
2.1.1.2	Les missions commerciales . . . . .	29
2.1.1.3	L'accès aux données et les traitements massifs . . . . .	30
2.1.1.4	Missions scientifiques vs missions opérationnelles . . . . .	30
2.1.2	La basse résolution spatiale en agro-hydrologie, instructif mais insuffisant	31
2.1.3	Restitution de Variables Environnementales essentielles . . . . .	32
2.2	Approximation de la demande en eau d'irrigation : l'apport des Sentinel	36
2.2.1	Détection des cultures irriguées, et synergie Sentinel-1&2 et demande en eau d'Irrigation . . . . .	36
2.2.1.1	Méthodes <i>ad hoc</i> mises en oeuvre . . . . .	36
2.2.1.2	Incertitudes liées au capteurs . . . . .	37
2.2.1.3	Variabilité intersaisonnière de l'irrigation . . . . .	37
2.2.1.4	Importance du riz comme proxy de la demande en eau . . . . .	38
2.2.2	Régionalisation de la demande en eau pour l'irrigation du riz . . . . .	38
2.2.2.1	Classifications supervisées du riz en saison sèche avec Sentinel-2 à l'échelle du Tèlangana . . . . .	38
2.2.2.2	Approche d'évaluation et de quantification de l'incertitude . . . . .	38
2.2.2.3	Sentinel-1 dans la littérature : potentiel et contraintes pour la cartographie du riz . . . . .	40
2.3	Impact régional de l'irrigation sur la détection de l'humidité des sols par satellite	42
2.3.1	Sols mouillés par temps sec . . . . .	42
2.3.2	Corrélations entre humidités et surfaces en riz . . . . .	42
2.3.3	Limites de l'assimilation pour les produits SMAP L4 . . . . .	43
2.4	Détection des volumes en eau de surface disponibles pour l'irrigation . . . . .	45
2.4.1	Impacts locaux et régionaux des réservoirs agricoles . . . . .	45
2.4.2	Suivi des dynamiques des surfaces en eau : Radar ou Optique? . . . . .	45
2.4.3	Cartographie de la capacité des réservoirs du RHS à haute résolution . . . . .	47
2.4.3.1	La stéréoscopie à très haute résolution . . . . .	47
2.4.3.2	Estimation de l'incertitude sur les volumes liées aux MNT . . . . .	48
2.5	Stockage Total de l'Eau (TWS) et Eau Souterraine (GWS) : Lever les limites de résolution de GRACE . . . . .	52
2.6	Conclusions et perspectives de la télédétection des agro-hydrosystèmes . . . . .	53
2.6.1	régionaliser la calibration d'un modèle agro-hydrologique . . . . .	53
2.6.2	Nouvelles missions, nouvelles mesures physiques et nouvelles variables restituées . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Perspectives</b>	
	<b>Nouveaux Capteurs, nouveaux Pays, nouveaux Ecosystèmes</b>	<b>54</b>
3.1	Modélisation agro-hydrologique d'un contexte massivement irrigué et peuplé . . . . .	54
3.1.1	Revisiter les algorithmes d'humidité des sols à basse résolution pour les milieux irrigués semi-arides . . . . .	54
3.1.2	Générer des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie au bon moment . . . . .	54
3.1.3	Projet structurant sur le Tèlangana . . . . .	55
3.1.4	Projet collectif structurant en Thaïlande et Vietnam . . . . .	55

3.1.4.1	Perspectives de direction de thèse en Thaïlande : suivi du riz pluvial et fertilisation azotée . . . . .	56
3.1.4.2	Projet en cours : riz pluvial et sécheresses dans le nord-est de la Thaïlande . . . . .	56
3.1.4.3	Perspectives de projet collaboratifs en Thaïlande : suivi du pompage pour la canne à sucre . . . . .	56
3.1.5	Nouveaux capteurs, nouvelles variables . . . . .	57
3.1.5.1	Exemples de missions en préparation . . . . .	57
3.1.5.2	Le potentiel de SWOT en agro-hydrologie . . . . .	59
3.2	Cartographie des <i>small natural features</i> : milieux naturels fragmentés, de faible étendue, rélictuels ou émergents, mais essentiels (HUNTER, 2017) . . . . .	59
3.2.1	Ouverture thématique et interdisciplinarité scientifique . . . . .	60
3.2.2	Cartographie des tourbières andines de haute altitude . . . . .	60
3.2.2.1	Enjeux du projet RePeatAndes . . . . .	60
3.2.2.2	Acquisition de données et cartographie régionale . . . . .	62
3.2.3	Suivi des tourbières gelées en contexte de réchauffement climatique . . . . .	62
3.2.3.1	Enjeux de l'ANR ArcticPeat . . . . .	62
3.2.3.2	Hypothèses de travail . . . . .	62
3.2.3.3	Acquisitions de données et travaux préliminaires . . . . .	63
3.3	Conclusion des perspectives . . . . .	66
	<b>Postface</b>	<b>67</b>

# Remerciements

Bienvenu-e-s dans les coulisses de cette histoire post-thèse.

Elle a probablement débuté ce jour de février 2010, à l’ambassade d’Inde à Paris, lorsque le préposé aux visas me remit le mien en main propre avec un beau visa X (visa de conjoint) pour un an, en me disant qu’à 27 ans, je serais le plus jeune chercheur d’Inde.

Ou alors elle a débuté un jour de novembre 2012, mon premier jour en tant que post-doc CNES au CESBIO, lorsque j’ai croisé pour la première fois le directeur de l’époque, Yann Kerr. Aveuglé par le soleil, je n’ai pas vu l’homme qui m’écrasa la main de sa poigne de fer. Poigne qu’il utilisa deux ans plus tard pour soutenir mes demandes de financement de post-doc et défendre mes candidatures aux concours de chercheur, INRAE, CNRS (en 30 et 52), IRD (CSS1, CSS3 puis CSS5). Je le remercie beaucoup pour ça, tous les jours où je le croise en lui faisant des blagues.

Pendant ces années d’aventures scientifiques, j’ai reçu le soutien de mentors tels que Yann : Jérôme Perrin, l’hydrogéologue suisse du BRGM qui dirigeait la cellule franco-indienne à Hyderabad, qui avait insisté pour m’accueillir dans son bureau de chef plutôt que de me laisser dans l’open space avec les étudiants en tout genre. Simon Gascoin bien sûr, avec qui j’ai monté le projet de post-doc CNES, qui m’a toujours fait confiance et soutenu malgré les hauts et les bas que génère l’instabilité des CDD successifs. Patrick Durand pour sa présence et sa confiance pendant cette période de construction de projet professionnel, Jean-Christophe Maréchal, Yvan Caballero et Benoît Dewandel, qui m’ont toujours accueillis avec amitié et confiance après mon premier post-doctorat avec eux au BRGM et au NGRI.

Arrivant dans un laboratoire de télédétection spatiale alors que je n’y connaissais rien, je tiens ici à remercier quelques personnes ressources qui ont eu une importance capitale dans ma transmutation vers le grade de CRCN au CESBIO : Olivier Hagolle, Gérard Dedieu, Thuy Le Toan, piliers de missions spatiales, grands spécialistes de télédétection optique et radar et amateurs de partage de connaissances et de spécialités de nos régions.

Je remercie également la bienveillance quotidienne, dans les échanges scientifiques, humains et opérationnels des – plus que permanents – du CESBIO : Valérie Demarez, Jean-Philippe Gastellu, Valérie Le Dantec, Mehrez Zribi, Gilles Boulet, Vincent Simmoneaux, Éric Ceschia, Vincent Bustillo, Benoît Coudert, Tiphaine Tallec, Vincent Rivalland, Nemesio Rodriguez, Jérémy Auclair, Jérôme Colin ainsi que Catherine Leprieur qui mettait un point d’honneur à mettre en avant notre travail de non permanents en ligne. J’en profite aussi pour remercier chaleureusement l’équipe de gestion et le travail remarquable qui y est fait depuis que je suis au CESBIO : Monique Britz, Delphine Maria, Dominique Tarrisse, Laura Léal, Émilie Bastié. Faut dire que la gestion des labos publics, c’est un métier digitalisé : numérique mais faut tout faire

avec les doigts, avec des logiciels et règles différentes selon les tutelles et les époques. À cela se sont ajoutées les démarches administratives liées à la Zone à Régime Restrictif (ZRR) qui a obligé le laboratoire à déléguer des tâches de collecte d'informations et de police aux frontières à Éric Brune et Laurence Keppel, que je remercie ici pour avoir permis à nos visiteurs du monde entier de réaliser leur séjour au laboratoire. Bigup aux supports informatiques successifs, Yann Robert puis Ibrahim Attalah. Sans ce support bien fait, rien de possible. Sans leur engagement, point d'HDR.

Je pense également, bien sûr, aux buddies, mi-collègues, mi-bras droits, mi-frères de galère, mi-ours, mi-super-héros : Adrien Selles, jeune (à l'époque) chercheur insomniaque hyperactif pour le BRGM à Hyderabad, l'inventeur de l'hydrogéologie expliquée aux platistes, le veilleur (au sens propre) de sciences en tout genre, toujours sur le terrain, et qui fera, une nuit, un chef-d'œuvre du 7ème art dans la catégorie post-apocalyptique, j'en suis certain. Merci à Santiago Peña-Luque pour les intenses *brain-storming* autour des techniques de restitution des variables hydrologiques dans les données satellite Sentinel qui étaient toutes neuves, et maintenant des données du satellite SWOT, toutes neuves également. Une collaboration essentielle, agréable et informelle qui, je l'espère, va continuer. Merci aux vieux copains du milieu, Brice Barret et Jean-Baptiste Feret, dans la catégorie scientifiques fous aux projets survivalistes avec l'autosuffisance comme objectif, Vincent Thierion, Youen Grusson, entre partage du parcours pro, scientifique et perso. On a tous fini au CESBIO, à l'OMP ou dans l'ESR mais aussi dans les mêmes soirées, un entre-soi peu recommandable.

Une pensée aux copains copines dans les projets et au labo, Yoann Moreau, Émilie Bastié (à nouveau), Gaétan Pique, Arnaud Mialon, Alexandre Bouvet, Stephou Mermoz, Florian Helen, Delphine Leroux, Cyril Benhamou, Taeken Wjimer, Alex Corizzi, Ludovic Arnaud, et tous les co-bureaux : Lucas Landier, Pierre-Alexis Herrault, Tiangiang Yin, toujours prêts à fournir une aide technique et des blagounettes, plus ou moins techniques, mais surtout à supporter les miennes.

Bengaluru, Inde, Novembre 2015, je ressuscite mes recherches en Inde grâce à un séjour à l'Indian Institute of Science, accueilli par l'équipe de la Cellule Franco-Indienne de Recherche en Science de l'Eau. Des moments inoubliables avec Ahmad Al Bitar, Amit Kumar Sharma et Sriramulu Buvaneshwari, des discussions fondatrices avec Muddu Sekhar, Laurent Ruiz, Jean Riotte, que je remercie ici pour la qualité de ce mois partagé, au milieu de l'horreur que vivait Paris les jours suivant le 13.

Hyderabad, Inde, Octobre 2018, 500 km de routes indiennes avec l'équipe terrain du NGRI, que je remercie ici, Adrien (toujours lui) mais aussi Wajid Uddin, le facilitateur, l'homme aux lunettes de soleil de l'autorité. Nous avons traversé des villages dont le destin, nous l'apprendrons plus tard, était de finir au fond d'une giga-bassine.

Grand merci aux équipes de l'UMI IFAECI à Buenos Aires et au CONICET à Mendoza, pour l'excellence de l'accueil des collègues Argentines, pour leur aide et les échanges scientifiques : Stella Moreira, Romina Ruscica ainsi que les collègues franco-belges : Mélanie Roy et François De Vleschouwer. Et aussi pour les souvenirs de terrain dans les Andes, de pinguins et autres guanacos, de cuissons de viandes et de provolone, de manifestations de *porteños* anti-FMI et de *vermuteria*, tout ça restera i.nou.bli.able.

Un grand merci aux aventurier·ère·s du Grand Nord pour les moments hors du temps d'abord en Sibérie arctique, puis au bord de la baie d'Hudson, quand le temps de la guerre nous a rattrapé. Nikita Tananaev et sa capacité d'improvisation face aux aléas du terrain, à apprendre le français en quelques mois et son goût pour l'humour absurde, Michelle Garneau et

la *A team* pour la bonne humeur et le travail d'équipe sur le pergélisol sous un soleil de plomb ou dans le blizzard mordant, sur la table de pique-nique dans le froid de la nuit sous les aurores boréales : Laure Gandois, Fred Bouchard, Maia Barret, Julien Arsenault, Lucile Cosyn, Rémi Trémouille, Lucia Perez-Serrano. Je remercie toute l'équipe technique, l'ingénieur son et vidéos, Arnaud Mansat pour son temps de montage et ses heures d'écoute des enregistrements de nos aventures nordiques, Konstantin Ozeritski pour ce vol drone thermique de nuit improvisé au dessus de la tourbière gelée, et les données incroyables qu'elles ont fournies pour un prix très modeste et festif... Grand merci à l'équipe du CNSC de Churchill pour son dévouement pour que la SCIENCE avance! Une pensée à Sheldon, le *bear monitor* et ses histoires arctiques incroyables, le moose grillé à l'arrière du *truck*. Et petite dédicace à Kubrick pour son très approprié "Shining".

Un grand merci à Michel Le Page, qui m'a accompagné dans mes premières cartographies de riz alors que, cloué au lit par une hernie discale, je passais le temps sur les premières données Sentinel. Merci à lui pour le temps qu'il a consacré, et pour les rencontres qu'il a rendues possibles, notamment avec Panu et Tita, de l'agence spatiale Thaïlandaise à Bangkok, et qui font partie des perspectives à court terme de ce travail. Si facile et enrichissant de travailler avec un optimisme aussi débordant, je suis très heureux de pouvoir les remercier ici. De même, je remercie Thuy Le Toan (à nouveau) pour son énergie, ses contacts en Asie du Sud-Est, et les aventures fabuleuses qu'on a pu traverser, du nuage de pollution de New-Delhi aux embouteillages de Hanoi en passant par l'ICISE de Quy Nhon. Merci également à Thanh Ngo-Duc, de l'USTH de Hanoi, croisé là-bas, venu faire un séjour au CESBIO pour concrétiser des collaborations à l'heure où j'écris ces lignes.

Merci également à Claire Pascal, ma toute première étudiante en thèse, qui a dû essuyer les plâtres d'une expérience nouvelle pour moi, et avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler. Je pense aussi aux stagiaires qui ont contribué à ce que je puisse demander cette validation d'acquis : Yvan Gouzenes, Tamara Queune, Maëlle Goupil, Diane Duchemin, Loris Cousin, Raphaël Registo. Merci à Olivier Merlin pour la direction de thèse de Claire, une expérience enrichissante et agréable.

Toute mon affection à Jean-Louis Roujean, avec qui j'ai partagé le plus longtemps un bureau (mais pas que) et qui semble être encore content de cette situation (malgré tout).

Un grand merci à Lionel Jarlan, qui a accepté (il a dit avec plaisir) le rôle de correspondant/Parrain/Référent/Mentor/Grand Schtroumpf et qui va encore dire qu'il n'y est pour rien, et qu'il n'a rien fait, mais qu'il est content. Je tiens à le remercier pour ça, mais aussi pour toute son œuvre, sa bienveillance et son flegme légendaire, très adaptés à la fonction de directeur de recherche à l'IRD dans le monde géo-post-politique d'aujourd'hui. Je remercie également les rapporteurs et la rapportrice ainsi que le reste du jury qui ont bien voulu se pencher sur cette pièce unique.

Je dédicace enfin ce manuscrit à celle qui partage ma vie, qui est ma vie, et avec qui on rigole bieng (et depuis longtemps)!

# Avant-propos

En sciences de l'environnement, et au risque d'enfoncer des portes ouvertes, on peut dire que la grande accélération définie par STEFFEN et al., 2007 constitue le cadre général de presque toutes les questions de recherche.

Ce concept désigne l'amplification brutale et exponentielle récente des processus d'origine anthropique qui modifient l'environnement à l'échelle planétaire. Cette dynamique de vitesse rend encore plus saillante une autre notion proposée par Paul J. Crutzen et Eugene F. Stoermer lors de la conférence du Programme International Géosphère-Biosphère (IGBP) en 2000 : l'Anthropocène (CRUTZEN, 2002). Ce terme désigne l'idée que nous pourrions définir une nouvelle ère géologique caractérisée par l'empreinte indélébile des activités humaines dans les archives environnementales. Ainsi, les impacts de nos sociétés industrielles seraient de véritables forces géophysiques avec un pouvoir de transformation à l'échelle de la planète, à l'image des activités volcaniques du Cénozoïque ayant pu modifier drastiquement le climat et la biosphère terrestre en quelques centaines de milliers d'années. Mais selon KAUFMAN et al. (2020), le rythme actuel de réchauffement, lié à la constante accélération des émissions de CO<sub>2</sub> des activités humaines sur les 150 dernières années auraient effacé 6500 ans de refroidissement d'origine naturelle des températures moyennes estimé lors de l'Holocène. Très rapide donc.

D'autres auteurs ont voulu préciser ces concepts. Pourquoi ne pas relier l'accélération de ces changements globaux à l'essor du capitalisme extractiviste ayant accompagné la révolution industrielle, en inventant le terme de *capitalocène* (MALM et al., 2014). Ce concept a l'avantage de ne pas faire porter la responsabilité de la surexploitation du monde à l'ensemble de l'humanité. S'ensuit un débat fleuve pour savoir si les systèmes politiques d'inspiration socialistes collectivistes du XX<sup>e</sup> siècle, tout aussi extractivistes et destructeurs que le capitalisme libéral triomphal des 30 dernières années, auraient eux aussi leur part de responsabilité. Débat alimenté par notre savoir précaire sur l'influence de l'*homo sapiens* et ses cousins disparus, qui, en leur temps, auraient été une force à l'origine de modifications environnementales phénoménales, conduisant par exemple, et sans être exhaustif, à la déforestation par le feu (Australie), à la forestation (Amazonie), à l'extinction de la méga faune croisée lors de leurs conquêtes des continents (hypothèse célèbre de l'"overkill") – du mamouth au koala géant, en passant par le mylodon de Patagonie (P. S. MARTIN, 1984). Un débat qui n'est absolument pas le sujet de ce mémoire. Le lecteur peut se rassurer.

C'est après 1945 que le caractère exponentiel de l'évolution d'indicateurs socio-économiques – population, PIB, investissements, consommation d'énergie, d'engrais, d'eau, grands barrages, transports, tourisme ... – et environnementaux – Gazs à Effet de Serre (GES) : CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, Température de surface, acidification des océans, azote, déforestation en zone tropicale, occupation du sol et dégradation de la biosphère... – frappe l'imaginaire de l'érudit qui sait qu'il vit dans un monde fini (MCNEILL et al., 2014).

Dans ce bestiaire d'indicateurs, certains n'ont pas manqué de vous interpeler, j'en suis sûr. L'agro-hydrologie aborde à la fois les indicateurs liés à la production agricole – l'occupation des sols, la consommation d'eau, d'engrais, la construction de barrages – et ceux liés à une destruction des environnements et ressources naturels – la déforestation, la pollution en azote des eaux continentales et côtières, la dégradation de la biosphère – entraînant elles mêmes des retroactions positives ou négatives sur la production agricole.

L'agro-hydrologie est donc une discipline scientifique qui, en se consacrant à l'étude des interactions entre activités agricoles et ressources en eau, va rendre compte des changements rapides liés à la grande accélération de l'anthropocène, et ce partout dans le monde. Vous êtes prévenus.

Selon les critères choisis, l'agro-hydrologie peut apporter un éclairage sur les exploits productivistes des remembrements, révolutions vertes, mécanisations agricoles, et autres infrastructures hydrauliques à court et moyen terme. Elle a également l'objectif d'identifier et quantifier à plus long terme les effets délétères de ces transformations modernes sur les ressources et les milieux : structure et fertilité des sols, disponibilité en eau, pollutions diffuses. Elle est aussi le socle de transversalité et de couplage avec des questions d'ordre sociale, économique, technologique pour comprendre la capacité de résilience des agro-systèmes conventionnels, ancestraux ou innovants, proposer des systèmes plus durables, si tant est que quelqu'un puisse en fournir une définition convaincante, dans un climat qui ne connaît plus la stabilité caractéristique de l'holocène. Une stabilité qui aurait favorisé le succès de l'agriculture depuis le début de la révolution néolithique, il y a 11 000 ans (RICHERSON et al., 2001).

Né dans un monde où la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique était de 340 ppm, j'écris ce mémoire dans un monde à 430 ppm : un niveau jamais atteint depuis le Pliocène il y a 3,3 millions d'années (VEGA et al., 2020), période durant laquelle le climat global était plus chaud de 2–3°C et le niveau marin plus élevé de près de 25 m. Or, les températures de la période 2010–2019 restent encore comparables à celles de l'Éémien, il y a environ 125 000 ans (KAUFMAN et al., 2020). Ce contraste illustre le décalage temporel entre la concentration en CO<sub>2</sub> et la réponse thermique du système Terre : il est donc raisonnable de s'attendre à une poursuite du réchauffement jusqu'à atteindre, à terme, des températures moyennes proches de celles du Pliocène.

Les enjeux des sciences de l'environnement en général, et de l'agro-hydrologie en particulier, sont de quantifier l'impact de ces changements rapides, pas uniquement climatiques, et d'essayer de proposer des "solutions" – je préfère le mot "correction" mais c'est très personnel – pour modifier ces trajectoires. Nous allons montrer ici quelques exemples de recherches méthodologiques quantitatives. Pour les solutions, au risque de décevoir les technoscientistes, ne les cherchez pas ici, je ne travaille pas sur la *transformation du réel* (GUÉGUEN et al., 2022), ni chez moi, ni dans les pays tiers. Pas encore !

# Chapitre 1

## L'avènement de l'agro-hydrologie spatialisée

Mieux contraindre les dynamiques agricoles par satellite

### 1.1 Introduction du chapitre

L'agriculture et les cycles de l'eau sont influencés non seulement par le dérèglement climatique, mais également par la croissance et l'interconnexion des économies humaines. Le climat, souvent mis en avant, n'est qu'un facteur parmi d'autres dans la transformation des agrosystèmes. Il est donc crucial d'évaluer l'importance relative de différents leviers : amélioration ou dégradation des conditions de production, transition des milieux naturels, intensification des cultures via l'innovation technologique, ou conversion des agricultures vivrières en cultures commerciales. Ces considérations imposent de développer des méthodes capables de quantifier ces dynamiques à l'échelle des territoires agro-géo-physiques, afin d'éclairer les stratégies d'adaptation et de gestion durable des ressources.

#### 1.1.1 L'agro-hydrologie, sous-discipline de l'hydrologie

L'agro-hydrologie étudie les interactions entre agriculture et ressources en eau. Émergente dans les années 1970 aux États-Unis, suite à une prise de conscience des problèmes de pollutions diffuses agricoles (KAUARK LEITE, 1990), elle combine :

- l'hydrologie, pour décrire le cheminement de l'eau et des nutriments, leur stockage, vidange et transfert/transformation à l'échelle des bassins versants.
- l'agronomie, pour décrire les relations sol-plante-atmosphère, la croissance des cultures et optimiser les pratiques agricoles et les rendements.

Le terme apparaît dès 1960 (WHITMORE, 1961), autour de méthodes appliquées aux bilans hydriques agricoles, à la nécessité de drainage des marais puis de leur irrigation (RIDDER et al., 1994). Malgré une croissance notable de l'hydrologie agricole, le terme « agro-hydrologie » n'a pas encore acquis une reconnaissance formelle en tant que sous-discipline, malgré son histoire ancienne, sa pertinence croissante dans un monde où l'irrigation *accélère*. Elle s'est rapidement développée en un portefeuille de recherche beaucoup plus large, englobant des résultats diversifiés s'étendant aux sciences sociales et physiques. Selon SMIDT et al. (2023), il devient de plus en plus nécessaire de clarifier et d'orienter le développement de la discipline, tout en structurant son champ de recherche, à mesure que des équipes interdisciplinaires exploitent des outils innovants pour relever les défis continuellement renouvelés de l'agriculture et de la gestion de l'eau.

### 1.1.2 La modélisation agro-hydrologique

Une des réalisations majeures de l'agro-hydrologie est la conceptualisation, construction numérique et validation de couplages de modélisation numériques conceptuelles, empiriques, mécanistes ou mixtes. Développés à partir des années 1980 en France, avec le développement de l'informatique dans les laboratoires, les flux d'eau y sont d'abord simulés en premier, auxquels se greffent des processus de transfert et de transformation des nutriments (AMBROISE, 1999; BEAUJOUAN, 2001; DURAND et al., 2002; DUPAS et al., 2011; FERRANT et al., 2011). Au même moment, à l'U.S. Department of Agriculture (USDA), le modèle Soil Water Assessment Tool (SWAT) était développé (ARNOLD et al., 1998), pour devenir l'un des modèles agro-hydrologiques les plus utilisés dans le monde, à vrai dire parce qu'il sert de modèle hydrologique simplifié pouvant simuler des débits et concentrations en éléments à l'échelle de bassins versants très grands plutôt que comme modèle d'interaction des surfaces et pratiques agricoles avec la ressource en eau.

Les modèles agro-hydrologiques combinent en effet un modèle de système hydrologique simplifié, capable de fonctionner au pas de temps journalier mais avec une représentation spatiale explicite, et un modèle de croissance des cultures au même pas de temps. Ce couplage permet de simuler la cascade de processus hydriques et biophysiques, en intégrant explicitement les effets des pratiques agricoles sur la production agricole, la consommation et le transfert de l'eau et des nutriments, modulés par l'activité photosynthétique pilotée par les données météorologiques. Les forçages météorologiques des deux modèles sont identiques garantissant une cohérence des interactions entre le système hydrologique et le système sol-plante pour simuler le cycle de l'eau et des nutriments dans les bassins agricoles en tenant compte de :

- l'effet spatialisé des successions culturales et de l'occupation des sols agricoles dans les bassins versants
- la croissance des cultures et l'absorption d'eau et de nutriments
- l'effet des pratiques agricoles (irrigation, fertilisation, travail du sol)
- l'effet des agencements des cultures et structures agro-forestières (haie, interculture, bandes enherbées), hydrologiques (réservoirs, drains, fossés, canaux)
- l'effet des paramètres hydrologiques de transferts (conductivité hydraulique à saturation, vitesse de transfert latéral, coefficients de Manning ...) et transformation de la matière organique des sols (taux de minéralisation, dénitrification) ou dans la rivière (devenir de l'azote, phosphates, pesticides).

Ils permettent de :

- fournir des informations spatialisées sur l'usage de l'eau et le transfert des nutriments
- évaluer les impacts de l'agriculture sur la qualité et la quantité de l'eau
- identifier sources et puits d'azote, et analyser l'efficacité des politiques agricoles
- étudier l'impact du changement climatique et des pratiques sur la qualité et quantité des eaux de surface et souterraines.

#### 1.1.2.1 Les approches de modélisation

Épistémologiquement, ils peuvent être empiriques (dits "boîtes noires" ou "data-driven"), décrivant les relations entrée-sortie sans détailler les processus sous-jacents (DUNN et al., 2013), ou mécanistes, qui décrivent physiquement les processus à partir des lois fondamentales de la physique, chimie ou biologie, avec des paramètres idéalement mesurables (FLIPO et al., 2007). Une troisième catégorie, les modèles conceptuels, se situe entre les deux, utilisant des schémas simplifiés (compartiments de stockage et de flux) où les paramètres sont souvent calés, ne correspondant pas à des quantités observables (FENICIA et al., 2011). Beaucoup de modèles combinent

en pratique ces approches mixtes, relations empiriques ou conceptuelles à base physique. C'est le cas de deux modèles dont nous allons parler dans ce chapitre : SWAT et TNT2, utilisés pour simuler la cascade de processus agro-hydrologiques (BEAUJOUAN, 2001 ; FERRANT et al., 2011 ; FERRANT et al., 2014a ; SALMON-MONVIOLA, 2017).

### 1.1.2.2 Les représentations spatiales et temporelles

Spatialement, on distingue les modèles globaux, qui considèrent le bassin versant comme un ensemble homogène sans découpage, les modèles semi-distribués, qui segmentent l'espace en unités homogènes (type de sol, météo, occupation du sol pente, réseau de drainage) mais deconnectées spatialement. C'est le cas des Hydrologic Response Units (HRU) où les écoulements latéraux ne sont pas explicitement simulés mais routés directement vers les cours d'eau ou les réservoirs souterrains (NEITSCH et al., 2002). Enfin les modèles distribués, qui intègrent la variabilité spatiale via un maillage et simulent explicitement les écoulements latéraux. C'est le cas du modèle Topography based Nitrogen Transfer and Transformation (TNT2) (BEAUJOUAN, 2001 ; SALMON-MONVIOLA, 2017). Pour le lecteur voulant aller plus loin, j'ai réalisé une comparaison de l'application de ces deux modèles au cours de ma thèse (FERRANT, 2009) dans journal of hydrology (FERRANT et al., 2011).

Temporellement, les modèles peuvent être statiques, sans évolution temporelle, ou dynamiques, fonctionnant avec des pas de temps allant de l'infra-journalier au pluriannuel, afin de représenter des processus à des échelles de temps très diverses, des plus rapides (quelques secondes) aux plus lents (plusieurs années, voire décennies pour les transferts hydrologiques).

### 1.1.3 Finalité de la modélisation agro-hydrologique

La finalité principale de la modélisation agro-hydrologique est l'évaluation des impacts des changements climatiques et agricoles sur la quantité et la qualité de l'eau au niveau des bassins versants. Ces modèles constituent des outils essentiels pour la mise à l'épreuve de divers scénarios – de l'efficacité des pratiques agricoles passées et prospectives, aux impacts des variabilités climatiques à court terme ou changements climatiques à plus long terme – sur les cycles hydrologiques et biogéochimiques. L'outil peut ainsi contribuer à identifier des leviers d'action pour atténuer la pollution diffuse agricole ou mieux répartir l'eau disponible entre irrigation, milieux naturels et eaux souterraines. Il peut fournir un support à la décision pour une gestion durable des ressources en eau face aux défis environnementaux actuels et futurs (MOREAU et al., 2012 ; FERRANT et al., 2013 ; SALMON-MONVIOLA, 2017 ; CASAL, 2018 ; CASAL et al., 2019). J'ai pu intervenir sur ces aspects dans les travaux de thèse de Laurène Casal qui a travaillé sur la calibration du modèle TNT2 sur des bassins versants agricoles breton. Elle a simulé quantitativement l'abattement théorique des fuites de nitrates dans les rivières à l'aide d'une densification du réseau de haie, que seule une approche de modélisation distribuée permet d'en modéliser les effets hydro-biochimiques. J'avais également réalisé ce genre de travail en thèse (FERRANT, 2009 ; FERRANT et al., 2013) dans le contexte agro-hydrologique de la Gascogne (Sud-Ouest de la France).

### 1.1.4 L'équifinalité dans les modèles agro-hydrologiques

Historiquement, ces modèles distribués sont construits sur des cartes pédologique, d'occupation des sols, de pentes, d'objets hydrologiques divers (canaux, drains, retenues, lacs et barrages) dont l'intersection spatiale définit un cadre de forçage des paramètres mécanistes ou empiriques

reproduisant les flux d'eau : évapotranspiration, flux latéraux, ruissellements, infiltration, recharge de nappe. La calibration de ces processus se fait sur une variable intégratrice, les débits à l'exutoire du bassin versant considéré. Et se cache derrière cette calibration un ensemble d'équifinalités.

Le principe d'équifinalité tient dans le fait que plusieurs structures de modèles, jeux de paramètres ou conditions initiales peuvent conduire à des résultats similaires. L'équifinalité ne se limite donc pas aux paramètres, mais s'étend aux choix de métriques de performance, aux flux internes et aux données d'entrée. Les sources d'équifinalité pour les seuls modèles hydrologiques sont énumérées dans la publication de KHATAMI et al. (2019).

Premièrement, l'équifinalité des structures de modèle signifie que différentes architectures de modèle, avec des niveaux de complexité variés, peuvent reproduire un comportement hydrologique de manière quasi équivalente. Les modèles pluie débit statistiques, qui vont avoir de meilleures performances sur la reconstruction des débits que tout modèle mécaniste, à ceci près qu'ils ne reproduisent pas la cascade de processus, et donc ne permettent pas de tester des scénarios de changement d'occupation du sol par exemple.

Deuxièmement, l'équifinalité des paramètres de modèle, la facette la plus étudiée, implique que plusieurs ensembles de paramètres peuvent être acceptables et conduire à des performances de modèle équivalentes, rendant l'identification d'un jeu de paramètres unique et "vrai" incertaine. Cette difficulté d'identification est généralement due à une limitation des données d'observation spatio-temporelles disponibles. Elle est entre autres à l'origine du développement de méthodes d'estimation de l'incertitude par vraisemblance (comme GLUE pour Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) qui représente la valeur d'un paramètre comme une distribution de probabilité (BEVEN et al., 2014) basé sur la performance du modèle : c'est à dire une optimisation d'une fonction objectif et une valeur plausible des paramètres lorsqu'ils ont une signification physique. Ces concepts vont servir dans les travaux qui suivent (FERRANT et al., 2014a ; FERRANT et al., 2016).

Troisièmement, l'équifinalité des métriques de performance (ou fonctions objectives) résulte de la réduction de comportements systémiques complexes en des valeurs agrégées, ce qui entraîne une perte d'information et permet à des erreurs sous-jacentes différentes de produire des scores de performance identiques. Une des stratégies explorée dans les deux études précédemment citées est de multiplier les fonctions objectives grâce aux variables dérivées des données satellite permettant de valider des processus intermédiaires et ajoute de l'information spatiale pour contraindre le modèle : ici, la vitesse de croissance des cultures ou les surfaces saisonnières cultivées.

Quatrièmement, l'équifinalité des conditions initiales et aux limites survient lorsque diverses conditions de départ ou de frontière, souvent incertaines, peuvent aboutir à des résultats de simulation comparables.

Cinquièmement, l'équifinalité des flux internes du modèle illustre que différentes combinaisons de processus internes simulés (par exemple, l'interception, l'évapotranspiration ou le ruissellement) peuvent également conduire au même résultat de sortie du modèle.

Enfin, et c'est un point crucial pour la suite de ce chapitre, l'équifinalité des données d'entrée apparaît lorsque différentes variables d'entrée, variant en type, quantité ou qualité, peuvent conduire à des résultats de simulations numériques similaires.

C'est précisément cette dernière équifinalité des données d'entrée, qui représente un défi majeur dans la calibration et la validation des modèles agro-hydrologiques spatialisés, que j'ai commencé à explorer au Centre d'Etude Spatiale de la Biosphère (CESBIO), à l'aide en particulier des observations spatio-temporelles par satellite, au milieu des spécialistes des données d'observation satellite de la terre en tout genre : optique, radar, micro-onde.

### **1.1.5 Données d’observation de la terre : quelles résolutions, pour quelles bénéfices ?**

En hydrologie, le débat scientifique actuel porte sur l’hyper-résolution nécessaire des modèles continentaux. WOOD et al. (2011) ont argumenté le besoin d’augmenter la résolution spatiale des modèles hydrologiques à l’échelle continentale ou globale, en passant de 5-10 km à 1km. Cette opinion est motivée par l’importance des processus d’interaction entre les transferts de surface et de sub-surface dans les cycles biogéochimiques, dans la génération de crues ou de sécheresses hydrologiques. Les échanges surface et atmosphère via l’évapotranspiration sont contrôlés par l’humidité des sols et la végétation, évoluant également selon des conditions locales (pente, orientation par exemple), ainsi que par les activités agricoles. Cette hyper-résolution de l’ordre du km est rendue possible par l’existence de bases de données à l’échelle mondiale dérivées d’observations satellites de moyenne résolution à basse résolution caractérisant les variables de surface (évaporation, température de surface, Indices de végétation, surfaces enneigées, occupation des sols, humidité des sols). En réponse à cette communication, BEVEN et al. (2012) ont ajouté que le manque de connaissance des processus, l’incertitude associée à la simplification des modèles, la précision des mesures (satellite ou non) et l’incertitude quant à leur interprétation ont une importance plus grande sur leurs capacités de prédiction que la résolution spatiale des modèles elle-même. De plus, ils estiment que les paramètres hydrologiques valables à basses résolutions spatiales ne sont plus adaptés à des échelles fines. A la lecture de ces éléments, il semble nécessaire d’étudier les surfaces cultivées à l’aide d’approches de modélisation adaptées à la résolution des hétérogénéités spatiales des surfaces cultivées, en intégrant l’hyper-résolution des observations (satellitaires notamment) pour décrire les dynamiques des surfaces cultivées : phénologie, mise en culture, pratiques agricoles (LAFONT et al., 2012).

L’approche de modélisation couplée agro-hydrologique est en cela adaptée aux capacités d’observation de la terre qui ont explosées dans la dernière décennie. C’est dans ce contexte, large et précis à la fois que j’ai développé mes recherches au CESBIO, d’abord en post-doc puis en tant que chercheur à l’IRD.

## **1.2 Apport des données optiques multi-temporelle sur la modélisation du cycle de l’azote**

Mes travaux avec les données Formosat-2 et le modèle agro-hydrologique TNT2 se sont inscrits dans une démarche d’amélioration de la calibration et de la représentation spatialisée des processus au sein des bassins versants agricoles, en tirant parti de l’avènement des séries d’images satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle (FERRANT et al., 2014a ; FERRANT et al., 2016). Le modèle TNT2 (Topography-based Nitrogen Transfer and Transformation) est un modèle agro-hydrologique distribué, couplant le modèle de culture STICS (BRISSON et al., 2002) avec un modèle hydrologique basé sur les concepts de TOPMODEL (BEVEN et al., 1979). Il a été développé pour simuler le cycle couplé de l’eau et de l’azote à l’échelle de petits bassins versants agricoles, comme le bassin de Montoussé à Auradé (Gers, France), un site de recherche expérimental suivi depuis 1983 (FERRANT, 2009).

### **1.2.1 Problématiques initiales et rôle des observations satellitaires**

Avant ces travaux, la calibration des modèles agro-hydrologiques distribués comme TNT2 était souvent limitée à des variables intégratives à l’échelle du bassin versant (débits, flux de

nitrate à l'exutoire, rendements agricoles moyens). Cette approche conduisait aux problèmes d'équifinalité présentés en introduction, où plusieurs jeux de paramètres pouvaient produire des résultats similaires sur les critères d'évaluation, et masquait la complexité des processus à l'échelle locale. Les principales incertitudes provenaient du manque d'observations agronomiques détaillées (biomasse, croissance des cultures) pour toutes les situations pédo-climatiques, ainsi que d'une connaissance imparfaite des pratiques agricoles spatialisées, telles que les dates de semis ou de fertilisation.

C'est à ce moment que les séries d'images satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle de Formosat-2 ont joué un rôle déterminant. Grâce à une résolution de 8 mètres et à des acquisitions fréquentes réalisées dans le cadre de l'Observatoire Spatial Régional du CESBIO <https://osr.cesbio.cnrs.fr/>, 105 cartes de l'indice de surface foliaire (LAI) ont pu être dérivées sur la période 2006–2010 pour l'ensemble du bassin versant étudié.

Le LAI, et plus spécifiquement son maximum saisonnier (LAX), a été utilisé comme indicateur intégrateur de la productivité des cultures à l'échelle du pixel ou de la parcelle agricole. La figure 1.1 illustre la forte corrélation entre ce paramètre maximal et le retard de levée observé à un stade précoce du tournesol sur les images *Google Satellite* (figure 1.1, à droite).

Cette photographie aérienne montre, en juillet 2008, des parcelles de tournesol encore en début de croissance végétative (zones vertes), entourées de champs de blé d'hiver en phase de dessiccation, juste avant la récolte. Les parcelles de tournesol présentent une forte hétérogénéité intra- et inter-parcellaire, visible dès la levée et retrouvée au stade de maturité physiologique, matérialisé par le LAI maximal (LAX) de la saison (figure 1.1, à gauche).

Ces données ont offert une opportunité unique pour contraindre et calibrer spatialement le modèle TNT2, avant même le lancement de la mission Sentinel-2 en 2015.

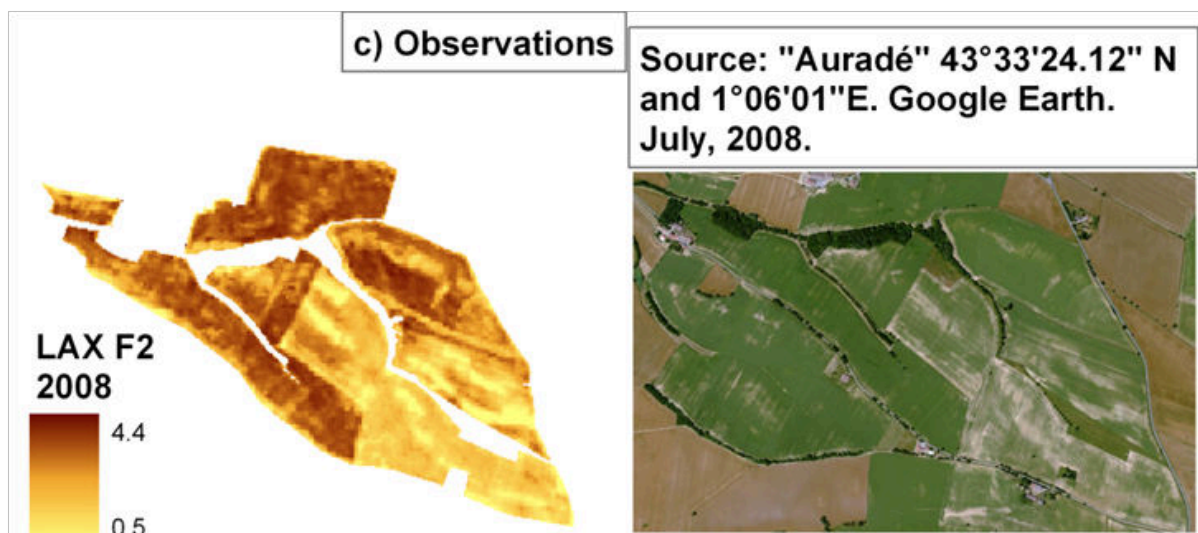


FIGURE 1.1 – Maximum d'indice foliaire dérivé des séries temporelles d'image FORMOSAT-2 de 2008 (gauche, 8m de résolution spatiale) comparé à une photographie aérienne en Juillet 2008 (50 cm de résolution spatiale) pour le tournesol (d'après FERRANT et al. (2016)).

### 1.2.2 Réajustement des dates de semis

La date de semis constitue une variable de forçage essentielle dans les modèles agronomiques, telle que STICS, qui est intégré au modèle agro-hydrologique distribué TNT2. Cette date initie le calcul du cumul de températures journalières, déterminant ainsi la progression des stades

phénologiques, de l'émergence à la maturation et à la sénescence de la culture. Cependant, l'intégration de cette variable aux modèles se heurte à des incertitudes majeures. D'une part, les données de semis, lorsqu'elles sont transmises par les agriculteurs, sont souvent incomplètes et spatialement non exhaustives, nécessitant des estimations basées sur des règles d'experts ou des moyennes régionales. D'autre part, la pertinence de ces dates est intrinsèquement liée au cultivar (ou espèce) modélisé et à ses paramètres phénologiques spécifiques, qui sont rarement disponibles dans les bases de données agricoles et évoluent rapidement. La durée de la vernalisation du blé d'hiver, par exemple, peut significativement influencer la sensibilité de l'indice de surface foliaire (LAI) à la date de semis.

Face à ces limitations, j'ai développé une stratégie novatrice, consistant à reconsidérer la date de semis non plus comme une variable de forçage, mais comme un paramètre à calibrer spatialement. Cette approche s'est appuyée sur l'exploitation de séries d'images satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle, telles que les 105 cartes de LAI à 8 mètres de résolution dérivées des données Formosat-2 sur la période 2006-2010. Un algorithme d'optimisation a été mis en œuvre pour ajuster de manière itérative la date de semis à l'échelle de la parcelle (ou même du pixel). Ce processus vise à minimiser le décalage temporel (Tdiff), exprimé en températures cumulées, entre les profils de LAI simulés par TNT2 (intégrant STICS) et les profils observés par satellite, en se focalisant sur les premières phases de croissance (seuil de LAI à 0.7). Cette méthode a démontré une convergence rapide des solutions de dates de semis.

Les résultats de cette optimisation ont révélé un ajustement significatif de la croissance simulée des cultures (notamment le blé d'hiver) aux observations satellitaires, réduisant les décalages temporels initiaux. L'impact de cette recalibration sur les bilans hydriques à l'échelle du bassin versant s'est avéré négligeable (environ 1 mm/an). En revanche, un effet notable a été observé sur les flux d'azote dans les cours d'eau, avec une réduction d'environ 12 % des pertes dans les cours d'eau et une diminution de 2.7 % de la dénitrification. Ceci s'explique par une augmentation de l'absorption d'azote par les plantes et de la production de biomasse pour le blé d'hiver, améliorant ainsi l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE).

Si le critère d'évaluation hydrologique, les débits annuels, ne montrent pas de changements majeurs, l'optimisation a entraîné des effets hydriques significatifs à des échelles de temps et d'espace plus fines (E. MARTIN et al., 2016). L'optimisation, particulièrement efficace pour le blé d'hiver, a amélioré la dynamique de croissance simulée de cette culture. Un semis plus précoce du blé d'hiver, résultant de cette optimisation, a provoqué une augmentation de l'évapotranspiration réelle (AET) de mars à juin. Cette hausse de l'AET est directement attribuée à un développement végétal anticipé et à une absorption racinaire de l'eau plus précoce au printemps. La conséquence directe de cette absorption anticipée est une baisse de la teneur en eau du sol, menant à des sols plus secs. Cette diminution de l'humidité du sol se traduit par une réduction des débits mensuels des cours d'eau par rapport aux simulations antérieures comme montré dans la figure 1.2 (jusqu'à 5% en fin d'été). Cette approche met en lumière le potentiel des données satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle Formosat-2 – que seront ensuite Sentinel-2 – pour contraindre les modèles agro-hydrologiques à l'échelle parcellaire, permettant ainsi de mieux modéliser des dynamiques hydriques fines, souvent masquées par les agrégations annuelles.

### 1.2.3 Calibration de la réserve utile

Dans un second temps, les travaux ont porté sur la variabilité spatiale du LAI observée au sein même des parcelles (figure 1.1), qui ne pouvait être expliquée uniquement par les dates de semis ou les pratiques agricoles homogènes à l'échelle du champ. Cette hétérogénéité est davantage liée aux conditions locales du sol et de l'hydrologie (FERRANT et al., 2016).

La capacité de rétention en eau du sol ou réserve utile (SWHC pour Soil Water Holding Capacity) est un réservoir fondamental dans la modélisation agro-hydrologique, influençant di-

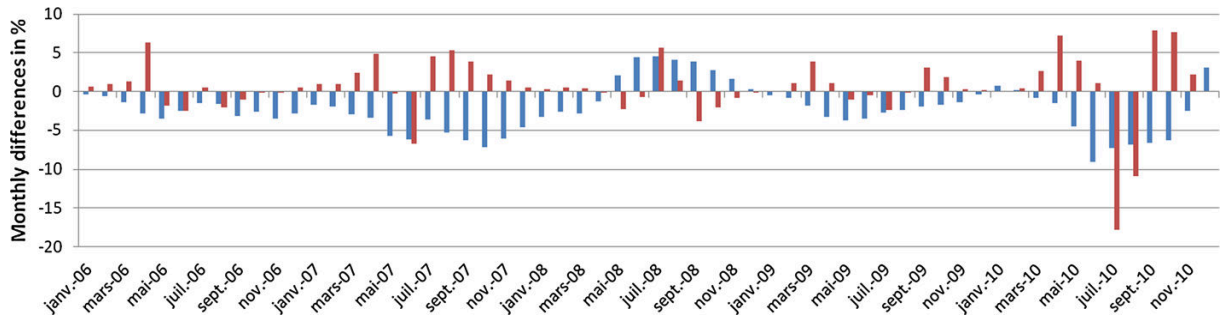


FIGURE 1.2 – Débits mensuels (bleu) et évapotranspiration (rouge) simulé par le modèle TNT2 en pourcentage de différence entre une version "dates de semis optimisées" et une version "dates de semis *a priori*" (d'après E. MARTIN et al. (2016)).

rectement l'infiltration, le ruissellement, l'évapotranspiration et la percolation, des processus qui gouvernent le bilan hydrique des sols. Ce réservoir est défini par un ensemble de paramètres (profondeur de couches de sol, porosités etc) qu'il est très difficile d'obtenir à partir des cartes pédologiques pas toujours spatialement précises. La calibration directe de la réserve utile (SWHC) est donc un défi en raison du manque de données et de la variabilité spatiale intrinsèque des sols.

Dans TNT2, cette capacité est définie par trois paramètres sur trois niveaux de sol : une épaisseur de niveau de sol, une porosité de drainage (l'eau n'y reste pas plus d'un jour) et un microporosité (qui va servir aux cultures dans leur horizon racinaire). J'ai donc re-estimé spatialement la SWHC en utilisant les séries d'observations satellitaires Leaf Area Index maximal (LAX), dérivées des images Formosat-2 sur la période 2006-2010. Plus précisément, un ensemble de 154 combinaisons réalistes de profondeur de sol (de 0,2 à 2 m) et de porosité de rétention (de 0,04 à 0,3) a été testé pour simuler des LAX synthétiques à l'échelle du pixel. L'SWHC optimale pour chaque pixel et chaque année a ensuite été sélectionnée en identifiant la combinaison de paramètres qui minimisait la différence entre le LAX simulé et le LAX observé par satellite. Il est important de noter que cette optimisation a été réalisée en désactivant les facteurs de stress liés à l'azote, attribuant ainsi les hétérogénéités observées du LAX principalement aux facteurs de stress hydrique liés à la SWHC.

Les résultats de cette calibration ont démontré une bonne capacité du modèle à reproduire l'hétérogénéité spatiale du LAX observé pour chaque année individuelle, avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,95 et des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) inférieures à 0,2 entre les LAX synthétiques et observés (sauf pour 2008).

Des analyses de sensibilité (indices de Sobol) ont été utilisées pour comprendre l'influence de ces paramètres sur le LAX simulé en fonction du contexte topographique et climatique (figure 1.3). L'indice de Sobol est un indicateur utilisé en analyse de sensibilité globale, basée sur la décomposition de la variance (SOBOL, 2001).

La méthode de calibration spatiale sur le seul LAX a révélé une difficulté à trouver une solution SWHC unique et constante pour un même pixel sur plusieurs années, n'y parvenant que pour environ 10 % des pixels lorsque l'erreur était limitée à  $0,2 \text{ m}^2/\text{m}^2$  sur les cinq ans. Cette incapacité à maintenir une solution unique s'explique par la nature des facteurs de stress (seuls les facteurs hydriques étaient considérés), la dynamique de croissance racinaire et les changements temporels de la porosité du sol. Le tournesol, en tant que culture estivale non irriguée, s'est avéré être la culture la plus contraignante pour l'estimation de la SWHC.

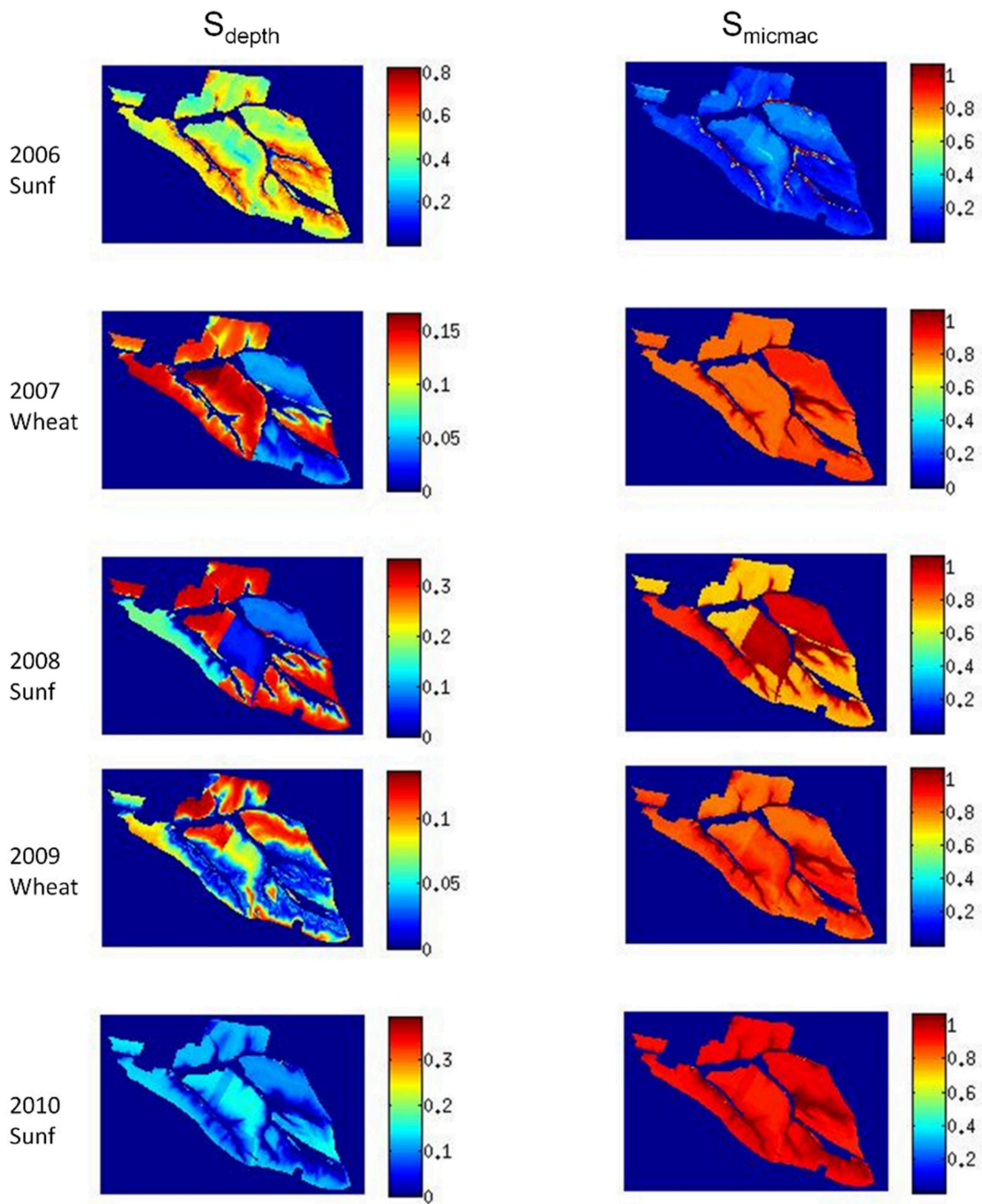


FIGURE 1.3 – Indices de Sobol pour chaque ensemble de LAI max (LAX) simulés pour chaque combinaison de paramètres de sol pour chaque pixel et chaque année.  $S_{\text{depth}}$  pour la profondeur de sol et  $S_{\text{micmac}}$  pour la porosité de rétention. Plus la valeur de Sobol est forte et plus la sensibilité est forte (d'après FERRANT et al. (2016)).

#### 1.2.4 Perspectives sur la modélisation agronomique spatialisée

Ces études d'il y a 10 ans ont démontré le potentiel des données satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle (Formosat-2, précurseur de Sentinel-2) pour améliorer la modélisation agro-hydrologique. En contraignant dynamiquement la croissance des cultures et les paramètres clés du sol, ces observations ont permis de mieux localiser les zones de surplus ou de déficit en azote dans le paysage et d'affiner la compréhension des transferts d'eau et de nutriments.

Néanmoins, elles ont aussi soulevé des défis, notamment l'équifinalité des paramètres de sol et la nécessité d'intégrer d'autres facteurs de stress (stress azoté, rayonnement global, dynamique du sol). Les missions satellitaires qui ont suivi, comme les satellites Sentinel-1A & 1B (lancés en 2014 et 2016, radar pour l'humidité du sol et la biomasse) et Sentinel-2A & 2B (lancés en 2015 et 2017), avec leur couverture systématique et haute résolution, allaient permettre d'acquérir de nouvelles données nécessaires pour relever ces défis et développer une modélisation agro-hydrologique encore plus réaliste et spatialement explicite.

Les recherches menées plus récemment par certains co-auteurs de ces travaux et collègues du CESBIO, présentées dans l'article "AgriCarbon-EO v1.0.1" (WIJMER et al., 2024), s'inscrivent dans une lignée directe de ces publications pionnières. Leur publication décrit une chaîne de traitement complète conçue pour la simulation à grande échelle et à haute résolution des flux de carbone, en assimilant les réflectances Sentinel-2 et Landsat-8 dans des modèles de transfert radiatif – PROSAIL dans PROSPECT-5-D (FÉRET et al., 2017) – et agronomiques – SAFYE-CO2- (PIQUE et al., 2020). En exploitant ces données d'observation de la Terre (EO) à l'échelle intra-parcellaire (10 m) sur de vastes régions, AgriCarbon-EO vise à estimer les composantes du bilan carbone, telles que la biomasse et les rendements du blé.

L'approche développée par WIJMER et al. (2024) répond directement aux défis d'équifinalité et de complexité des calibrations à haute résolution précédemment identifiés. Ils emploient une approche bayésienne innovante (BASALT), combinant échantillonnage d'importance normalisé et tables de recherche, ce qui permet de propager les incertitudes tout au long de la chaîne de traitement, des réflectances aux variables de sortie.

Cette méthodologie aborde de manière élégante la question de l'équifinalité en fournissant des estimations d'incertitude et en offrant une solution adaptable à grande échelle pour l'assimilation de données de l'échelle intra-parcellaire à l'échelle régionale, un aspect où les méthodes itératives classiques seraient coûteuses en calcul. L'assimilation du LAI vert (GLAI) dérivé des satellites dans SAFYE-CO2 permet en outre de tenir compte implicitement des impacts des stress du sol (hydriques et nutritifs) sur le développement végétal, répondant ainsi au besoin d'intégrer d'autres facteurs de stress mentionnés dans les travaux antérieurs.

Ce modèle développé sur les données de l'OSR dans le sud-ouest de la France, n'a été déployé pour l'instant qu'en Ukraine, pour suivre l'impact de la guerre d'invasion de la Russie de Poutine sur la production agricole régionale (ANTONENKO et al., 2024). Les résultats montrent une baisse significative de la biomasse dans la région de Kherson en 2022, attribuée à l'abandon des terres agricoles par les fermiers, entraînant des déficits d'irrigation et de fertilisation.

Je proposerai dans les prochaines années de construire des projets avec les partenaires thaïlandais pour déployer cette chaîne de traitement sur la production de riz pluvial (non irrigué) de la région d'Isan (Nord-Est de la Thaïlande), en y intégrant le stress azoté (voir le chapitre 3).

## 1.3 Modélisation de l'impact de l'irrigation du riz en Inde du Sud

Le projet ANR SHIVA (Socio-economic Assessment of the rural Vulnerability of water users under stressors of global changes in the Hard rock area of South India) avait pour objectif d'évaluer la vulnérabilité des agriculteurs face aux pressions des changements globaux dans les régions très rurales mais densément peuplées de roches cristallines du sud de l'Inde. Dans ce cadre, mes travaux de post-doctorat visaient à modéliser le cycle de l'eau spatialement dans le bassin versant de la rivière Kudaliar dans le climat actuel et futur.

### 1.3.1 Problématiques initiales et rôle des observations satellitaires

#### 1.3.1.1 Une irrigation massive par pompage de l'eau souterraine

Le bassin versant de Kudaliar (environ 1000 km<sup>2</sup>), situé au nord d'Hyderabad, est représentatif d'une région semi-aride de roches cristallines, du granite fissuré, composant un aquifère fait d'une zone altérée appelée saprolite (premiers dizaines de mètres), d'une zone fissurée profonde et de grandes fractures apportant une importante hétérogénéité hydro-géologique locale : des débits de pompage très variables d'un forage à l'autre (figure 1.4c). Cet aquifère a été étudié par la Cellule Franco-Indienne de recherche sur les Eaux Souterraines (CEFIRES) basée au National geophysical Research Institute (NGRI) d'Hyderabad par les chercheurs du BRGM dès les années 2000 (MARÉCHAL et al., 2004).

La topographie est relativement plate (entre 430 et 640 mètres d'altitude) mais du fait de la profondeur importante de la nappe, les rivières sont déconnectées de l'eau souterraine, ce qui implique qu'elles ne coulent que pendant la mousson (Juillet à Novembre) puis s'assèchent pendant la période sèche (Décembre à Avril). Cette situation est provoquée par le pompage dans des milliers de forages (borewell) pour l'irrigation des cultures et majoritairement l'inondation du riz. Ces forages et l'alimentation électrique triphasée nécessaire au pompage ont été financé par le grand programme de modernisation de l'agriculture à partir des années 60 appelé la révolution verte.

Dans ces zones amonts, l'eau souterraine représente la principale ressource pour l'agriculture irriguée intensive, rendant la région particulièrement sensible aux sécheresses et à la surexploitation des aquifères. L'aquifère est caractérisé par une relativement faible capacité d'emmagasinement pouvant être annuellement épuisés et rechargés en une mousson importante (BOISSON et al., 2015).

#### 1.3.1.2 Vulnérabilité aux sécheresses consécutives

Des systèmes traditionnels de collecte des eaux de ruissellements – réservoirs appelés "tanks" – constituent le "Rainwater Harvesting System" (RHS, figure 1.4d), disséminés le long du réseau de drainage pour stocker temporairement le ruissellement de surface pour l'irrigation en aval mais pourraient aussi contribuer à la recharge des aquifères. Les études montrent que ces aquifères, ainsi que les RHS, ne peuvent pas contrecarrer les années de sécheresse consécutives. L'eau disponible dans les réservoirs constituant le RWH, bien qu'elle puisse localement améliorer l'approvisionnement annuel, n'est pas une solution à long terme. Le remplissage des réservoirs est extrêmement variable d'une année à l'autre et ils s'assèchent tous les deux à quatre ans (jusqu'en 2019), à l'exception de quelques années exceptionnellement humides. Cela limite la capacité de gestion sur plusieurs années et indique que l'eau, une fois infiltrée ou stockée en surface, est rapidement utilisée ou perdue (BOISSON et al., 2022).

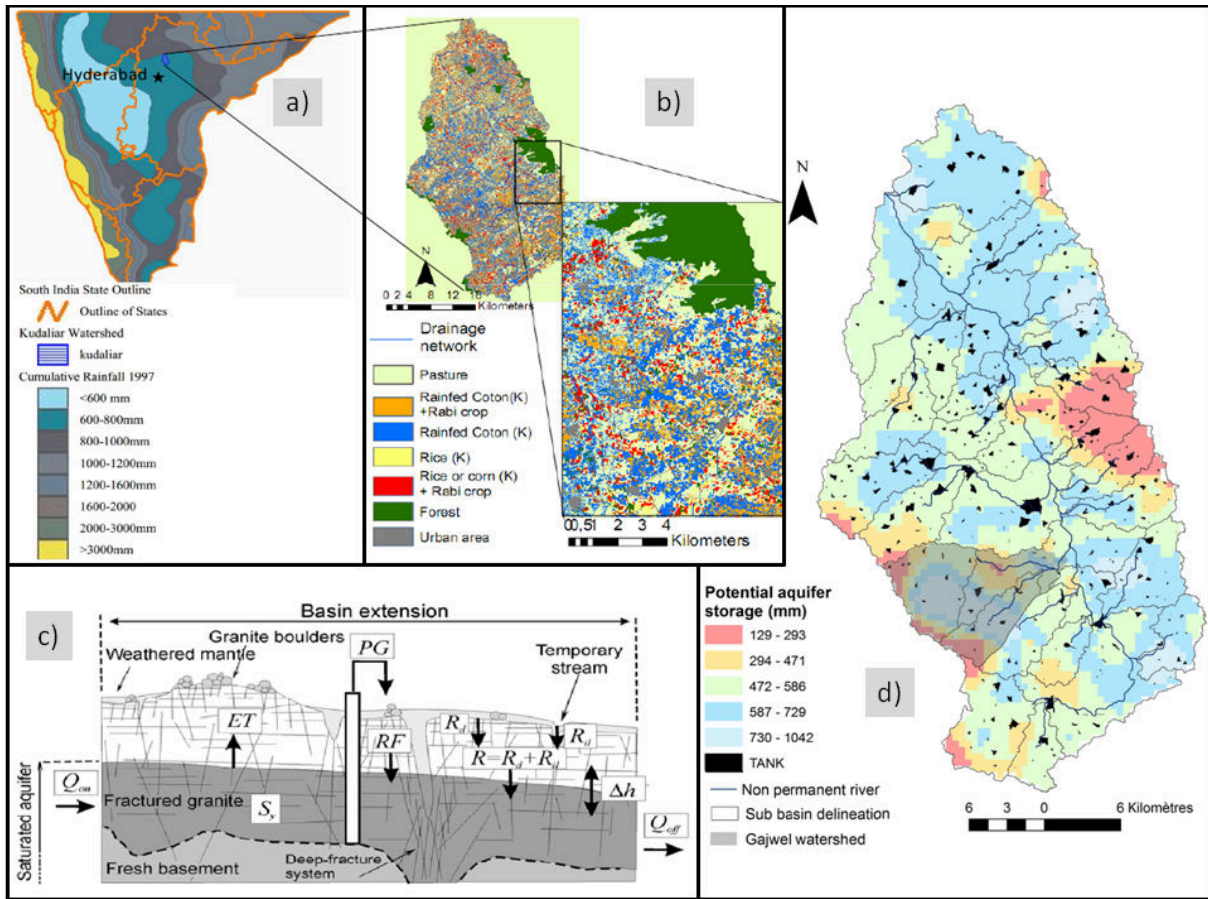


FIGURE 1.4 – (a) Localisation du bassin versant de la Kudaliar au Telangana, Inde du Sud. (b) Occupation du sol (projet SHIVA, SIRS/CLS). (c) Schéma conceptuel de l'aquifère granitique d'Hyderabad (MARÉCHAL et al., 2004). (d) Carte de capacité de stockage estimée (DEWANDEL et al., 2012) ; la zone grisée correspond au sous-bassin de Gajwel étudié par PERRIN et al. (2012).

### 1.3.1.3 Domination des flux verticaux

Dans ces aquifères, les flux d'eau verticaux (pompage, évaporation, recharge) prédominent largement sur les flux latéraux à l'échelle kilométrique :  $Q_{on}$  et  $Q_{off}$  sont donc négligeable (voir le schéma conceptuel de la figure 1.4c). La recharge des aquifères et les retours d'irrigation sont des processus saisonniers essentiels. Cette dominance s'explique par la faible conductivité hydraulique latérale de la couche fissurée de l'aquifère ( $10^{-5}$  m/s) et une forte densité de pompage. La recharge des aquifères est fortement dépendante de l'intensité et de la variabilité interannuelle de la mousson. Des années humides peuvent recharger significativement l'aquifère, parfois jusqu'à sa capacité maximale, tandis que des années sèches entraînent un épuisement rapide car l'extraction dépasse la recharge.

### 1.3.1.4 Choix d'un modèle semi-distribué

Dans ce contexte de données limitées, le modèle SWAT (Soil Water Assessment Tool) a été choisi comme outil de modélisation intégré des ces flux verticaux. Il est considéré pertinent pour évaluer les impacts des changements climatiques sur les pompes observés pour la culture du riz. Sa pertinence pour les conditions spécifiques de la région est due à sa capacité à simuler le bilan hydrique de manière conceptuelle mais physiquement basée. Puisque les flux d'eau verti-

caux prédominent largement sur les flux latéraux régionaux à l'échelle kilométrique, l'approche semi-distribuée de SWAT, qui divise le bassin en unités de réponse hydrologique (Hydrological Response Units, HRU) et considère que le réservoir d'eau souterraine est parfaitement connecté au sein d'un sous-bassin mais indépendant des sous-bassins adjacents, est bien adaptée. Cela a permis de simuler la disponibilité des eaux souterraines à l'échelle du sous-bassin dans un premier article (PERRIN et al., 2012), cohérente avec l'échelle des villages pour l'évaluation de la vulnérabilité des agriculteurs.

### 1.3.1.5 Occupation du sol par satellite, en 2010

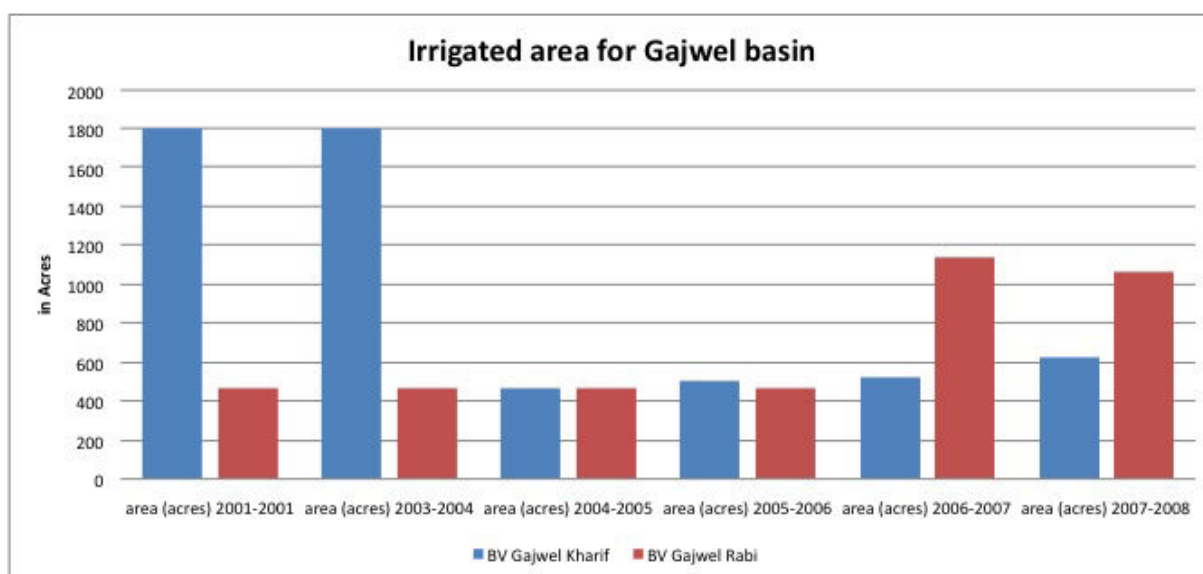


FIGURE 1.5 – Surfaces irriguées saisonnières (2001-2008) dans le bassin versant de Gajwel (sources : statistiques gouvernementales). Kharif : Mousson, Juillet à Novembre; Rabi : saison sèche, Décembre à Avril

Pour caractériser l'occupation des sols et les pratiques agricoles, des cartes d'occupation des sols ont été établies à partir d'images satellitaires multi-spectrales du capteur LISS IV à bord de Resourcesat-I (IRS 1D). Ces images, d'une résolution de 5,8 mètres et composées de trois bandes spectrales (vert, rouge, proche infrarouge), ont été utilisées pour les saisons Kharif (mousson, juillet à novembre) et Rabi (saison sèche, décembre à avril) des années 2007, 2009 et 2010. La classification, basée sur des observations de terrain ont permis d'identifier les cultures irriguées (riz, légumes, maïs) et pluviales (coton), et de d'estimer les besoins en eau d'irrigation (figure 1.4b). Cependant, l'une des principales limitations, le nombre d'observation satellite, n'a pas permis de caractériser la variabilité temporelle des mises en culture du riz, très dépendante de la productivité des pompages, elle même dépendante du niveau piézométrique (figure 1.5). Cette contrainte a souligné la nécessité d'une télédétection multi-temporelle plus fréquente pour une représentation plus réaliste des pratiques agricoles et de la demande en eau.

### 1.3.2 Modélisation verticale du cycle de l'eau en zone irriguée (84 km<sup>2</sup>)

Dans une première étude, nous avons évalué la capacité de SWAT à reproduire, sur la base des besoins d'extraction théoriques basé sur les cartes de mise en culture issues des données satellites, les cycles verticaux – pompage, réinfiltration, évapotranspiration et recharge – à l'échelle d'un

bassin versant de 84 km<sup>2</sup>, en tenant compte du RHS (PERRIN et al., 2012) (partie grisée du bassin versant de Kudaliar dans la figure 1.4).

Contrairement aux applications classiques qui calibrent le modèle sur les débits des cours d'eau, cette étude a innové en basant sa calibration sur les estimations de recharge des eaux souterraines calculées indépendamment par une méthode de bilan hydrique (technique de fluctuation de la nappe phréatique) et sur le stockage de l'eau de surface dans les réservoirs, étant donné l'absence de cours d'eau pérennes. Les résultats ont montré que SWAT a réussi à reproduire les estimations de taux de recharge, le ruissellement et le stockage de l'eau de surface dans les réservoirs, ainsi que les fluctuations mensuelles de la nappe phréatique. L'étude a révélé que l'évapotranspiration est de loin le flux d'eau le plus important (90 % des précipitations annuelles). Les réservoirs de percolation jouent un rôle significatif, contribuant à environ 23 % de la recharge annuelle de l'aquifère (ou 33 % si l'on exclut la réinfiltration du surplus d'irrigation) pendant les moussons normales, bien que cette contribution soit spatialement très variable. Le bassin versant est très sensible à la variabilité interannuelle de la mousson, avec des périodes de stress hydrique pendant les années sèches ayant un impact sur la production agricole.

En conclusion, l'étude souligne que la portée d'une recharge artificielle additionnelle serait faible, car une part significative du ruissellement est déjà capturée dans le RHS actuel. Le modèle restitue convenablement les conditions moyennes de recharge, mais présente un biais systématique aux extrêmes climatiques : une sous-estimation lors des années sèches et une surestimation lors des années particulièrement humides. Ce comportement suggère que le modèle ne parvient pas à reproduire la variabilité interannuelle de la recharge, possiblement en raison du fonctionnement bimodal des sols de la région (DE CONDAPPA et al., 2008). En effet, ceux-ci peuvent favoriser des écoulements préférentiels en conditions de déficit hydrique, tandis qu'en conditions excédentaires, une plus grande proportion de l'infiltration est retenue dans le profil.

### **1.3.3 Modélisation de l'impact des changements climatiques sur le pompage (1000 km<sup>2</sup>)**

Dans une deuxième étude, j'ai évalué les effets du changement climatique (CC) sur l'extraction locale des eaux souterraines (GWE) par les agriculteurs à l'échelle du bassin versant entier (Kudaliar, 1000 km<sup>2</sup>). Cette étude a utilisé des données de température et de précipitation de modèles climatiques globaux (GCM) désagrégées (VIGAUD et al., 2012) pour forcer le climat dans le modèle SWAT. L'objectif est d'identifier les zones vulnérables à des perturbations des flux verticaux, et notamment la recharge de nappe (FERRANT et al., 2014b).

#### **1.3.3.1 Projections climatiques 2045-2065**

Quatre Global Climate Models (GCM : CGCM, CNRM, ECHAM, BCCR), sélectionnés pour leur capacité à reproduire le maximum de précipitations pendant la mousson d'été, ont été utilisés avec les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre les plus probables de l'IPCC (à l'époque) : SRES A2 (NAKICENOVIC et al., 2000). Les séries chronologiques de précipitations et de températures atmosphériques ont été désagrégées à l'aide d'une méthode probabiliste. Pour ces projections futures (2045-2065), le modèle SWAT a utilisé la même occupation du sol chaque année par manque d'observations satellite disponibles. Cette simplification permet d'isoler l'impact des seuls développements climatiques futurs sur les variables hydrologiques, mais peut entraîner une surestimation de l'extraction et de la sécheresse pendant les périodes sèches, et une sous-estimation pendant les années plus humides. L'extraction simulée des eaux souterraines (GWE) par SWAT est égale à la Demande en Eau d'Irrigation (DEI) ou Irrigation Water Demand (IWD) lorsque l'eau souterraine est disponible ; sinon, elle est inférieure en cas d'épuisement de l'aquifère.

### 1.3.3.2 Impacts du CC sur les stocks souterrains

Les quatre modèles climatiques projettent une augmentation des précipitations saisonnières et de leur variabilité, ainsi qu'une extension possible de la période de mousson, avec des augmentations plus prononcées en mai-juin et août (15 % à 50 %). Les changements de température de surface maximaux sont prévus pendant la saison sèche, en particulier en février-mars (+2.5°C). Bien qu'un scénario multi-modèles (SWAT-GCM) suggère une augmentation moyenne de 50 mm du stockage des eaux souterraines (GroundWater Storage – GWS) à l'avenir (soit environ 30 % de la recharge d'eau souterraine), les changements dans les moyennes du GWS ne sont généralement pas statistiquement significatifs. Cependant, une intensification des extrêmes hydrologiques est projetée. Cela se traduit par des variations contradictoires de la durée des périodes de sécheresse des aquifères (situations de stress où le GWS descend sous un seuil critique de 50 mm). Alors que certains scénarios (SWAT-BCCR) prévoient une diminution globale des sécheresses (jusqu'à 2 mois par an), d'autres (SWAT-CGCM) projettent une augmentation globale (jusqu'à 2 mois par an).

### 1.3.3.3 Impacts du CC sur les pompages

Les impacts sur le GWE sont également contrastés et localement très hétérogènes, allant d'une légère augmentation à une diminution (-1 à 20 mm/an). Cette hétérogénéité spatiale dépend principalement de la capacité locale des systèmes de collecte des eaux de pluie (RHS), de la demande en eau d'irrigation (DEI) et de la capacité totale de l'aquifère dans chaque sous-bassin versant. Des pénuries de pompage sont simulées pendant une à quatre saisons sur 20 ans de simulation, période durant laquelle les aquifères des sous-bassins se vident, affectant la productivité des cultures. Par exemple, une diminution de 10-20 mm d'extraction pour une saison de croissance correspond à 18 jours à un mois de pénurie d'eau d'irrigation pendant la mousson pour les zones irriguées. Les zones du sud-est du bassin, avec une forte densité de petits réservoirs et une DEI intermédiaire, peuvent voir une augmentation du GWS, tandis que les zones occidentales avec une DEI plus élevée et une capacité d'aquifère plus faible connaissent des conditions plus sèches et des restrictions d'irrigation plus sévères.

## 1.3.4 Stratégies d'adaptation des agriculteurs

L'extraction d'eau souterraine est connue pour varier selon les saisons et les années avec les surfaces irriguées. L'étendue des surfaces semées dépend directement de la productivité des forages : plus les pompes fournissent d'eau, plus la superficie irriguée est importante. Toutefois, le comportement des agriculteurs est fortement influencé par la mémoire des moussons passées.

Par exemple, les statistiques au niveau du mandal (un équivalent de nos cantons) présentées dans la figure 1.5 montrent qu'après deux années de sécheresse en 2003 et 2004, la surface irriguée pendant la mousson ne dépassait pas 2 %. Avant la mousson 2005, pourtant très abondante, les agriculteurs n'avaient semé qu'environ 2 % du bassin. De la même manière, lors de la mousson 2006 — également pluvieuse — ils ont de nouveau limité l'extension des surfaces irriguées à 2 %. Cette restriction de surface a limité l'extraction d'eau ce qui a contribué à une forte recharge nette de l'aquifère. L'année sèche suivante, bénéficiant de cette nappe d'eau reconstituée, les agriculteurs ont pu doubler la superficie irriguée afin de rattraper le manque de production agricole des saisons précédentes.

Ces mécanismes d'adaptation locale doivent être pris en compte si l'on veut reconstruire fidèlement les conditions hydrologiques observées par le passé. En effet, l'utilisation d'une carte d'extraction figée, construite sur une situation moyenne, conduit à surestimer les prélèvements — et donc la sécheresse hydrologiques (étiages) — lors des années sèches, et à sous-estimer

l'extraction en années plus humides. Toutefois, fixer les volumes d'eau extraits dans les simulations passées demeure essentiel si l'on veut isoler l'effet du changement climatique projeté pour l'avenir.

## 1.4 Perspectives sur la modélisation régionale de l'irrigation

A l'époque du projet SHIVA (2008-2013), les données satellitaires à résolution décimétrique (environ 10 m), adaptées à l'observation des surfaces agricoles fragmentées, étaient rares, coûteuses et hétérogènes quant à leurs paramètres d'acquisition (angles de visée, emprises spatiales, etc.). Elles nous ont néanmoins permis de travailler sur une année à l'échelle de 1000 km<sup>2</sup>.

A cette époque, les modèles climatiques, bien que choisis parmi des centaines pour être les plus performants à représenter la mousson indienne, étaient considérés comme l'une des principales sources d'incertitude pour les études d'impact du changement climatique. Cependant, et nous le verrons dans la suite de ce manuscrit, les sécheresses hydrologiques récurrentes connues dans cette région d'Inde (2001 à 2003, 2010, 2015 à 2016 et 2019), marquées par un étiage complet du RHS, des grands barrages et de l'aquifère, ne se sont pas reproduites depuis 2019. L'augmentation de l'intensité de la mousson de l'été, directement liée à la plus forte température de surface de l'océan indien, y sont potentiellement pour quelque chose (JIN et al., 2017).

De plus, depuis lors, le terrain choisi pour le projet SHIVA – dont l'objectif était d'évaluer la vulnérabilité et d'explorer les scénarios possibles d'adaptation de cette agriculture familiale de subsistance dans cette région très rurale – a connu des mutations extraordinaires. Environ un cinquième du bassin versant de Gajwel a été immergé (dont 3 villages) par ce que j'appellerais une giga-bassine construite en 2019 dans le cadre du plus grand projet de détournement de rivière au monde : the Kaleshwaram lift project, 10 milliards d'euros environ. Kaleshwaram, du nom de la dernière ville sur la rivière Godavari avant l'état d'Andhra Pradesh. Une seconde giga bassine (sur les 20 construites dans l'état du telangana) a été creusée sur le bassin versant de la rivière Kudaliar.

Ces bassines, intégrées à un réseau construit indépendamment de la topographie par des engins de miniers, sont conçus pour recevoir l'eau pompée dans la rivière Godavari, située 200 km au nord et 200 m en aval. Autant d'eau prélevée par les agriculteurs indiens qui se trouvent sur le passage des canaux. Destinée en bout de réseau à alimenter Hyderabad, la capitale du Telangana, en eau potable. Cette ville en manque cruellement depuis qu'elle a doublé sa population entre 2010 et 2015 (6 à 12 millions d'habitants en seulement 5 ans).

Cette histoire de giga bassine, illustrant la guerre de l'eau entre états indiens, est racontée en image ici : <https://www.cesbio.cnrs.fr/multitemp/the-indian-water-rush/>.

Le suivi de l'impact de ces structures immenses et la quantification de ces flux régionaux sont un nouveau défi pour l'agro-hydrologie spatiale. L'enjeu n'est plus seulement d'évaluer l'impact du changement climatique sur un milieu agricole passif et adaptatif, mais de quantifier et suivre des mutations régionales gigantesques qui suivent la grande accélération de l'anthropocène – voire dans cet exemple du capitalocène.

Cela nécessite de repenser l'échelle spatiale et numérique : exploitation massive de données satellitaires (10 m à 300 km), big data, nouveaux capteurs et clusters. Le défi est lancé, et la suite de ce manuscrit explore cette nouvelle dimension de l'agro-hydrologie spatiale.

Une transition toute trouvée donc !

## Chapitre 2

# L'agro-hydrologie spatiale

Tirer parti de l'explosion des observations satellitaires de la Terre

### 2.1 Introduction du chapitre

Les observations de la Terre par satellite n'échappent pas non plus à la Grande Accélération. Autant les mettre à profit !

Le chapitre précédent a souligné l'émergence d'une agro-hydrologie spatialisée, rendue nécessaire par les enjeux globaux de gestion de l'eau qui nécessitent d'identifier les processus affectant la qualité et l'abondance de l'eau afin de fournir une évaluation des menaces qui pèsent sur la production agricole vivrière et la qualité/fonctionnalité des hydrosystèmes, dans le temps et l'espace. Il a également mis en évidence les limites des approches antérieures face à la dynamique rapide des processus agricoles et hydrologiques, particulièrement dans les pays intertropicaux caractérisés par des parcelles de petite taille et une rareté des observations in situ.

Ce chapitre focalise sur le contexte agro-hydrologique du Telangana, un état d'Inde du Sud présenté précédemment. J'ai pu réaliser ces travaux en tant que chargé de recherche à l'IRD grâce à l'existence de la Cellule Franco-Indienne de Recherche sur les Eaux Souterraines (CE-FIRES), une collaboration historique entre le National Geophysical Research Institute (NGRI, Hyderabad) et le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM, Montpellier). Une partie a également fait l'objet du travail de recherche de thèse de Claire Pascal, que j'ai co-dirigée avec Olivier Merlin, soutenue en Octobre 2022.

Les questions de recherche portent sur la trajectoire des extractions d'eau pour l'irrigation du riz dans cet état, qui représentent entre 50 et 500 mm d'extraction selon les zones et la ressource utilisée pour une moyenne de précipitation de 800 mm. La démarche consiste à articuler les données satellitaires avec les approches conventionnelles de l'hydrogéologie et des données d'hydrologie disponibles (relevés de terrain, réseaux piézométriques, débits, cartographie souterraine et mesures directes). Est ce que ces données anciennes ou nouvelles apportent une meilleure compréhension de l'impact de l'irrigation sur le cycle de l'eau dans ces régions (schéma de la figure 2.1) ? Cela permet-il de formuler des recommandations de gestion à l'échelle de l'état du Tèlangana ?

#### 2.1.1 Les missions satellites pour l'agro-hydrologie spatiale

##### 2.1.1.1 Les missions institutionnelles

L'explosion des observations satellitaires, notamment via les missions du programme européen COPERNICUS Sentinel lancées à partir de 2014, complètent les déjà nombreuses missions des agences spatiales partenaires : NASA, CSA, DLR (Table 2.1). En passant de 0.1 Pétatocet

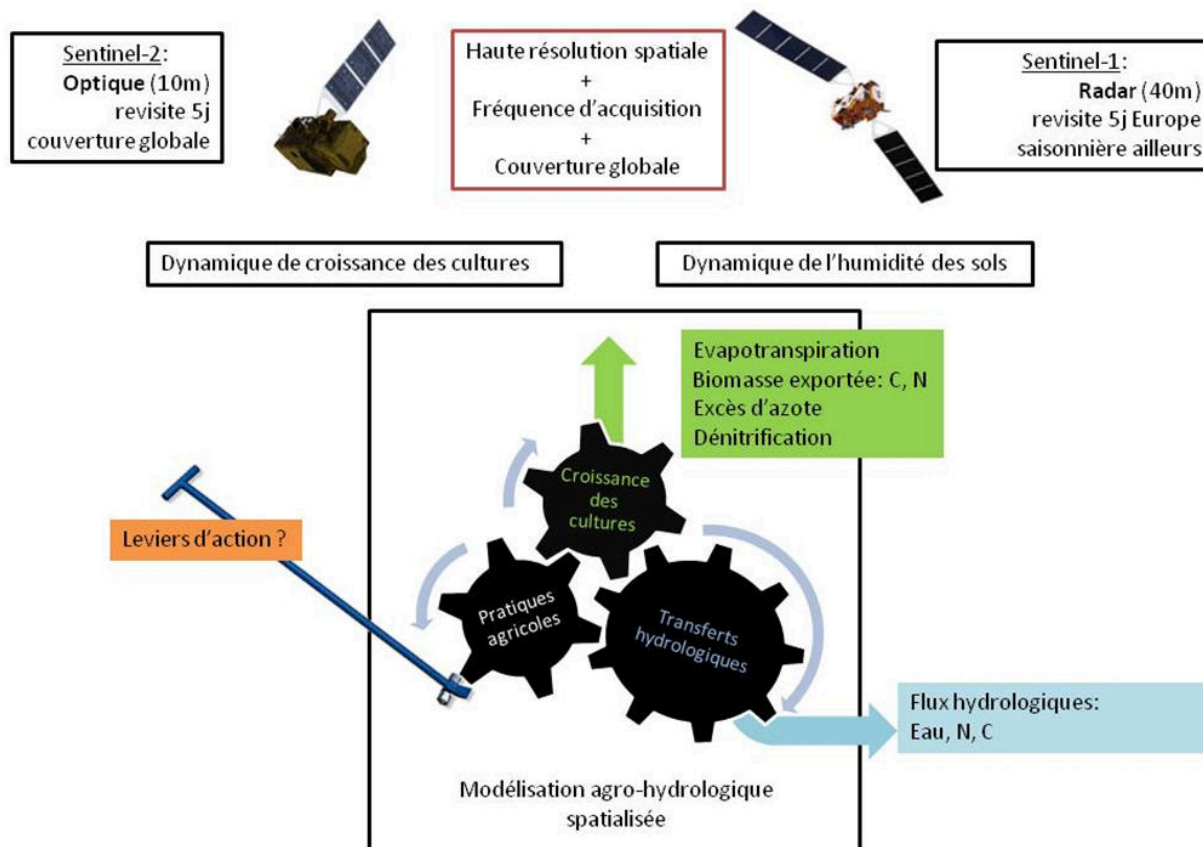


FIGURE 2.1 – Schéma conceptuel du projet "agrohydrology from space". La télédétection radar de l'humidité des surfaces pendant les périodes de sol nu et la télédétection optique de la croissance des cultures permettent de représenter spatialement les conditions de croissance locale, dépendant des caractéristiques physiques et des pratiques agricoles. L'objectif est de simuler spatialement les flux d'eau, d'azote et de carbone vers l'hydrosphère et l'atmosphère afin d'explorer les impacts des pratiques agricoles sur ces cycles dans le cadre de gestion intégrée des ressources à l'échelle de bassins versants.

de données d'observation de la terre en 2000, à 2 en 2010, puis à 10 en 2015 et à plus de 50 en 2020, la terre n'a jamais été autant scrutée. L'accélération en 2015 correspond principalement à ces missions Sentinel. Sentinel-1 et Sentinel-2 sont sans précédents car ces missions, respectivement radar et optique, se font systématiquement à hautes résolutions spatiales (10-20 m) et temporelles (5 à 10 jours), à l'échelle de la planète, avec les mêmes caractéristiques d'acquisition (angle de visée par exemple). Les résolutions et les capteurs sont adaptés aux contextes et enjeux agro-hydrologiques des pays inter-tropicaux (figure 2.2a) : résolution decamétrique adaptée aux tailles des parcelles agricoles (figure 2.2b), synergie entre capteurs optiques – mesures indirectes de surface foliaire – et radar – mesures indirectes de biomasse – ces derniers peu impactés par un couvert nuageux garantissant des acquisitions pendant les saisons de moussons tropicales.

La table 2.1 présente un ensemble de missions très utilisées en hydrologie et en agriculture à différentes échelles de temps et d'espace. Les missions grisées ne sont pas utilisées ici. Les missions en rouge sont les plus récentes et font partie des perspectives de cette habilitation à diriger des recherches.

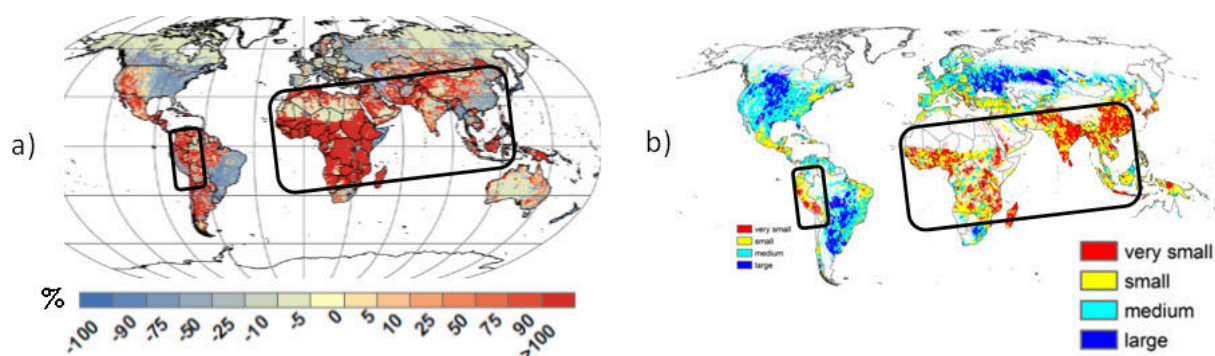


FIGURE 2.2 – a) Projections des besoins en eau dans le futur (2100) d’après WADA (2016). b) Taille des parcelles agricoles d’après FRITZ et al. (2015). Les encadrés indiquent les régions du globe correspondant aux pays partenaires historiques de l’IRD, où la taille des parcelles agricoles et les enjeux en eau sont particulièrement bien adaptés aux capacités d’observation offertes par les missions Sentinel.

TABLE 2.1 – Liste des missions Copernicus et de missions partenaires fournissant des données libres, utilisées pour les approches multi-capteurs en agrohydrologie. En gris, les missions qui ne servent pas ici. En rouge, les nouvelles missions en perspectives.

Satellite / Mission	Année de lancement	Type de capteur / bande	Résolution / précision	Objectifs principaux
Pléiades / SPOT 6-7	> 2010	Optique très haute résolution	0,5–1,5 m	Cartographie détaillée, stéréoscopie
Sentinel-1	2014	Radar SAR (C-band)	5–20 m	Inondations, mouvements de terrain, agriculture, glaces
Sentinel-2	2015	Optique multispectrale (VNIR/SWIR)	10–60 m	Végétation, occupation du sol, agriculture, qualité de l’eau
Sentinel-3	2016	Altimètre radar + radiomètres + spectromètre	Océans : 300 m ; terres : km	Niveau de la mer, température, couleur de l’eau, glaces
Sentinel-4/5	2019/2017	Spectromètres atmosphériques	Polaire / géostationnaire	Pollution atmosphérique, gaz trace
Sentinel-6	2020	Altimètre radar	cm sur niveau de mer	Niveau de la mer, climat
Landsat 5-7-8	1984	Optique multispectrale (VNIR/SWIR)	30 m	Végétation, occupation du sol, agriculture
SMOS	2009	Radiomètre micro-ondes (L-band)	25–50 km	Humidité du sol, salinité océanique
SMAP	2015	Radiomètre micro-ondes + radar (L-band)	9 km (radar), 36 km (radiomètre)	Humidité du sol, gel/dégel, hydrologie
ICESat-2	2018	Laser (LIDAR)	0,7 m vertical, 70 cm horizontal	Élévation des surfaces terrestres et glaciaires, lacs, hydrologie

TABLE 2.1 – (suite) Liste des missions Copernicus et partenaires

Satellite / Mission	Année de lancement	Type de capteur / bande	Résolution / précision	Objectifs principaux
TerraSAR-X	2007	Radar SAR (X-band)	1–30 m	Surveillance radar terrestre et océanique, glaces
BIOMASS	2025	Radar SAR (P-band)	60-90 m	Biomasse des forêts tropicales, eau dans les déserts et le pergélisol
SWOT	2022	Altimètre Ka-band + interférométrie	Océans : 1 km ; lacs/rivières : 50–100 m	Niveau et topographie des eaux, inondations, hydrologie fluviale
TRISHNA	2026	Optique multi-spectral et Thermique	50m, 2–3 jours	Évapotranspiration, stress hydrique des cultures, gestion de l'irrigation, température de surface (terres et océans)
MODIS / VIIRS	1999 / 2011	Optique multispectrale	250 m–1 km	Température, chlorophylle, feux, neige, lumière nocturne
GRACE & Grace-FO	2002	Gravimétrie	300 km, mensuel	Variation du stock d'eau terrestre

### 2.1.1.2 Les missions commerciales

Nous n'aborderons pas ici les déjà très nombreuses missions privées commerciales qui elles aussi participent à la grande accélération du nombre d'objets en orbite. Je donne ici quelques chiffres : environ 589 satellites commerciaux sont actuellement en orbite, gérés par 53 opérateurs privés, dont Planet Labs et Spire Global. Ces deux entreprises détiennent à elles seules plus de 50 % de cette flotte opérée grâce à la miniaturisation des satellites et la réduction de leurs coûts de lancement.

Dans le cadre de nos travaux au CESBIO, il est rare que nous nous tournions vers ces données pour plusieurs raisons :

- des contraintes méthodologiques et techniques, calibration des capteurs insuffisamment documentée, qualité des acquisitions très variables
- des contraintes d'accès à ces données, limité par des coûts élevés et des conditions d'utilisation restrictives, difficile d'exploiter à grande échelle sur des périodes longues
- une emprise au sol souvent réduite ne permettant pas une couverture homogène des territoires étudiés, ce qui complique la comparaison et l'intégration avec des séries temporelles existantes.

Ces limitations techniques et opérationnelles ont conduit à privilégier des sources publiques et standardisées, garantissant la reproductibilité et la comparabilité des résultats. Exception faite des données stéréoscopiques des satellites Pléiades (Airbus Defense & Space), utilisée dans l'application décrite dans la section 2.4.3.

### 2.1.1.3 L'accès aux données et les traitements massifs

Dans une logique de souveraineté scientifique et de transparence, j'ai délibérément limité mes travaux aux infrastructures publiques gratuites mises à disposition par le CNES et les ministères, telles que les miroirs de données PEPS (aujourd'hui GEODES, <https://geodes-portal.cnes.fr/>), TheiaLand (<https://catalogue.theia-land.fr/>), ainsi que les logiciels développés par le CNES ou issus de la recherche académique (OTB, <https://www.orfeo-toolbox.org/>; IOTA2, <https://framagit.org/iota2-project/iota2>; S1tiling, <https://s1-tiling.pages.orfeo-toolbox.org/s1tiling/latest/>; WaterDetect, <https://github.com/cordmaur/WaterDetect>; SurfWater, <https://www.applisat.fr/fiches-produits/surfwater>).

J'ai sciemment choisi de ne pas dépendre de miroirs privés ni de plateformes *cloud* propriétaires (Google Earth Engine, AWS, et autres acteurs américains), afin de garantir l'accessibilité, la pérennité et la reproductibilité de nos résultats. Ce choix a nécessité un investissement important en développement, et a rapidement été mis à l'épreuve par l'émergence de nouvelles technologies et écosystèmes (par exemple, l'opposition entre OTB et les bibliothèques Python modernes comme `rasterio`, `rioxarray`, ou la parallélisation via `Dask`), illustrant la tension permanente entre indépendance scientifique et efficacité opérationnelle.

Google Earth Engine (GEE), précurseur de ces solutions depuis 2011 et gratuit pour les chercheurs beta-testeurs (dont j'ai fait partie), propose des outils puissants de calcul et d'analyse géospatiale à grande échelle directement sur le *cloud*. Il offre un accès massif à des catalogues d'images satellites et de données environnementales, et permet d'appliquer des traitements personnalisés sans téléchargement local à l'aide d'une interface de scripts Java. Parmi ses innovations récentes, le jeu de données *Satellite Embedding* fournit des vecteurs intégrant les dimensions spectrales, spatiales et temporelles des observations satellites. Ces *embeddings* facilitent l'utilisation de classifieurs simples (kNN, Random Forest) pour des tâches de classification supervisée avec peu de données d'entraînement, ouvrant de nouvelles perspectives pour le suivi des surfaces en eau, de la végétation, et d'autres classes difficiles à définir. Sans utiliser GEE, il faut produire à nouveau ces *embeddings*, ou s'en passer.

Avons-nous eu raison de nous en tenir à des solutions publiques en 2016? Très probablement, car il n'existait alors pas ou peu d'alternatives privées permettant de travailler à grande échelle. Toutefois, face aux outils et à ces nouvelles variables spatiales proposés aujourd'hui par GEE, recoder et se former aux nouvelles méthodes, cinq à dix ans plus tard, semble désormais incontournable pour exploiter pleinement non plus le potentiel des données satellites brutes et des indices dérivés seuls, mais aussi de ces représentations vectorielles compactant ces données pour accélérer les tâches d'analyse ou de classification.

*La même question se pose à nous aujourd'hui à propos de notre usage assumé ou non, et surtout sécurisé de l'IA conversationnelle.*

### 2.1.1.4 Missions scientifiques vs missions opérationnelles

On distingue généralement deux grandes catégories de missions satellitaires institutionnelles. Les missions opérationnelles sont conçues pour fournir des données régulières et continues sur le long terme, souvent dans le cadre de programmes institutionnels tels que Copernicus, USGS/NASA ou NOAA. Elles reposent sur des technologies de capteurs déjà éprouvées et visent une fréquence d'acquisition élevée ainsi qu'une pérennité des séries temporelles. C'est le cas des constellations Sentinel, des séries Landsat, de MODIS/VIIRS, de Pléiades/SPOT ou encore de TerraSAR-X.

À l'inverse, les missions scientifiques sont plus exploratoires, de durée de vie généralement plus courte, et jouent souvent le rôle de démonstrateur technologique. Elles testent de nouvelles approches instrumentales avec des résolutions spatiales et temporelles inédites, et visent en

priorité la recherche. SMOS, initialement prévue pour trois ans mais encore en fonctionnement seize ans plus tard, et GRACE/GRACE-FO en sont des exemples emblématiques, renseignant respectivement l’humidité des sols et les variations du stockage en eau terrestre à large échelle. Plus récemment, ICESat-2, SWOT, BIOMASS et bientôt NISAR et TRISHNA illustrent cette dynamique : leurs lancements s’attaquent à des défis scientifiques majeurs, comme l’amélioration du rapport signal/bruit ou l’évaluation de l’utilité de nouveaux capteurs, respectivement Lidar, radar en bande Ka, P, L & S, thermique, tous à haute résolution spatiale, pour le suivi des surfaces continentales et océaniques.

Un aspect particulièrement notable est l’effet des missions Sentinel-1 et Sentinel-2 qui, parce qu’opérationnelles, ont favorisé la diffusion du savoir-faire en télédétection au-delà du milieu académique. Ce mouvement a favorisé l’émergence d’un écosystème privé de services appliqués en télédétection, directement construits sur les données Sentinel-1 et Sentinel-2. De nombreuses entreprises proposent désormais des produits opérationnels allant du suivi de la déforestation et des risques environnementaux (Kayrros, Satelligence, Descartes Labs) à l’accompagnement de la transition agricole (SatSure, OneSoil, EOS Crop Monitoring, PlanetWatchers), en passant par l’assurance, la finance et la traçabilité des filières.

Ces services illustrent comment la mise à disposition libre et régulière de données satellitaires a stimulé (avec de l’argent public) l’innovation et la valorisation socio-économique de la télédétection. Et dépassent facilement, lorsque c’est rentable, nos efforts de recherche appliquée avec les petits moyens alloués à la recherche publique.

### 2.1.2 La basse résolution spatiale en agro-hydrologie, instructif mais insuffisant

La mission GRACE, qui mesure les micro-variations du champ gravitationnel terrestre, permet d’estimer mensuellement le stock d’eau continental (Terrestrial Water Storage, TWS). Elle a révélé des tendances décennales de gain ou de perte d’eau, attribuables notamment à la surexploitation des aquifères dans le nord de l’Inde (RODELL et al., 2009 ; TIWARI et al., 2009).

Dans des régions fortement irriguées comme le Punjab, le lien entre la baisse des nappes et l’extraction pour l’irrigation est clair. Les profondeurs piézométriques y sont passées de moins de 5–10 m dans les années 1980 à 40–80 m dans les années 2010, pour atteindre aujourd’hui 100–200 m.

Ailleurs, un signal aussi net n’est pas observé. ASOKA et al. (2017) confirment les résultats de RODELL et al. (2009) sur la baisse continue des nappes du nord de l’Inde depuis 2002, mais rapportent une apparente hausse des aquifères du sud (figure 2.4a). Ces aquifères, de nature granitique ou volcanique et de volume plus limité que les aquifères sédimentaires du nord alimentés par les neiges et glaciers de l’Himalaya, présentent en réalité des fluctuations autour de zéro, sans tendance durable à l’échelle spatiale de GRACE (environ 300 km) (figure 2.3). L’impression de hausse dans le sud est accentuée par le choix de 2002 comme année de référence, une période marquée par une sécheresse exceptionnelle et des niveaux de nappe très bas.

Le bassin versant de la rivière Kudaliar illustre ce comportement : avec une capacité d’environ 200–250 mm répartie sur 35–50 m d’horizons poreux (figure 1.4d), l’aquifère suit uniquement des cycles de remplissage et de vidange, sans dynamique long terme.

Les observations in situ du Central Ground Water Board (CGWB) confirment cette distinction. Les cartes piézométriques de janvier 2025 indiquent des profondeurs supérieures à 20 m dans le Punjab, contre moins de 10 m dans le Telangana (figure 2.5, source des données : <https://gwdata.cgwb.gov.in/public-file-list/Bulletin>). Dans le Punjab, les niveaux piézométriques présentent un abaissement de plus de 4 m sur la période 2015–2024 (figure 2.4b). Dans le Telangana, les niveaux oscillent autour d’une profondeur moyenne de 15 – 20 m mais

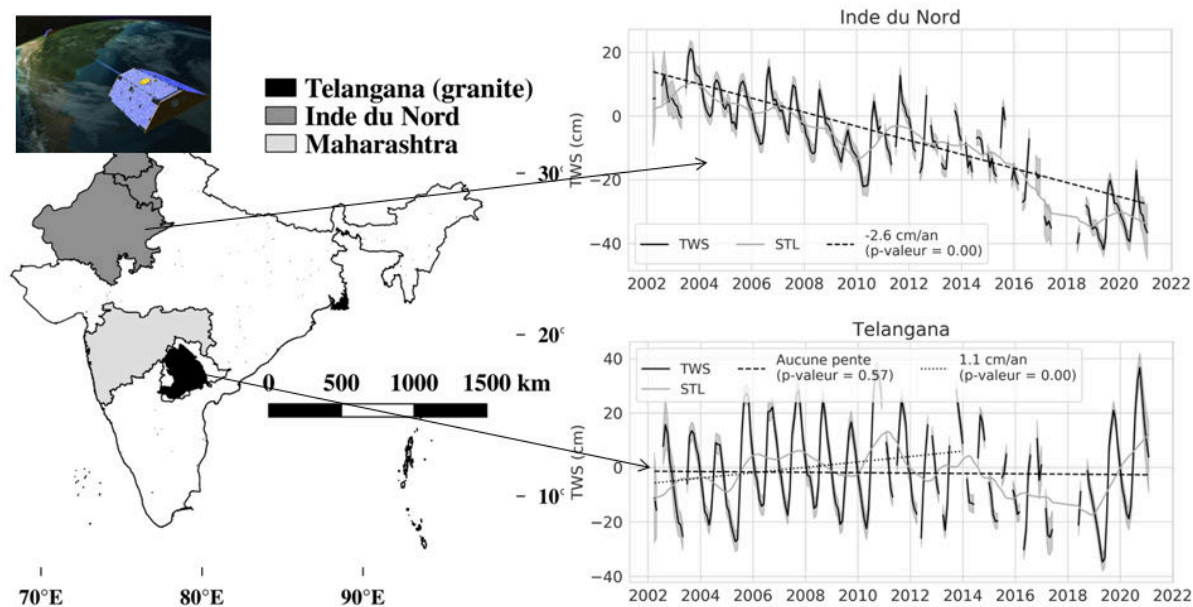


FIGURE 2.3 – Grace Terrestrial Water Storage anomaly. Nord : aquifère profond sédimentaire, irrigation pour la culture du blé, baisse tendancielle continue du TWS sur 20 ans. Sud : aquifère de socle cristallin peu profond, irrigation du riz, état stationnaire dominé par la variabilité saisonnière. sources : S. Gascoin, CESBIO, à partir des données GRACE. Accédé en 2022 (figure non publiée).

lorsque le niveau atteint 35 à 50 m, i.e. des horizons fissurés de porosité très faible, la productivité des pompages s'effondre. On considère les aquifères périodiquement vidés et rechargés lors d'une mousson importante, contexte qui ne permet pas de voir une tendance à la baisse des piezomètres (figure 2.4c).

Une étude à l'échelle du Sud de l'Inde s'est posé la question de l'origine d'une présumée observation de la restauration des nappes phréatiques rapportée par la littérature (HORA et al., 2019). Souvent attribuée à l'augmentation des précipitations et aux interventions politiques, elle est en contradiction avec les rapports de terrain dénombrant des défaillances de puits contribuant à des baisses de surfaces irriguées. En intégrant les données des puits secs ou défaillants, leur analyse révèle une pression croissante sur les ressources en eau. C'est donc bien au niveau local qu'on peut établir un diagnostic régional de ces interactions entre disponibilité de l'eau et usages.

### 2.1.3 Restitution de Variables Environnementales essentielles

C'est donc la plus haute résolution spatiale et temporelle de missions satellite telles que Sentinel-1&2 qui a été identifiée pour mieux décrire les processus anthropo-physiques derrière

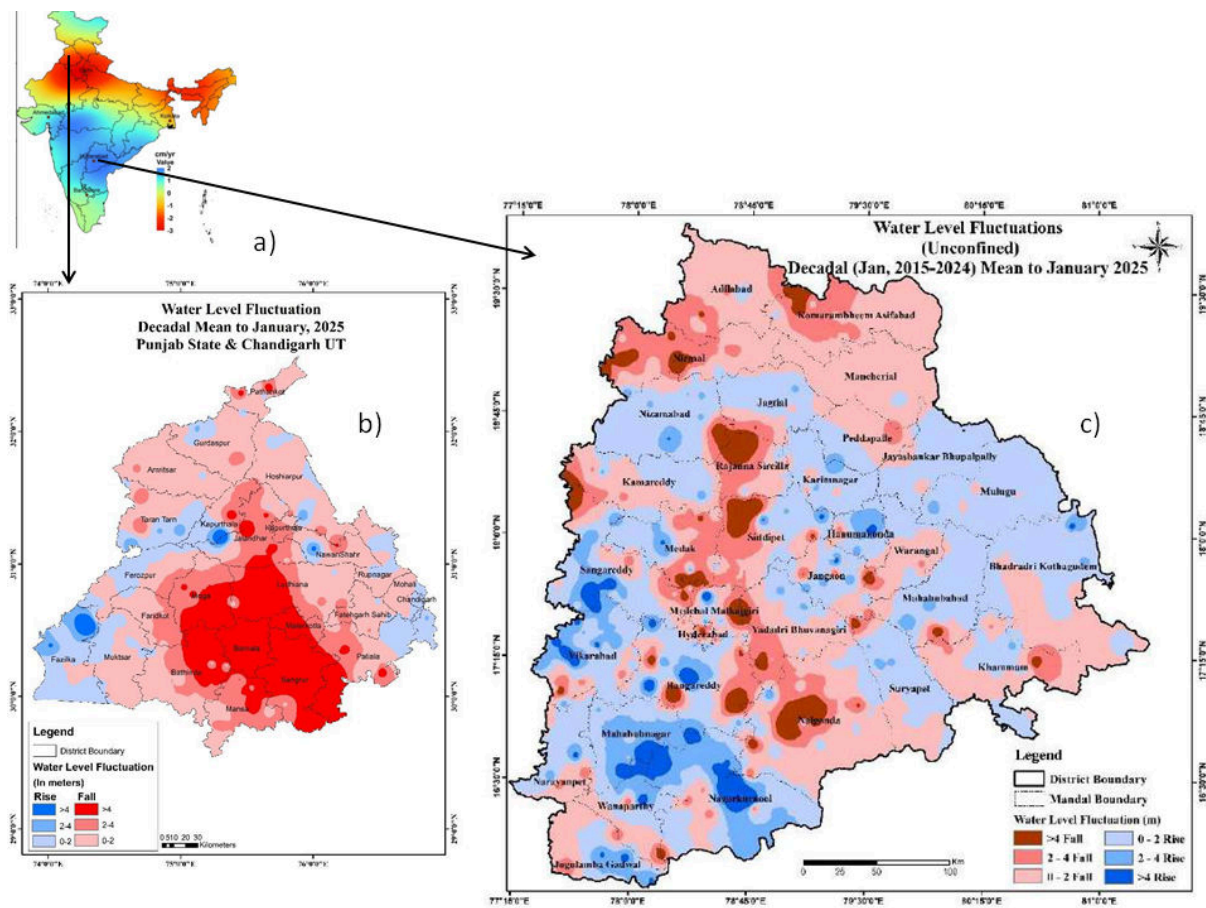


FIGURE 2.4 – a) Tendances du TWS (2002 – 2016) calculé et discuté par ASOKA et al. (2017) à l'échelle de l'Inde. b) Evolution du niveau piézométrique (2015 – 2025) dans l'état du Punjab et c) dans l'état du Tèlangana. sources : CGWB, accèdè en Août 2025.

les observations à large échelle des grands cycles hydrologiques.

Nous allons voir dans ce chapitre comment ces données sont un changement radical en agro-hydrologie (FERRANT et al., 2017; MAGUIRE et al., 2022; EINI et al., 2023) en permettant de restituer des variables biophysiques à des échelles spatiales et temporelles qui changent notre capacité de quantification des cycles de l'eau locaux à l'échelle régionale, de multiplier par cent les échelles spatiales de travail – de l'intra-parcellaire à l'échelle régionale de dizaines de milliers de km<sup>2</sup> – tout en garantissant des résolutions spatiales et temporelles cohérentes avec les dynamiques agricoles et hydrologiques. La recherche méthodologique que j'ai menée a visé à identifier les nouvelles Variables Environnementales Essentielles (VEEs) – une analogie aux Variables Climatologiques Essentielles définies par les sciences du climat depuis plus de 20 ans <https://gcos.wmo.int/site/global-climate-observing-system-gcos/essential-climate-variables> – à restituer de ces observations satellite multi-temporelles, multi-capteurs, en tester leur cohérence, incertitudes liées à leur application en agro-hydrologie. La figure 2.6 présente ces différentes données satellites aux résolutions emboîtées et le signal temporel des variables agro-hydrologiques.

Les travaux qui suivent sont précisément inscrits dans cette démarche (schéma de la figure 2.1), pour tester et exploiter ces nouvelles sources de données afin de renseigner aux résolutions spatio-temporelles appropriées des Variables Essentielles de l'Environnement (VEEs) cruciales pour l'agro-hydrologie : la détection saisonnière des surfaces en riz, le stockage total de l'eau

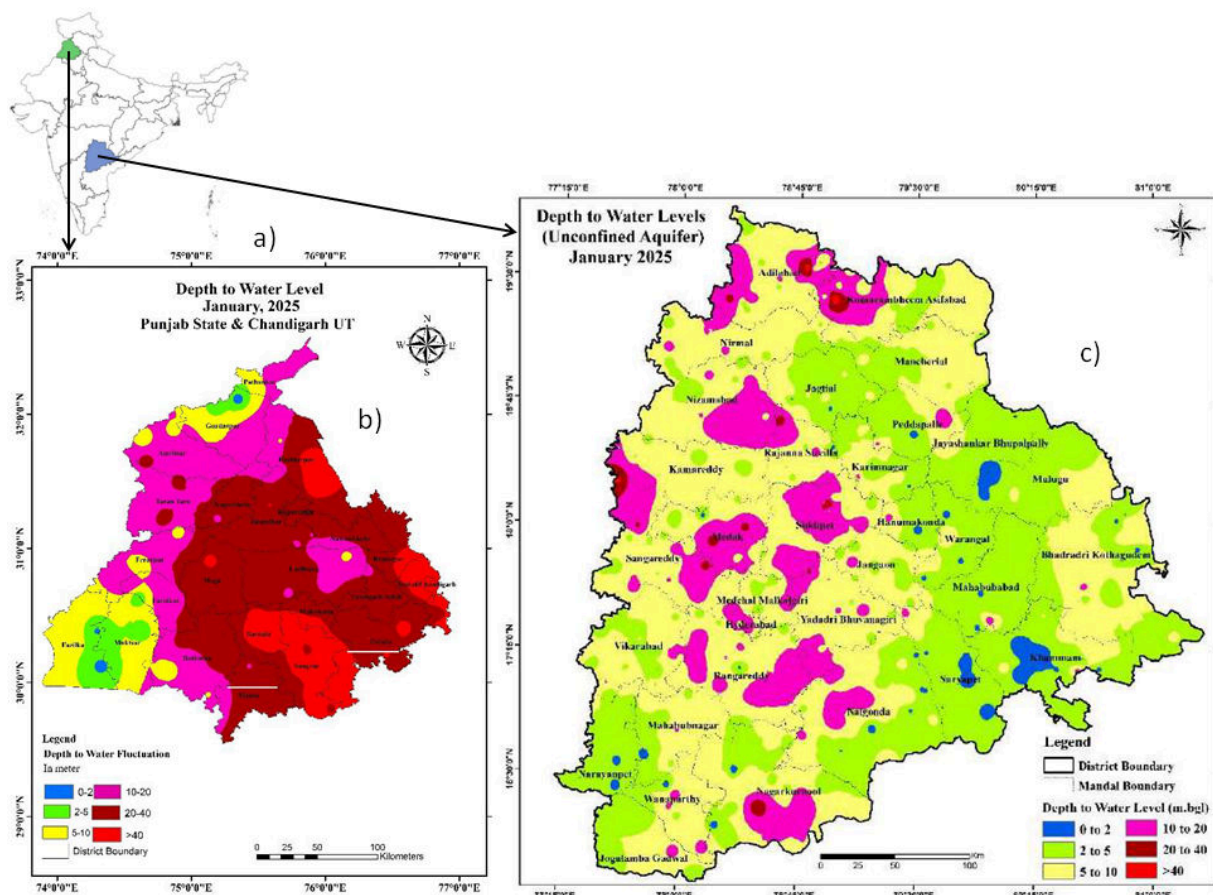
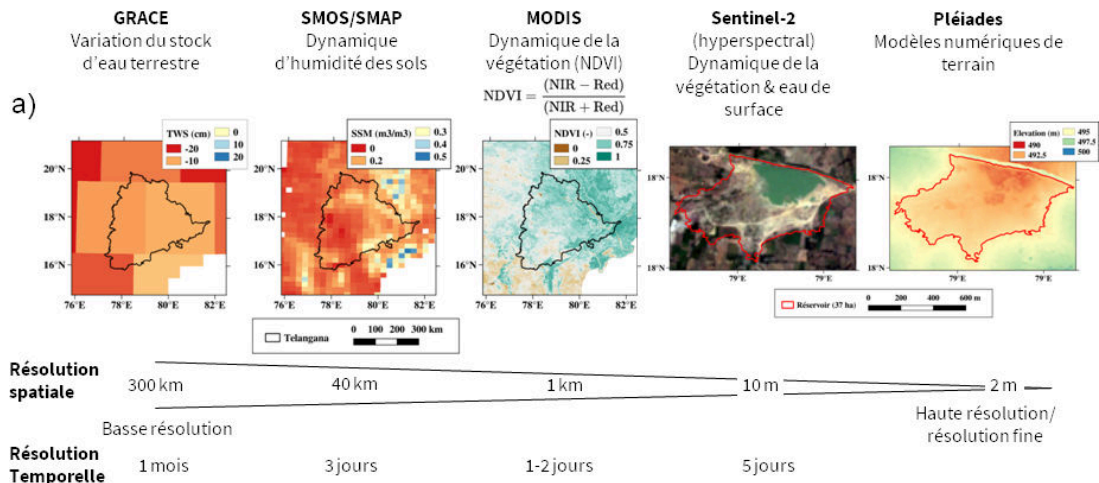


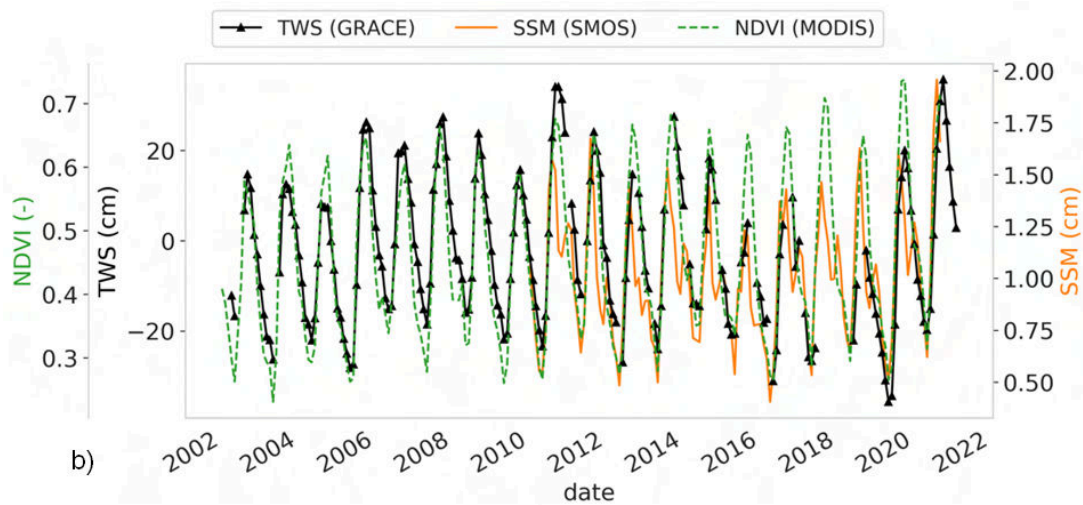
FIGURE 2.5 – a) localisation des états du Punjab et du T elanganas en Inde. b) Profondeur piézométrique dans l’état du Punjab en janvier 2025 et c) dans l’état du T elanganas. sources : CGWB, acc ed e en Août 2025.

(TWS) et l’eau souterraine (GWS), ainsi que les dynamiques des eaux de surface et leurs prélèvements. Les surfaces saisonnières cultivées en riz pour les saisons sèches 2016 à 2019 sont estimées par classification des images Sentinel-1&2 et des données de campagnes de terrain que nous avons pu organiser depuis le NGRI  a Hyderabad. C’est dans le cadre de la dernière campagne 2019 que Claire Pascal a pu voyager à Hyderabad pendant son stage avec moi, et découvrir ces agro-hydro systèmes. Avant fermeture des frontières pour 2 ans.

Une partie du travail pr esent e ci-dessous a été réalisée dans la thèse de Claire Pascal, soutenue en 2022, que j’ai co-dirigée avec Olivier Merlin (directeur de thèse, Charg e de recherche au CNRS) au CESBIO. Vous trouverez dans son manuscrit de thèse une excellente introduction générale sur le cycle de l’eau agricole en Inde et son évolution sur les 60 dernières années. Les travaux de stage de M2 de Tamara Queune en 2022 et Diane Duchemin en 2023 s’inscrivent également dans ces questions de recherche.



(a) Anomalie mensuelle du stock d'eau total (TWS) en octobre 2018 (GRACE) à 3° de résolution spatiale, humidité du sol de surface (SSM) du 31 octobre 2018 (SMOS) rééchantillonnée à 25 km, et l'indice de végétation NDVI d'octobre 2018 (MODIS) à 1 km (d'après le manuscrit de thèse de PASCAL (2022)).



(b) Séries temporelles à l'échelle mensuelle de TWS, SSM et NDVI à l'échelle de l'état du Tèlangana (d'après PASCAL (2022)).

FIGURE 2.6 – Ensemble de données satellites hétérogènes pour l'agro-hydrologie appliquée à la télédétection de l'irrigation en Inde.

## 2.2 Approximation de la demande en eau d'irrigation : l'apport des Sentinel

On l'a vu précédemment, la co-évolution de deux variables – la disponibilité en eau en début de saison de culture et les surfaces irriguées mises en culture – suit des dynamiques marquées et changeantes en Inde du Sud, notamment dans les zones amonts, irriguées par pompage de l'aquifère. Une des variables *proxy* du besoin en eau dans cette région est la surface en riz, qui nécessite environ 1m d'eau par saison de croissance. Ce besoin en eau correspond à la fois à la saturation de la porosité du sol et au maintien d'une lame d'eau en surface, utilisée comme moyen de gestion des adventices : en effet, le riz est une graminée qui prospère avec les racines immergées, contrairement aux autres graminées généralement considérées comme des mauvaises herbes. Ces relations dépendent dans les zones déconnectées de toute grande ressource en eau de surface (grands barrages et rivières perennes), c'est l'eau souterraine qui fait varier ces mises en cultures. Et les figure 2.4 et 2.5 montrent bien la grande variabilité de la profondeur piézométriques dans l'espace et le temps, indiquant un besoin de résolution spatiale suffisante pour étudier ces interactions.

La surface cultivée en riz constitue une variable quantitative de premier ordre pour estimer le besoin en eau d'irrigation, les autres cultures irriguées n'y contribuant que de manière marginale. Voici comment nous l'avons démontré avant de changer d'échelle spatiale.

### 2.2.1 Détection des cultures irriguées, et synergie Sentinel-1&2 et demande en eau d'Irrigation

Les premiers travaux réalisés en 2017 (FERRANT et al., 2017) ont tenté de quantifier les incertitudes liées au capteur radar (Sentinel-1) ou optique (Sentinel-2) ou leurs usage conjoints à l'échelle du bassin versant de la rivière Kudaliar (1000 km<sup>2</sup>). Le travail a consisté à créer une chaîne de traitement basé sur la librairie Orfeo ToolBox (OTB) développée au CNES (<https://www.orfeo-toolbox.org/>).

La télédétection des cultures en Inde du Sud, avec ses parcelles agricoles de petite taille, disséminées autour des forages lorsque la principale ressource en eau est souterraine, représente un défi majeur que la haute résolution spatiale des Sentinel-1&2 (10-20 m) permet de relever. L'avantage crucial de Sentinel-1 réside dans sa capacité à acquérir des données indépendamment de la couverture nuageuse, un atout indispensable pendant la saison de la mousson où les observations optiques sont souvent entravées. Cette synergie a permis de quantifier les surfaces irriguées pour les deux saisons de croissance du riz, la saison de mousson (couvert nuageux très présent) et la saison sèche (absence de précipitation et de nuages).

#### 2.2.1.1 Méthodes *ad hoc* mises en oeuvre

Le prétraitement des données Sentinel-2 (produits Level-1C téléchargé depuis le miroir CNES du service de distribution de Copernicus a été réalisé dans par l'infrastructure Thialand, avec le logiciel MAJA développé au CESBIO (HAGOLLE et al., 2017). Les produits L2A ainsi générés sont disponibles sur l'infrastructure GEODES encore aujourd'hui (<https://geodes-portal.cnes.fr/>). Le prétraitement des données Sentinel-1 (données Level-1 GRD), a été réalisé à l'aide du programme S1Tiling développé également au CESBIO (<https://s1-tiling.pages.orfeo-toolbox.org/s1tiling/1.0.0/install.html>), pour appliquer les corrections topographiques et géométriques et générer un raster à 10 ou 20 m de résolution. Les images radar sont affectées par un bruit de *speckle*, inhérent au mode de détection cohérent du signal, qui altère la qualité radiométrique et complique leur interprétation. Plutôt que d'appliquer un filtrage spatial classique (comme le filtre de Lee) qui tend à lisser les détails

fins, une approche multi-temporelle est privilégiée : elle exploite la redondance d'informations entre plusieurs acquisitions successives pour réduire le *speckle* tout en préservant la texture et les structures spatiales.

Les indices spectraux sont calculés à partir des bandes Sentinel tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) à 10 m, le NDWI (Normalized Difference Wetness Index) à 20 m, et le rapport VV/VH (polarisation double de Sentinel-1) à 10 m et 20 m.

Toujours avec OTB, nous avons employé l'algorithme d'apprentissage automatique basé sur la méthode du Random Forest, sur trois saisons de croissance (janvier à mars et juillet à novembre 2016, et janvier à mars 2017), réputée la plus robuste (PELLETIER et al., 2016) à l'époque. Nous avons entraîné et validé cet algorithme avec des données de terrain provenant de relevés d'occupation des sols saisonniers réalisés grâce à la collaboration avec la CEFIRES et lors de mes nombreux séjours au NGRI à Hyderabad entre 2016 et 2019.

### 2.2.1.2 Incertitudes liées au capteurs

Sentinel-1 s'est avéré particulièrement utile pendant la saison de mousson, caractérisée par un couvert nuageux permanent, pour la détection du coton et de l'eau de surface, n'étant pas sensible ni aux nuages, ni à la couleur des sols. Nous avons obtenu des scores élevés pour le coton non irrigué dans cette zone (0,95 à 10 m, 0,94 à 20 m) avec Sentinel-1 seul, contrairement à Sentinel-2, beaucoup plus sensible à la couleur du sol pour des cultures de faible couvert végétal. La détection automatique de la dynamique des surfaces d'eau a été très précise avec Sentinel-1, permettant de surveiller plus de 200 petits réservoirs ce qui pourrait permettre de quantifier leur contribution à la recharge des aquifères et à l'évaporation. Nous avons constaté que la haute résolution de Sentinel-1 (10-20 m) permet de détecter plus de surfaces d'eau que les données à plus faible résolution (56 m de Resourcesat, le satellite indien). Sentinel-1 est néanmoins plus bruité quand il s'agit de délimiter les parcelles de riz (FERRANT et al., 2017; FERRANT et al., 2019). Pour les saisons sèches, sans couvert nuageux, la donnée Sentinel-2 reste celle qui permet les cartographies les plus précises pour l'eau et les parcelles de riz de petites tailles.

### 2.2.1.3 Variabilité intersaisonnière de l'irrigation

Nous avons estimé la Demande en Eau d'Irrigation (DEI) en nous basant sur les surfaces de cultures identifiées et les pratiques d'irrigation quotidiennes observées lors d'études précédentes (PERRIN et al., 2012).

Les résultats ont révélé une forte variabilité interannuelle des surfaces irriguées, directement liée aux précipitations de la mousson et à la disponibilité locale en eau. Pendant la saison sèche de 2016 (Rabi, janvier à avril), qui a connu des conditions hydrologiques extrêmement sèches, nous avons détecté les totaux de surfaces irriguées les plus bas, s'élevant à seulement 3,5% du total des terres. La DEI estimée était de  $49,5 \pm 0,78$  mm (avec une incertitude de 1,5%). Au cours de la saison de la mousson (Kharif) 2016, les surfaces irriguées représentaient 5% des terres, avec une DEI de  $44,9 \pm 2,9$  mm (incertitude de 6,5%). En revanche, durant le Rabi 2017 (saison sèche, décembre à avril), après des pluies exceptionnelles en septembre 2016 qui ont rechargé les aquifères et le Rainwater Harvesting System (RHS), nous avons observé un accroissement très important des surfaces irriguées consécutives à ces intempéries, surfaces de riz atteignant jusqu'à 16% de la surface totale, 6% pour les autres cultures irriguées. La DEI estimée pour cette saison a atteint  $226,2 \pm 5,8$  mm (incertitude de 2,5%), un chiffre comparable à la recharge annuelle des aquifères dans la région.

#### 2.2.1.4 Importance du riz comme proxy de la demande en eau

Lorsque l'on examine la DEI par saison estimée dans cette étude, le riz représente une part nettement plus importante que les autres cultures irriguées (maïs et légumes). Pour la saison de croissance pendant la période sèche de 2016 (janvier à avril), la DEI du riz était d'environ 45 mm, tandis que celle des autres cultures irriguées variaient de 0,9 à 5,9 mm. Pendant la saison Kharif 2016, la DEI du riz était d'environ 46,9 mm, contre seulement 0,12 mm pour les autres cultures. Pour la saison sèche 2017, la DEI du riz a atteint environ 208 mm, tandis que celle des autres cultures irriguées était d'environ 14,5 mm. Ces chiffres démontrent clairement que la culture du riz inondé a une demande en eau considérablement plus élevée que les autres cultures irriguées (maïs et légumes) dans la zone d'étude.

Cette première étude démontre le potentiel de restitution en quasi temps réel de la forte variabilité à court terme des surfaces mises en culture pour le riz en Inde du Sud, comme proxy à l'abondance de l'eau souterraine. Ces variables agro-hydrologiques dynamiques sont cruciales pour calibrer les modèles agro-hydrologiques et mieux comprendre les stratégies d'adaptation des agriculteurs face à la variabilité climatique et hydrologique.

### 2.2.2 Régionalisation de la demande en eau pour l'irrigation du riz

La stratégie de recherche qui a suivi a consisté à tester notre capacité à estimer cette DEI saisonnière dans les conditions les plus favorables, à en évaluer l'incertitude et à publier les données en suivant les recommandations FAIR préconisées de mon institut de recherche, l'IRD (Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable).

#### 2.2.2.1 Classifications supervisées du riz en saison sèche avec Sentinel-2 à l'échelle du Tèlangana

Je me suis donc concentré sur une variable clé de la demande en eau : la surface cultivée en riz, qui en représente la majeure partie (chapitre précédent). J'ai choisi de travailler uniquement avec Sentinel-2, afin de bénéficier de sa précision spatiale, et de cibler spécifiquement les saisons sèches, période quasi exempte de nuages et offrant ainsi un grand nombre d'observations exploitables. L'étude a été menée à l'échelle de l'aquifère granitique, couvrant cette fois près des deux tiers de l'État du Tèlangana (27 tuiles Sentinel-2, contre seulement deux dans les travaux précédent). La méthode ici reste classique (Classification supervisée Random Forest) et n'est pas l'objet de recherche, elle est décrite dans ce workflow (figure 2.7). Ce travail a fait l'objet d'un *datapaper* (FERRANT et al., 2025) associé à la donnée publiée en ligne sur [datasuds-geo.ird.fr/geonetwork/umr\\_cesbio/eng/catalog.search#/metadata/1f7bb3d2-4223-4e1d-a39d-7e432bcbbb34](https://datasuds-geo.ird.fr/geonetwork/umr_cesbio/eng/catalog.search#/metadata/1f7bb3d2-4223-4e1d-a39d-7e432bcbbb34).

#### 2.2.2.2 Approche d'évaluation et de quantification de l'incertitude

Nous n'avons pas produit une classification unique, mais huit cartes indépendantes, chacune reposant sur un jeu d'échantillons d'apprentissage différent. Cette stratégie permet de générer des cartes de confiance au niveau du pixel. Bien que la classe riz soit très bien identifiée individuellement (F-score > 0,98), la variabilité des surfaces estimées à l'échelle des Mandals (équivalent indien de nos cantons) pour chaque saison demeure forte selon les zones, en raison de l'incertitude liée à l'échantillonnage.

La figure 2.8 illustre cette relation en comparant, pour chaque Mandal, le coefficient de variation (CV) des pourcentages de riz liés à l'incertitude de classification (calculé sur les 8 tirages aléatoires d'échantillons pour une même saison) avec le CV interannuel (calculé sur les quatre

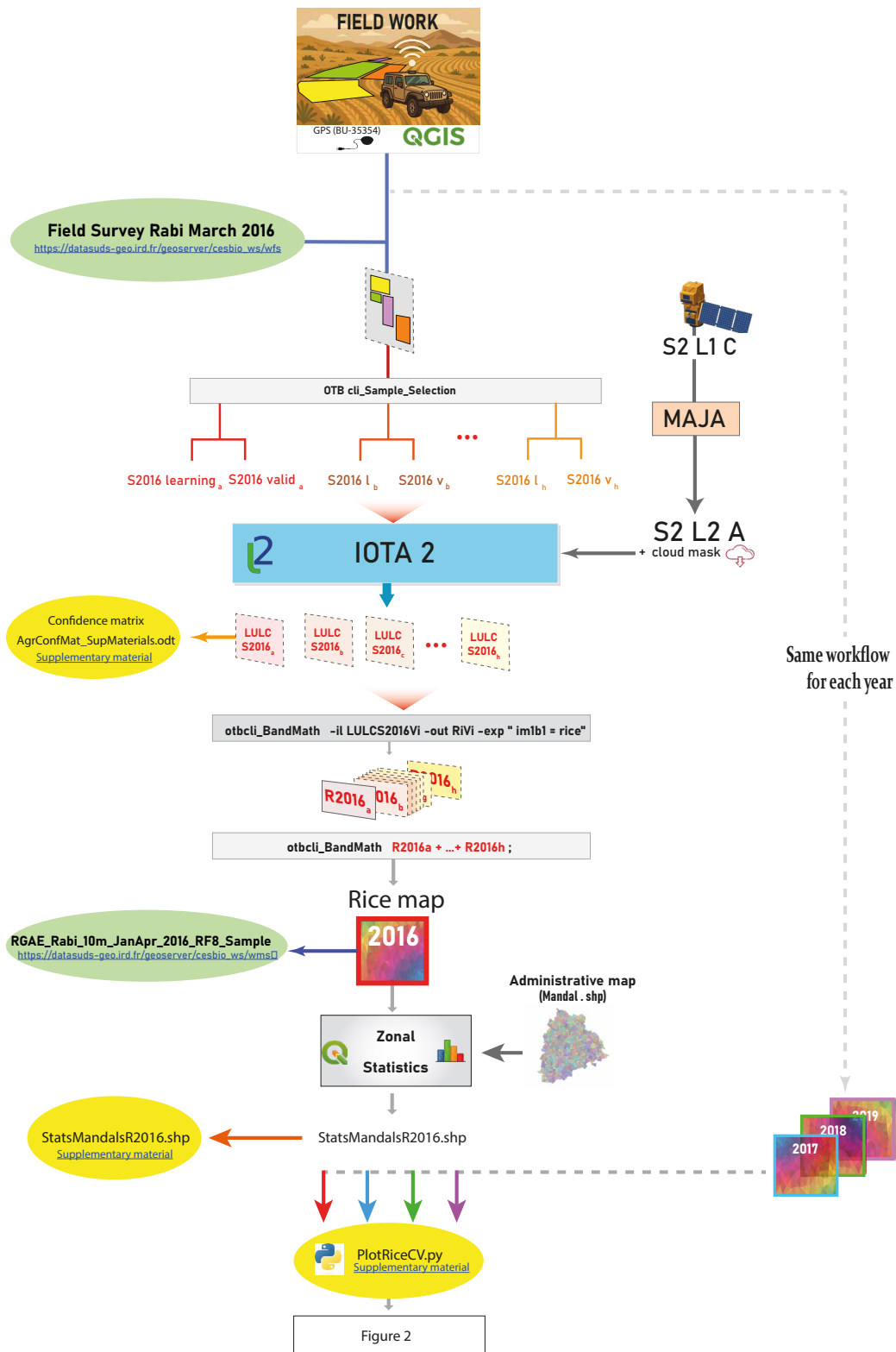


FIGURE 2.7 – Schéma de traitement pour les cartographies de riz publiées à partir des échantillons d'apprentissage obtenu lors des 4 campagnes de terrain entre 2016 et 2019 (d'après FERRANT et al. (2025)).

saisons sèches étudiées). Ce graphique met en évidence un point essentiel : malgré d'excellentes métriques de classification au pixel (F-score  $> 0,98$ ), l'incertitude intra-saisonnière due au choix des échantillons peut être importante, parfois comparable voire supérieure à la variabilité inter-annuelle des surfaces rizicoles au niveau du Mandal. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les zones faiblement cultivées. Il faut donc prendre en compte cette variabilité lors de l'interprétation des tendances ou de la comparaison avec les statistiques agricoles.

### 2.2.2.3 Sentinel-1 dans la littérature : potentiel et contraintes pour la cartographie du riz

Dans la littérature, des efforts récents ont visé à produire des cartes saisonnières de surface cultivées en riz à l'échelle de l'Inde en mobilisant les données Sentinel-1. Ces données radar garantissent une acquisition régulière des données quels que soient les couverts nuageux à des résolutions de reconstruction de 10 à 20 m. Bien que reconnues très utiles dans les grands bassins de production de riz (PHAN et al., 2021), nous avons pu voir précédemment que ces données, moins bien résolues que l'optique de Sentinel-2, entraînent des incertitudes importantes dans les régions où les rizières sont fragmentées (FERRANT et al., 2019).

Les méthodes classiques reposent sur le seuillage de l'amplitude de variation temporelle d'indices spécifiques. Dans une étude récente, CHEN et al. (2024) ont utilisé le *SAR-based Paddy Rice Index* (SPRI) dérivé du coefficient de rétrodiffusion en polarisation croisée VH de Sentinel-1 pendant les phases de transplantation et de croissance du riz. L'indice SPRI combine trois composantes, chacune normalisée entre 0 et 1 : (i)  $f(D)$ , la variation saisonnière du coefficient de rétrodiffusion VH, calculée à partir des valeurs maximales et minimales observées pendant la saison ; (ii)  $f(V)$ , proportion de temps où le coefficient de rétrodiffusion est faible, correspondant à un temps de sol nu ou d'inondation ; et (iii)  $f(W)$ , la dérivée dans le temps du signal VH, indiquant des changements rapides liés à l'inondation temporaire et l'émergence de la culture. Ces trois fonctions sont multipliées pour former le SPRI, dont le seuillage permet d'identifier les pixels cultivés en riz sur chaque saison. Cette approche tire parti de la dynamique spécifique des rizières irriguées, caractérisées par des périodes d'inondation suivies d'une croissance végétative, tout en restant robuste aux variations locales de conditions de culture.

Pour générer les cartes finales, CHEN et al. (2024) ont défini un seuil sur les valeurs de SPRI afin de sélectionner les pixels les plus probables de rizières, ce seuil étant ajusté à l'échelle des états indiens avec les statistiques agricoles existantes. Ces approches se heurtent à des limites importantes dans des régions comme le Telangana, où les systèmes d'irrigation reposent majoritairement sur les eaux souterraines et où les rizières sont dispersées autour des forages, rendant leur détection moins fiable. Ainsi, dans cette région, CHEN et al. (2024) rapportent des performances modestes (F-score  $\approx 0.7$ ), nettement inférieures à celles obtenues dans d'autres États du nord de l'Inde, comme le long du Gange, où l'extension rizicole est massive et plus homogène (F-score  $\approx 0.9$ ). Et nettement plus faibles que les performances que nous obtenons avec Sentinel-2 (FERRANT et al., 2025). Malgré l'avantage du radar pour traverser la couverture nuageuse, la résolution spatiale plus grossière et la variabilité locale des pratiques limitent la précision des classifications. On peut aisément imaginer l'ampleur de l'incertitude associée à des cartes dont la précision de classification reste si faible : elles deviennent difficiles à utiliser de manière fiable pour estimer et suivre les surfaces en riz.

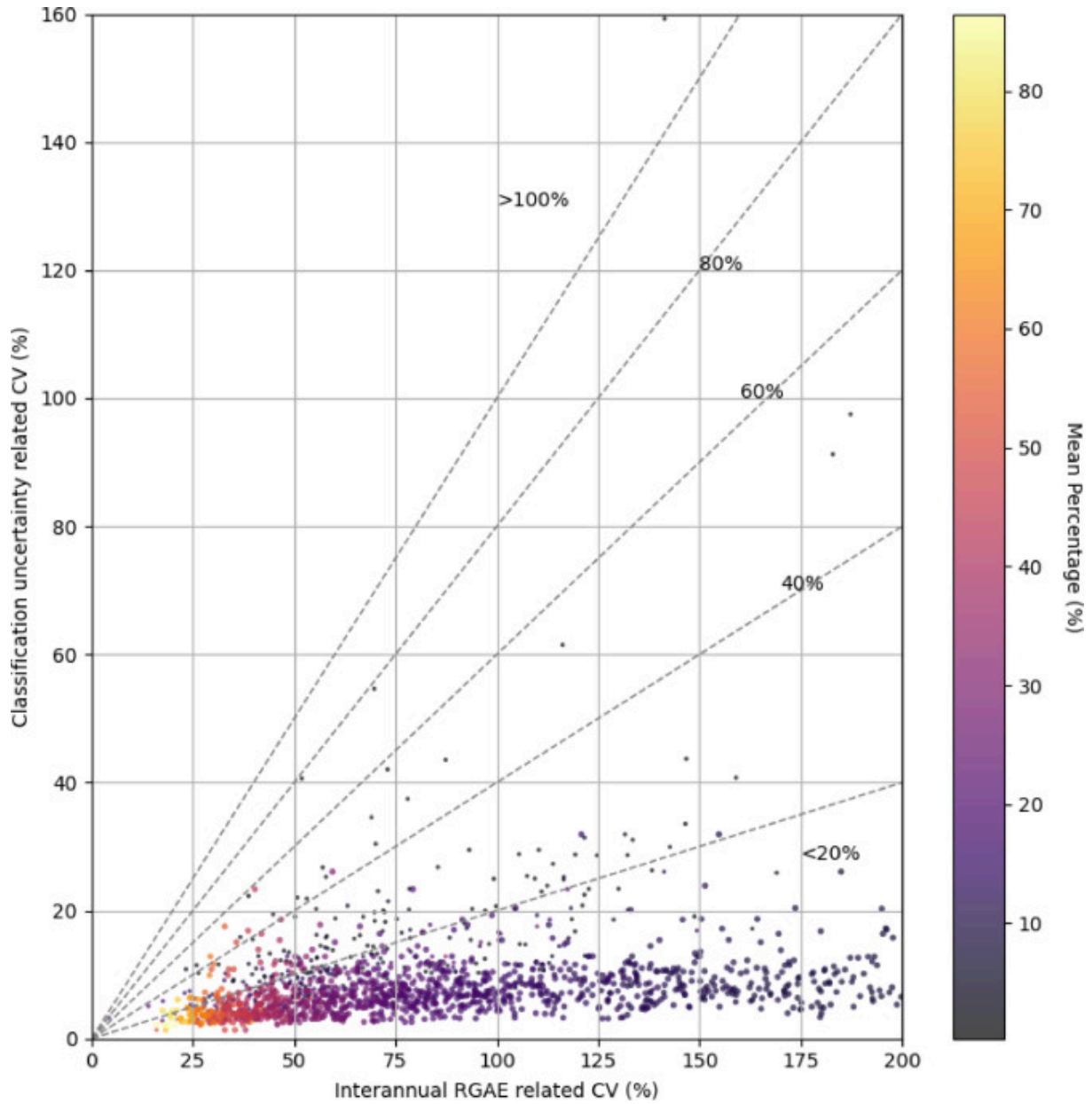


FIGURE 2.8 – Relation entre la variabilité interannuelle des superficies rizicoles (coefficient de variation des moyennes annuelles 2016–2019) et l’incertitude de classification (coefficient de variation des 8 cartes par saison) à l’échelle du Mandal, au Telangana (Inde). Chaque point correspond à un Mandal, la couleur indiquant le pourcentage moyen de surface en riz sur les quatre saisons. (d’après FERRANT et al. (2025)).

## 2.3 Impact régional de l’irrigation sur la détection de l’humidité des sols par satellite

Parce que les rizières mises en culture sont irriguées jusqu’à la saturation de la réserve utile des sols pendant 3 mois, voire afin d’atteindre une inondation des parcelles pendant le premier mois et que les surfaces restituées sont très variables dans le temps et l’espace, nous avons donc examiné leur influence à l’échelle régionale sur l’humidité des sols dérivées des satellites micro-ondes à basse résolution. Un travail réalisé dans le cadre de la thèse de Claire Pascal a consisté à utiliser ces données de surfaces saisonnières en riz précédemment décrites agrégées à la résolution de la grille de restitution des humidités de sol dérivées des données micro-ondes bande L des satellites SMOS et SMAP (25 km, (PASCAL et al., 2023)).

Les données mensuelles de l’humidité de surface du sol (Surface Soil Moisture, SSM) de niveau 3 (L3SM RE07) du satellite SMOS, concernent les 5 premiers centimètres du sol et sont fournies par le Centre Aval de Traitement des Données SMOS (CATDS, <https://www.catds.fr/>).

L’ensemble de données L3 amélioré (L3E) et les données SSM de niveau 4 (L4) de SMAP sont également explorées. Les données L4 SSM sont obtenues en assimilant les températures de brillance (Tb) de SMAP dans le modèle de surface terrestre NASA Catchment Land (CLM). Les données sont accessibles sur les plateformes <https://appears.earthdatacloud.nasa.gov> et <https://nsidc.org/data/smap/smap-data.html>.

### 2.3.1 Sols mouillés par temps sec

Les produits satellite de niveau 3 à environ 25 km de résolution présentent un cycle annuel bimodal de l’humidité du sol sur les zones irriguées du Tèlangana, avec un pic durant la période humide attribué aux précipitations de la mousson et un second durant la saison sèche, d’amplitude plus ou moins grande, attribué à l’irrigation. L’amplitude de ce second pic (ou maximum saisonnier) d’humidité peut selon les endroits être plus important que l’amplitude observée pendant la saison humide. L’amplitude de ces pics d’humidité en période sèche est néanmoins très variable dans l’espace, comme l’est la variable de surface en riz (figure 2.9).

### 2.3.2 Corrélations entre humidités et surfaces en riz

L’amplitude du second pic de SSM (celui de la saison sèche, dû uniquement à l’irrigation) est significativement corrélée à la fraction de riz. Pour SMOS L3, le coefficient de corrélation (R) est de 0,81, tandis que pour SMAP L3E, il est de 0,77. Ces chiffres représentent la moyenne des corrélations sur toutes les années étudiées pour la saison sèche (PASCAL et al., 2023). Durant la saison humide, les corrélations sont généralement plus faibles car :

- l’amplitude du SSM est influencée à la fois par les précipitations et l’irrigation
- l’incertitude sur le pourcentage de riz liée aux faible nombre de données Sentinel-2 exploitables pendant la mousson est plus grande.

Pour cette saison, les corrélations moyennes sur toutes les années sont de 0,68 pour SMOS L3 et de 0,55 pour SMAP L3E. Même dans ce cas, SMOS L3 montre une meilleure corrélation que SMAP. La thèse de Claire Pascal a discuté la possibilité d’envisager de restituer le pourcentage de surface en riz à partir des données SMOS à 25km, en identifiant toutefois des limites aux produits globaux actuels fournis par le CATDS, à commencer par la faible résolution spatiale, mais aussi par l’absence de prise en compte de la variabilité importante des surfaces en eau dans les algorithmes de restitution.

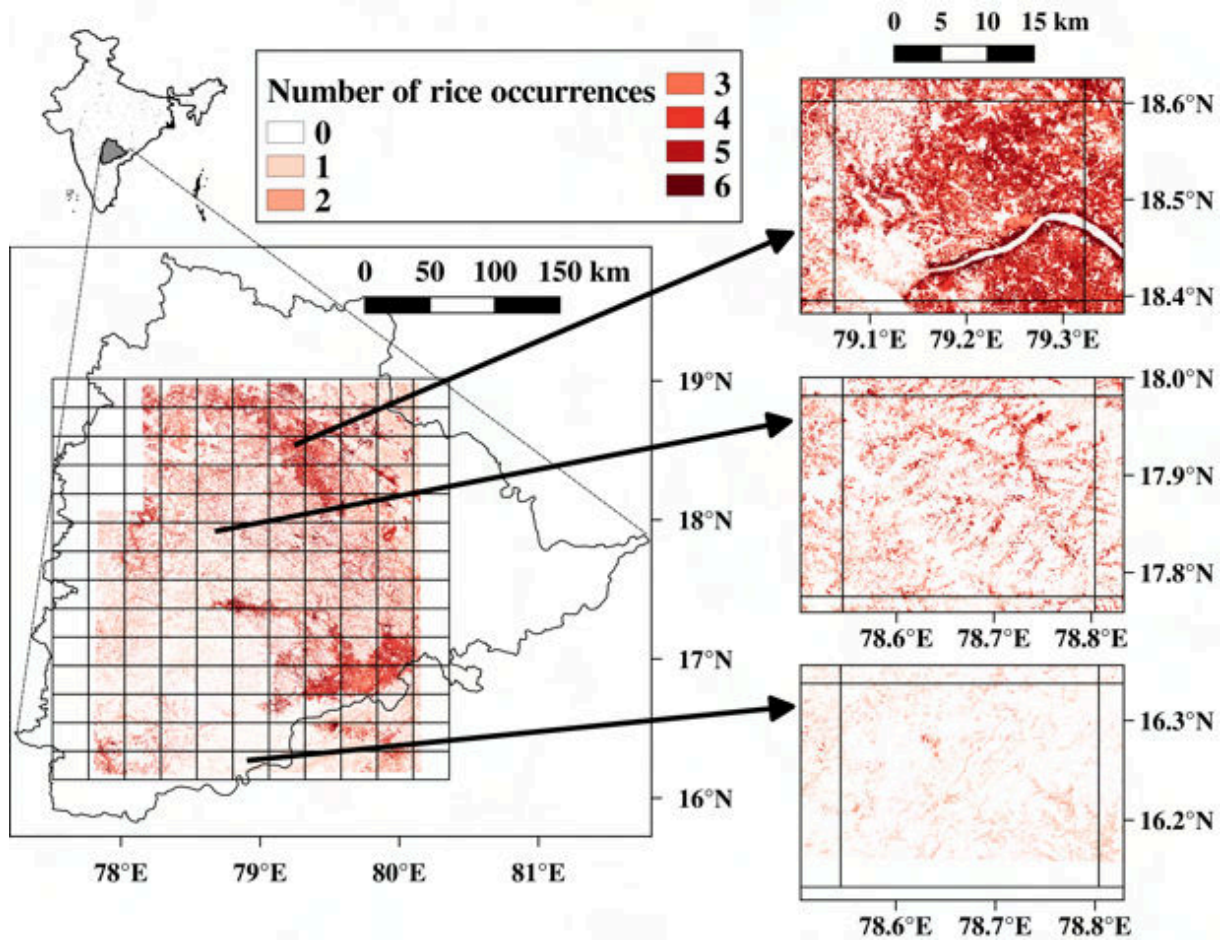
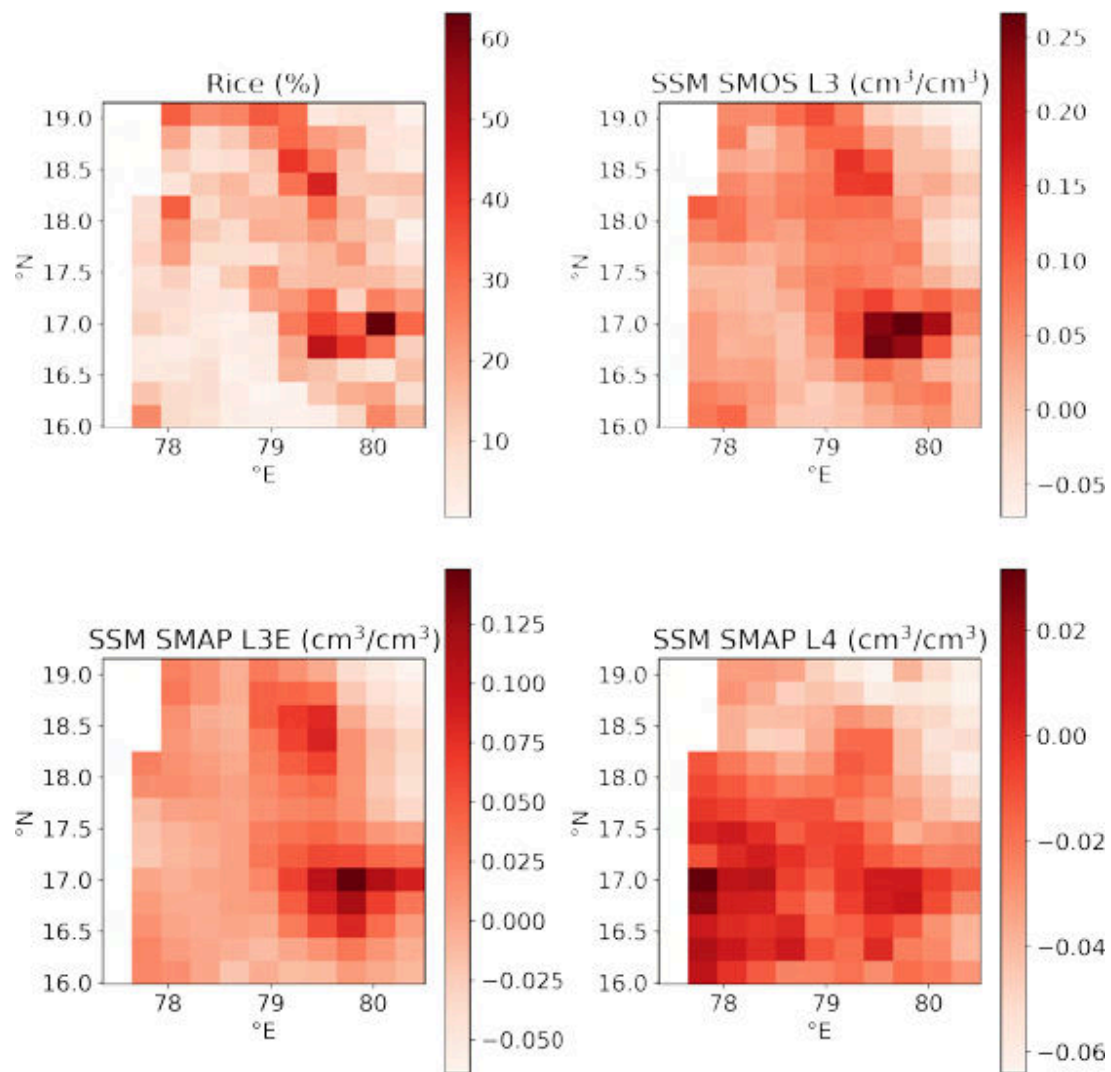


FIGURE 2.9 – Nombre d’occurrences de rizières sur six saisons, cartographiées avec Sentinel-1&2 (FERRANT et al., 2019). EASE-Grid (Equal-Area Scalable Earth Grid) est représentée pour illustrer la différence entre les résolutions des produits d’humidité des sols SMOS et SMAP (d’après PASCAL et al. (2023)). Trois pixels de cette grille sont présentés pour illustrer la très grande variabilité de la mise en culture du riz sur le territoire.

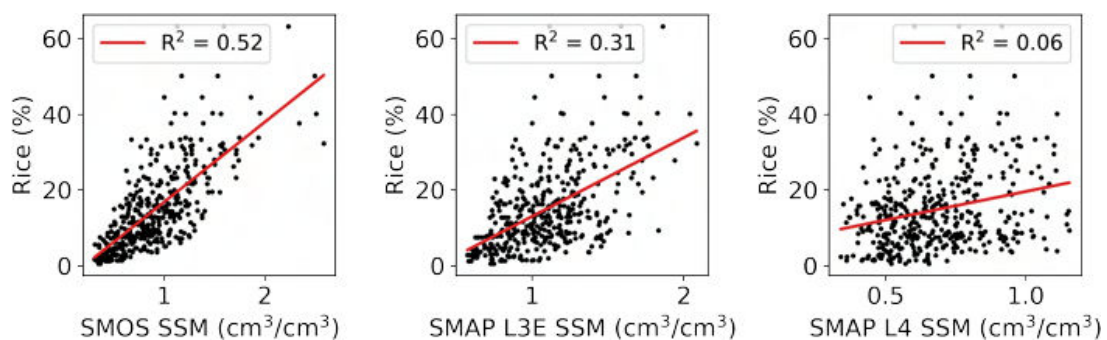
### 2.3.3 Limites de l’assimilation pour les produits SMAP L4

Le produit SMAP de niveau 4 (SMAP L4 Global Soil Moisture) fournit des estimations d’humidité du sol en surface et en profondeur issues de l’assimilation des observations de température de brillance (Tb) de SMAP dans le modèle de surface terrestre GEOS-5 Catchment Land Surface Model développé au GMAO/NASA. Dans ce schéma, l’humidité simulée est ajustée pour rester cohérente avec les forçages météorologiques : en l’absence de précipitations, toute augmentation d’humidité détectée par les observations L3 est corrigée.

Les produits de niveau 3 (SMOS/SMAP L3) reflètent directement l’humidité du sol mesurée par le satellite, incluant l’effet de l’irrigation. En revanche, l’assimilation pour le produit L4 efface cette signature, entraînant une sous-estimation de l’humidité dans les zones irriguées. La figure 2.10a montre les pourcentages de surface en riz pour la saison sèche de 2018 et compare les anomalies de SSM observées par SMOS et SMAP L3 avec celles estimées par SMAP L4. Attention, les échelles de couleurs sont différentes entre L3 et L4, allant de 0 à 0.25 pour L3 et de -0.06 à 0.02 pour L4. L4 présente donc une utilité limitée pour analyser les dynamiques de l’irrigation et ses impacts.



(a) Cartes de la couverture rizicole (%) et de l'amplitude du pic durant la saison sèche 2018 pour les anomalies d'humidité du sol (SSM, en  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) issues de SMOS L3, SMAP L3E et SMAP L4 (calculées en soustrayant, pixel par pixel, la moyenne temporelle des valeurs de SSM entre 2016 et 2019).



(b) Relation entre la couverture rizicole et produits SSM, avec la droite de régression et son coefficient de détermination ( $R^2$ ) indiqués par la ligne rouge.

FIGURE 2.10 – Evaluation des corrélations entre surface en riz et produits SSM SMOS et SMAP, d'après PASCAL et al. (2023)

## 2.4 Détection des volumes en eau de surface disponibles pour l'irrigation

Dans ce contexte semi-aride du sud de l'Inde, où l'agriculture irriguée dépend en grande partie des aquifères, les infrastructures dites de recharge artificielle (Managed Aquifer Recharge, MAR) consistent en des ensembles de petits réservoirs collinaires permettant de stocker l'eau de ruissellement de la mousson (tanks). Ces systèmes en cascade, aussi appelés Rainwater Harvesting System (RHS), sont souvent perçus comme une solution à la pénurie d'eau, garantissant un maintien de l'eau de pluie en amont, dans la capacité de rétention (volume totale) des réservoirs ainsi que la réinfiltration dans l'aquifère sous-jacent. Cependant, leur efficacité fait l'objet d'un débat scientifique.

Les travaux qui suivent ont été initiés dans le cadre d'un appel à projet Space4society de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), puis en collaboration avec un ingénieur du CNES, Santiago Pena-Luque, en charge du développement d'un algorithme de détection des surfaces en eau Sentinel-1&2 (PEÑA-LUQUE et al., 2021), puis dans le cadre de la thèse de Claire Pascal (PASCAL et al., 2022 ; PASCAL et al., 2024) et en collaboration avec une étudiante en thèse du groupe de recherche du professeur Richard Kelly, de l'université de Waterloo, au Canada, Victoria Vanthof (VANTHOF et al., 2024).

### 2.4.1 Impacts locaux et régionaux des réservoirs agricoles

Les solutions de recharge artificielle des aquifères (MAR) se sont développées à l'échelle mondiale avec des résultats positifs, y compris en Inde (DILLON et al., 2019 ; DASHORA et al., 2018). Néanmoins, l'efficacité des programmes MAR à grande échelle dans les régions semi-arides demeure incertaine (KUMAR et al., 2006 ; GLENDENNING et al., 2012). Les modèles à petite échelle montrent que les réservoirs de percolation peuvent contribuer significativement à la recharge locale, mais de manière très variable spatialement (PERRIN et al., 2012). Des effets négatifs sont possibles en aval, et les bénéfices pour les populations restent souvent inégaux en raison d'un dimensionnement inadapté et de la variabilité interannuelle des pluies. Enfin, les évaluations restent limitées dans le temps (1–2 ans) et laissent incertaine la quantification fiable du remplissage et de l'efficacité des réservoirs (NICOLAS et al., 2019).

L'état du Tèlangana compte plus de 45 000 de ces petits réservoirs. Il y a dix ans, ils étaient mal inventoriés et leur dynamique de remplissage difficile à suivre. Contrairement aux grands barrages, aucune information centralisée n'existe pour le suivi de leur remplissage. La quantification de ces volumes d'eau est donc l'objectif qu'on s'est fixé en 2019, dans le cadre des obtenus de l'ESA ForEarth, du projet PNTS Water4Agri3D et de la thèse de Claire Pascal.

### 2.4.2 Suivi des dynamiques des surfaces en eau : Radar ou Optique ?

J'ai travaillé à partir de 2018 à l'élaboration d'une chaîne de traitement des données SAR Sentinel-1 pour extraire les surfaces en eau de manière automatique, en prenant comme zone de test l'État du Tèlangana. On l'a vu précédemment, le radar Sentinel-1 présente plusieurs avantages : acquisition d'images systématiques (non masquées par les nuages) et forte détectabilité des surfaces en eau. Cette chaîne s'appuie sur le langage *Shell*, la librairie géospatiale Orfeo ToolBox, ainsi que sur des outils spécifiques tels que *S1Tiling*, développés au CNES pour le prétraitement (calibration, reprojection et mosaïquage des images sur la grille Sentinel-2). Cette chaîne précurseure (non publiée) a été testée lors du stage de fin d'étude de l'ingénieure agronome Claire Pascal au CESBIO, que j'ai encadrée, avant de lui proposer le sujet de thèse co-construit avec Olivier Merlin.

Ce travail a été poursuivi en collaboration avec Santiago Peña-Luque, en charge du développement de la chaîne *SurfWater*, aujourd’hui opérationnelle et dont les produits sont disponibles sur la plateforme Theia<sup>1</sup>. Le principe repose sur une détection supervisée *Random Forest* utilisant comme référence la carte mondiale des occurrences d’eau de (PEKEL et al., 2016), combinée à un filtrage adapté aux images radar et à une régularisation spatiale des cartes classifiées basée sur un filtre majoritaire (mode filtering) dans un voisinage prédéfini. Cette approche permet de générer de manière robuste des masques de surfaces en eau à partir d’images Sentinel-1, utilisés pour analyser la dynamique inter- et intra-annuelle du remplissage et de la vidange des réservoirs agricoles du RHS au Telangana.

Un résultat majeur est que Sentinel-1 permet de suivre les dynamiques de remplissage/vidange très rapides sous le couvert nuageux permanent de la mousson. La revisite Sentinel-1 n’est que de 12 jours en Inde, alors que certaines dynamiques de remplissage/vidange peuvent être encore plus rapides. Les surfaces en eau dérivées des images SAR présentent une érosion apparente de leurs contours, restituées à une résolution de 10–20 m. Ce biais, lié majoritairement aux pixels situés aux bordures des surfaces en eau, affecte la classification des pixels voisins et augmente pour les surfaces les plus réduites, qui représentent une part majoritaire des réservoirs du RHS. L’importance de cet effet est supérieure à celle observée en imagerie optique, en raison de la nature de la diffusion radar et du bruit de speckle.

Les données multispectrales Sentinel-2 sont principalement exploitées via l’application de seuils sur des indices spectraux (SI) reconnus pour identifier les pixels d’eau, tels que le Normalized Difference Water Index (NDWI), le Modified NDWI (MNDWI), l’Automated Water Extraction Index (AWEI) ou le Water Index 2015 (WI2015) (XU, 2006 ; DU et al., 2016 ; FEYISA et al., 2014 ; ACHARYA et al., 2018 ; FISHER et al., 2016 ; YANG et al., 2020). La calibration de ces seuils est souvent nécessaire pour chaque acquisition et zone couverte, et des méthodes automatiques, comme le seuillage d’Otsu, permettent de séparer les pixels en classes eau/non-eau à partir de l’histogramme bimodal des SI (OTSU, 1979). Les fausses détections dans les zones urbaines, sur sol nu, dans les nuages, la neige/glace ou les zones d’ombre peuvent être partiellement corrigées par des filtres ou des méthodes combinées, mais certaines erreurs persistent, notamment dans les zones montagneuses peu éclairées. Les surfaces en eau à faible réflectance (grande profondeur, végétation aquatique sombre, fonds obscurs) ou à forte réflectance (eaux peu profondes avec fonds clairs ou forte turbidité) peuvent rester indétectées avec ces méthodes.

Des méthodes alternatives ont été proposées, comme la conversion de l’espace colorimétrique RGB (bandes SWIR2, NIR et RED) en HSV (Teinte, Saturation, Valeur), permettant de dissocier la chromaticité et la luminosité (PEKEL et al., 2014 ; PEKEL et al., 2017 ; NGOC et al., 2019). Des approches plus sophistiquées, utilisant la programmation génétique, la classification supervisée, la segmentation d’objets ou l’apprentissage profond, ont montré une meilleure précision, notamment pour les plans d’eau temporaires et les zones humides (DOÑA et al., 2021 ; HOLLSTEIN et al., 2016 ; YOUSEFI et al., 2018 ; KAPLAN et al., 2017 ; WIELAND et al., 2019). Les méthodes basées sur les SI restent moins robustes dans des milieux complexes (turbidité, végétation aquatique), alors que les classifieurs nécessitent des données externes et des échantillons d’entraînement, ce qui complique leur mise en œuvre (BANGIRA et al., 2019). Une approche prometteuse combine plusieurs SI et la réflectance brute dans un regroupement hiérarchique multidimensionnel non supervisé, optimisant l’utilisation de l’information contenue dans une scène Sentinel-2 à grande échelle, sans données auxiliaires ni mosaïques temporelles (CORDEIRO et al., 2021). Cette méthode a surpassé les programmes et techniques traditionnelles, tels que Sen2Cor, MAJA, FMask ou le seuillage MNDWI, notamment pour les petites surfaces en eau (< 0,5 ha) (MAIN-KNORN et al., 2017).

J’ai participé à une étude comparative des effets capteurs/méthodes/résolutions sur les va-

---

1. <https://hydroweb.next.theia-land.fr/>

riations de surface en eau avec Sentinel-1 et Sentinel-2 (PEÑA-LUQUE et al., 2021). Les données optiques sont globalement plus précises pour cartographier de larges zones et surveiller la surface des réservoirs. Cependant, les approches multi-temporelles, combinant plusieurs observations sur une période donnée (par exemple, 15 jours), améliorent systématiquement les performances des deux capteurs, particulièrement pour le radar. L’erreur relative sur l’estimation de la surface des réservoirs diminue ainsi de 22% à 15% pour le radar et de 17% à 13% pour l’optique avec une fenêtre de 15 jours. La précision de la détection radar est influencée par la géomorphologie des réservoirs, étant moins performante pour les étendues d’eau étroites. Les deux capteurs tendent à sous-estimer la surface lorsque les réservoirs sont presque pleins, biais probablement causé par la végétation dense sur les berges. Pour un suivi opérationnel, il est donc suggéré d’utiliser des fenêtres temporelles de 10 à 20 jours et de combiner les deux capteurs afin de bénéficier à la fois de la précision optique et de la régularité des observations radar, indépendamment de la couverture nuageuse.

### 2.4.3 Cartographie de la capacité des réservoirs du RHS à haute résolution

La relation entre la hauteur d’eau et la surface inondée d’un réservoir dépend fortement de sa géométrie, ce que l’on décrit par une courbe hypsométrique. Dans des vallées encaissées, par exemple, la surface inondée varie peu lorsque le volume ou la hauteur d’eau change, ce qui rend difficile le suivi précis du niveau ou du volume par simple observation de la surface. À l’inverse, les réservoirs hydrologiques régionaux (RHS) sont généralement très plats et bordés de digues de quelques centaines de mètres de long et d’une dizaine de mètres de hauteur. Dans ces conditions, la surface inondée est très sensible aux variations de hauteur d’eau : de petites augmentations de niveau entraînent de grandes variations de surface. Cela fait de la surface en eau régionale un indicateur particulièrement pertinent pour suivre l’état de remplissage de ces RHS.

Mais comment transformer les variations de surface en eau en variation de volume ? En raison de leur petite taille, leur dispersion et leur faible profondeur, les techniques classiques d’altimétrie satellitaire ne sont pas adaptées pour suivre les variations de volume des réservoirs du RHS. Les missions classiques Envisat, ICESat, Topex/Poseidon ou Sentinel-3 ne couvrent que rarement une infime partie de ces réservoirs, et avec des niveaux de précision verticale de plusieurs dizaines de cm (BAUP et al., 2014 ; CRÉTAUX et al., 2011 ; DUAN et al., 2013 ; FRAPPART et al., 2006 ; FLEURY et al., 2023).

#### 2.4.3.1 La stéréoscopie à très haute résolution

Une étude a été réalisée dans le cadre de la thèse de Claire Pascal, qui a évalué les erreurs d’estimation des variations de volumes en combinant les surfaces en eau Sentinel-2 pendant la période sèche et les modèles Numériques de Terrain (MNT) régionaux et globaux disponibles gratuitement (entre 30 et 90m de résolution) (PASCAL et al., 2024). Pour ce faire, nous avons tiré parti des assèchements hydrologiques réguliers observés dans l’État du Telangana, qui entraînent un assèchement quasi complet des réservoirs du RHS, comme cela a été le cas en 2016 et 2019.

Nous avons ainsi commandé, via le programme DINAMIS du CNES, des acquisitions stéréoscopiques Pléiades permettant de caractériser la bathymétrie de 500 petits réservoirs avec une résolution de 2 m, considérées ensuite comme une référence bathymétrique (figure 2.11). Ces données ont été combinées avec les extensions maximales de surface en eau (MWAE) dérivées de séries temporelles Sentinel-2. L’étude a permis d’estimer la capacité maximale du RHS du Telangana à 29,7 mm ( +/-9 mm) (PASCAL et al., 2021), soulignant l’importance cruciale

de ces petits réservoirs pour l'irrigation des zones agricoles en amont, malgré un volume total relativement faible par rapport aux grands barrages. La haute résolution des images Pléiades s'est révélée particulièrement adaptée à la petite taille et aux faibles profondeurs (<2 m) de ces retenues.

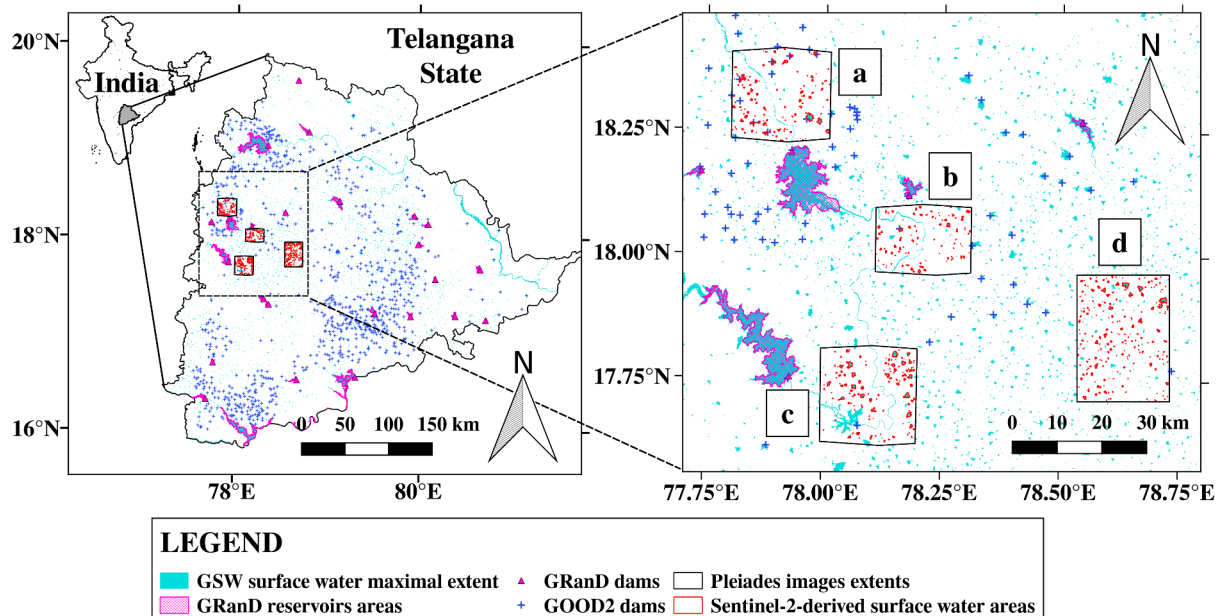


FIGURE 2.11 – Localisation des acquisitions Pléiades en mode stéréoscopique permettant de produire des Modèles Numériques de Terrain à 2m de résolution (d'après PASCAL et al. (2021)). Les surfaces maximales observées par Sentinel-2 (en rouge) ont été produites pendant l'étude sur les emprises pléiades et sont comparées aux données et inventaires préexistants : GRanD, GSW, GOOD2.

#### 2.4.3.2 Estimation de l'incertitude sur les volumes liées aux MNT

La figure 2.12 montre le détail obtenu par la stéréoscopie Pléiade à l'échelle d'un réservoir typique du RHS. On peut y voir également une grande correspondance entre la surface en eau maximale sentinel-2 (en rouge) et la courbe de niveau qui correspond au niveau d'eau. Explorer ces données permet de reconstruire des courbes hypsométriques et donc de retrouver à la lecture d'une surface en eau un volume. Utilisées comme référence, on compare l'écart de volume entre ces courbes et celles obtenues avec un MNT classique, c'est à dire global et à 30m. Ces données sont publiées sur le dépôt Zenodo (FERRANT, 2023) et associées au papier de PASCAL et al. (2024).

La figure 2.13 illustre la relation entre le cumul des surfaces en eau du RHS, estimées dans les emprises Pléiades (scènes a à d), et le volume associé calculé à partir des MNT Pléiades à 2 m de résolution, puis rééchantillonnés à 12, 30 et 90 m, ainsi que des MNT régionaux (CartoDEM) ou globaux (AW3D30, GLO-30 et TanDEM-X). Cette comparaison met en évidence les erreurs attendues lorsque l'on utilise des bathymétries à des résolutions dégradées ou issues de MNT globaux moins résolus et acquis alors que les réservoirs n'étaient pas forcément vides. Bien que parfois importantes, ces incertitudes ouvrent néanmoins la perspective d'une caractérisation minimale des volumes dans les contextes dépourvus de mesures locales ou de collecte centralisée des données.

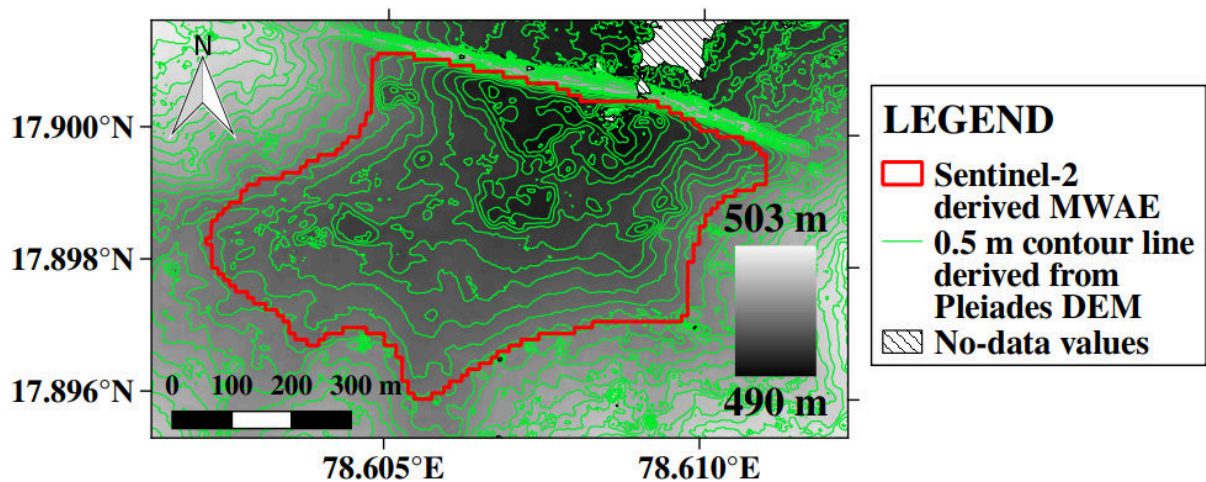


FIGURE 2.12 – Exemple d’une bathymétrie de réservoir obtenu par stéréoscopie Pléiades alors que l’ensemble des réservoirs étaient à sec. Le polygone en rouge correspond à la surface maximale en eau (MWAE pour Maximal Water Area Extent) observée avec Sentinel-2 depuis 2017 (d’après PASCAL et al. (2021)).

Enfin, nous avons produit la variable de volume d’eau de surface stockée dans le RHS en fonction du temps à l’aide des MNT Pléiades. Les cartes de surface en eau dérivées de Sentinel-2 ont été combinées avec les MNT Pléiades pour estimer, à chaque date disponible, le volume individuel de chaque réservoir du RHS. Ces volumes élémentaires ont ensuite été cumulés afin de reconstituer, à l’échelle des emprises Pléiades (scènes a à d), des séries temporelles du volume cumulé en millions de mètres cubes (MCM) (figure 2.14). Cette reconstruction a permis de d’estimer une variation du volume jusqu’à plus de 15 millions de mètres cube (MCM). Malgré les interruptions liées à la couverture nuageuse durant la mousson, les séries temporelles optiques se révèlent particulièrement pertinentes pour documenter la phase de vidange saisonnière. Elles apportent ainsi un indicateur robuste du stock d’eau mobilisé par les réservoirs, essentiel pour comprendre les impacts hydrologiques du RHS sur les dynamiques régionales et pour le développement de systèmes opérationnels de suivi et d’alerte sécheresse. On observe dans les séries temporelles que le volume cumulé des réservoirs présente des variations en dents de scie entre deux acquisitions consécutives, même en l’absence de pluie. Ces oscillations ne reflètent pas de réelles variations hydrologiques, mais traduisent la sensibilité des surfaces dérivées aux conditions d’acquisition, au bruit des images, et aux erreurs de classification, en particulier pour les petites étendues d’eau.

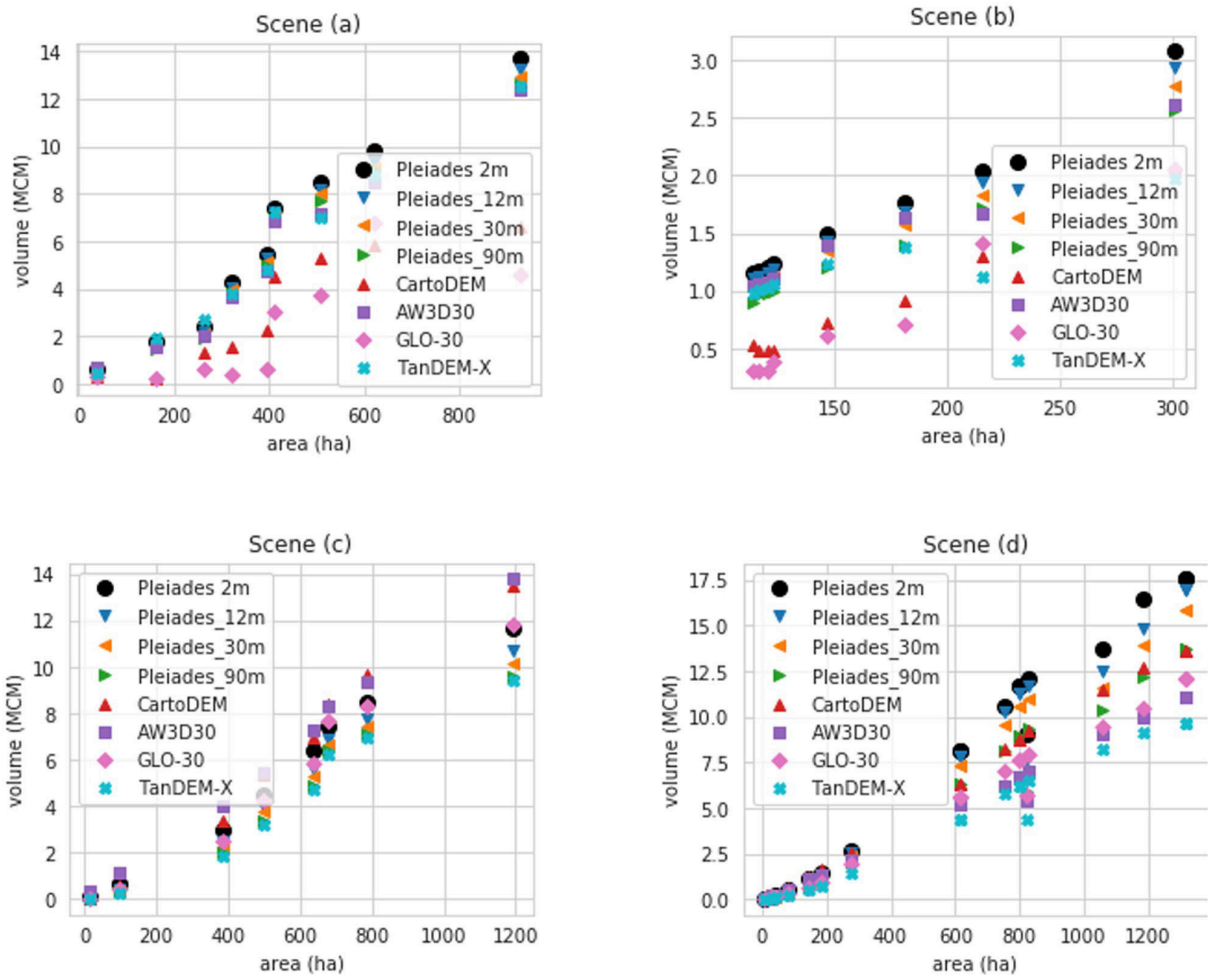


FIGURE 2.13 – Relation surface–volume des réservoirs du RHS dans les emprises Pléiades. Chaque scène (a–d) comporte quatre graphes correspondant aux volumes calculés à partir des MNT Pléiades (2 m) rééchantillonnés à 12, 30 et 90 m, ainsi que des MNT régionaux (CartoDEM) et globaux (AW3D30, GLO-30, TanDEM-X). La comparaison met en évidence les écarts induits par un réduction des résolutions et l’utilisation de MNT globaux pour la bathymétrie des petits réservoirs (d’après PASCAL et al. (2024)).

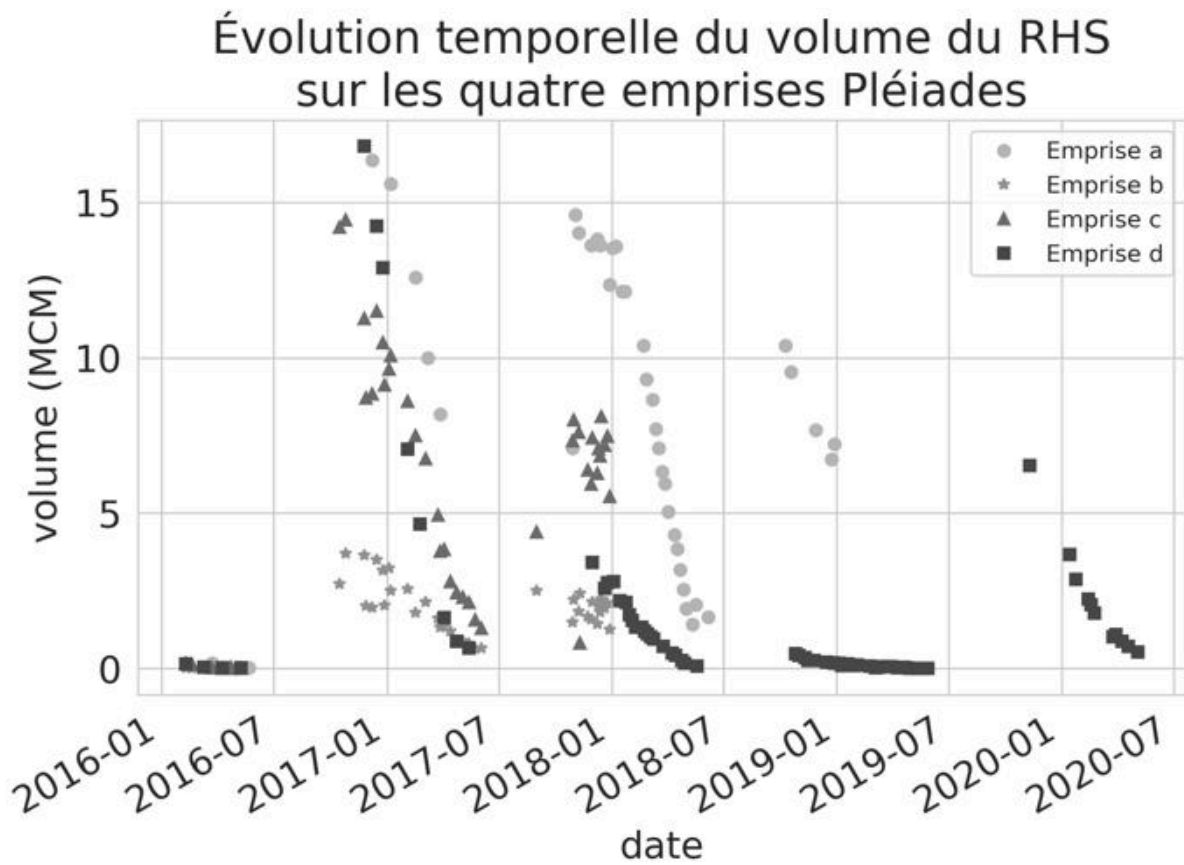


FIGURE 2.14 – Evolution des volumes stockés dans les réservoirs du Rainwater Harvesting System du Tèlangana, à partir des Modèles Numériques de Terrain dérivés des images stéréoscopiques Pléiades et des surface en eau extraites des images Sentinel-2 (d’après PASCAL (2022)).

## 2.5 Stockage Total de l'Eau (TWS) et Eau Souterraine (GWS) : Lever les limites de résolution de GRACE

Les données de gravimétrie issues des missions GRACE et GRACE-FO ont profondément transformé le suivi du stockage total de l'eau à l'échelle régionale. Toutefois, leur résolution native relativement grossière (300–400 km) limite leur applicabilité pour la gestion hydrologique à des échelles pertinentes pour l'agriculture.

La désagrégation spatiale des données GRACE vise à augmenter leur résolution afin de produire des cartes du stockage en eau souterraine (GWS) à une échelle plus fine, typiquement de quelques dizaines de kilomètres ( $0,5^\circ$  soit environ 50 km dans cette étude). Différentes méthodes de désagrégation (downscaling) ont été évaluées pendant la thèse de Claire Pascal, pour estimer les anomalies de stockage total en eau (TWS) et d'eau souterraine (GWS) sur l'aquifère granitique fracturé. Face à la résolution de GRACE, nous avons appliqué des modèles fondés sur les données, notamment des forêts aléatoires (Random Forest), en utilisant des prédicteurs satellitaires à plus haute résolution (précipitations TRMM, NDVI MODIS, humidité du sol ESA CCI), permettant d'obtenir des cartes de TWS et GWS à une résolution de  $0,5^\circ$  (50 km).

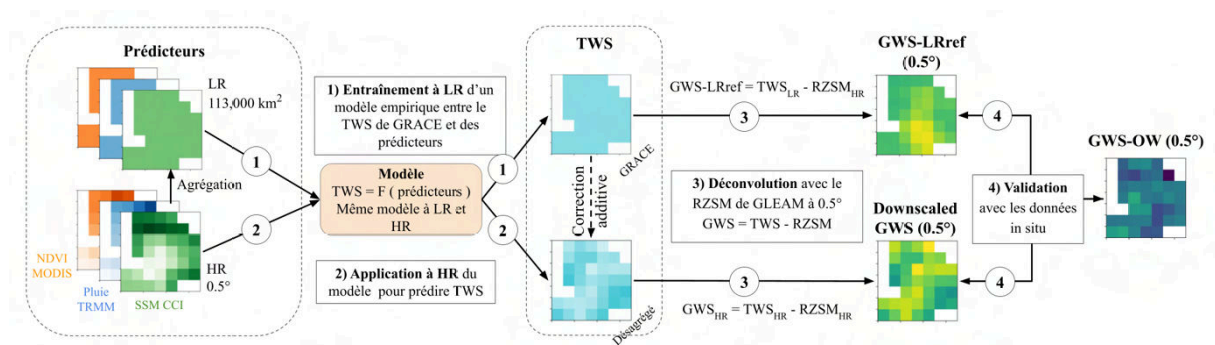


FIGURE 2.15 – Logigramme de la désagrégation empirique statique (d'après PASCAL (2022)).

Un apport majeur de ces travaux de thèse a été l'introduction d'un cadre de validation spatio-temporelle pour les produits GRACE désagrégés (figure 2.15). Ce cadre dépasse la simple évaluation de l'accord temporel avec les mesures in situ, en quantifiant également le gain d'information apporté par la désagrégation par rapport aux données GRACE brutes, tant en corrélation temporelle (+30% de gain en R pour SMOS et SMAP) qu'en cohérence spatiale. Il a été démontré que la performance des méthodes de désagrégation varie selon la saison, reflétant les processus hydrologiques dominants de l'année, tels que la recharge liée à la mousson ou le pompage intense pour l'irrigation. Ces travaux ont ainsi permis d'interpréter spatialement et temporellement la qualité et l'incertitude des produits GWS désagrégés.

Depuis ce travail de PASCAL et al. (2022), plusieurs études ont poursuivi l'amélioration des méthodes de désagrégation pour l'analyse des ressources en eau souterraine. WANG et al. (2024) ont développé une approche statistique utilisant des forêts aléatoires pour augmenter la résolution spatiale des anomalies de stockage d'eau, tandis que Suryawanshi et al. (en discussion dans HESS) ont proposé une méthode intégrant des contraintes de masse et validée par des observations in situ. Ces travaux ouvrent de nouvelles perspectives pour la quantification fine des variations d'eau souterraine en Inde et pour l'application de ces techniques à d'autres bassins fortement exploités.

## 2.6 Conclusions et perspectives de la télédétection des agro-hydrosystèmes

### 2.6.1 régionaliser la calibration d'un modèle agro-hydrologique

Les travaux réalisés sur le bassin de la rivière Kudaliar ( 1000 km<sup>2</sup>) ont montré qu'il est possible de reconstruire un bilan hydrique détaillé intégrant le RHS, l'irrigation et les pompages pour l'irrigation détectée par satellite. La généralisation de cette approche à l'ensemble de l'aquifère granitique, couvrant les trois quart de l'État du Tèlangana, semble possible, moyennant quelques simplifications : surfaces en riz comme proxy de demande en eau, surfaces en eau et MNT globaux comme proxy du volume d'eau de surface, gravimétrie et déformation interférométrique comme proxy du stock d'eau souterraine. Ces travaux ouvrent des perspectives majeures pour la gestion des ressources en eau : suivre simultanément les surfaces cultivées, l'état des réserves de RHS, les débits et le remplissage des barrages dans les zones irriguées devient envisageable à grande échelle.

### 2.6.2 Nouvelles missions, nouvelles mesures physiques et nouvelles variables restituées

L'arrivée prochaine de nouvelles missions satellitaires, telles que CO3D pour la stéréoscopie haute résolution, les observations SWOT pour l'altimétrie des plans d'eau et NISAR pour l'InSAR (interférométrie radar) à large couverture, offrira un ensemble de données inédit, combinant haute résolution, répétitivité et informations radar. La fusion de ces sources permettra certainement de calibrer des modèles agro-hydrologiques régionaux avec une précision inédite, d'anticiper les déficits hydriques et de développer des outils opérationnels de suivi et d'alerte sécheresse. Ces efforts sont d'autant plus importants lorsqu'ils concernent des régions très fortement irriguées et peuplées, comme l'Inde et les pays d'Asie du sud-est.

# Chapitre 3

## Perspectives

Nouveaux Capteurs, nouveaux Pays, nouveaux Ecosystèmes

### 3.1 Modélisation agro-hydrologique d'un contexte massivement irrigué et peuplé

#### 3.1.1 Revisiter les algorithmes d'humidité des sols à basse résolution pour les milieux irrigués semi-arides

Les produits globaux d'humidité des sols (Surface Soil Moisture, SSM) issus des données micro-onde SMAP et SMOS à 40km de résolution, parce que sensibles à l'irrigation massive de ces zones, ont un potentiel significatif pour estimer l'eau mobilisée pour l'irrigation, en particulier durant la saison sèche dans les zones arides et semi-arides. Des approches actuelles d'estimation quantitative de l'irrigation, basées sur l'inversion du bilan hydrique du sol (BROCCA et al., 2018), ne permettent pas de dissocier la contribution de la pluie de celle de l'irrigation. Dans le contexte du Telangana, où les cultures sont irriguées même pendant les épisodes pluvieux, cette limitation restreint l'interprétation des flux d'eau. Des méthodes alternatives, comme le modèle PrISM (PELLARIN et al., 2020), sont en cours de développement et pourraient apporter des estimations plus précises.

Cependant, l'algorithme de SMOS, par exemple, utilise une carte de référence des surfaces en eau qui les considère fixes, ce qui conduit à des erreurs locales (à l'échelle de la grille de 25km du produit SSM) importantes en Inde, où les surfaces en eau dans les grands barrages et petits réservoirs du RHS présentent une variabilité spatiale et temporelle très marquée, notamment pendant la saison sèche. Les missions futures, notamment SMOS-HR actuellement en phase 0 au CNES (RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ et al., 2019), offriront des données de surface à résolution plus fine, permettant de mieux caractériser l'humidité du sol à l'échelle de paysages mieux connus et d'améliorer la quantification de l'eau d'irrigation et de sa dynamique spatiale et temporelle. Un travail est en cours avec Diane Duchemin, ancienne stagiaire avec moi, aujourd'hui en CDD au CESBIO pour travailler avec moi et Nemesio Rodriguez (IR CNRS) sur ce sujet.

#### 3.1.2 Générer des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie au bon moment

Les missions satellitaires actuelles (Sentinel-1&2, SWOT, Pléiades) vont être complétées par celles à venir, telles que CO3D ou NISAR, qui offriront une agilité sans précédent en termes de revisite et de résolution spatiale. Cette capacité permettra de produire des Modèles Numériques de Terrain (MNT) régionaux adaptés au suivi dynamique des systèmes hydrologiques comme le RHS, et capturer les variations temporelles des volumes d'eau de surface. La distribution de ces

données à haute résolution (jusqu'à 12 m) fournira une information hydrologique directement exploitable pour la gestion de l'eau, la calibration de modèles agro-hydrologiques et le développement de systèmes d'alerte précoce pour la sécheresse. Un travail actuel très préliminaire avec Santiago Pena-Luque du CNES porte sur la comparaison des élévations de la surface de l'eau dans le RHS mesuré ar SWAT et les relations hypsométriques publiées précédemment.

### 3.1.3 Projet structurant sur le Tèlangana

Un projet est actuellement en cours de montage dans le cadre de l'appel à projet générique de l'ANR avec l'équipe du BRGM avec qui je travaille historiquement sur ces aquifères, en collaboration avec deux chercheuses de l'IPGP, Manon Dalaison et Kristel Chanard. Elles apportent respectivement une expertise en interférométrie radar et en géodésie, deux compétences absentes au CESBIO. Ces objectifs collaboratifs ouvrent des champs de recherche innovants sur les liens entre recharge d'aquifères cristallins et déformations de surface observ es avec l'interférométrie radar et les anomalies gravimétriques mesur es par les techniques de géodésie.

Ce projet vise, par exemple, à dépasser la première tentative de calibration du modèle SWAT à l'aide des données TWS de GRACE à l'échelle du sous-continent indien (XIE et al., 2020). Cette étude cherchait à démontrer le rôle des prélèvements d'eau souterraine pour l'irrigation dans la diminution continue des anomalies TWS observ es par GRACE en Inde du Nord (cf. section 2.1.2 du chapitre précédent). Pour simplifier le module souterrain de SWAT, les auteurs ont supprimé le paramètre GWQMN (Ground Water Minimum Discharge threshold), qui définit pourtant un volume minimal d'eau dans l'aquifère peu profond à partir duquel la nappe se connecte à la rivière et contribue au débit de base. Cette simplification est pertinente pour les aquifères non consolidés du Nord de l'Inde, considérés comme pratiquement infinis, mais elle n'est pas adapt e aux aquifères cristallins ou basaltiques du Sud, qui peuvent participer à l'écoulement de base des rivières non perennes en fin de mousson lorsque l'aquifère est saturé, ainsi qu'aux rivières perennes. En réalité, ce paramètre exprime la combinaison de la porositi  efficace (*Specific Yield*, SY) et de l'épaisseur alt r e de l'aquifère, c'est-à-dire la partie de substrats capable de stocker de l'eau.

Un autre axe de recherche consiste à évaluer quantitativement l'impact du plus grand projet de détournement de rivière au monde, le Kaleshwaram Lift Irrigation Project (KLIP), lancé en 2016 et inauguré le 21 juin 2019. Ce projet vise à transférer les eaux de la rivière Godavari depuis la ville de Kaleshwaram, situ e à la frontière du Tèlangana et de l'Andhra Pradesh, vers le sud, à 200 mètres d'altitude et sur une distance de 200 km, alimentant un réseau de 20 réservoirs d'une capacité totale de 147 TMC (thousand million cubic feet). Ce gigantesque système de pompage et de canaux a pour objectif d'irriguer 45 lakh (4,5 millions) d'acres de terres agricoles, de fournir de l'eau potable à 70% de la population de l'état et de soutenir les besoins industriels.

Tous ces chiffres sont fournis par la presse indienne. D'un coût estimé à environ 10 milliards d'euros, le KLIP modifie profondément les variables hydrologiques de la région, notamment les anomalies de gravimétrie. Cette transformation offre un terrain d'étude idéal pour analyser les effets de tels mégaprojets sur les ressources en eau souterraine et les dynamiques écologiques associ es, en amont comme en aval du point de pompage.

### 3.1.4 Projet collectif structurant en Thaillande et Vietnam

 tre chercheur à l'IRD, c'est apporter notre expertise et nos questionnements scientifiques en réponse aux problématiques de nos partenaires, tout en contribuant à la stratégie collective du laboratoire, stratégie redéfinie collégialement tous les cinq ans. Lors de la dernière évaluation

HCERES, nous avons ainsi décidé d'élargir les collaborations du CESBIO vers l'Asie du Sud-Est, en commençant par le Vietnam, et plus récemment par la Thaïlande.

Les thématiques liant agriculture, eau et climat suscitent un fort intérêt auprès de nos partenaires régionaux : en Thaïlande (agence spatiale GISTDA, université Kasetsart à Bangkok, université de Phayao au Nord), comme au Vietnam (Laboratoire Mixte International LOTUS, CARE, et l'Université des Sciences et Technologies de Hanoï - USTH), partenaires historiques de l'IRD.

#### **3.1.4.1 Perspectives de direction de thèse en Thaïlande : suivi du riz pluvial et fertilisation azotée**

A l'issue d'une mission de trois semaines à Bangkok en mars 2025, une nouvelle perspective d'encadrement de thèse s'est présentée, portant sur l'impact des pratiques de fertilisation azotée sur le riz inondé du centre de la Thaïlande. L'objectif sera d'exploiter les données satellitaires fournies par la *Geo-Informatics and Space Technology Development Agency* (GISTDA, équivalent d'une agence spatiale Thaïlandaise), mais aussi Sentinel-2, pour suivre la croissance et le stress azoté du riz irrigué. Je serai co-directeur avec une collègue de la GISTDA (dr Nuntikorn Kitratporn) et un professeur de l'université de Phayao mais sans possibilité de co-tutelle.

Les travaux prévus combineront indices de végétation, estimation de l'humidité de surface, données et modèles agronomiques, afin de quantifier les effets conjoints du climat et de la fertilisation azotée sur les rendements.

Cette approche offrira une vision spatio-temporelle fine des pratiques agricoles, rotations culturales et fertilisation (voire sur-fertilisation) en fonction des variations climatiques.

#### **3.1.4.2 Projet en cours : riz pluvial et sécheresses dans le nord-est de la Thaïlande**

Une perspective de recherche consiste à exploiter la richesse des données climatiques, agricoles et satellitaires pour mieux comprendre la variabilité des rendements du riz pluvial dans le bassin de production en Thaïlande des 20 dernières années, notamment dans le bassin versant de la rivière Mun, cœur de la production de riz pluvial.

Ce projet, mené en collaboration avec le GISTDA et le collègue IRD du CESBIO Michel Le Page, vise à combiner séries statistiques historiques, déclarations de dégâts locales et observations satellitaires pour détecter les anomalies climatiques et évaluer leur impact sur les rendements. L'approche repose sur des analyses multi-échelles et l'application de modèles de régression par forêts aléatoires, permettant d'explorer la contribution relative des facteurs climatiques et environnementaux selon la résolution spatiale et temporelle, ainsi que le potentiel des données satellitaires pour généraliser les estimations à des scénarios climatiques futurs.

Ce travail fait l'objet d'un stage de césure de Raphael Registo (Oct 2025 à Février 2026) que je vais co-encadrer avec Michel Le Page et Nuntikorn Kitratporn. Les résultats seront valorisés sous forme de cartes d'anomalies, de risques et de prédiction des rendements, offrant un outil opérationnel pour l'aide à la décision et la gestion agricole.

#### **3.1.4.3 Perspectives de projet collaboratifs en Thaïlande : suivi du pompage pour la canne à sucre**

Lors de cette mission, nous avons pu visiter une exploitation de 200 ha de canne à sucre dans la province de Kamphaeng Phet (350 km). Cette culture pluri-annuelle y est irriguée par submersion gravitaire, à partir d'une dizaine de forages récemment équipés de pompes solaires. Le cycle de production (12 mois, avec 3 à 4 repousses successives) et les pratiques d'irrigation (3 à 5 apports en saison sèche) illustrent une gestion typique de cette culture dans la région. Ce

terrain offre un cas d'étude intéressant pour développer un projet visant à quantifier les volumes d'eau prélevés dans l'aquifère pour l'irrigation de la canne à sucre, en s'inspirant des approches présentées précédemment en Inde. D'autant plus que l'agriculteur lui-même est intéressé par la démarche d'étude. L'idée est toujours d'évaluer la durabilité d'une culture, vivrière en Inde et commerciale en Thaïlande quand à la ressource souterraine. La recherche de financement va être discutée courant 2026.

### **3.1.5 Nouveaux capteurs, nouvelles variables**

Dans ces contextes agricoles, les nouvelles missions scientifiques telles que TRISHNA, BIOMASS, NISAR, SWOT ou CO3D offrent des opportunités inédites pour l'observation et la compréhension des systèmes agro-hydrologiques.

#### **3.1.5.1 Exemples de missions en préparation**

TRISHNA et son capteur thermique haute résolution (50m) permettra de suivre des proxies d'évapotranspiration et de stress hydrique à haute résolution temporelle (tous les 2 jours), améliorant l'estimation de l'eau utilisée par les cultures et le diagnostic du stress hydrique.

BIOMASS est un radar en bande P, fréquences très pénétrantes, en orbite tropicale. Il fournira (fournit déjà) des mesures directes de la biomasse et de la structure des forêts tropicales denses. C'est une activité collaborative au CESBIO qui fait partie intégrante de la proposition de renouvellement de l'International Research network (IRN) Space4Sust (financement de mobilités de recherche entre les pays d'Asie du Sud-Est, Maghreb et Inde) que je coordonne depuis 4 ans.

NISAR est comparable à Sentinel-1, mais avec un radar bande L et bande S (alors que Sentinel-1 est uniquement en bande C). Cela lui permet de pénétrer plus profondément la végétation et les sols, et de produire des mesures complémentaires sur la topographie, l'humidité des sols et la biomasse de couverts végétaux peu denses (cultures et savanes). NISAR ouvrira la voie à des analyses d'interférométrie radar à large échelle, permettant de suivre les variations de hauteur des surfaces en eau et des sols agricoles, même sous couverture nuageuse.

CO3D (lancé il y a quelques mois) offrira des acquisitions stéréoscopiques à haute résolution, permettant la génération rapide de modèles numériques de terrain régionaux et la caractérisation fine des petits réservoirs et terrasses irriguées. Ces nouvelles données, privées et payantes, pourront tout de même être accessibles aux chercheurs dans une première phase de démonstration.

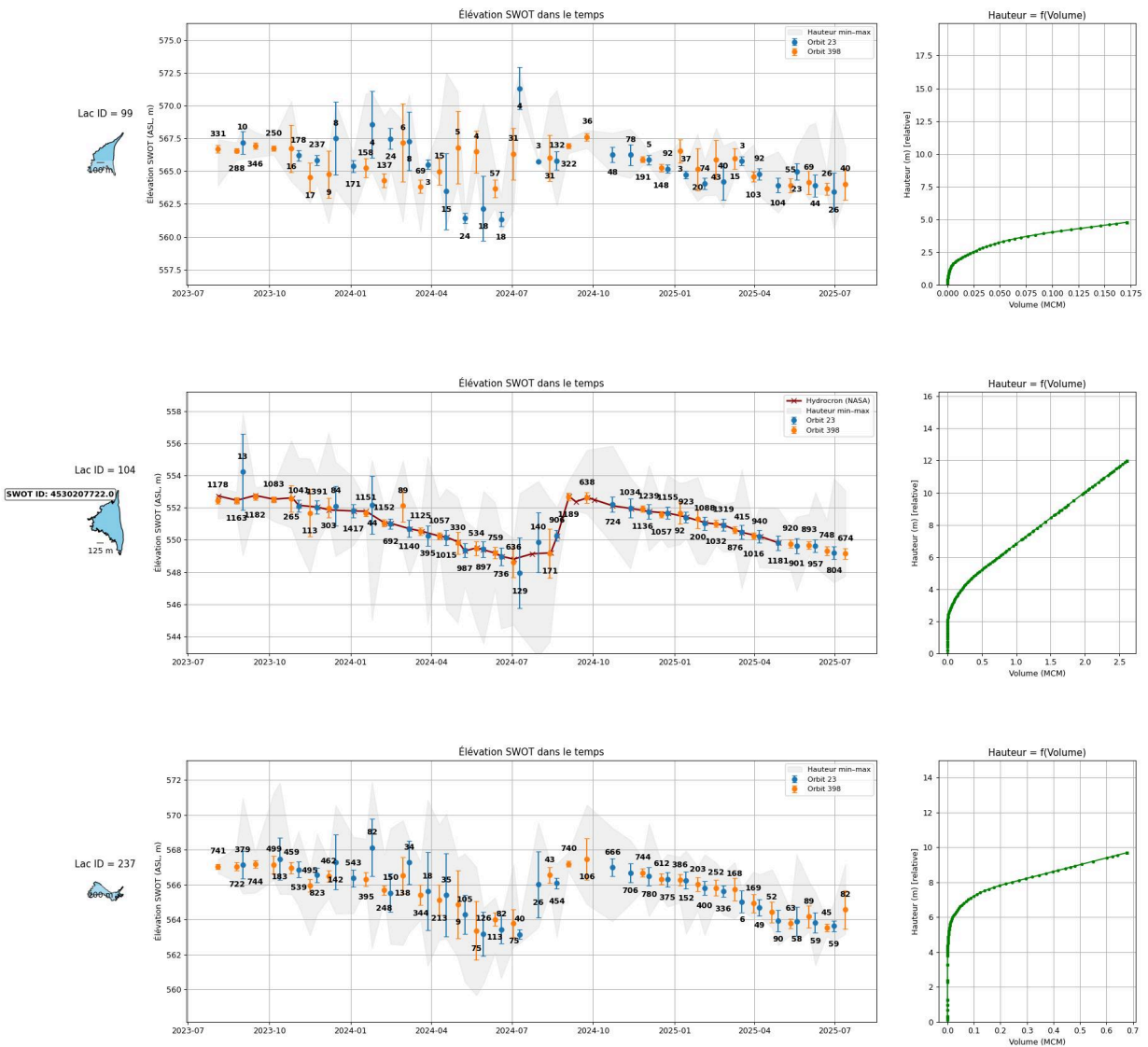


FIGURE 3.1 – Chroniques d’élévation (nuages de points) des surfaces en eau détectées par SWOT dans la zone d’étendue maximale d’eau de réservoirs du RHS (représentées à gauche avec une échelle), selon les orbites SWOT (produit retraité par Santiago Pena-Luque au CNES). Les chiffres indiquent le nombre de points détectés en eau utilisés pour représenter la population d’élévation restituée par le satellite. La courbe orange correspond au produit NASA Hydrochron ([https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/SWOT\\_L2\\_HR\\_LakeSP\\_2.0](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/SWOT_L2_HR_LakeSP_2.0)), qui dépend d’une base de données mondiale de lac. Il n’est donc pas produit pour tous les réservoirs du RHS. Il a parfois de grandes différences d’élévation, car il connecte des surfaces en eau attenantes (comme les rizières) aux réservoirs. À droite, la relation profonde en fonction de la surface en eau dérivée des bathymétries Pléiades. De haut en bas, 3 réservoirs de tailles et formes différentes. Données non publiées

### 3.1.5.2 Le potentiel de SWOT en agro-hydrologie

La mission SWOT (Surface Water and Ocean Topography), lancée en 2022, repose sur un radar interférométrique en bande Ka (KaRIn), déployé en configuration bistatique avec deux antennes séparées d'environ 10 m. L'instrument fournit une mesure bidimensionnelle de la hauteur de surface, couvrant une fauchée d'environ 120 km (deux bandes de 50 km séparées par un nadir non observé), avec une répétitivité orbitale de 21 jours.

En océanographie, SWOT est conçu pour atteindre une précision de l'ordre de quelques centimètres sur la hauteur de surface et permettre la détection des structures dynamiques à l'échelle méso et subméso (15–30 km), auparavant inaccessibles par altimétrie conventionnelle. Ces capacités ouvrent la voie à une avancée majeure dans l'étude de la circulation océanique, de la turbulence et des échanges de chaleur, de carbone et de nutriments.

En hydrologie continentale, SWOT permet une cartographie globale des plans d'eau et des cours d'eau, avec une précision attendue de quelques centimètres sur l'élévation et une capacité de détection des rivières de largeur supérieure à 50–100 m et des lacs d'une surface minimale de environ 6 ha. Cette résolution rend la mission particulièrement adaptée au suivi systématique des grands lacs et grands fleuves, mais limite sa capacité à caractériser les petits plans d'eau et les réseaux hydrographiques fins.

Ainsi, SWOT se positionne comme une mission révolutionnaire en océanographie, tout en constituant une avancée pionnière pour l'hydrologie spatiale. Alors quid de l'agro-hydrologie spatiale ?

Un travail en cours, qui pourrait constituer ma première direction de thèse au CESBIO en partenariat avec le CNES, porte sur l'évaluation de l'incertitude des mesures SWOT d'élévation des surfaces en eau dans le RHS indien. L'étude concerne environ 500 réservoirs dont la bathymétrie a été obtenue à partir des MNT Pléiades.

La figure 3.1 illustre des résultats obtenus sur ces plans d'eau, de petite taille par rapport au design de la mission, qui vise une erreur moyenne de 10 cm sur l'élévation d'un plan d'eau d'au moins 1km<sup>2</sup>, alors que les réservoirs étudiés ne dépassent pas 5 à 10 ha. La figure montre une grande diversité de bruit obtenu sur l'évolution des élévations selon les tailles et forme des corps d'eau. Elle montre qu'il y a un clair signal de remplissage avec la mousson (juillet à septembre) mais que le nombre de pixels détecté en eau varie fortement entre les orbites et les dates.

Si nous choisissons néanmoins d'explorer ces cas en limite de détection du satellite, c'est parce que les premières observations suggèrent que la capacité de détection de SWOT est plus fine que ce qui était prévu et qu'il y a certainement une possibilité de qualifier un produit de remplissage de ces systèmes hydrologiques jusqu'ici non jaugés à partir des données SWOT.

Une beau sujet de thèse !

## 3.2 Cartographie des *small natural features* : milieux naturels fragmentés, de faible étendue, rélictuels ou émergents, mais essentiels (Hunter, 2017)

Agronome de formation, j'ai d'abord concentré mes recherches sur l'exploitation des images satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle (HRST) pour le suivi des agro-systèmes, un usage pour lequel ces satellites ont été conçus. Leur couverture globale permet cependant d'observer l'ensemble des terres émergées, alors que seules 38% correspondent à des surfaces agricoles. Dans les recherches sur les milieux naturels — géomorphologie, géologie, écologie, géophysique, géochimie — les données HRST sont utilisées de manière sporadique et rarement avec les outils et l'expertise développés pour l'agriculture.

### 3.2.1 Ouverture thématique et interdisciplinarité scientifique

Une part importante de mes perspectives de recherche consiste à transférer ces méthodologies aux écosystèmes naturels. Ce travail a commencé juste avant la pandémie de COVID-19, avec un séjour dans les Andes argentines en janvier 2020, des séjours en 2017 et 2021 dans la région des tourbières d’Igarka, dans le kraï de Krasnoïarsk en Sibérie, puis en 2023 et 2024 dans les basses terres de la baie d’Hudson, près de Churchill au Manitoba, Canada.

Cette collaboration avec les équipes du CRBE, laboratoire de l’Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) d’écologie et d’environnement, est pertinente car elle associe des expertises de terrain et d’analyse bio-géochimiques de ce laboratoire avec l’expertise d’analyse d’images aéroportées et satellite du CESBIO. Notre objectif est donc d’identifier les outils de télédétection adaptés aux questions scientifiques qui se posent sur ces milieux, et généraliser les observations de terrain à l’échelle des images HRST, mais aussi avec des capteurs à très haute résolution satellite ou aéroportés (drônes).

Les *small natural features* (SNF) désignent des milieux naturels de faible superficie mais d’importance écologique majeure, difficiles à détecter et à cartographier avec les capteurs satellitaires conventionnels (HUNTER, 2017). Ils jouent souvent un rôle disproportionné dans le fonctionnement des écosystèmes, la biodiversité, le stockage de carbone et la régulation hydrologique. Parmi eux, on peut citer :

- les tourbières andines d’Argentine, véritables réservoirs hydriques et stocks de carbone en haute altitude, soumis à l’érosion du vent, du surpâturage et des sécheresses nivales
- les tourbières gelées d’Igarka, formées à l’Holocène, caractéristiques des pergélisols subarctiques et boréaux en plein dégel
- les *peat plateaus* des basses terres de la baie d’Hudson, formées il y a entre 6000 et 3000 ans, jouant un rôle majeur dans la régulation hydrologique et le stockage de carbone dans les écosystèmes subarctiques canadiens.

Leur hétérogénéité spatiale, leur lente évolution posent des défis spécifiques à la télédétection, notamment pour les capteurs à moyenne résolution, et nécessitent des approches combinant données à haute résolution et connaissances de terrain.

### 3.2.2 Cartographie des tourbières andines de haute altitude

La cartographie des tourbières andines de haute altitude en Argentine est essentielle pour comprendre et préserver ces écosystèmes fragmentés mais stratégiques. Elles constituent à la fois d’importants réservoirs d’eau et des stocks de carbone, tout en étant particulièrement sensibles aux changements climatiques. L’imagerie satellite à haute résolution, combinée à des observations de terrain, permet de documenter leur étendue, leur état de santé et les processus écologiques qui les régissent, fournissant ainsi des outils indispensables pour leur conservation et leur gestion durable (figure 3.2).

#### 3.2.2.1 Enjeux du projet RePeatAndes

Ce projet est né en 2020 d’une collaboration avec l’Instituto Franco-Argentino sobre Estudios Climáticos Integrados (IFAECI), hébergé au Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) à Buenos Aires, et l’Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), basé à Mendoza. Une mission de terrain organisée dans le cadre d’une Mission Longue Durée (MLD) en Argentine a permis, en collaboration avec le CRBE (ex-EcoLab), de collecter des sondages de tourbe sur un transect nord-sud de 1000 km dans les Andes arides argentines, ainsi que des échantillons d’eau et des vérités terrain en vue de la classification de ces écosystèmes typiquement situés à plus de 3000m d’altitude, véritables oasis dans un désert minéral de haute montagne.

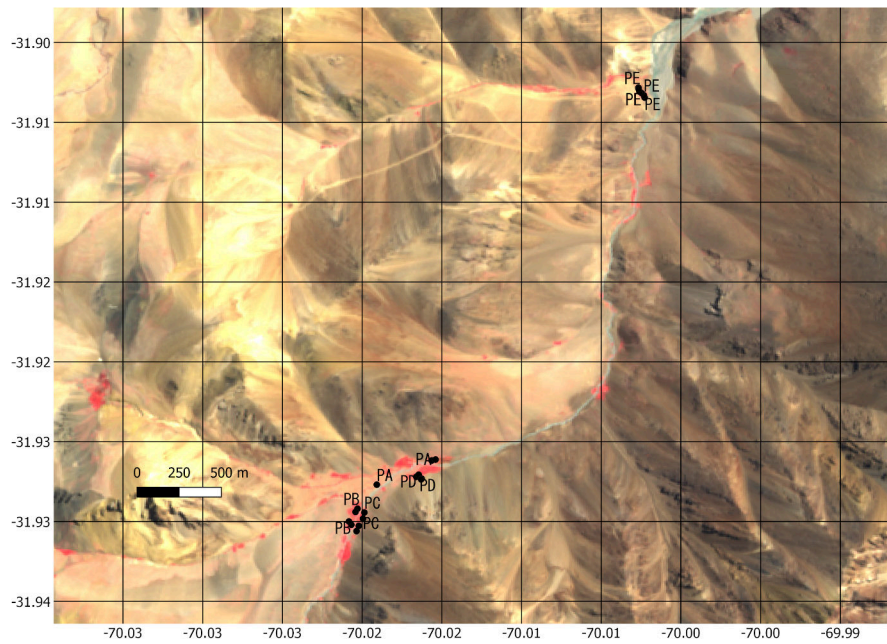


FIGURE 3.2 – Image en fausses couleurs Sentinel-2 du site de Laguna Blanca (haut). Les zones rouges correspondent aux tourbières andines de haute altitude dites en coussins (*cushion peatlands*). Photo de terrain d’une tourbière (milieu). Sondage prélevée avec un carottier russe (bas).

L'analyse bibliographique montre que les tourbières d'altitude andines sont nettement moins étudiées que celles d'autres régions du monde, comme l'Europe, l'Amérique du Nord ou les basses terres tropicales. De plus, la répartition des études le long du gradient latitudinal andin est inégale : la majorité des travaux portent sur les Andes du Nord (Équateur, Colombie) et centrales (Pérou), tandis que les recherches restent rares sur les tourbières de haute altitude d'Argentine, de Bolivie et du Chili (GARCÍA LINO et al., 2024).

### 3.2.2.2 Acquisition de données et cartographie régionale

Une cartographie dynamique annuelle (2019–2024) est en cours de réalisation à une super-résolution de 5 m, calculée sur le cluster TREX du CNES. Elle vise à distinguer les tourbières des prairies humides naturelles, à identifier des zones de dégradation — souvent observées après des sécheresses climatiques liées à un déficit de précipitations neigeuses — ainsi que des arrachages dus au pâturage des guanacos ou à l'érosion éolienne. Les surfaces impactées se distinguent par un jaunissement ou un noircissement, révélant la tourbe sous-jacente.

Ces travaux ont toutefois été fortement ralentis par la fermeture de l'Argentine durant la pandémie, qui a interrompu plusieurs années de collaborations avec les chercheurs argentins.

### 3.2.3 Suivi des tourbières gelées en contexte de réchauffement climatique

#### 3.2.3.1 Enjeux de l'ANR ArcticPeat

Les tourbières de pergélisol, ces vastes étendues de sol gelé riches en matière organique, sont aujourd'hui au cœur des préoccupations environnementales mondiales. Identifiées par le Programme des Nations Unies pour l'environnement comme l'un des cinq principaux "problèmes environnementaux émergents", elles représentent un enjeu majeur pour le climat <https://globalpeatlands.org/sites/default/files/2022-08/unesp%20frontiers%202018-19.pdf>.

Le pergélisol, défini comme un sol restant à une température inférieure à 0°C pendant au moins deux années consécutives, subit une évolution rapide due au réchauffement climatique. Ces sols stockent environ  $1035 \pm 150$  gigatonnes de carbone organique, ce qui équivaut à la moitié du stock mondial de carbone organique des sols (HUGELIUS et al., 2014). A la page 44 du rapport de l'ONU cité précédemment, vous trouverez une magnifique transformation des tourbières gelées en *peat plateaus* en Alaska avec une série temporelle d'images aériennes depuis 1945.

Les tourbières sont particulièrement importantes car elles concentrent plus d'un tiers de ce carbone de pergélisol et présentent la plus haute densité de carbone des biomes arctiques et subarctiques. La libération potentielle de ce carbone, longtemps séquestré, dans le cycle actif pourrait créer une rétroaction positive sur le changement climatique, accélérant davantage le réchauffement global.

La télédétection de ces écosystèmes est cruciale pour cartographier, suivre et quantifier l'évolution spatio-temporelle de ces milieux sensibles, en permettant de restituer les variables biophysiques impactées par des changements morphologiques et hydrologiques de petite envergure mais à large échelle.

#### 3.2.3.2 Hypothèses de travail

Le projet Arctic-PEAT, porté par le CRBE, utilise une approche par chronoséquence pour étudier le fonctionnement des tourbières subarctiques avant et après le dégel du pergélisol, et pour cartographier ce paysage fragmenté. L'objectif est d'identifier les zones de faible émission (voire même puit) de méthane comme les tourbières gelées intactes (*peat plateau secs*), et celles qui deviennent des sources importantes de méthane, comme les effondrements liés au dégel.

L'objectif de la télédétection de ces écosystèmes est de détecter ces changements de végétation. Les zones encore gelées sont recouvertes de lichens blancs (Cladoniacées) et de végétation arbustive basse (Chicouté ou Plaquebière, *Rubus chamaemorus*), et présentent un fonctionnement associé à de faibles émissions de méthane. Les zones affectées par le dégel sont dominées par des sphaignes et autres bryophytes (type *Sphagnum*), et sont souvent des effondrements topographiques formant des mares de thermokarst, et correspondent à des zones de forte émission de méthane.

Le dégel entraîne en effet un affaissement de la surface du sol dû à la perte de volume de glace, une accumulation d'eau en contrebas et un changement de végétation. La cartographie de ces écosystèmes très fragmentés nécessite des images à haute ou très haute résolution, par satellite (Sentinel-2) ou par drone, dans le visible, le proche infrarouge et le thermique, permettant de produire des modèles numériques de la microtopographie des effondrements. Ces données permettent ensuite de discriminer les milieux secs et froids (lichens) des milieux humides et chauds (sphaignes) et de spatialiser le degré de dégel dans le paysage.

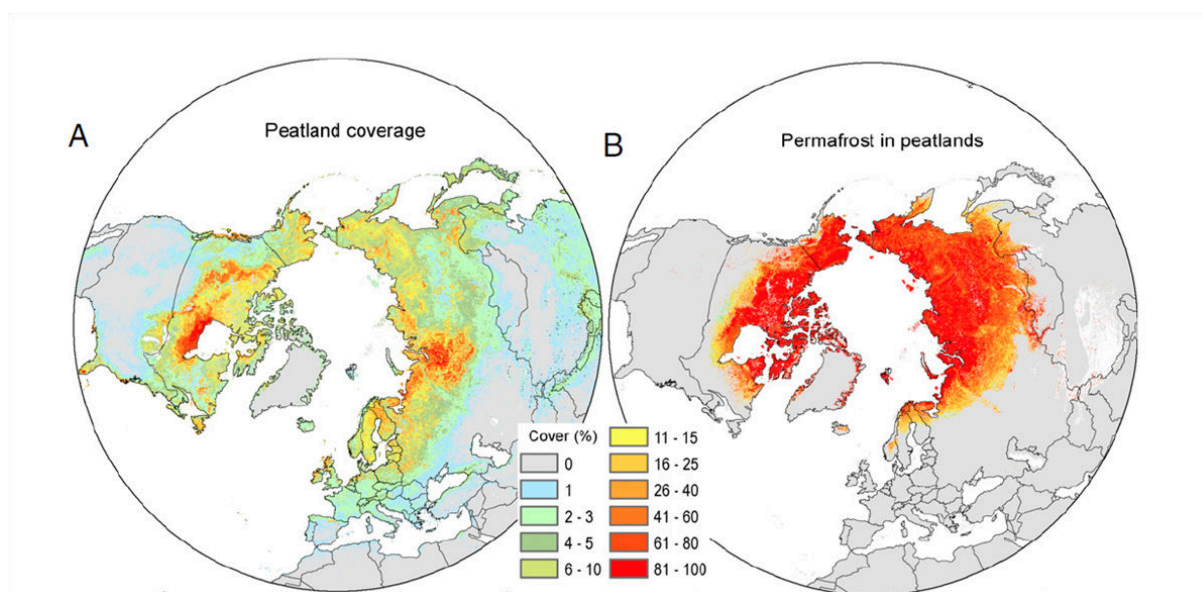


FIGURE 3.3 – Localisation des tourbières boréales (A) et du pergélisol (B) (d'après HUGELIUS et al. (2020)). La zone rouge de Sibérie correspond à la région d'Igarka, premier site envisagé (avant l'invasion russe de l'Ukraine). La zone rouge au Canada correspond à la région de repli du projet, dans les basses terres de la baie d'Hudson.

Ce projet écrit en 2020 a pris du retard compte tenu de la crise sanitaire, de la fermeture des frontières puis de sa relocalisation dès 2023 dans la baie d'Hudson au Canada, en raison de l'invasion de l'Ukraine par les armées de poutine et ses alliés. Les basses terres de la Baie d'Hudson sont en effet le deuxième plus grand bassin de tourbière gelée du monde derrière celui d'Igarka (les deux zones rouges dans le figure 3.3).

### 3.2.3.3 Acquisitions de données et travaux préliminaires

Après deux missions de terrain au centre de recherche d'études nordiques, le CNSC (<https://churchillscience.ca/>) à 20 km de Churchill avec l'équipe de géochimiste de Laure Gandois (DR CNRS), l'équipe de microbiologistes de Maialen Barret (MCF INP ENSAT) et l'équipe de géomorphologues de Frédéric Bouchardu (Professeur à l'université de Sherbrooke, Canada), j'ai pu obtenir des acquisitions drone dans les longueurs d'onde visible et thermique des sites visités

grâce aux pilotes de l'université de Sherbrooke (Lucile Cosyn, en thèse) et de l'université de Calgary (Konstantin Ozeritski, en post-doctorat) et produire des cartographies de végétation, des images thermiques des surfaces, des Modèles Numériques de Surface (MNS) très précis.

J'ai encadré un stage de master 1 de SupAero (Loris Cousin, mai-juillet 2025) visant à explorer l'apport des données de télédétection à très haute résolution (drône) et satellitaires (Sentinel-2) pour cartographier la couverture de lichen, un indicateur clé de l'état des plateaux de tourbe gelée.

Le stagiaire a réalisé une classification supervisée par Forêt Aléatoire (Random Forest) des images drône (RVB et modèles numériques de surface) pour cartographier avec une très grande précision (résolution de 16x16 cm) les surfaces des plateaux de tourbe des sites où on a pu aller faire voler le drone (sites accessibles en voiture ou en hélicoptère). Trois classes principales sont cartographiées : lichen, végétation photosynthétique et dépressions couvertes d'eau ou de sphaigne (mousse typique des tourbières non gelées). Ces cartes ont ensuite servi à entraîner des modèles de régression pour estimer le pourcentage de chaque classe au sein des pixels Sentinel-2 (figure 3.4).

L'étude a comparé deux types de données Sentinel-2 :

- à la résolution native de 10 m, les modèles ont atteint une performance très robuste ( $R^2 = 0.76$  pour le lichen), validant la méthode pour le suivi régional
- à une résolution de 5 m (super-résolution), obtenue via un réseau de neurones, sur les GPU du cluster du CNES (TREX), avec un code python développé par Julien Michel (CNES, CESBIO, [https://github.com/Evoland-Land-Monitoring-Evolution/sentinel2\\_superresolution](https://github.com/Evoland-Land-Monitoring-Evolution/sentinel2_superresolution)).

Les performances directes se sont avérées nettement inférieures ( $R^2 = 0.61$  pour le lichen) en super-résolution, avec des prédictions plus dispersées. Mais une analyse plus poussée a révélé un potentiel intéressant : en agrégeant les prédictions faites à 5 m pour revenir à une échelle de 10 m, les résultats se sont avérés légèrement meilleurs que ceux obtenus nativement à 10 m. Bien que modeste, cette amélioration suggère que les données super-résolues capturent des détails spatiaux pertinents qui, une fois le bruit réduit par agrégation, peuvent affiner les estimations à plus grande échelle.

Ce travail, extrêmement préliminaire, fournit donc une méthode validée pour le passage d'échelle des observations locales vers le régional et ouvre des perspectives sur l'apport des approches de fusion de données multi-résolutions pour le suivi des écosystèmes arctiques.



FIGURE 3.4 – Haut : Orthomosaic drone du *peat plateau* situé dans le parc naturel de Waputsk, Hudson Bay low land, Manitoba, Canada. Milieu et bas : Proportions estimées de surfaces couvertes de lichen (tourbe gelée) et de dépressions (tourbe en cours de dégel) dans les pixels Sentinel-2 (10\*10m) à l'été 2023 (matériel non publié).

### 3.3 Conclusion des perspectives

La production de variables environnementales essentielles (VEE) à large échelle constitue un enjeu central pour comprendre les trajectoires des écosystèmes dans un monde en mutation rapide, soumis aux pressions combinées du changement climatique et des activités humaines. Ce champ de recherche, particulièrement dynamique, bénéficie aujourd'hui de la disponibilité croissante des données satellitaires et d'autres sources ouvertes, attirant ainsi une communauté scientifique toujours plus large. C'est notamment le cas pour la cartographie du riz, l'estimation de la recharge et pompages de nappes, l'application de la gravimétrie et de l'interférométrie radar à l'hydrologie, ou encore le couplage entre produits satellites et modèles hydrologiques, de l'échelle locale à régionale.

Cependant, les processus liés à l'irrigation demeurent souvent ignorés ou sous-estimés, alors même qu'ils représentent dans de nombreuses régions du monde une composante essentielle du cycle hydrologique. Les défis restent considérables pour améliorer les approches de couplage, affiner les algorithmes de restitution de l'humidité des sols, de l'évapotranspiration réelle, des volumes stockés dans les grands barrages et les aquifères et mieux décrire — à des échelles régionales — la diversité et la complexité des pratiques agricoles.

Par ailleurs, la génération de VEE pertinentes pour des milieux naturels encore peu étudiés, en particulier les *small natural features*, demeure un enjeu majeur de la télédétection à haute et très haute résolution spatiale (HR/VHR). L'étude de ces écosystèmes naturels fragmentés, isolés, montagneux ou situés en milieu subarctique, représente un apport scientifique déterminant. Elle permet non seulement de combler des lacunes importantes dans la compréhension des dynamiques écologiques, mais aussi de transférer des outils et méthodes utiles à l'ensemble de la communauté scientifique, notamment aux partenaires du Sud et de l'IRD.

# Postface : Science et satellites au prisme de la grande accélération

En ouverture de ce mémoire, j'évoquais la grande accélération de l'Anthropocène : ces décennies où la croissance des activités humaines, de la consommation d'énergie et de ressources, ainsi que des flux de matières et d'informations, suit une trajectoire exponentielle – pour ne pas dire la pente d'une piste noire.

On nous présente souvent les satellites, les voitures électriques ou l'intelligence artificielle comme des solutions phares de la transition écologique. Mais croire que rendre nos systèmes plus efficaces et plus intelligents suffira à résoudre les crises de la grande accélération est une illusion : historiquement, chaque gain d'efficacité a plutôt stimulé une consommation accrue que permis la diminution promise.

Vito, dessinateur et illustrateur français, invite à repenser notre rapport à la consommation, à la technologie et à l'environnement, en offrant des perspectives visuelles inspirantes d'un monde plus respectueux et solidaire. Il a notamment caricaturé cette écologie high-tech en cheval de Troie, image que j'ai pris soin de lui demander l'autorisation de partager, car je l'aime particulièrement (ci-après). Derrière l'image d'une transition verte, on introduit toujours plus de technologie, de calculs et de satellites. Une stratégie qui, loin de freiner la course, pourrait bien l'accélérer. Jamais on n'a autant parlé d'environnement, de petits gestes et de colibris, avec cette impression paradoxale que cette mobilisation retarde une transition pourtant théorisée et identifiée par l'écologie politique discutée collégialement par les collègues de l'Atécopol à Toulouse (par exemple). L'économie verte et la croissance verte, dénoncées dans ses planches, traduisent cette contradiction.

Pire, une réaction de "l'ancien monde" s'organise dans la sphère occidentale : la stratégie du chaos du savoir portée par Trump, les révisions opportunistes des politiques de RSE des grandes entreprises et les trajectoires nationales restent largement éloignées des objectifs climatiques — avec un plan France conduisant à +4 °C et des visions partielles ou décalées des problématiques de réchauffement climatiques dans les BRICS. Les chercheurs américains se voient aujourd'hui empêchés de parler de changement climatique, alors que mes collègues indiens et leurs étudiants semblent n'étudier que les effets climatiques, comme si le reste — facteurs socio-économiques, politiques ou culturels — était anecdotique.

Le GIEC n'a jamais été un simple observateur du climat. Comme le souligne FRESSOZ (2025), il a historiquement promu une approche solutionniste, privilégiant les technologies et mesures d'atténuation (Carbon Capture and Storage – CCS, Bio-Energy with Carbon Capture and Storage – BECCS, Direct Air Capture – DAC, hydrogène vert) plutôt qu'une réflexion sur la suffisance ou la décroissance. Or, ces technologies impliquent une consommation énergétique

considérable, justifiant la mise en place de grands projets d'énergies renouvelables, eux-mêmes gourmands en espace et parfois en concurrence avec la production agricole. C'est déjà le cas des cultures énergétiques : en France, 80 % du colza est destiné au biodiesel et 10–15 % du maïs au bioéthanol, alimentant majoritairement nos réservoirs de voiture. Compte tenu de l'impact de la culture du maïs sur les ressources en eau estivales, on peut légitimement se demander si les solutions de la transition écologique ne sont pas un remède empoisonné.

Un autre exemple : l'agri-voltaïsme. Encore au stade expérimental, l'implantation de panneaux solaires dans les champs sans réduire la production agricole est une solution envisagée. Dans ces situations, lorsque deux activités se disputent la même terre, celle offrant la meilleure rentabilité supplante l'autre, entraînant une hausse des prix fonciers et des flux d'investissements concentrés sur les usages les plus lucratifs.

Les projets de parcs éoliens offshore posent eux aussi des enjeux concrets, notamment en matière de sécurité face à des drones sous-marins hostiles (sans même parler de l'environnement...). Ces exemples illustrent les limites pratiques et les risques associés à une transition écologique technologique intensive. Les programmes de "reforestation" et de compensation carbone ne font pas exception : sous couvert d'action climatique, ils détournent de l'argent public ou les dons des particuliers et transforment les massifs de feuillus ou les savanes en monocultures de pins et d'eucalyptus, acidifiantes pour les sols et inflammables. Pire encore, ces plantations constituent des stocks de carbone temporaires, utilisés pour compenser les émissions de gaz à effet de serre d'entreprises, alors que leur destin est souvent de finir en carton et papier, brûlé dans nos déchèteries d'ici 10 à 20 ans, aggravant plutôt que réduisant les risques climatiques.

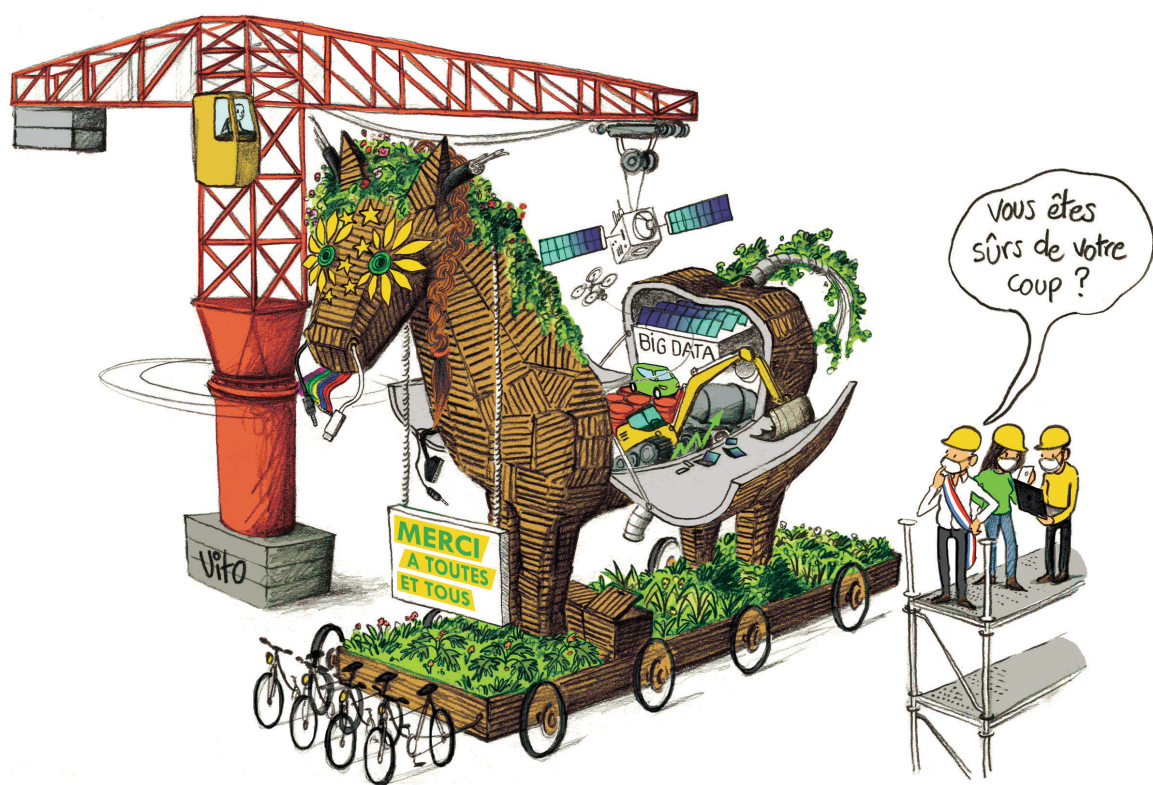
Parallèlement, le constat que les émissions mondiales n'ont guère diminué depuis la création du GIEC et les accords de Paris a conduit certains scientifiques centraux du GIEC, comme Valérie Masson-Delmotte et Christophe Cassou, à adopter un ton plus alarmiste, soulignant l'urgence d'actions immédiates. Cette tonalité tranche avec la partie solutionniste et technophile du panel, révélant la tension entre avertissement scientifique et croyance dans la capacité de la technologie à résoudre les problèmes liés aux émissions de carbone.

Cette grande accélération touche également la publication scientifique. Journaux et articles évoluent dans un business model fructifiant : reviews bâclées ou laconiques, refus agressifs sans argumentation, papiers "boulés" pour de bonnes raisons mais publiés ailleurs. Comment expliquer à un étudiant que ce qu'il cite provient d'une publication qui n'aurait pas dû voir le jour ? Faire un état de l'art en 2025 n'est plus la même chose qu'en 2005, et transmettre cette prudence reste un défi.

Au final, satellites, IA, supercalculateurs : ces outils sont utiles, mais insuffisants. Sans remise en question profonde de nos trajectoires, de nos modes de consommation et des structures scientifiques et économiques qui les soutiennent, ils risquent surtout de renforcer l'illusion que des solutions techniques suffisent à contenir la grande accélération.

Voilà, c'est dit. Et on n'est pas plus avancé qu'au début.

*"To the happy few"*  
— épigraphe des oeuvres de Stendhal



Dessin de vito, publié dans le numéro 172 du journal de la décroissance, septembre 2020.

# Bibliographie

- ACHARYA, T. D., SUBEDI, A. et LEE, D. H. (2018). « Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal ». In : *Sensors* 18, p. 2580. DOI : [10.3390/s18082580](https://doi.org/10.3390/s18082580).
- AMBROISE, B. (1999). « Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 2 - Modélisation systémique et dynamique ». In : *Revue des Sciences de l'Eau* 12. Consulté le 20 août 2025, p. 123-153. DOI : [10.7202/705346ar](https://doi.org/10.7202/705346ar). URL : <https://www.erudit.org/fr/revues/rseau/1999-v12-n1-rseau3295/705346ar/>.
- ANTONENKO, V., AL BITAR, A., DANYLENKO, I., WIJMER, T., COLIN, J., DEJOUX, J.-F., LEFEBVRE, A., KNIBBE, M., CESCHIA, E. et GASCOIN, S. (2024). « Impact of the Russian invasion on wheat biomass in Ukraine ». In : *Environmental Research Letters* 19.12. DOI : [10.1088/1748-9326/ad8363](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad8363). URL : <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad8363>.
- ARNOLD, J. G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R. S. et WILLIAMS, J. R. (1998). « Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I : Model Development ». In : *Journal of the American Water Resources Association* 34.1, p. 73-89. DOI : [10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x). URL : <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- ASOKA, A., GLEESON, T., WADA, Y. et MISHRA, V. (2017). « Relative contribution of monsoon precipitation and pumping to changes in groundwater storage in India ». In : *Nature Geoscience* 10.2, p. 109-117. DOI : [10.1038/ngeo2869](https://doi.org/10.1038/ngeo2869). URL : <https://doi.org/10.1038/ngeo2869>.
- BANGIRA, T., ALFIERI, S., MENENTI, M. et NIEKERK, A. van (2019). « Comparing thresholding with machine learning classifiers for mapping complex water ». In : *Remote Sensing* 11.11, p. 1351. DOI : [10.3390/rs11111351](https://doi.org/10.3390/rs11111351).
- BAUP, F., FRAPPART, F. et MAUBANT, J. (2014). « Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 18.5, p. 2007-2020. DOI : [10.5194/hess-18-2007-2014](https://doi.org/10.5194/hess-18-2007-2014).
- BEAUJOUAN, V. (2001). « Modélisation des transferts d'eau et d'azote dans les sols et les nappes : développement d'un modèle conceptuel distribué ». Consulté le 20 août 2025. Thèse de doct. École nationale supérieure agronomique de Rennes. URL : <https://theses.fr/2001NSARD035>.
- BEVEN, K. J. et BINLEY, A. M. (2014). « GLUE : 20 years on ». In : *Hydrological Processes* 28.24, p. 5897-5918. DOI : [10.1002/hyp.10082](https://doi.org/10.1002/hyp.10082).
- BEVEN, K. J. et CLOKE, H. L. (2012). « Comment on “Hyperresolution Global Land Surface Modeling : Meeting a Grand Challenge for Monitoring Earth’s Terrestrial Water” by E. F. Wood et al. » In : *Water Resources Research* 48.1, W01801. DOI : [10.1029/2011WR010982](https://doi.org/10.1029/2011WR010982).
- BEVEN, K. J. et KIRKBY, M. J. (1979). « A physically-based variable contributing area model of basin hydrology ». In : *Hydrological Sciences Bulletin* 24.1, p. 43-69. DOI : [10.1080/02626667909491834](https://doi.org/10.1080/02626667909491834).
- BOISSON, A., GUIHÉNEUF, N., PERRIN, J., BOUR, O., DEWANDEL, B., DAUSSE, A., VIOSSANGES, M., AHMED, S. et MARÉCHAL, J.-C. (2015). « Determining the vertical evolution of hydrody-

- namic parameters in weathered and fractured south Indian crystalline-rock aquifers : Insights from a study on an instrumented site ». In : *Hydrogeology Journal* 23.4, p. 757-773. DOI : [10.1007/s10040-014-1226-x](https://doi.org/10.1007/s10040-014-1226-x). URL : <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1226-x>.
- BOISSON, A., VILLESSECHE, D., SELLES, A., ALAZARD, M., CHANDRA, S., FERRANT, S. et MARÉCHAL, J.-C. (2022). « Long term monitoring of rainwater harvesting tanks : is multi-years management possible in crystalline South Indian aquifers ? » In : *Hydrological Processes* 36.12, e14759.
- BRISSON, N., GARY, C., JUSTES, E., ROCHE, R., MARY, B., RIPOCHE, D. et CELLIER, P. (2002). « STICS : A generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn ». In : *Agronomie* 22.1, p. 69-92. DOI : [10.1051/agro:2001005](https://doi.org/10.1051/agro:2001005). URL : <https://doi.org/10.1051/agro:2001005>.
- BROCCA, L., TARPANELLI, A., FILIPPUCCI, P., DORIGO, W., ZAUSSINGER, F., GRUBER, A. et FERNÁNDEZ-PRIETO, D. (déc. 2018). « How much water is used for irrigation? A new approach exploiting coarse resolution satellite soil moisture products ». In : *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 73, p. 752-766. ISSN : 0303-2434. DOI : [10.1016/j.jag.2018.08.023](https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.023).
- CASAL, L. (2018). « Évaluation de scénarios de gestion paysagère de l'azote par modélisation en bassins versants agricoles ». NNT : 2018NSARD085 ; disponible sur HAL (tel-02178704). Thèse de doct. Agrocampus Ouest.
- CASAL, L., DURAND, P., AKKAL-CORFINI, N., BENHAMOU, C., LAURENT, F., SALMON-MONVIOLA, J., FERRANT, S., PROBST, A., PROBST, J.-L. et VERTÈS, F. (2019). « Reduction of stream nitrate concentrations by land management in contrasted landscapes ». In : *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 114.1, p. 1-17. DOI : [10.1007/s10705-019-09979-0](https://doi.org/10.1007/s10705-019-09979-0). URL : <https://hal.science/hal-02324505>.
- CHEN, X., SHEN, R., PAN, B., PENG, Q., ZHANG, X., FU, Y. et YUAN, W. (2024). « A High-Resolution Distribution Dataset of Paddy Rice in India Based on Satellite Data ». In : *Remote Sensing* 16.17, p. 3180. DOI : [10.3390/rs16173180](https://doi.org/10.3390/rs16173180).
- CORDEIRO, M., MARTINEZ, J.-M. et PEÑA-LUQUE, S. (2021). « Automatic water detection from multidimensional hierarchical clustering for Sentinel-2 images and a comparison with Level 2A processors ». In : *Remote Sensing of Environment* 253, p. 112209. DOI : [10.1016/j.rse.2020.112209](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112209).
- CRÉTAUX, J.-F., ARSEN, A., CALMANT, S., KOURAEV, A., VUGLINSKI, V., BERGÉ-NGUYEN, M. et al. (2011). « SOLS : A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data ». In : *Advances in Space Research* 47.9, p. 1497-1507. DOI : [10.1016/j.asr.2011.01.004](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.01.004).
- CRUTZEN, P. (2002). « Geology of Mankind ». In : *Nature* 415.6867, p. 23. DOI : [10.1038/415023a](https://doi.org/10.1038/415023a).
- DASHORA, Y., DILLON, P., MAHESHWARI, B. et al. (2018). « A simple method using farmers' measurements applied to estimate check dam recharge in Rajasthan, India ». In : *Sustainable Water Resources Management* 4, p. 301-316. DOI : [10.1007/s40899-017-0185-5](https://doi.org/10.1007/s40899-017-0185-5).
- DE CONDAPPA, D., GALLE, S., DEWANDEL, B. et HAVERKAMP, R. (2008). « Bimodal Zone of the Soil Textural Triangle : Common in Tropical and Subtropical Regions ». In : *Soil Science Society of America Journal* 72.1, p. 33-40. DOI : [10.2136/sssaj2006.0343](https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0343).
- DEWANDEL, B., MARÉCHAL, J.-C., BOUR, O., LADOCHE, B., AHMED, S. et KRISHNAMURTHY, N. S. (2012). « Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and effective porosity at watershed scale in deeply weathered crystalline aquifers ». In : *Journal of Hydrology* 416-417, p. 83-97. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2011.11.038](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.038).
- DILLON, P., STUYFZAND, P., GRISCHEK, T., LLURIA, M., PYNE, R. D. G., JAIN, R. C., BEAR, J., SCHWARZ, J., WANG, W., FERNANDEZ, E., STEFAN, C., PETTENATI, M., GUN, J. van

- der, SPRENGER, C., MASSMANN, G., SCANLON, B. R., XANKE, J., JOKELA, P., ZHENG, Y., ROSSETTO, R., SHAMRUKH, M., PAVELIC, P., MURRAY, E., ROSS, A., BONILLA VALVERDE, J. P., PALMA NAVA, A., ANSEMS, N., POSAVEC, K., HA, K., MARTIN, R. et SAPIANO, M. (2019). « Sixty years of global progress in managed aquifer recharge ». In : *Hydrogeology Journal* 27.1, p. 1-30. DOI : [10.1007/s10040-018-1841-z](https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z). URL : <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>.
- DOÑA, C., MORANT, D., PICAZO, A., ROCHERA, C., SÁNCHEZ, J. M. et CAMACHO, A. (2021). « Estimation of Water Coverage in Permanent and Temporary Shallow Lakes and Wetlands by Combining Remote Sensing Techniques and Genetic Programming : Application to the Mediterranean Basin of the Iberian Peninsula ». In : *Remote Sensing* 13.4, p. 652. DOI : [10.3390/rs13040652](https://doi.org/10.3390/rs13040652).
- DU, Y., ZHANG, Y., LING, F., WANG, Q., LI, W. et 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 ». In : *Remote Sens.* 8, p. 354. DOI : [10.3390/rs8040354](https://doi.org/10.3390/rs8040354).
- DUAN, Z. et BASTIAANSEN, W. (2013). « Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data ». In : *Remote Sensing of Environment* 134, p. 403-416. DOI : [10.1016/j.rse.2013.03.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.010).
- DUNN, S. M., JOHNSTON, L., TAYLOR, C., WATSON, H., COOK, Y. et LANGAN, S. J. (2013). « Capability and limitations of a simple grid-based model for simulating land use influences on stream nitrate concentrations ». In : *Journal of Hydrology* 507, p. 110-123. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2013.10.017](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.017). URL : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.017>.
- DUPAS, R., GARNIER, J., BILLEN, G., THIEU, V., RUIZ, L. et BEAUJOUAN, V. (2011). « Assessing nitrogen emissions in surface water at the national level : A case study in France ». In : *Science of the Total Environment* 409.15. Consulté le 20 août 2025, p. 2902-2914. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2011.04.027](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.027). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969712012934>.
- DURAND, P., BEAUJOUAN, V., WESSEL, W., RAAT, K. J. et WHITEHEAD, P. G. (2002). « Parameterisation of hydrological models : A review and lessons from the study of an agricultural catchment (Naizin, France) ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 22.2. Consulté le 20 août 2025, p. 93-107. DOI : [10.1051/agro:2002004](https://doi.org/10.1051/agro:2002004). URL : <https://www.agronomy-journal.org/articles/agro/abs/2002/02/10/10.html>.
- EINI, M. R., MASSARI, C. et PINIEWSKI, M. (2023). « Satellite-based soil moisture enhances the reliability of agro-hydrological modeling ». In : *Science of the Total Environment* 866, p. 161255. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2023.161255](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161255).
- FENICIA, F., KAVETSKI, D. et SAVENIJE, H. H. G. (2011). « Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling : 1. Motivation and theoretical development ». In : *Water Resources Research* 47, W11510. DOI : [10.1029/2010WR010174](https://doi.org/10.1029/2010WR010174). URL : <https://doi.org/10.1029/2010WR010174>.
- FÉRET, J.-B., GITELSON, A. A., NOBLE, S. D. et JACQUEMOUD, S. (2017). « PROSPECT-D : Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle ». In : *Remote Sensing of Environment* 193, p. 204-215. DOI : [10.1016/j.rse.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.004).
- FERRANT, S. (2023). *2 m resolution DEM based stereoscopy Pleiades acquisitions in Telangana, South-India (Version V1)*. Accès le 25 septembre 2025. DOI : [10.5281/zenodo.10403040](https://doi.org/10.5281/zenodo.10403040). URL : <https://doi.org/10.5281/zenodo.10403040>.
- FERRANT, S., BUSTILLO, V., BUREL, E., SALMON-MONVIOLA, J., CLAVERIE, M., JAROSZ, N., YIN, T., RIVALLAND, V., DEDIEU, G., DEMAREZ, V. et CESCHIA, E. (2016). « Extracting Soil Water Holding Capacity Parameters of a Distributed Agro-Hydrological Model from High Resolution Optical Satellite Observations Series ». In : *Remote Sensing* 8.154.

- FERRANT, S., GASCOIN, S., VELOSO, A., SALMON-MONVIOLA, J., CLAVERIE, M., RIVALLAND, V., DEDIEU, G., DEMAREZ, V., CESCHIA, E., PROBST, J.-L., DURAND, P. et BUSTILLO, V. (2014a). « Agro-hydrology and multi-temporal high-resolution remote sensing : toward an explicit spatial processes calibration ». In : *Hydrological Earth System Sciences* 18, p. 5219-5237.
- FERRANT, S., SELLES, A., VINCENT, A., THIERION, V., HAGOLLE, O., SHAKEEL, A. et TIWARI, V. M. (2025). « Seasonal flooded rice area extent dataset during dry seasons 2016 to 2019 at the Telangana state scale, South-India ». In : *Data in Brief* 62, p. 111981. ISSN : 2352-3409. DOI : [10.1016/j.dib.2025.111981](https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111981). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235234092500705X>.
- FERRANT, S. (2009). « Modélisation agro-hydrologique des transferts de nitrates à l'échelle des bassins versants agricoles gascons ». Thèse de doct. Toulouse 3.
- FERRANT, S., CABALLERO, Y., PERRIN, J., GASCOIN, S., DEWANDEL, B., AULONG, S., DAZIN, F., AHMED, S. et MARÉCHAL, J.-C. (2014b). « Projected impacts of climate change on farmers' extraction of groundwater from crystalline aquifers in South India ». In : *Scientific Report* doi :10.1038/srep03697.
- FERRANT, S., DURAND, P., JUSTES, E., PROBST, J.-L. et SANCHEZ-PEREZ, J.-M. (2013). « Simulating the long term impact of nitrate mitigation scenarios in a pilot study basin ». In : *Agricultural Water Management* 124, p. 85-96.
- FERRANT, S., OEHLER, F., DURAND, P., RUIZ, L., SALMON-MONVIOLA, J., JUSTES, E., DUGAST, P., PROBST, A., PROBST, J.-L. et SANCHEZ-PEREZ, J.-M. (2011). « Understanding nitrogen transfer dynamics in a small agricultural catchment : Comparison of a distributed (TNT2) and a semi distributed (SWAT) modeling approaches ». In : *Journal of Hydrology* 406.1, p. 1-15. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.026>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411003441>.
- FERRANT, S., SELLES, A., LE PAGE, M., HERRAULT, P.-A., PELLETIER, C., AL-BITAR, A., MERMOZ, S., GASCOIN, S., BOUVET, A., SAQALLI, M. et al. (2017). « Detection of irrigated crops from Sentinel-1 and Sentinel-2 data to estimate seasonal groundwater use in South India ». In : *Remote Sensing* 9.11, p. 1119.
- FERRANT, S., SELLES, A., LE PAGE, M., MERMOZ, S., GASCOIN, S., BOUVET, A., AHMED, S., KERR, Y. H. et al. (2019). « Sentinel-1&2 for near real time cropping pattern monitoring in drought prone areas. application to irrigation water needs in telangana, south-india ». In : *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42, p. 285-292.
- FEYISA, G. L., MEILBY, H., FENSHOLT, R. et PROUD, S. (2014). « Automated Water Extraction Index : A new technique for surface water mapping using Landsat imagery ». In : *Remote Sens. Environ.* 140, p. 23-35. DOI : [10.1016/j.rse.2013.08.029](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029).
- FISHER, A., FLOOD, N. et DANAHER, T. (2016). « Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia ». In : *Remote Sens. Environ.* 175, p. 167-182. DOI : [10.1016/j.rse.2015.12.055](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055).
- FLEURY, M. de, KERGOAT, L. et GRIPPA, M. (2023). « Hydrological regime of Sahelian small waterbodies from combined Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 Synthetic Aperture Radar Altimeter data ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 27.11, p. 2189-2204. DOI : [10.5194/hess-27-2189-2023](https://doi.org/10.5194/hess-27-2189-2023).
- FLIPO, N., EVEN, S., POULIN, M., THÉRY, S. et LEDOUX, E. (2007). « Modelling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CaWaQS ». In : *Science of the Total Environment* 375, p. 69-79. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2006.12.014](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.014). URL : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.014>.

- FRAPPART, F., MINH, K., L'HERMITTE, J., CAZENAVE, A., RAMILLIEN, G., LE TOAN, T. et al. (2006). « Water volume change in the lower Mekong from satellite altimetry and imagery data ». In : *Geophysical Journal International* 167.2, p. 570-584. DOI : [10.1111/j.1365-246X.2006.03184.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03184.x).
- FRESSOZ, J.-B. (2025). « In tech we trust : A history of technophilia in the Intergovernmental Panel on Climate Change's (IPCC) climate mitigation expertise ». In : *Energy Research & Social Science* 127, p. 104280. ISSN : 2214-6296. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104280>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629625003615>.
- FRITZ, S., SEE, L., THORNTON, P., OBERSTEINER, M. et al. (2015). « Mapping global cropland field size ». In : *Global Change Biology* 21.5, p. 1980-1992. DOI : [10.1111/gcb.12838](https://doi.org/10.1111/gcb.12838).
- GARCÍA LINO, M. C., PFANZELT, S., DOMIC, A. I., HENSEN, I., SCHITTEK, K., MENESES, R. I. et BADER, M. Y. (2024). « Carbon dynamics in high-Andean tropical cushion peatlands : A review of geographic patterns and potential drivers ». In : *Ecological Monographs*. First published : 22 July 2024. DOI : [10.1002/ecm.1614](https://doi.org/10.1002/ecm.1614). URL : <https://doi.org/10.1002/ecm.1614>.
- GLENDENNING, C., VAN OGTROP, F., MISHRA, A. et VERVOORT, R. (2012). « Balancing watershed and local scale impacts of rain water harvesting in India—A review ». In : *Agricultural Water Management* 107, p. 1-13. ISSN : 0378-3774. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.011>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377412000273>.
- GUÉGUEN, H. et JEANPIERRE, L. (2022). *La perspective du possible : Comment penser ce qui peut nous arriver, et ce que nous pouvons faire*. L'horizon des possibles. Paris : La Découverte. ISBN : 9782348067341.
- HAGOLLE, O., HUC, M., DESJARDINS, C., AUER, S. et RICHTER, R. (2017). *MAJA Algorithm Theoretical Basis Document (1.0)*. DOI : [10.5281/zenodo.1209633](https://doi.org/10.5281/zenodo.1209633). URL : <https://doi.org/10.5281/zenodo.1209633>.
- HOLLSTEIN, A., SEGL, K., GUANTER, L., BRELL, M. et ENESCO, M. (2016). « Ready-to-Use Methods for the Detection of Clouds, Cirrus, Snow, Shadow, Water and Clear Sky Pixels in Sentinel-2 MSI Images ». In : *Remote Sensing* 8.8, p. 666. DOI : [10.3390/rs8080666](https://doi.org/10.3390/rs8080666).
- HORA, T., SRINIVASAN, V. et BASU, N. B. (2019). « The groundwater recovery paradox in South India ». In : *Geophysical Research Letters* 46.16. DOI : [10.1029/2019GL083525](https://doi.org/10.1029/2019GL083525).
- HUGELIUS, G., LOISEL, J., CHADBURN, S., JACKSON, R. B., JONES, M., MACDONALD, G., MARUSHCHAK, M., OLEFELDT, D., PACKALEN, M., SIEWERT, M. B., TREAT, C., TURETSKY, M., VOIGT, C. et YU, Z. (2020). « Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117.34, p. 20438-20446. DOI : [10.1073/pnas.1916387117](https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117).
- HUGELIUS, G., STRAUSS, J., ZUBRZYCKI, S., HARDEN, J. W., SCHUUR, E. A. G., PING, C.-L., SCHIRRMMEISTER, L., GROSSE, G., MICHAELSON, G. J., KOVEN, C. D. et AL., et (2014). « Estimated Stocks of Circumpolar Permafrost Carbon with Quantified Uncertainty Ranges and Identified Data Gaps ». In : *Biogeosciences* 11.23, p. 6573-6593. DOI : [10.5194/bg-11-6573-2014](https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014).
- HUNTER, M. L. (2017). « Conserving small natural features with large ecological roles : An introduction and definition ». In : *Biological Conservation* 211, p. 1-2. DOI : [10.1016/j.bioccon.2016.12.019](https://doi.org/10.1016/j.bioccon.2016.12.019).
- JIN, Q. et WANG, C. (2017). « A revival of Indian summer monsoon rainfall since 2002 ». In : *Nature Climate Change* 7, p. 587-594. DOI : [10.1038/nclimate3348](https://doi.org/10.1038/nclimate3348). URL : <https://www.nature.com/articles/nclimate3348>.

- KAPLAN, G. et AVDAN, U. (2017). « Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery ». In : *European Journal of Remote Sensing* 50.1, p. 137-143. DOI : [10.1080/22797254.2017.1297540](https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1297540).
- KAUARK LEITE, L. A. (1990). « Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole ». Thèse de doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées, p. 342.
- KAUFMAN, D., MCKAY, N., ROUTSON, C., ERB, M., DÄTWYLER, C., SOMMER, P. S., HEIRI, O. et DAVIS, B. (2020). « Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach ». In : *Scientific Data* 7.1, p. 201. DOI : [10.1038/s41597-020-0530-7](https://doi.org/10.1038/s41597-020-0530-7). URL : <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0530-7>.
- KHATAMI, S., PEEL, M. C., PETERSON, T. J. et WESTERN, A. W. (2019). « Equifinality and Flux Mapping : A New Approach to Model Evaluation and Process Representation Under Uncertainty ». In : *Water Resources Research* 55.11, p. 8922-8941. DOI : [10.1029/2018WR023750](https://doi.org/10.1029/2018WR023750). URL : <https://doi.org/10.1029/2018WR023750>.
- KUMAR, D., GHOSH, S., PATEL, A., SINGH, O. et RAVINDRANATH, R. (2006). « Rainwater harvesting in India : some critical issues for basin planning and research ». In : *Land Use and Water Resources Research* 6, p. 1-17.
- LAFONT, S., ZHAO, Y., CALVET, J.-C., PEYLIN, P., CIAIS, P., MAIGNAN, F. et WEISS, M. (2012). « Modelling LAI, Surface Water and Carbon Fluxes at High-Resolution over France : Comparison of ISBA-A-Gs and ORCHIDEE ». In : *Biogeosciences* 9.1, p. 439-456. DOI : [10.5194/bg-9-439-2012](https://doi.org/10.5194/bg-9-439-2012).
- MAGUIRE, J. D. et MULLA, D. J. (2022). « Managing spatial irrigation using remote-sensing-based evapotranspiration models ». In : *Agricultural Water Management* 272, p. 107423. DOI : [10.1016/j.agwat.2022.107423](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107423).
- MAIN-KNORN, M., PFLUG, B., LOUIS, J., DEBAECKER, V., MÜLLER-WILM, U. et GASCON, F. (2017). « Sen2Cor for Sentinel-2 ». In : *Proceedings of SPIE, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*. T. 10427, p. 1042704. DOI : [10.1117/12.2278218](https://doi.org/10.1117/12.2278218).
- MALM, A. et HORNBORG, A. (2014). « The geology of mankind ? A critique of the Anthropocene narrative ». In : *The Anthropocene Review* 1.1, p. 62-69. DOI : [10.1177/2053019613516291](https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2053019613516291). URL : <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2053019613516291>.
- MARÉCHAL, J.-C., DEWANDEL, B. et SUBRAHMANYAM, K. (2004). « Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer ». In : *Water Resources Research* 40, W11508. DOI : [10.1029/2003WR002879](https://doi.org/10.1029/2003WR002879).
- MARTIN, E., GASCOIN, S., GRUSSON, Y., MURGUE, C., BARDEAU, M., ANCTIL, F., FERRANT, S., LARDY, R., LE MOIGNE, P., LEENHARDT, D. et al. (2016). « On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities : examples from the Garonne Basin of France ». In : *Surveys in Geophysics* 37, p. 223-247.
- MARTIN, P. S. (1984). « Prehistoric overkill : the global model ». In : *Quaternary Extinctions : A Prehistoric Revolution*. Sous la dir. de MARTIN, P. S. et KLEIN, R. G. Tucson : University of Arizona Press, p. 354-403.
- MCNEILL, J. et ENGELKE, P. (2014). *The Great Acceleration : An Environmental History of the Anthropocene since 1945*. Cambridge, MA : Harvard University Press. ISBN : 9780674545038.
- MOREAU, P., RUIZ, L., RAIMBAULT, T., VERTÈS, F., CORDIER, M. O., GASCUEL-ODOUX, C., MASSON, V., SALMON-MONVIOLA, J. et DURAND, P. (2012). « Modeling the potential benefits of catch-crop introduction in fodder crop rotations in a Western Europe landscape ». In : *Science of the Total Environment* 437, p. 276-284. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2012.07.091](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.091). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712010467>.

- NAKICENOVIC, N. et SWART, R. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios : a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK : Cambridge University Press.
- NEITSCH, S. L., ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R. et WILLIAMS, J. R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) User's Manual, Version 2000*. Rapp. tech. College Station, TX : Texas Water Resources Institute, Texas A&M University.
- NGOC, D. D., LOISEL, H., JAMET, C., VANTREPOTTE, V., DUFORÊT-GAURIER, L., MINH, C. D. et MANGIN, A. (2019). « Coastal and inland water pixels extraction algorithm (WiPE) from spectral shape analysis and HSV transformation applied to Landsat 8 OLI and Sentinel-2 MSI ». In : *Remote Sensing of Environment* 223, p. 208-228. DOI : [10.1016/j.rse.2019.01.024](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.024).
- NICOLAS, M., BOUR, O., SELLES, A., DEWANDEL, B., BAILLY-COMTE, V., CHANDRA, S., AHMED, S. et MARÉCHAL, J.-C. (2019). « Managed aquifer recharge in fractured crystalline rock aquifers : Impact of horizontal preferential flow on recharge dynamics ». In : *Journal of Hydrology* 573, p. 717-732. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.003).
- OTSU, N. (1979). « A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms ». In : *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 9, p. 62-66. DOI : [10.1109/TSMC.1979.4310076](https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076).
- PASCAL, C. (2022). « Cartographie multi-échelle des ressources en eau sur les régions irriguées : une approche par télédétection multi-capteurs ». Thèse préparée au CESBIO (Centre d'Études Spatiales de la Biosphère). Thèse de doct. Université Paul-Sabatier (Toulouse III).
- PASCAL, C., FERRANT, S., PEÑA-LUQUE, S., SELLES, A., MARECHAL, J.-C., WIJMER, T., GASCOIN, S. et MERLIN, O. (2024). « Monitoring Indian ungauged small reservoirs volume from remote sensing : Feasibility, bias and perspectives ». In : *PLOS Water* 3.12, e0000260.
- PASCAL, C., FERRANT, S., RODRIGUEZ-FERNANDEZ, N., KERR, Y., SELLES, A. et MERLIN, O. (2023). « Indicator of flood-irrigated crops from SMOS and SMAP soil moisture products in southern India ». In : *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 20, p. 1-5.
- PASCAL, C., FERRANT, S., SELLES, A., MARÉCHAL, J.-C., GASCOIN, S. et MERLIN, O. (2021). « High-resolution mapping of rainwater harvesting system capacity from satellite derived products in South India ». In : *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. IEEE, p. 7011-7014.
- PASCAL, C., FERRANT, S., SELLES, A., MARÉCHAL, J.-C., PASWAN, A. et MERLIN, O. (2022). « Evaluating downscaling methods of GRACE data : a case study over a fractured crystalline aquifer in South India ». In : *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 2022, p. 1-25.
- PEKEL, J.-F., BELWARD, A. et GORELICK, N. (2017). *Global Water Surface Dynamics : Toward a Near Real Time Monitoring Using Landsat and Sentinel Data*. AGU Fall Meeting Abstract GC11C-0742.
- PEKEL, J.-F., COTTAM, A., GORELICK, N. et BELWARD, A. S. (2016). « High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes ». In : *Nature* 540.7633, p. 418-422. ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/nature20584](https://doi.org/10.1038/nature20584). URL : <https://doi.org/10.1038/nature20584>.
- PEKEL, J.-F., VANCUTSEM, C., BASTIN, L., CLERICI, M., VANBOGAERT, E., BARTHOLOMÉ, E. et DEFOURNY, P. (2014). « A near real-time water surface detection method based on HSV transformation of MODIS multi-spectral time series data ». In : *Remote Sensing of Environment* 140, p. 704-716. DOI : [10.1016/j.rse.2013.10.008](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.008).
- PELLARIN, T., ROMÁN-CASCÓN, C., BARON, C., BINDLISH, R., BROCCA, L., CAMBERLIN, P., FERNÁNDEZ-PRieto, D., KERR, Y. H., MASSARI, C., PANTHOU, G., PERRIMOND, B., PHILIPPON, N. et QUANTIN, G. (jan. 2020). « The Precipitation Inferred from Soil Moisture (PrISM) Near Real-Time Rainfall Product : Evaluation and Comparison ». In : *Remote Sensing* 12.3, p. 481. DOI : [10.3390/rs12030481](https://doi.org/10.3390/rs12030481).

- PELLETIER, C., VALERO, S., INGLADA, J., CHAMPION, N. et DEDIEU, G. (2016). « Assessing the robustness of Random Forests to map land cover with high resolution satellite image time series over large areas ». In : *Remote Sensing of Environment* 187, p. 156-168.
- PEÑA-LUQUE, S., FERRANT, S., CORDEIRO, M. C., LEDAUPHIN, T., MAXANT, J. et MARTINEZ, J.-M. (2021). « Sentinel-1&2 multitemporal water surface detection accuracies, evaluated at regional and reservoirs level ». In : *Remote Sensing* 13.16, p. 3279.
- PERRIN, J., FERRANT, S., MASSUEL, S., DEWANDEL, B., MARÉCHAL, J.-C., AULONG, S. et AHMED, S. (2012). « Assessing water availability in a semi-arid watershed of southern India using a semi-distributed model ». In : *Journal of Hydrology* 460, p. 143-155.
- PHAN, H., LE TOAN, T. et BOUVET, A. (2021). « Understanding Dense Time Series of Sentinel-1 Backscatter from Rice Fields : Case Study in a Province of the Mekong Delta, Vietnam ». In : *Remote Sens.* 13.5, p. 921. DOI : [10.3390/rs13050921](https://doi.org/10.3390/rs13050921).
- PIQUE, G., FIEUZAL, R., DEBAEKE, P., AL BITAR, A., TALLEC, T. et CESCHIA, E. (2020). « Combining High-Resolution Remote Sensing Products with a Crop Model to Estimate Carbon and Water Budget Components : Application to Sunflower ». In : *Remote Sensing* 12.18, p. 2967. DOI : [10.3390/rs12182967](https://doi.org/10.3390/rs12182967). URL : <https://doi.org/10.3390/rs12182967>.
- RICHERSON, P., BOYD, R. et BETTINGER, R. (2001). « Was agriculture impossible during the Pleistocene but mandatory during the Holocene? A climate change hypothesis ». In : *American Antiquity* 66.3. Publié en ligne le 20 janvier 2017 sur Cambridge Core, p. 387-411. DOI : [10.2307/2694241](https://doi.org/10.2307/2694241).
- RIDDER, N. A. de et BOONSTRA, J. (1994). « Analysis of Water Balances ». In : *Drainage Principles and Applications*. Sous la dir. de RITZEMA, H. P. Wageningen, The Netherlands : ILRI Publication, p. 601-636. ISBN : 90-70754-30-4.
- RODELL, M., VELICOGNA, I. et FAMIGLIETTI, J. S. (2009). « Satellite-based estimates of groundwater depletion in India ». In : *Nature* 460.7258, p. 999-1002. DOI : [10.1038/nature08238](https://doi.org/10.1038/nature08238). URL : <https://www.nature.com/articles/nature08238>.
- RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, N., MIALON, A., MERLIN, O., SUERE, C., CABOT, F., KHAZÂL, A., COSTERASTE, J., PALACIN, B., RODRIGUEZ-SUQUET, R., TOURNIER, T., DECOOPMAN, T., ANTERRIEU, É., COLOM, M., MOREL, J., KERR, Y. H., ROUGÉ, B., BOUTIN, J., PICARD, G., PELLARIN, T., ESCORIHUELA, M., AL BITAR, A. et RICHAUME, P. (2019). *SMOS-HR : A High Resolution L-Band Passive Radiometer for Earth Science and Applications*. undefined.
- SALMON-MONVIOLA, J. (2017). « Modélisation agro-hydrologique spatialement distribuée pour évaluer les impacts des changements climatique et agricole sur la qualité de l'eau ». Consulté le 20 août 2025. Thèse de doct. Université de Rennes 1. URL : [https://theses.hal.science/tel-01662412v1/file/fix\\_BvB0mw1z-salmon.pdf](https://theses.hal.science/tel-01662412v1/file/fix_BvB0mw1z-salmon.pdf).
- SMIDT, S. J. et al. (2023). « Agrohydrology : Toward a Formalized Discipline ». In : *Earth's Future* 11.6, e2022EF003410. DOI : [10.1029/2022EF003410](https://doi.org/10.1029/2022EF003410). URL : <https://doi.org/10.1029/2022EF003410>.
- SOBOL, I. M. (2001). « Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates ». In : *Mathematics and Computers in Simulation* 55.1-3, p. 271-280. DOI : [10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6).
- STEFFEN, W., CRUTZEN, P. et MCNEILL, J. (2007). « The Anthropocene : Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature ? » In : *Ambio* 36.8. Accessed : 2025-08-18, p. 614-621. DOI : [10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:TAAHNO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2). URL : [https://www.researchgate.net/publication/5610815\\_The\\_Anthropocene\\_Are\\_Humans\\_Now\\_Overwhelming\\_the\\_Great\\_Forces\\_of\\_Nature](https://www.researchgate.net/publication/5610815_The_Anthropocene_Are_Humans_Now_Overwhelming_the_Great_Forces_of_Nature).
- TIWARI, V. M., WAHR, J. et SWENSON, S. (2009). « Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations ». In : *Geophysical Research Letters* 36.18, p. L18401. DOI : [10.1029/2009GL039401](https://doi.org/10.1029/2009GL039401). URL : <https://doi.org/10.1029/2009GL039401>.

- VANTHOF, V., FERRANT, S., WALCKER, R. et KELLY, R. (2024). « Stereo bathymetry to monitor small seasonal agriculture water ponds in ungauged areas ». In : *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 48.3, p. 565-570.
- VEGA, E. de la, CHALK, T., WILSON, P., BYSANI, R. et FOSTER, G. (2020). « Atmospheric CO<sub>2</sub> during the Mid-Piacenzian Warm Period and the M2 glaciation ». In : *Scientific Reports* 10.1, p. 11002. DOI : [10.1038/s41598-020-67154-8](https://doi.org/10.1038/s41598-020-67154-8).
- VIGAUD, N., VRAC, M. et CABALLERO, Y. (2012). « Probabilistic downscaling of GCMs scenarios over southern India ». In : *International Journal of Climatology* 33, p. 1248-1263. DOI : [10.1002/joc.3522](https://doi.org/10.1002/joc.3522).
- WADA, Y. (2016). « Modelling groundwater depletion at regional and global scales : Present state and future prospects ». In : *Surveys in Geophysics* 37.2, p. 419-451. DOI : [10.1007/s10712-015-9347-x](https://doi.org/10.1007/s10712-015-9347-x).
- WANG, Y. et COAUTHORS (2024). « Statistical Downscaling of GRACE Terrestrial Water Storage for Improved Regional Resolution ». In : *Journal of Hydrology* 632, p. 130987.
- WHITMORE, J. S. (1961). « Agrohydrology ». In : *South African Geographical Journal* 43.1, p. 68-74. DOI : [10.1080/03736245.1961.10559366](https://doi.org/10.1080/03736245.1961.10559366).
- WIELAND, M. et MARTINIS, S. (2019). « A Modular Processing Chain for Automated Flood Monitoring from Multi-Spectral Satellite Data ». In : *Remote Sensing* 11.19, p. 2330. DOI : [10.3390/rs11192330](https://doi.org/10.3390/rs11192330).
- WIJMER, T., AL BITAR, A., ARNAUD, L., FIEUZAL, R. et CESCHIA, E. (2024). « AgriCarbon-EO v1.0.1 : large-scale and high-resolution simulation of carbon fluxes by assimilation of Sentinel-2 and Landsat-8 reflectances using a Bayesian approach ». In : *Geoscientific Model Development* 17, p. 997-1021. DOI : [10.5194/gmd-17-997-2024](https://doi.org/10.5194/gmd-17-997-2024). URL : <https://doi.org/10.5194/gmd-17-997-2024>.
- WOOD, E. F., ROUNDY, J. K., TROY, T. J., BEEK, L. P. H. van, BIERKENS, M. F. P., BLYTH, E., ROO, A. de, DÖLL, P., EK, M., FAMIGLIETTI, J., GOCHIS, D., GIESEN, N. van de, HOUSER, P., JAFFÉ, P. R., KOLLET, S., LEHNER, B., LETTENMAIER, D. P., PETERS-LIDARD, C., SIVAPALAN, M., SHEFFIELD, J., WADE, A. et WHITEHEAD, P. (2011). « Hyperresolution Global Land Surface Modeling : Meeting a Grand Challenge for Monitoring Earth's Terrestrial Water ». In : *Water Resources Research* 47.5, W05301. DOI : [10.1029/2010WR010090](https://doi.org/10.1029/2010WR010090).
- XIE, H., LONGUEVERGNE, L., RINGLER, C. et SCANLON, B. (2020). « Integrating groundwater irrigation into hydrological simulation of India : Case of improving model representation of anthropogenic water use impact using GRACE ». In : *Journal of Hydrology : Regional Studies* 29, p. 100681. ISSN : 2214-5818. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100681>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581819301909>.
- XU, H. (2006). « Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery ». In : *Int. J. Remote Sens.* 27, p. 3025-3033. DOI : [10.1080/01431160600589179](https://doi.org/10.1080/01431160600589179).
- YANG, X., QIN, Q., YÉSOU, H., LEDAUPHIN, T., KOEHL, M., GRUSSENMEYER, P. et ZHU, Z. (2020). « Monthly estimation of the surface water extent in France at a 10-m resolution using Sentinel-2 data ». In : *Remote Sens. Environ.* 244, p. 111803. DOI : [10.1016/j.rse.2020.111803](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111803).
- YOUSEFI, P., JALAB, H. A., IBRAHIM, R. W., NOOR, N. F. M., AYUB, M. N. et GANI, A. (2018). « Water-Body Segmentation in Satellite Imagery Applying Modified Kernel K-means ». In : *Malaysian Journal of Computer Science* 31.2, p. 143-154. DOI : [10.22452/mjcs.vol31no2.4](https://doi.org/10.22452/mjcs.vol31no2.4).