



HAL
open science

Analyse des inondations par remontées de nappes phréatiques sur la côte Ouest de la Manche à l'aide de la télédétection

Anna Charpentier

► To cite this version:

Anna Charpentier. Analyse des inondations par remontées de nappes phréatiques sur la côte Ouest de la Manche à l'aide de la télédétection. Géographie. 2024. dumas-04788418

HAL Id: dumas-04788418

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04788418v1>

Submitted on 18 Nov 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

2023-
2024



**Analyse des inondations par remontées de nappes phréatiques
sur la côte Ouest de la Manche, à l'aide de la télédétection.**

Mémoire de recherche de Master 1

SOUS LA DIRECTION DE STÉPHANE COSTA, DANIEL DELAHAYE ET
CHLOÉ MESNAGE—LABORATOIRE IDEES
ANNA CHARPENTIER

UNIVERSITÉ DE CAEN – UFR SEGGAT | Calvados, Normandie

ideas


**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE

Remerciements

La rédaction de ce mémoire a été rendue possible grâce au soutien et à l'encouragement de nombreuses personnes. Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

En premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement ma co-encadrante de mémoire, **Chloé Mesnage**. Sa supervision éclairée, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce projet. Ses remarques constructives et son expérience ont été essentielles à la maturation de mes idées et à l'aboutissement de cette recherche. Je veux également lui témoigner ma reconnaissance pour sa présence lors des moments d'incertitudes.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers mes deux encadrants **Stéphane Costa** et **Daniel Delahaye**. Leurs cours et les discussions ont grandement enrichi ma compréhension des concepts et théories géographiques, m'inspirant à pousser mes recherches plus loin. Je tiens à les remercier pour leur compréhension et leurs nombreux conseils pendant nos rendez-vous.

Un merci particulier va à **Sasha Griffin**, **Mohand Medjkane** et **Charles Brionne** qui m'ont énormément aidé lors de mes problèmes de traitements informatiques, et qui ont grandement participé à ma formation en télédétection. Je remercie également Bastien Sandberg pour m'avoir donné des conseils pour les vols drones, ainsi que les autres doctorants du laboratoire pour leur conseils et leur accueil au sein du laboratoire IDEES.

Je fais une seconde mention particulière à **Côme** et **Pierre** pour leur aide précieuse dans l'analyse des données et pour leurs nombreuses relectures de ce manuscrit et leur réconfort quotidien. Puis également à ces deux femmes exceptionnelles **Isabelle** et **Marie-Thérèse** pour m'avoir motivé tout le long.

Je suis également redevable aux nombreux collègues et amis qui ont partagé ce parcours avec moi. Leur soutien moral, leurs encouragements et leurs précieux conseils ont été une source constante de motivation. Parmi eux, je tiens à mentionner **Léa** et **Léa**, **Anastasie**, **Maël**, **Michaela**, **Baptiste**, **Zoé**, **Antoine**, **Matar**, **Emma**, **Céline**, **Martin**, **Océane** et **Loéven** et **Guillaume** pour

leur soutien à la bibliothèque cartotheque SEGGAT tout au long de ces six mois éprouvants. De plus, je remercie mes collègues du bar **La Pagaille**, pour leur compréhension lors de mes moments de fatigue et de leur encouragement.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux participants de cette étude et aux diverses institutions qui ont facilité mes recherches sur le terrain, notamment le **Cerema** qui m'a laissé participer à une de leur campagne sur le terrain de Chloé Mesnage. Leur collaboration et leur disponibilité ont été cruciales pour la collecte des données nécessaires à cette thèse.

Merci à la **bibliothèque - cartotheque** pour leur accueil et leur conseils bibliographiques.

Merci à **Julien Frérot** pour son aide lors de mes nombreux problèmes de connexion avec Arcgis Pro.

Merci à mes deux plus grands compagnons de vie et aussi colocataires **Louis** et **Martin** d'avoir accepté mes humeurs changeantes et de m'avoir fait de bons repas et de vivre des moments forts sympathiques.

Merci à la musique techno, aux soirées entre amis et au micro-macramé de m'avoir changé les idées pour continuer encore plus fort.

Sommaire

Remerciements.....	1
Sommaire	4
Introduction générale	6
Chapitre 1 – Présentation des zones d'étude.....	10
Introduction du chapitre 1.....	11
1.Sélection des sites d'étude	11
2.Présentation environnementale des six communes étudiées.....	14
Conclusion du chapitre 1.....	24
Chapitre 2 –Contexte et pertinence de l'étude.....	26
Introduction du chapitre 2.....	28
1.Objectifs de l'étude	28
2. Contexte environnemental et socio-économique du secteur d'étude : la côte ouest du Cotentin	29
Conclusion du chapitre 2.....	38
Chapitre 3 – État de l'art	40
Introduction du chapitre 3.....	42
1.Le phénomène de remontées de nappes	42
2.Évolution de la télédétection.....	49
3.Études antérieures sur le sujet	53
Conclusion chapitre 3.....	56
Chapitre 4 – Acquisition et mise en forme des résultats	58
Introduction du chapitre 4.....	60
1.Méthodologie générale	61
2.L'usage de la télédétection pour l'évaluation de la profondeur temporelle	62

3.L'utilisation du drone pour obtenir des images supplémentaires	73
4.Méthodologie appliquée aux différents dispositifs placés au sol	88
Conclusion du chapitre 4.....	104
Chapitre 5– Résultats et traitements	106
Introduction du chapitre 5.....	108
1.Utilisation de la télédétection : comparaison des hivers 2021 et 2024	108
2.Utilisation du drone : comparaison des hivers 2001 et 2024	129
3.Le contrôle terrain : des outils indispensables	145
Conclusion du chapitre 5.....	162
Chapitre 6 – Pertinence de l'approche complémentaire et limites	164
Introduction du chapitre 6.....	166
1.Avantages et limites de chaque méthode	166
2.Pertinence du croisement de chaque méthode.....	182
Conclusion du chapitre 6	188
Conclusion générale	190
Références bibliographiques.....	192
Liste des figures.....	196
Table des matières.....	201
Annexes.....	206

Introduction générale

La compréhension approfondie des phénomènes hydrologiques, notamment les inondations est essentielle. Elle permet de prévenir les impacts environnementaux, mais aussi de protéger les communautés affectées. Les inondations, en particulier celles causées par les remontées de nappes phréatiques, représentent un risque majeur pour les régions côtières vulnérables.

La côte ouest de la Normandie, fréquemment exposée à ces dangers, offre un cadre d'étude privilégié pour examiner l'évolution de ces phénomènes naturels. Dans cette région, caractérisée par son histoire riche en événements hydrologiques significatifs, l'analyse des inondations acquiert une pertinence particulière. Les événements récents ont mis en lumière les sévères répercussions écologiques, économiques, et sociales, stimulant ainsi l'intérêt pour des études détaillées et orientées vers des solutions durables.



Figure 1 : Photo d'une inondation par remontée de nappes à Surtainville (Mesnage, 2024)

L'utilisation de la télédétection dans ce contexte est, nous semble-t-il, très prometteuse. Elle transcende les limites traditionnelles des études de terrain en permettant une collecte de données

sans contact direct, crucial pour les zones difficilement accessibles ou dangereuses. Cette technologie capte des informations à partir de capteurs montés sur satellites ou des drones. Elle fournit des images qui peuvent être analysées pour observer les changements survenant dans les environnements naturels et construits. Dans le cadre de notre étude, la télédétection permettra de suivre avec précision et de manière répétée les zones affectées par les inondations. Elle offre ainsi une vue d'ensemble détaillée et des analyses temporelles des phénomènes étudiés.

L'objectif principal de notre mémoire est triple. Premièrement, il ambitionne de caractériser la pertinence de l'utilisation de la télédétection pour identifier et analyser les inondations par remontées de nappes phréatiques. Deuxièmement, il vise l'examen de la corrélation de ces inondations avec les données météorologiques, dans l'optique de comprendre leur évolution et leur fréquence. Troisièmement, il cherche à valider ces observations par des points de contrôle au sol. L'étude se concentre sur les données de l'année 2024, choisie en raison de la richesse des données disponibles, avec notamment les hauteurs d'eau et les dates d'inondation. Une extension rétrospective à l'année 2021 est intégrée, pour tester la robustesse de l'analyse temporelle par télédétection.

Ce travail est organisé en six sections majeures :

I— Présentation des zones d'étude, où les sites spécifiques de la Côte des Isles et du Havre de Saint-Germain-sur-Ay sont introduits.

II— Contexte et justification de l'étude, expliquant l'importance de l'analyse des inondations dans cette région particulière.

III— Revue de la littérature, fournissant un aperçu des recherches antérieures et des connaissances actuelles sur le sujet.

IV— Acquisition et traitement des données, détaillant les méthodologies de télédétection utilisées et leur mise en œuvre.

V— Présentation et analyse des résultats, discutant des découvertes principales et de leur signification.

VI— Évaluation de l'apport des méthodes complémentaires, résumant les avantages et les limites des approches utilisées.

Ainsi donc, notre étude aspire à enrichir la compréhension des dynamiques des inondations par remontées de nappes phréatiques. Elle répond au besoin d'améliorer les méthodes de prévention et de gestion des risques dans la région étudiée. En contrepoint, nous espérons apporter des éclairages nouveaux sur la méthode d'analyse par télédétection concernant la dynamique des inondations par remontée de nappes dans cette région.

Chapitre 1 – Présentation des zones d'étude

Introduction du chapitre 1

Ce chapitre est consacré à la présentation détaillée du site d'étude choisi pour cette recherche. La sélection du site est une étape importante dans toute recherche géographique, car elle conditionne la pertinence et la portée des résultats obtenus. Ce chapitre se décompose en deux parties principales.

La première partie justifie le choix du site d'étude en mettant en lumière les critères qui ont guidé cette sélection. Ces critères incluent des considérations géographiques, socio-économiques et environnementales qui rendent ce site particulièrement pertinent pour les objectifs de notre recherche.

La seconde partie offre une présentation environnementale exhaustive des six communes constituant notre site d'étude. Chaque commune sera décrite en termes de caractéristiques géohydrologiques, climatiques, et topographiques. Cette présentation vise à fournir une compréhension approfondie du cadre dans lequel se déroule notre étude, soulignant les spécificités et les particularités du terrain étudié.

1.Sélection des sites d'étude

1.1. Justification du choix du site d'étude

Tout d'abord, je suis particulièrement attachée au département de la Manche puisque ma famille proche vit là-bas. Plus particulièrement dans la commune du Rozel (figure 2), où j'ai passé plusieurs années de ma vie. L'existence d'un pied-à-terre familial dans la Manche a favorisé mon choix de ce site comme terrain d'étude.

De plus, lors de mes recherches pour mon sujet de mémoire, j'ai eu l'occasion de rencontrer Chloé Mesnage, qui se concentre sur l'étude de la Normandie, plus particulièrement de la Manche. Elle m'a encouragé à orienter mon travail vers la zone de la côte des Isles et du Havre de Saint-Germain-sur-Ay. Comme mon intention était de me pencher sur les aléas hydrogéologiques, C.Mesnage m'a signalé que le risque d'inondation par débordement de nappes était très prononcé dans ces deux secteurs. En effet, ces espaces sont particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique, ce qui soulève de nombreux enjeux, notamment en ce qui concerne l'agriculture, comme nous l'expliquerons plus loin.

Enfin, choisir six communes comme terrain d'étude peut paraître ambitieux. Mais comme nous analyserons le phénomène de remontées de nappes phréatiques avec l'outil de télédétection, qui présente l'avantage de couvrir des zones très larges, cet objectif nous semble réalisable.

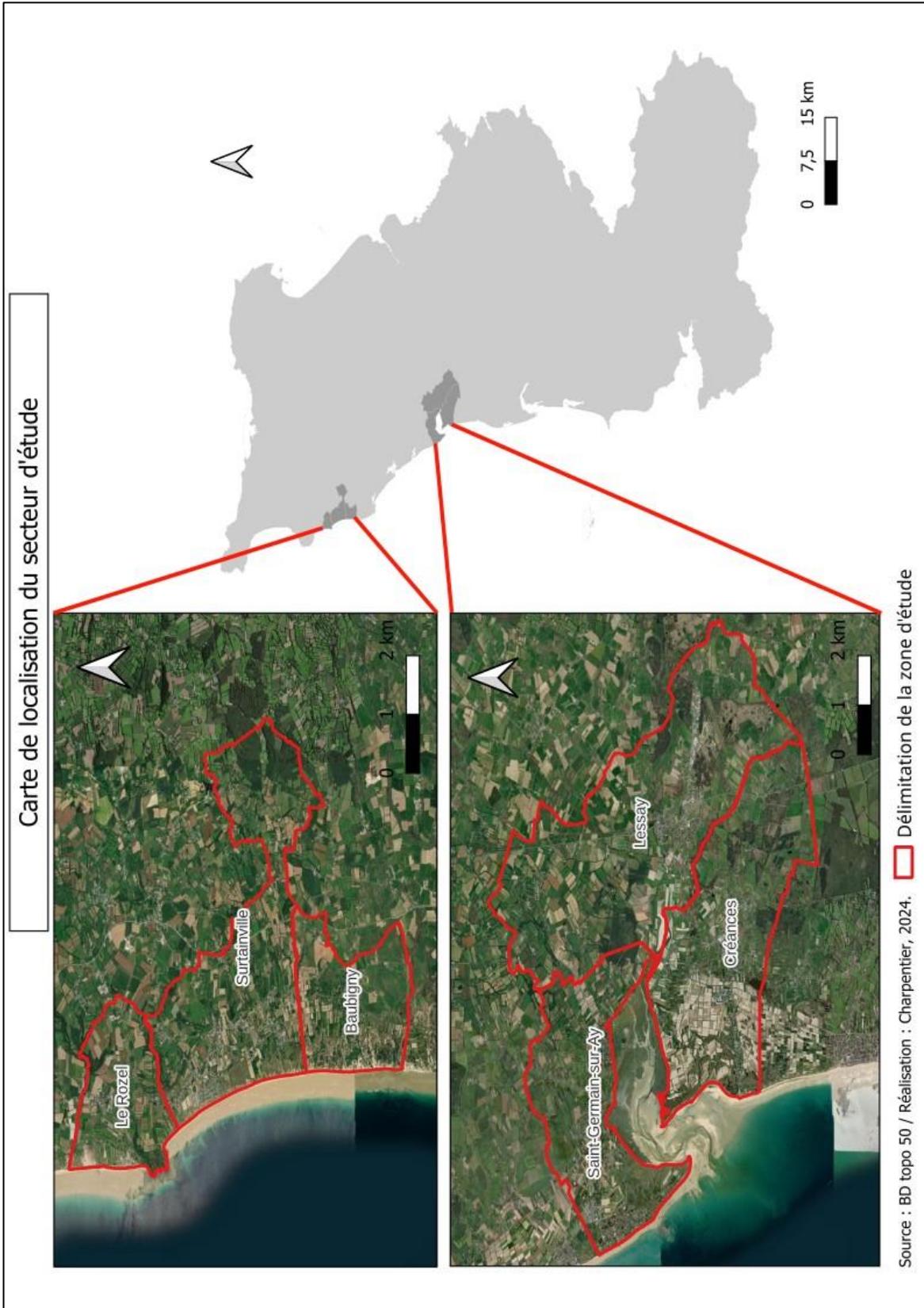


Figure 2 : Carte de localisation du secteur d'étude. (Charpentier, 2023)

1.2. Situation de la Normandie

La Normandie, située dans le nord-ouest de la France, est caractérisée par une diversité environnementale comprenant des côtes, des plaines, des plateaux et des forêts.

La région dispose d'une longue côte le long de la Manche, offrant des paysages côtiers variés. Il existe des zones humides importantes, comme le marais de Vernier, qui offre une grande biodiversité. Plusieurs rivières traversent la région comme la Seine, l'Orne et la Vire. Ces trois cours d'eau principaux contribuent à la richesse hydrographique et à la gestion des ressources en eau.

La Normandie est traditionnellement une région agricole, avec des terres utilisées pour la culture céréalière et l'élevage laitier.

Cette région fait face, à des défis environnementaux tels que la préservation de la biodiversité, la qualité de l'eau, la gestion des déchets et la lutte contre le changement climatique. De fait « Le littoral des départements de la Manche et du Calvados présente un linéaire important de côtes basses ponctuées de marais maritimes dont le niveau topographique se situe bien souvent en dessous de celui du niveau marin de référence, à savoir le niveau marin centennal (celui qui a une chance sur cent d'être atteint chaque année) » (*DREAL, 2015*).

2. Présentation environnementale des six communes étudiées

2.1. Topographie

Le relief de la Manche est plutôt hétérogène. Il s'élève du littoral vers la partie intérieure. Dans le nord du Cotentin, les côtes sont plutôt basses, comme sur la partie ouest du littoral. L'espace arrière littoral représente généralement une topographie marquée comme pour la commune du Rozel sur la figure 3.

Sur la carte altimétrique, on peut voir que sur nos six communes, l'altitude est relativement faible. De fait, elle ne dépasse pas les 90 mètres, et la plupart du reste de la surface est assez faible en altitude de 35 à 0 mètre pour le secteur du Havre de Saint-Germain-sur-Ay (*BD Alti, 2022*). Sur la zone de la côte des Isles, l'altitude est de 90 mètres à l'arrière de la frange littorale et diminue en passant par 45 mètres (en jaune sur la figure 3) à 0 (partie bleue). Nos communes ont des reliefs particulièrement bas et affaissés, ce qui accentue le risque d'inondation.

De nombreuses zones (parties bleues) sont situées sous le niveau marin. En effet, selon la carte des zones potentiellement sous le niveau marin (annexe 8), on observe que les six communes étudiées sont concernées.

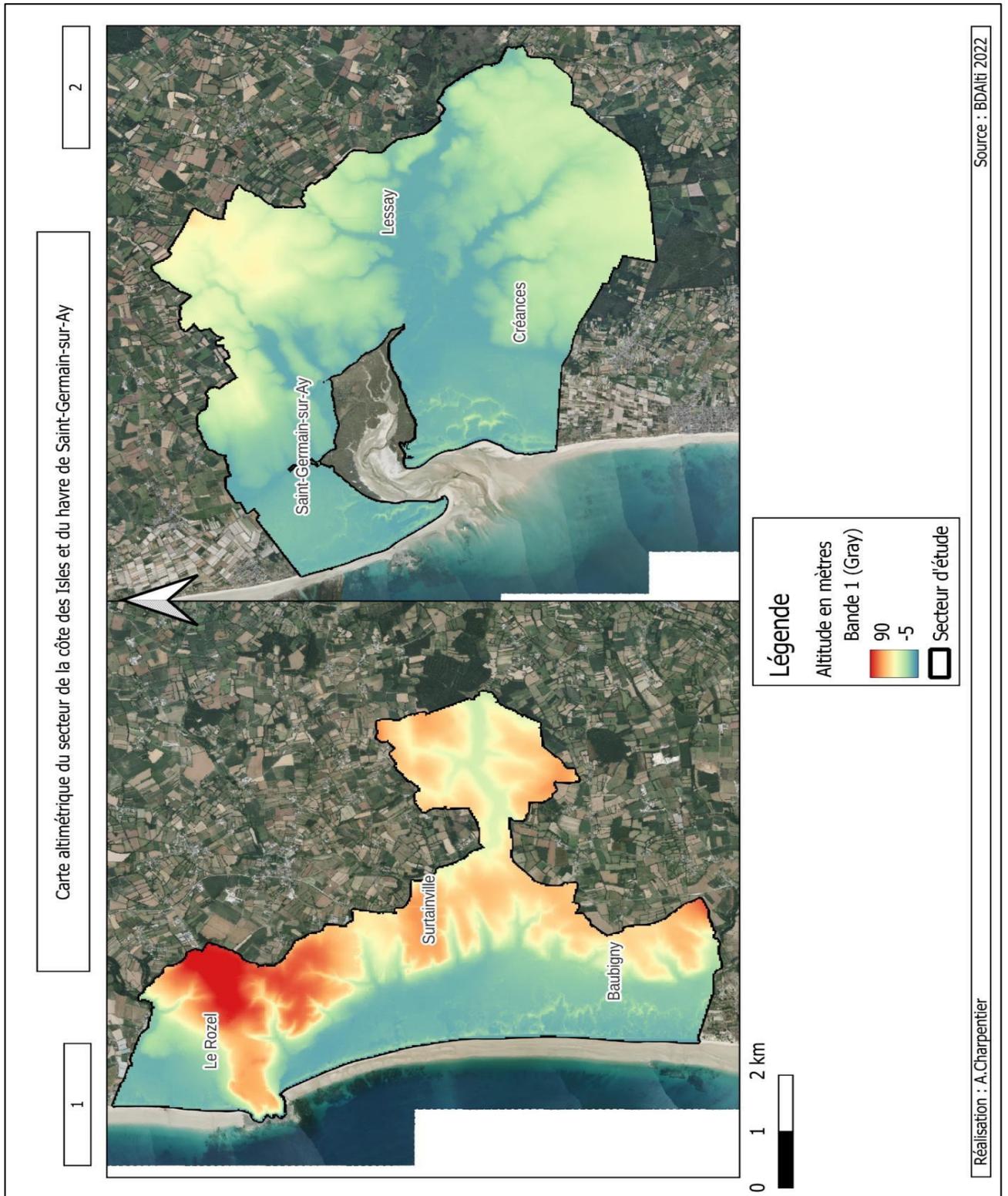


Figure 3 : Carte altimétrique du secteur de la côte des Isles et du havre de Saint-Germain-sur-Ay. (Charpentier, 2023)

2.2. Climat

La Normandie bénéficie d'un climat tempéré du fait des masses d'air provenant de l'Atlantique. Du fait de la proximité à l'océan, on distingue des précipitations à toutes saisons et une amplitude thermique plutôt faible. Les influences océaniques marquent le climat normand.

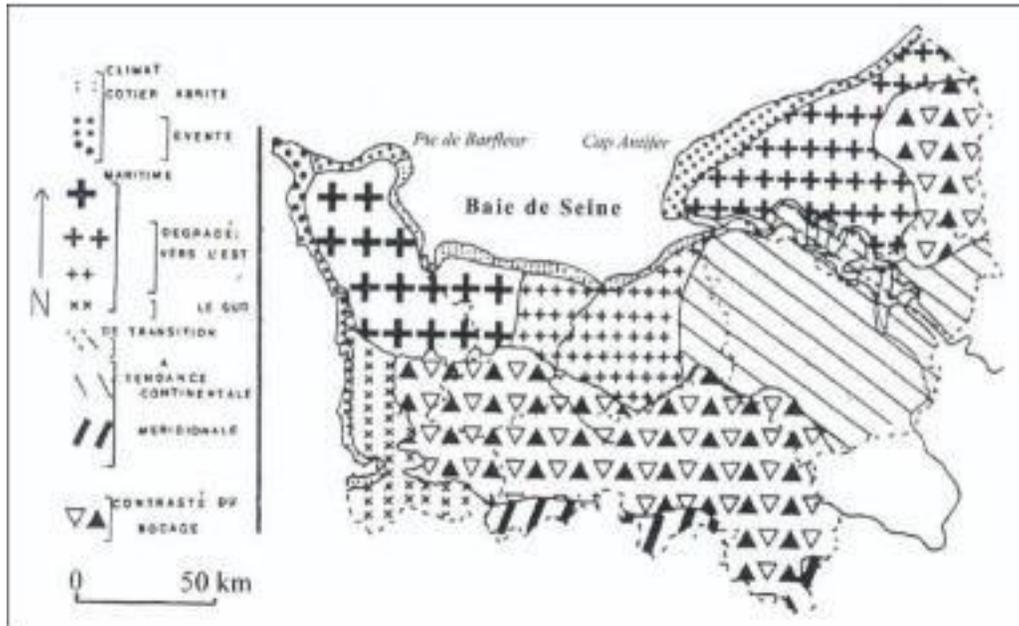


Figure 4 : Croquis des différents types de climats en Normandie (G. Escourrou, 1978)

2.2.1. Le climat particulier de la Manche

Le département de la Manche est diversifié en termes de climat, voir figure 4. Selon la localisation, quelques différences surviennent. La frange littorale possède un climat très éventé et tempéré. Alors que le Cotentin et l'ouest du département de la Manche ont un climat doux, humide et pluvieux. En allant vers le Sud, les conditions sont plus douces, il y a plus de soleil et moins de vent. Les hivers sont très doux et les étés frais. Quand le relief est très marqué (au niveau de la Hague) on constate un fort contraste pluviométrique et thermique. Effectivement, la pointe de la Hague, a un cumul de précipitations annuelles et de jours de gelée et de précipitations plus faibles que les communes à l'intérieur des terres. C'est le climat maritime qui domine à l'intérieur des terres, et le climat côtier sur la frange littorale.

Selon le bulletin de la situation hydrologique de la Normandie en 2023, par la DREAL, la situation des pluies efficaces sur l'année hydrologique est plus élevée que l'année précédente dans le

département de la Manche. Les valeurs au centre de la presqu'île du Cotentin sont comprises entre 500 et 750 mm de pluies efficaces. Concernant le reste du département, les valeurs sont comprises entre 400 et 500.

Sur les côtes le vent est constamment présent. Les vents dominants sont les vents d'Ouest. La force du vent peut aller de calme (<1,5 m/s) à fort (>8,0 m/s) (*Mesnager, 2022*).

2.3. Hydrogéologie

La côte ouest de la Manche est dominée par des formations géologiques à dominante sableuses et alluvionnaires (Voir annexe 9). Une grande partie du département, surtout à l'Ouest et au Nord, est représentée par le Massif armoricain.

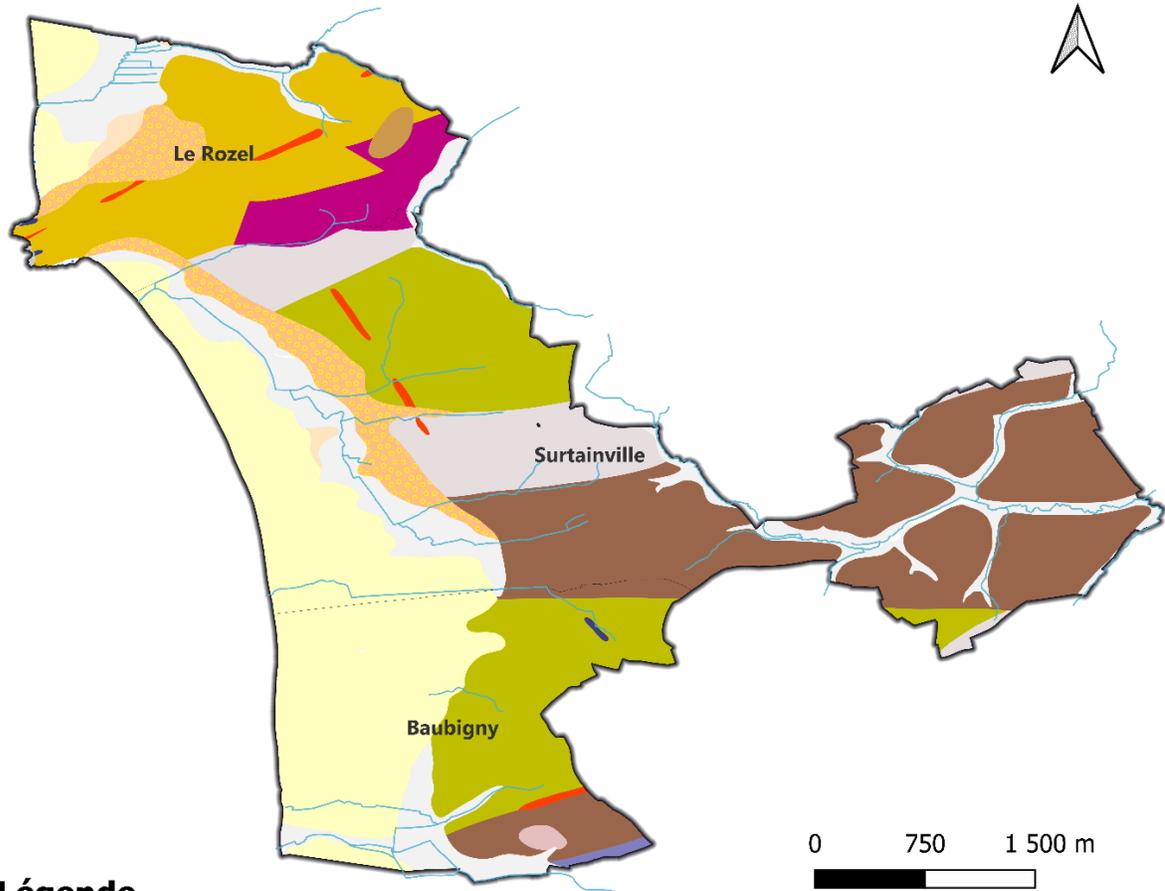
Sur la figure 5, on peut recenser les principaux domaines géologiques de notre terrain d'étude, ainsi que ses grands ensembles hydrologiques.

Les cours d'eau sont principalement situés au-dessus de ces schistes et de ces grès. Leurs affluents dépassent légèrement au-dessus des zones sableuses. « Le département de la Manche présente, comme pour les formations géologiques, une grande variété de ressources en eau souterraine, depuis les petits aquifères de socle granitique du Sud-Manche, jusqu'aux bassins sédimentaires très perméables et à forte porosité du Cotentin », (*DDTM Manche, 2005*). Le terrain de la côte des Isles se trouve sur le socle ancien productif. C'est-à-dire qu'il est essentiellement constitué de roches magmatiques (granite), métamorphiques (schistes) et sédimentaires (schistes et grès). Ces terrains présentent une perméabilité de fissures et d'interstices dans les parties altérées de la roche. Leur transmissivité, c'est-à-dire la vitesse de réaction d'un aquifère face à une perturbation, est comprise entre 10^{-4} et 10^{-3} m²/s.

Côté hydrologie, le réseau hydrographique sur les deux secteurs est assez dominant. De nombreux affluents descendent au niveau des terres. Surtout au niveau du havre de Saint Germain-sur-Ay, on remarque un estuaire très large avec un débit des cours d'eau très faible. « Les dépôts sédimentaires se sont accumulés jusqu'à former une flèche sableuse au nord abritant le havre des vents et des tempêtes. La remontée du flot lors des marées de vives eaux y est très impressionnante » écrit le parc des marais du Cotentin.

Ces particularités hydrogéologiques, décrites ci-dessus, font du terrain d'étude, une zone vulnérable aux inondations par remontées de nappe.

Carte hydrogéologique du secteur de la côte des Isles, Manche



Légende

Ecoulement naturel du cours d'eau

Retenues d'eau naturelles

Secteur d'étude

Géologie

Dunes récentes (Quaternaire)

Alluvions récentes (Holocène)

Dépôts marins sablo-argileux ou argilo-sableux (Quaternaire-Flandrien)

Formations solifluées et colluvionnées (Quaternaire)

Grès (Socle)

"Série compréhensive" grés-ampélique (Ordovicien-Dévonien inférieur)

Ampélites et calcaires (Silurien)

Formation des Conglomérats et grès pourprés (Cambrien)

Schistes et grès (Cambrien indifférencié)

Lamprophyres, microdiorites, diabases (Dévono-Carbonifère ?)

Microgranites porphyriques calco-alcalins (Paléozoïque)

0 750 1 500 m



Source : GEO050K_HARM_050, BRGM / Réalisation : Charpentier, 2024.

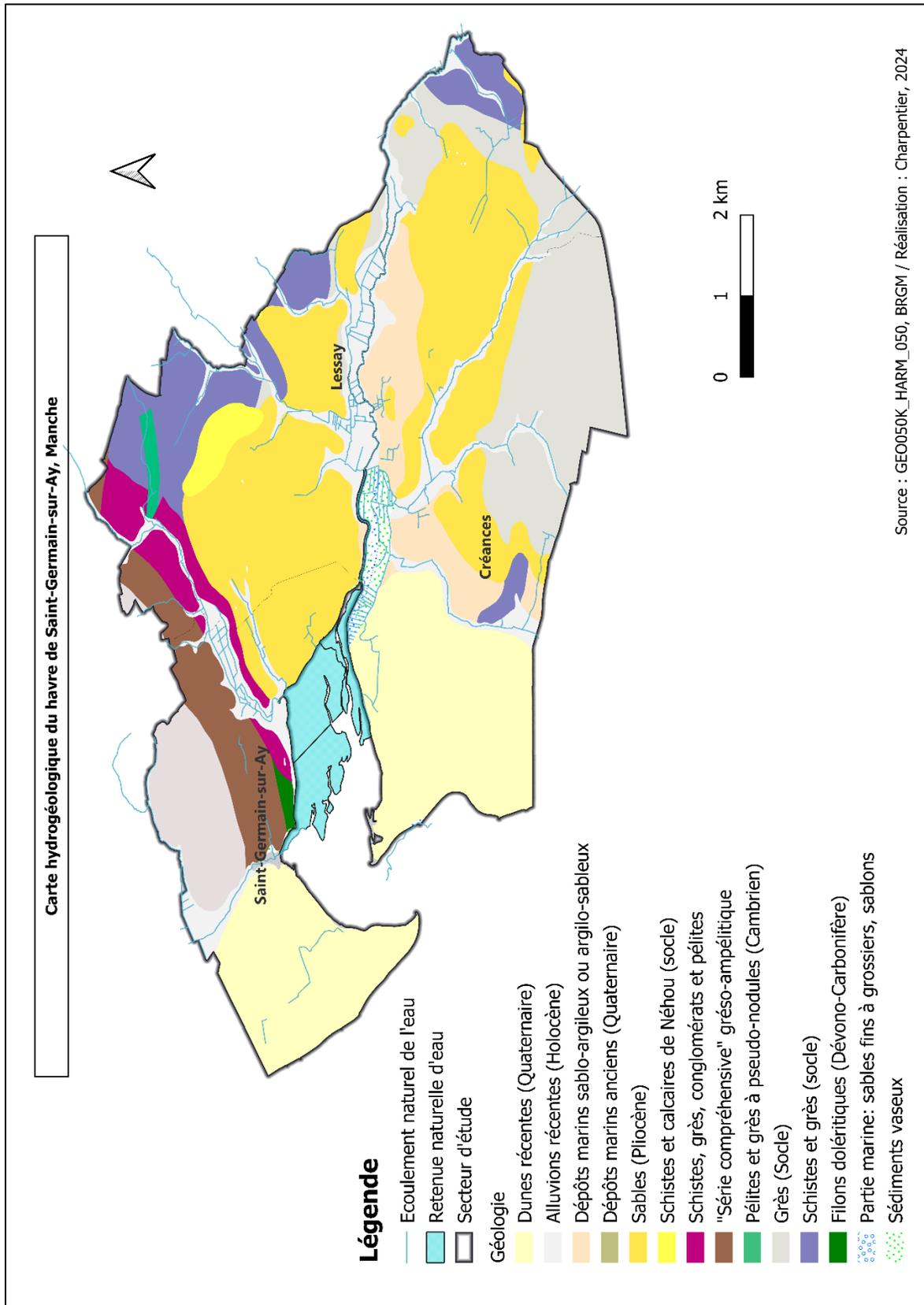


Figure 5 : Cartes hydrogéologiques du secteur de la côte des Isles et du havre de Saint-Germain-sur-Ay. (Charpentier, 2024)

L'hydrogéologie est directement liée à la géologie. Plusieurs facteurs géologiques influencent la capacité des roches à stocker de l'eau, notamment la perméabilité et la porosité.

Les formations sédimentaires telles que le grès, les alluvions et le sable permettent une circulation rapide de l'eau, facilitant ainsi une recharge rapide des nappes phréatiques. Dans certaines conditions, ces formations peuvent également constituer de bons aquifères.

Le calcaire, une autre roche sédimentaire, est souvent altéré par la circulation de l'eau chargée en dioxyde de carbone, ce qui entraîne la dissolution de la roche. Ce processus peut parfois créer des cavités, connues sous le nom de karsts.

Les schistes, bien que généralement imperméables en raison de leur structure feuilletée, peuvent influencer l'écoulement de l'eau en fonction de leur degré de fracturation.

Ainsi, la circulation de l'eau à travers les couches de roches est fortement influencée par les caractéristiques géologiques de chaque couche. En agissant comme réservoir ou barrière, les éléments du sol font partie des éléments déterminant la dynamique des nappes phréatiques.

Conclusion du chapitre 1

Pour conclure, le choix du site d'étude a été motivé par plusieurs raisons. D'une part, un attachement personnel au département de la Manche, où vit ma famille et où j'ai passé plusieurs années, a influencé ma décision. D'autre part, l'encouragement de Chloé Mesnage, spécialiste de la région, m'a orienté vers la Côte des Isles et le Havre de Saint-Germain-sur-Ay en raison des risques hydrologiques prononcés dans ces zones.

L'utilisation de la télédétection, couvrant de vastes zones, a rendu l'étude de six communes réalisables, malgré l'ambition apparente de ce choix. Ainsi, la Normandie, avec sa diversité environnementale et ses défis écologiques, s'avère être un terrain d'étude pertinent pour comprendre et gérer les risques liés aux inondations et au changement climatique.

En effet, l'analyse climatique, hydrogéologique et topographique du terrain étudié met en évidence plusieurs points principaux. La topographie des six communes, caractérisée par de faibles altitudes et des reliefs affaissés, accentue le risque d'inondation. En plus d'une topographie peu avantageuse, le climat tempéré de la Normandie, influencé par l'océan, entraîne des précipitations constantes et des amplitudes thermiques faibles, exacerbant les risques d'inondation dans les zones basses.

Par ailleurs, hydrogéologiquement, la côte ouest de la Manche, avec ses formations sableuses et alluvionnaires, et le socle granitique du Cotentin, présente une perméabilité variée, mais globalement vulnérable aux remontées de nappes phréatiques. La diversité géologique, comprenant des roches magmatiques, métamorphiques et sédimentaires, engendre une complexité dans la gestion des ressources en eau souterraine.

Au final, le réseau hydrographique dense, combiné à des caractéristiques géologiques particulières, rend le terrain d'étude particulièrement sensible aux aléas hydrologiques. Ces facteurs, accentués par les effets du changement climatique, apportent des défis significatifs pour la gestion de l'eau et la prévention des inondations. Cela nécessite une attention particulière pour la protection des activités agricoles dans la région.

Chapitre 2 –Contexte et pertinence de l'étude

Introduction du chapitre 2

Ce chapitre établit les bases sur lesquelles repose cette recherche. Comprendre le cadre global dans lequel s'inscrit notre travail est essentiel pour apprécier pleinement ses objectifs et ses enjeux.

Ce chapitre est structuré en plusieurs parties. La première partie est dédiée aux objectifs de l'étude. Nous y définissons clairement les questions de recherche et les hypothèses qui guident notre investigation, ainsi que les résultats attendus et leur contribution potentielle au champ de la géographie.

La deuxième partie explore le contexte environnemental et socio-économique de la Manche et de la Normandie. Cette partie fournit une analyse détaillée des caractéristiques géographiques, climatiques et écologiques de la région, ainsi que des dynamiques socio-économiques qui influencent son développement. En examinant ces éléments, nous mettons en lumière les raisons pour lesquelles cette région constitue un cadre pertinent pour notre recherche.

1.Objectifs de l'étude

Tout d'abord, ce mémoire a pour objectif d'évaluer l'efficacité de l'outil de télédétection dans le suivi continu des débordements de nappes phréatiques tout au long de l'année sur la côte ouest de la Manche. En outre, il vise à utiliser les images satellites comme une archive temporelle, permettant ainsi d'analyser rétrospectivement les moments d'apparition des débordements et d'observer leur évolution au fil du temps (fréquence et intensité). La recherche sur l'analyse rétrospective de notre phénomène par télédétection permettra de savoir si le processus a évolué au cours des dernières années. Et il va également permettre de localiser ces événements et d'avoir des dates récentes, pour pouvoir observer si des forçages comme la pluviométrie et la marée ont un effet.

Par la suite, il s'agira d'évaluer de manière critique les capacités et les limites de la télédétection en tant qu'outil d'analyse des inondations par remontées de nappes. En identifiant les apports de cette technologie, mais aussi en déterminant ses limites.

Cette approche réflexive vise à consolider la validité des résultats obtenus tout en soulignant les éventuelles lacunes méthodologiques.

Pour finir, contribuer à la thèse de Chloé Mesnage portant sur la vulnérabilité de l'agriculture normande face au changement climatique, sera aussi l'un des objectifs.

Ces buts de recherche convergent, nous en avons l'ambition, vers une compréhension meilleure des impacts du changement climatique dans la région. Ils offrent des perspectives utiles et pratiques pour les prises de décision futures en matière de gestion environnementale et de prévention des risques.

2. Contexte environnemental et socio-économique du secteur d'étude : la côte ouest du Cotentin

La côte ouest du Cotentin, située dans la région normande (figure 6), présente un contexte environnemental et socio-économique complexe. L'agriculture est au cœur des enjeux. Cette zone littorale, caractérisée par ses paysages diversifiés et sa proximité avec la mer de la Manche, est l'endroit où de nombreux défis sont à relever pour éviter l'impact sur la vie des communautés locales.

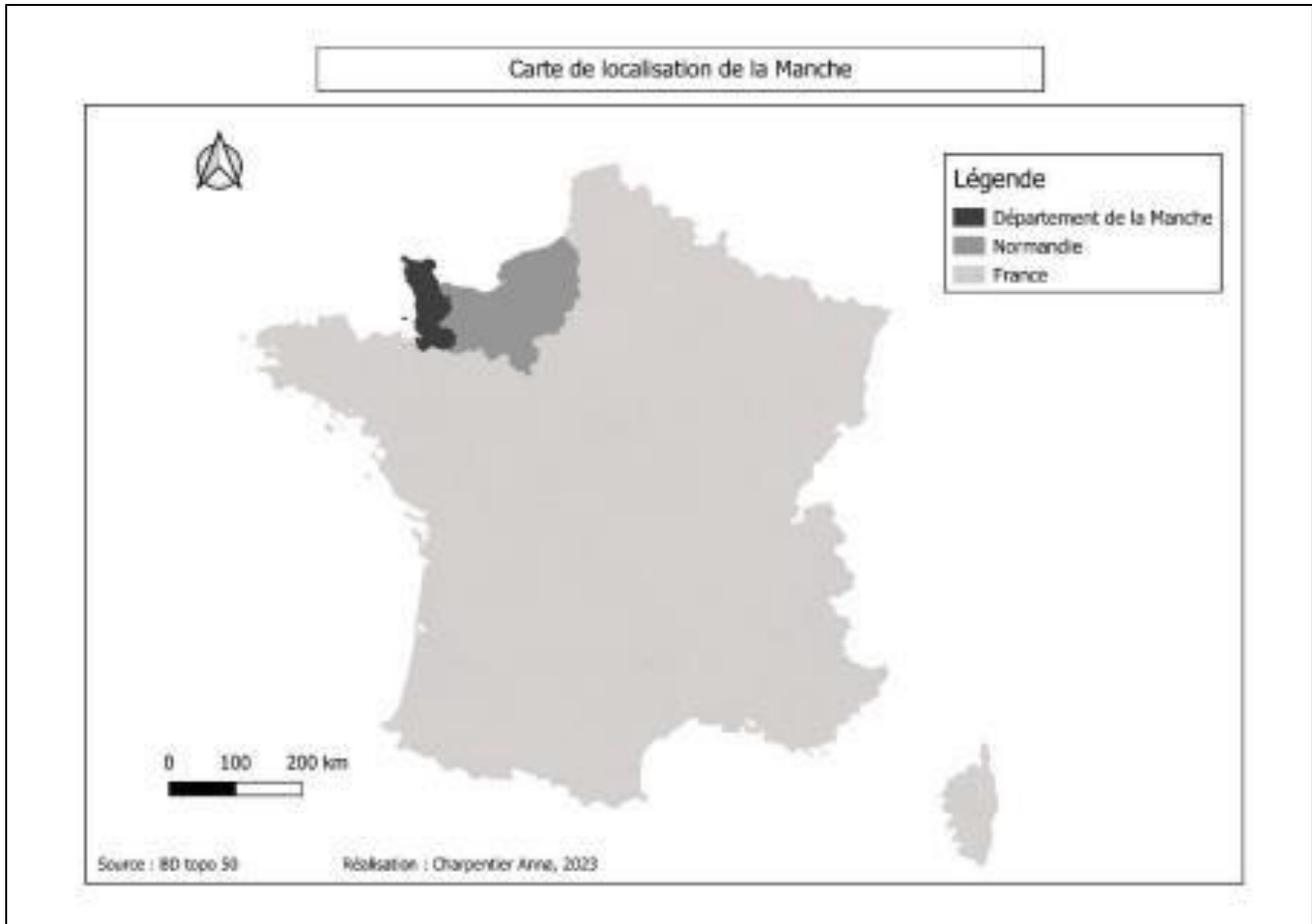


Figure 6 : Carte de localisation du département de la Manche, en Normandie. (Charpentier, 2023)

2.1. L'agriculture normande

L'agriculture occupe 70 % du territoire normand (Région Normandie, 2023), ce qui en fait un pilier essentiel de l'économie régionale. Sur la figure 7, les disparités entre les départements normands concernant le nombre d'exploitations par commune sont visibles. La Manche se distingue par le plus grand nombre d'exploitations agricoles par commune, du fait de sa moindre urbanisation. Cependant, sur la frange littorale, le nombre d'exploitations par commune est plus faible que dans l'intérieur des terres normandes, mais reste majeur dans la Manche par rapport aux autres départements normands disposants d'une façade maritime comme le Calvados. Cette particularité peut s'expliquer par la taille réduite des parcelles dans ces zones. Malgré cela, l'agriculture littorale offre une grande diversité de productions, notamment avec une prédominance marquée du maraîchage et de l'élevage. En effet, 60 % de la superficie maraîchère de la région se concentre sur ces côtes, ce qui en fait une caractéristique distinctive (Mesnage, 2023).

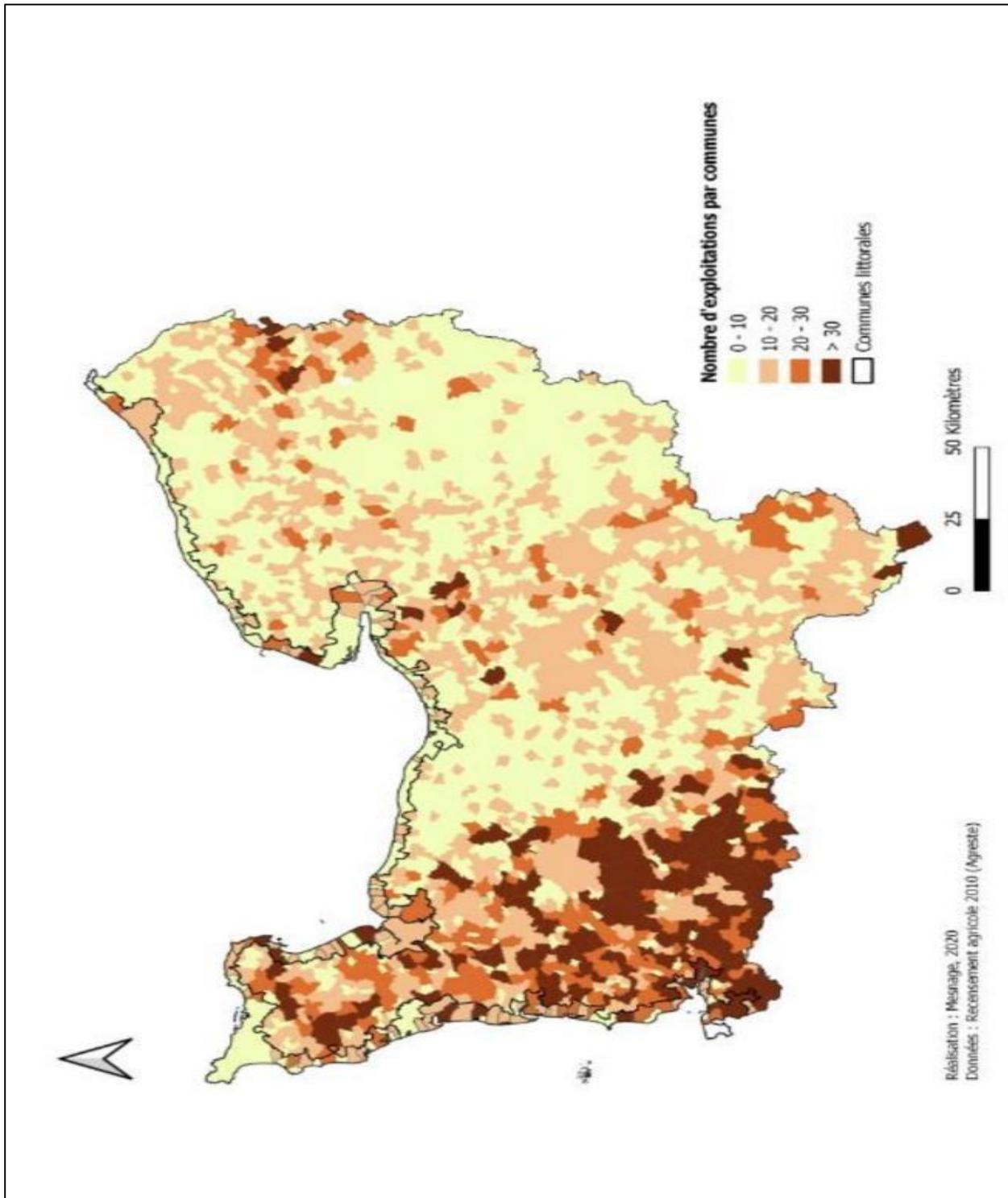


Figure 7 : Carte représentant le nombre d'exploitations par communes en Normandie, en 2010 (Mesnage, 2020)

Les différences observées dans le secteur agricole entre les trois départements normands sont étroitement liées au degré d'urbanisation et aux particularités géographiques des côtes. En effet, la Normandie présente une variété de types de côtes, comprenant des marais et polders, des côtes rocheuses élevées ou basses, ainsi que des côtes sableuses. Ces variations géographiques influent sur la diversité des sols et, par conséquent, sur la gamme de productions agricoles possibles.

Ainsi, la Manche se démarque en tant que département où l'agriculture littorale joue un rôle prépondérant, avec une orientation laitière et légumière, favorisée par la moindre urbanisation et la présence de côtes sableuses basses, particulièrement propices à des activités telles que le maraîchage.

2.2. L'agriculture littorale, spécificité de notre terrain d'étude

L'agriculture occupe une place prépondérante dans l'économie et le tissu social de cette zone côtière. Les terres fertiles du département de la Manche sont principalement dédiées au maraîchage et à l'élevage. Cette agriculture contribue massivement à la production agricole nationale. En effet, le département est le premier au niveau national pour certaines productions légumières : les poireaux : 40 700 tonnes, les navets potagers : 7 000 tonnes et les choux : 13 400 tonnes (Agreste, 2022).

Les six communes que nous présentons sont dominées par deux principales pratiques agricoles : les prairies permanentes (pâturage pour le bétail) et le maraîchage. Les herbages destinés à l'élevage dominent sur pratiquement les six communes (en vert sur les figures 9 et 10).

Cependant, l'ensemble de nos communes, sont aussi très maraîchères. Ces cultures de légumes prospèrent grâce aux sols sableux, c'est pourquoi sur la figure 9 et 10, elles apparaissent (rose) au bord des dunes. Ainsi la surface agricole utile dédiée au maraîchage est certes moins important que celle dédiée à l'herbage, mais d'un point de vue économique, la production de légume occupe une place supérieure étant donné qu'il s'agit d'une production à forte valeur ajoutée. On remarque notamment, lors des sorties sur le terrain, des cultures de poireaux, maïs et carottes. La récolte de ces derniers se fait généralement en hiver (figure 8), et le semis à partir du mois de mars.

Cependant avec un enjeu tel que les inondations, ces cultures se trouvent endommagées lors de la récolte.

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Maïs				 S	 S	 S	 R	 R	 R	 R		
Carotte	 R	 R	 S + R	 S + R	 S + R	 S + R	 S + R	 R	 R	 R	 R	 R
Poireau	 R	 R	 S + R	 S + R	 S + R	 S + R	 S + R	 R	 R	 R	 R	 R

S : Semis
R : Récolte

Figure 8 : Calendrier cultural pour les cultures de maïs, poireaux et carottes (L.Petit, N.Deverre, N.Guibout, J.Oehlmann)

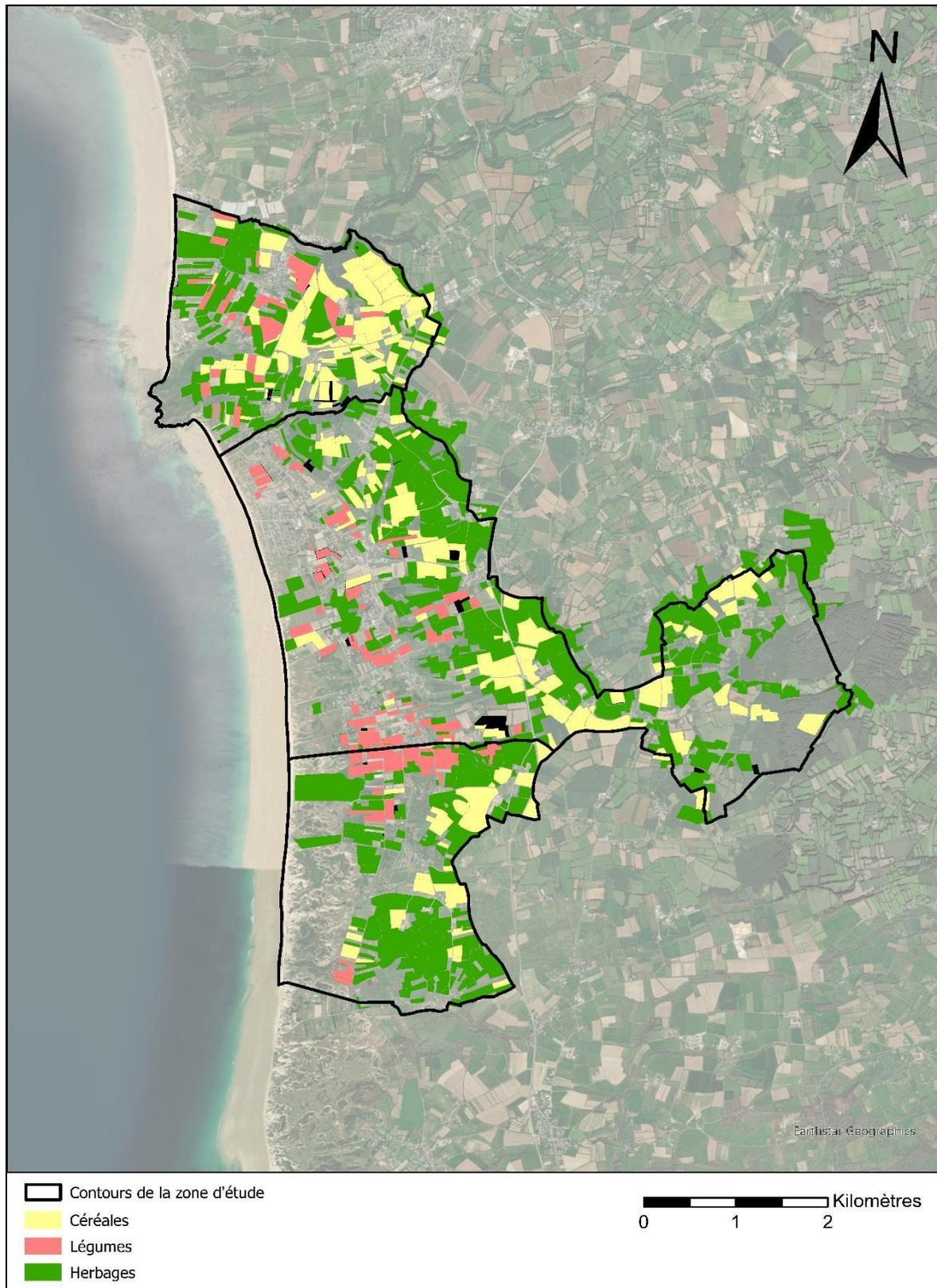


Figure 9 : Carte du registre parcellaire graphique de 2022 sur la côte des Isles (Mesnage, 2024)

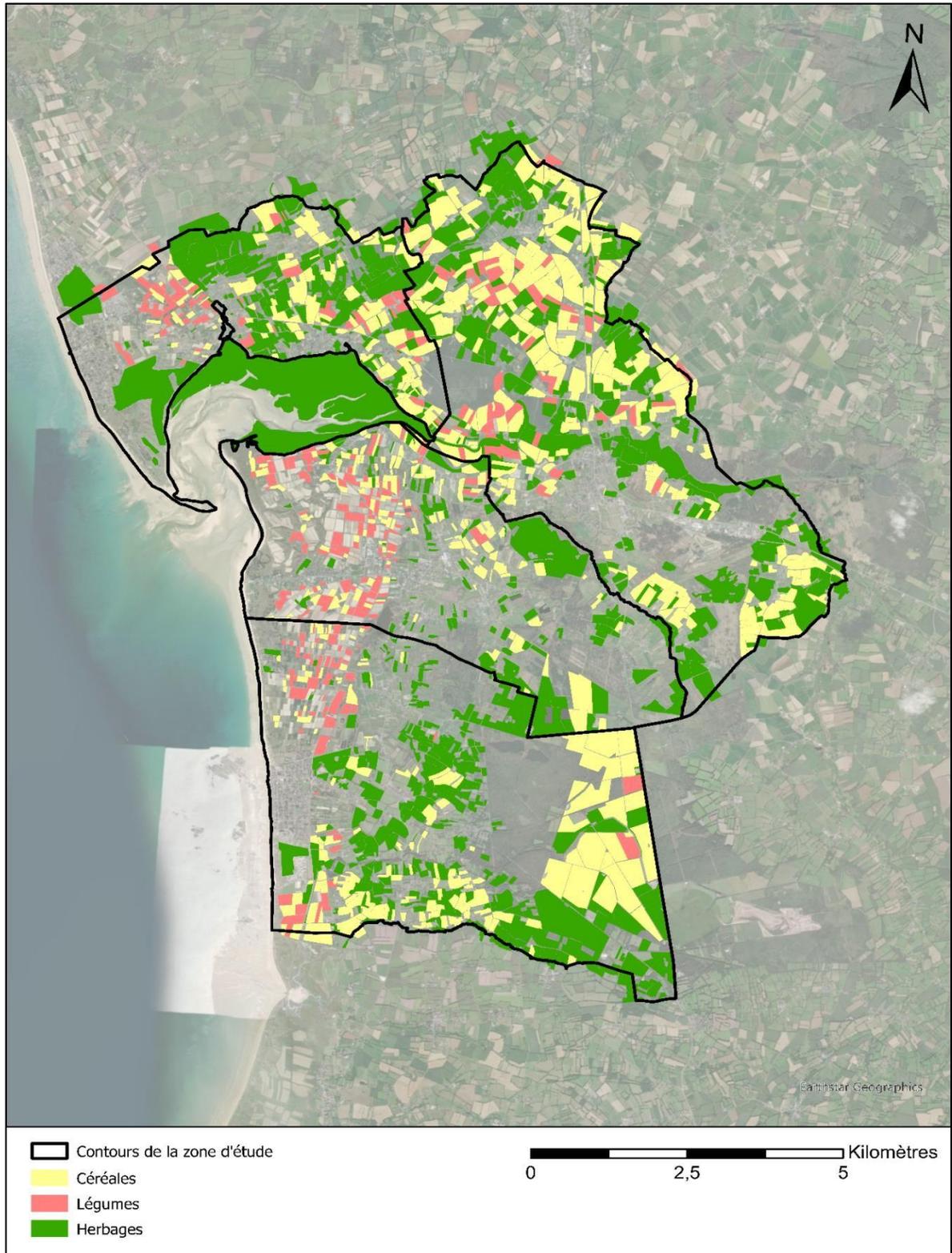


Figure 10 : Carte du registre parcellaire graphique de 2022 au Havre de Lessay (Mesnage, 2024)

2.3. Les défis pour l'agriculture locale

Aujourd'hui, l'agriculture locale est confrontée à des défis croissants liés au changement climatique. Les variations des précipitations, les épisodes de chaleur extrême, les événements météorologiques majeurs et plus intenses participent aux défis auxquels le département, et surtout notre terrain d'étude, doit faire face. Ces divers facteurs influent sur les rendements agricoles, ils mettent en péril la stabilité alimentaire et économique des exploitants et des habitants.

Le risque d'inondation est un des risques qui menace le plus la région, en particulier celui provoqué par les remontées de nappes. Ce phénomène a des répercussions dévastatrices sur les espaces agricoles. Les inondations peuvent endommager les cultures, dégrader les sols et compromettre les infrastructures liées à l'agriculture. Ces effets délétères représentent une menace directe pour la durabilité des exploitations et l'alimentation des communautés rurales. En outre, du point de vue social, l'effet sur la productivité agricole et la perte de revenus est un facteur à fort impact.

Ce risque est accentué par le changement climatique. Les projections du GIEC normand — Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat — sur la ressource en eau illustrent bien ce phénomène. En effet, en été « la diminution du niveau des nappes d'eau souterraines, liée à la diminution de leur recharge et à l'évolution des prélèvements pour les activités humaines, combinée avec l'élévation du niveau des mers, devrait conduire à une intrusion des eaux marines et à une salinisation des aquifères côtiers » (*GIEC normand, 2023*).

Tandis que, en hiver, les inondations devraient se faire plus fréquentes avec l'augmentation des précipitations intenses lors de cette période de l'année. Ainsi, les inondations par débordement de nappes, déjà fréquentes en Normandie, devraient augmenter.

Ces projections mènent donc à réfléchir sur l'avenir de ces espaces agricoles. C'est pourquoi la compréhension de ces enjeux est essentielle pour élaborer des stratégies d'adaptation et de gestion des risques. Le but est de conserver à la fois l'économie du département et le bien-être de la population locale.

C'est pourquoi le projet Rivages Normands 2100, s'engage à analyser les impacts-socioéconomiques des inondations par remontées de nappes et aussi de modéliser les effets du

changement climatique. En effet, ce projet a l'ambition de comprendre les risques de cet aléa et son évolution, mais aussi l'impact socio-économique. Ces inondations ont un effet, sur l'agriculture et son rendement économique, mais aussi sur le vécu des habitants, leur rapport au changement climatique, leur perception des différents types de menaces. Ces enjeux urbains sont multiples et complexes, et comprennent également l'impact sur les infrastructures et les bâtiments, qui provoquent des déformations du bâti, le vieillissement des réseaux et des problèmes sanitaires.

Conclusion du chapitre 2

L'analyse des débordements de nappes phréatiques par télédétection sur la côte ouest de la Manche met en lumière l'importance de cette approche pour le suivi des inondations. La télédétection permet un suivi continu et rétrospectif, offrant une vision précise de la fréquence et de l'intensité des débordements au fil du temps. Cette méthodologie permet d'évaluer l'évolution de ces phénomènes et de mieux comprendre leur dynamique.

Le contexte environnemental et socio-économique de la Manche renforce la pertinence de cette étude. La région est marquée par une diversité paysagère incluant côtes, plaines et marais. L'agriculture, occupant 70 % du territoire, est un pilier de l'économie locale, particulièrement dans les zones littorales où le maraîchage et l'élevage sont prédominants. La Manche se distingue par un nombre élevé d'exploitations agricoles par commune, soulignant l'importance de ce secteur pour la région. Cela met en évidence l'intérêt de ce mémoire de se concentrer sur l'agriculture littorale.

Les sols sableux de la côte ouest favorisent le maraîchage, contribuant à des productions légumières significatives au niveau national. Cependant, cette agriculture est vulnérable aux aléas climatiques, notamment aux inondations par débordement de nappes phréatiques. Ces inondations peuvent endommager les cultures, dégrader les sols et compromettre les infrastructures agricoles, menaçant ainsi la stabilité économique et alimentaire de la région.

Le changement climatique exacerbe ces risques. Les projections indiquent une augmentation des précipitations intenses en hiver et une diminution du niveau des nappes en été, conduisant à des inondations plus fréquentes et à une salinisation des aquifères côtiers. Ces défis nécessitent une adaptation stratégique pour préserver l'économie agricole.

Le choix de ce site d'étude est motivé par l'attachement personnel à la région et les conseils de Chloé Mesnage doctorante travaillant sur les aléas hydrogéologiques en Normandie. Cette étude vise à utiliser différentes méthodes de télédétection pour analyser les inondations actuelles et passées.

En identifiant les capacités et les limites des techniques de télédétection utilisées, cette recherche s'est donnée pour ambition de contribuer à une meilleure gestion des inondations par remontées de nappes.

Chapitre 3 – État de l'art

Introduction du chapitre 3

Ce chapitre présente l'état de l'art de notre étude, offrant une vue d'ensemble des recherches et connaissances actuelles relatives aux phénomènes étudiés. En examinant les travaux antérieurs et les avancées technologiques pertinentes, nous situons notre recherche dans un contexte scientifique plus large.

Le chapitre se divise en plusieurs parties. La première partie se concentre sur le phénomène d'inondation par remontées de nappes phréatiques, en expliquant ses mécanismes, ses impacts et sa récurrence sur notre terrain d'étude. Nous y présentons les conditions géologiques et hydrologiques qui favorisent ces remontées, ainsi que les défis qu'elles posent pour la gestion des ressources en eau.

La seconde partie retrace l'évolution au fil des années de la télédétection. Elle met en lumière les progrès technologiques qui ont permis d'améliorer la collecte et l'analyse des données environnementales.

Enfin, la troisième partie examine les études antérieures sur le sujet, en présentant les principales contributions scientifiques qui ont abordé les inondations par remontées de nappes phréatiques et l'application de la télédétection dans ce domaine.

1. Le phénomène de remontées de nappes

1.1. Explication du phénomène

Selon le CETE Nord Picardie. Dossier 2012 -119 Directive Inondation — Mission n° 6 Remontées de nappes, « les inondations par remontées de nappe sont des phénomènes complexes qui se produisent lorsque le niveau d'une nappe superficielle libre dépasse le niveau topographique des terrains qui la renferment ».

En effet, lorsque le niveau de la nappe phréatique, qui est la couche d'eau souterraine située sous la surface du sol (figure 11), dépasse la surface du sol, une remontée de nappe se produit (figure 12). Ce phénomène peut être causé par des précipitations abondantes, des infiltrations d'eau provenant de cours d'eau adjacents, ou encore d'autres facteurs qui peuvent augmenter le niveau d'eau souterrain. Ces débordements sont généralement provoqués "lorsque la recharge naturelle annuelle de la nappe dépasse celle de la vidange annuelle de celle-ci" (Mesnage, 2022).

Concernant l'agriculture, on considère que l'aléa est déjà problématique avant même que l'inondation ne soit visible dans la parcelle. En effet, parce que les racines des cultures s'enfoncent en moyenne à 30 centimètres dans le sol, la remontée de la nappe jusqu'à cette profondeur peut déjà occasionner des problèmes pour les plantes.

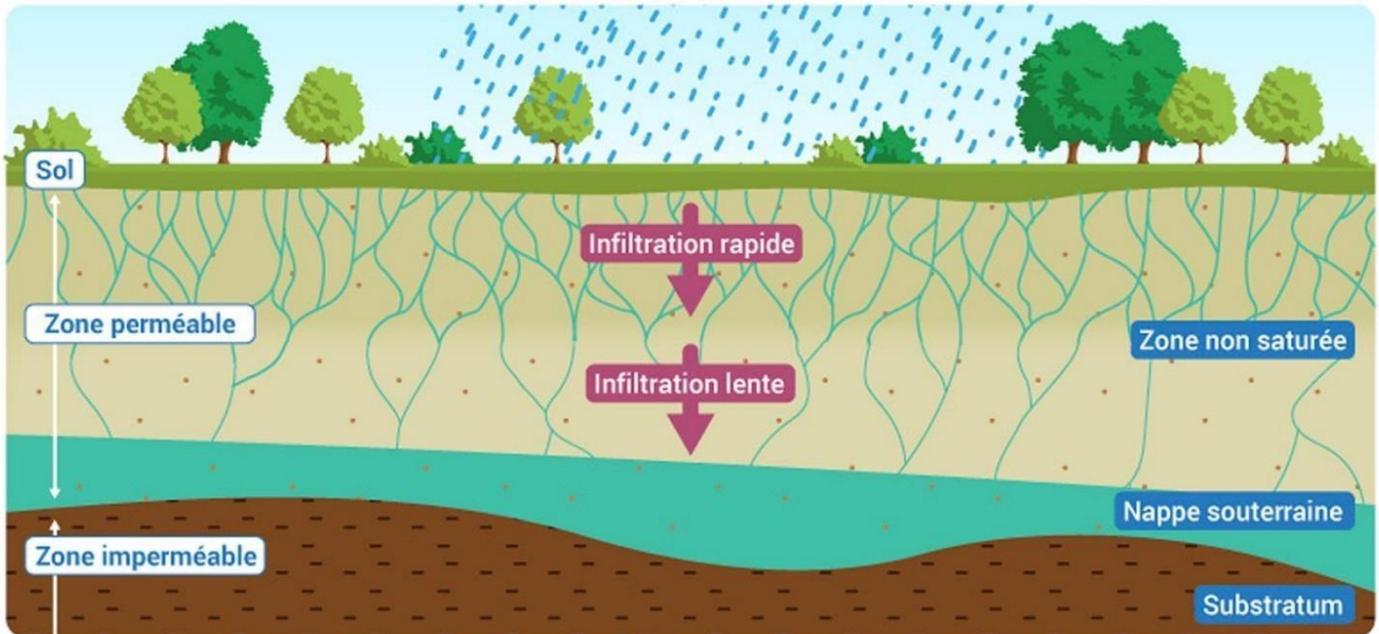


Figure 11 : Schéma d'un aquifère (L.Petit, N.Deverre, N.Guibout, J.Oehlmann)



Figure 12 : Photo d'illustration d'une remontée de nappe phréatique, en février 2024, au Havre de Lessay (L.Petit, N.Deverre, N.Guibout, J.Oehlmann, 2024)

1.2. L'exemple des inondations de 2001

Pour ce travail, l'événement de référence concernant notre aléa est constitué par les inondations de 2001. En effet, les nombreuses inondations par remontée de nappe de 2001 ont généré de nombreux dégâts en Basse-Normandie. Elles ont néanmoins permis une prise de conscience des acteurs locaux concernant cet aléa, auparavant peu mis en avant. C'est le cas de la DREAL —

Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement — qui a cartographié celles-ci. Sur le havre de Lessay la carte figure 13, permet de localiser les inondations de 2001 et le risque pour les réseaux et sous-sols de 0 à 2,5 mètres et le risque pour les infrastructures profondes de 2,5 à 5mètres.

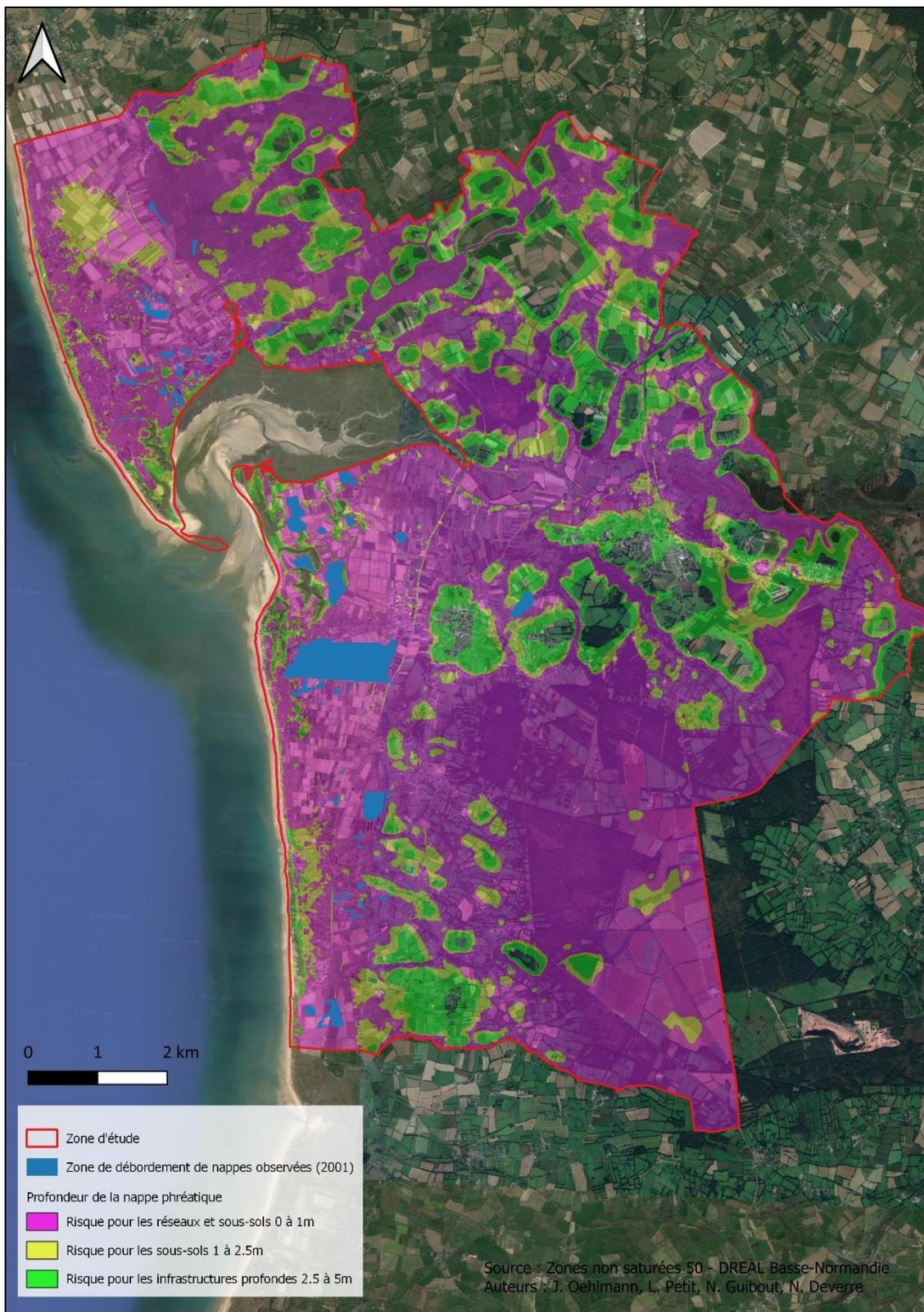


Figure 13 : Carte des débordements de nappes observés en 2001, ainsi que les risques pour les sous-sols (L.Petit, N.Deverre, N.Guiboult, J.Oehlmann, 2024)

L'aléa est très présent et a touché tous les départements de la Normandie. Dans la Manche, c'est le littoral qui a particulièrement été touché. Notamment notre secteur d'étude (figure 76).

1.3. L'importance des propriétés hydrogéologiques

Le fonctionnement des remontées de nappes est très lié aux propriétés hydrogéologiques du sol et du sous-sol. Lorsqu'il y a une surcharge en eau, le niveau de la nappe phréatique augmente, exerçant une pression sur les couches de sol supérieures. Cette pression peut engendrer la remontée de l'eau à travers les pores du sol. Cette pression crée des zones saturées et conduit à l'émergence d'eau à la surface.

On observe certains types d'aquifères plus sensibles que d'autres face à ce phénomène. Ces entités sont généralement de type calcaire ou crayeux présentant une double porosité : de fissure (infiltration rapide) ou de matrice (stockage important et frein au déstockage)" (*BRGM, 2013*).

Ce phénomène se produit généralement en hiver du fait des importantes précipitations et de la baisse des pompages. L'été, la mécanique s'inverse. Les précipitations baissent, les pompages par l'homme augmentent, et la recharge des nappes est, en conséquence, très faible.

1.4. Calendrier de l'aléa

Ces dernières décennies, la région normande a connu de nombreux épisodes d'inondations par remontées de nappes. Ce tableau (figure 14) répertorie les différentes inondations par débordement de nappes vécues dans la Normandie, et plus précisément dans la Manche (*DRIEAT île de France, 2011/Catnat, 2023*).

Année	Mois	Localisation	Cause
1982	Janvier	Cherbourg-Octeville, Granville, Coutances, Avranches, Saint Lô, Caen.	Précipitations importantes
1999	Décembre	Cherbourg, Granville, Avranches, Coutances, Carentan	Précipitations importantes, une marée haute et une élévation du niveau marin
2001	Décembre	Créances Le Rozel, Granville	Précipitations importantes, qui atteignent jusqu'à 300 mm en quelques jours
2014	Janvier	Créances, Le Rozel, Carentan, Saint-lô, Granville	Précipitations importantes, qui atteignent jusqu'à 200 mm en quelques jours
2018	Décembre	Créances, Le Rozel, Carentan, Saint-Lô, Granville	Précipitations importantes, qui atteignent jusqu'à 300 mm en quelques jours
2021	Janvier	La Hague, Le Rozel, Créances, Cherbourg	Les inondations ont été causées par de fortes précipitations, qui ont atteint jusqu'à 200 mm en quelques jours. Ces précipitations ont saturé les sols et les nappes phréatiques, ce qui a provoqué la remontée de l'eau et les inondations.
2022	Décembre	Créances, Le Rozel, Saint-Pair-sur-Mer, Villedieu-les-Poêles, Avranches, Percy-en-Normandie, Condé-sur-Noireau	Précipitations importantes, qui ont atteint jusqu'à 300 mm en quelques jours

Figure 14 : Tableau récapitulatif des grandes inondations dans la région Normande depuis 1980. (Charpentier, 2024).

1.5. La particularité du littoral

En zone littorale, les aquifères ont un fonctionnement qui diffère de la normale. Effectivement, “l’eau souterraine des aquifères côtiers est en continuité hydraulique avec la mer” (Dörfliger N., 2013). Le niveau marin affecte l’écoulement souterrain et les cycles de la marée influencent le niveau de la nappe. Donc on a un double facteur qui va influencer le niveau de la nappe avec les précipitations, tandis que dans l’intérieur des terres il y’a seulement l’effet des précipitations.

Les aquifères littoraux prennent place au sein de formations géologiques variées comme un bassin sédimentaire, les alluvions, un socle fissuré, ou des formations volcaniques et carbonatées karstifiées. Les zones côtières peuvent aussi avoir une topographie relativement plate, ce qui facilite le déplacement de l’eau. La faible altitude de ces zones augmente la vulnérabilité face aux inondations.

La proximité à la mer accentue cette vulnérabilité face au changement climatique qui inclut l’élévation du niveau des mers. Les phénomènes comme la fonte des glaces et l’expansion thermique de l’eau face au réchauffement augmentent ce risque.

Certains littoraux peuvent subir un affaissement du sol qui peut être dû à des activités humaines telles que l’extraction de l’eau souterraine, ce qui aggrave le risque d’inondation. Ces espaces sont généralement assez développés en termes de constructions comme les barrages, les digues et les polders, qui modifient le flux naturel de l’eau et influencent le risque d’inondation.

Climatiquement, la variabilité de ces espaces est assez grande. C’est-à-dire qu’il peut y avoir de nombreux épisodes de tempêtes, de marées et de précipitations intenses, qui provoquent des débordements de nappes.

Toutefois, certains écosystèmes côtiers comme les marais salants ou les mangroves, agissent comme des tampons naturels en absorbant l'eau pour réduire le risque d'inondation. Malgré tout, la dégradation de ces écosystèmes peut augmenter la vulnérabilité aux inondations.

À notre sens, tous ces facteurs spécifiques aux littoraux sont à prendre en compte dans la gestion fine des risques d'inondations.

1.6. Effets des remontées de nappes sur l'agriculture

Les remontées de nappe peuvent avoir plusieurs effets sur l'agriculture, selon leur intensité et leur durée. La problématique principale est la perte des cultures par inondation. En effet, les remontées de nappe peuvent entraîner des inondations temporaires des champs, endommageant les cultures et réduisant les rendements (figure 15). De plus, celle-ci peuvent également perturber les pratiques culturales. Ainsi, les agriculteurs peuvent être contraints de modifier leurs pratiques culturales (figure 8) en raison des remontées de nappe. Par exemple, ils peuvent devoir changer le calendrier des semis ou même décaler la date de la mise au champ du bétail en raison d'un sol trop humide et donc moins portant (Mesnage, 2022). Il est donc essentiel pour les agriculteurs et les décideurs de prendre en compte ces risques dans la gestion des ressources en eau et dans la planification agricole



Figure 15 : Inondation par débordement de nappes dans les parcelles de Surtainville, 2021, (France 3 Normandie).

2.Évolution de la télédétection

La télédétection est une technologie récente visant à acquérir des données de la surface de la Terre à l'aide d'outils de capture à distance, tels que des drones, des avions ou même des satellites. Des capteurs embarqués sur ces engins permettent d'enregistrer différentes parties du spectre électromagnétique, comme les micro-ondes, la lumière visible ou encore le rayonnement infrarouge.

Après un traitement du signal et une analyse, on peut obtenir des informations intéressantes sur divers aspects environnementaux. Ces données sont généralement utilisées pour construire des cartographies mettant en avant les environnements naturels. Ici, la notion qui nous intéresse particulièrement est l'humidité des sols.

2.1. Débuts : 1900 – 1950 : prémices de la télédétection au début du 20^e siècle

Au début de la Première Guerre mondiale, le principal moyen de collecte d'informations à distance était le ballon dirigeable ou fixe nommé le « ballon captif ». Ce ballon était capable de tenir à des vents de 90 km/heure. Équipés de stabilisateurs arrière, ils permettaient de repérer les lignes ennemies et d'orienter les tirs d'artillerie. La France était ainsi « au premier rang des nations dans le domaine de l'observation aérienne. » (*Fabrice Grenard, 2007*). Il y avait également des cerfsvolants munis d'appareils photo dans le but de produire des cartes précises des positions adverses.

À la seconde moitié du XX^e siècle, la télédétection aérospatiale se fait avec le chargement dans les avions de matériel photographique. Cette pratique se développe pendant la Première Guerre mondiale et se poursuit durant la Seconde Guerre mondiale.

C'est à des fins de reconnaissance militaire que les avions embarquent des appareils photographiques, pendant la première guerre de 1914 à 1918. De cette période jusqu'à la fin des années 50, la photographie aérienne s'émancipe. Celle-ci devient un outil indispensable pour la cartographie, la surveillance de la végétation ou encore la recherche pétrolière

2.2. L'ère spatiale (1957-1970)

Les événements commencent réellement à partir de 1957. Un exploit des Soviétiques le 4 octobre

1957, avec la mise sur orbite d'un satellite artificiel nommé Spoutnik-1. Depuis cette lancée, alors que les Américains avaient déjà envisagé de lancer des satellites, une série de différents satellites ont vu le jour. Des vaisseaux spatiaux équipés de caméras à bord, les premiers radars à bord d'avions ou encore des radiomètres-imageurs sont mis au point.

En 1972, le satellite LANDSTAT est lancé. C'est le premier programme spatial d'observation de la terre lancé à des fins civiles. Cette action ouvre les portes de la télédétection moderne. À cette époque, le développement de multiples capteurs et de nouvelles méthodes du traitement des données fait de la télédétection un outil économique et incontournable pour la gestion de la planète Terre.

2.3. L'évolution des capteurs : les années 1970 à 1990

Depuis les années 70, la résolution spatiale des capteurs et leur diversification augmentent de façon croissante. De fait, les multiples domaines du spectre électromagnétique sont exploités au fil des années.

C'est à partir des années 90 que l'utilisation de satellites équipés de capteurs actifs, notamment radars, adopte un rythme de croissance soutenu. Le domaine du visible et de l'infrarouge sont couramment utilisés sur de nombreux capteurs, et apparaissent à bord des satellites. Par exemple, les satellites Landstat ont commencé à fournir des données multispectrales.

2.4. Ère numérique (années 1990-2000)

L'augmentation de la puissance des ordinateurs et la diffusion accélérée fait des données de télédétection un marché concurrentiel. De fait, depuis les années 1990, on peut remarquer la grande importance des technologies dans la mobilité, l'apprentissage, la communication et la créativité, c'est la révolution numérique.

Dans le domaine de la télédétection, les capteurs satellitaires et aéroportés font des progrès considérables, qui permettent d'acquérir des images plus rapides et plus précises. L'intégration des capteurs multispectraux et hyperspectraux a permis d'obtenir des données plus riches en informations spectrales, ouvrant de nouvelles perspectives pour l'analyse environnementale.

Le stockage de données, la transmission et la manipulation des images ont radicalement transformé les méthodes de traitements et d'analyse. Par exemple, l'avènement des systèmes d'information géographique (SIG) a joué un rôle crucial dans la gestion et l'exploitation de ces données. Cela a permis aux géomaticiens d'intégrer ces données dans de multiples applications comme la cartographie, la gestion des ressources naturelles et la surveillance environnementale.

Le numérique a ainsi ouvert de nouvelles perspectives de télédétection.

2.5. Télédétection hyper-spectrale et LiDAR (années 2000 à aujourd'hui)

L'imagerie hyperspectrale ou « spectro-imagerie » est une technologie qui se base sur un grand nombre de bandes spectrales (plus d'une centaine). Elles ont la particularité d'être très étroites. La spécificité des « spectromètres imageurs » (Goetz *et al.*, 1985) est « l'acquisition d'un spectre continu dans une gamme de longueurs d'onde donnée » (*société française de photogrammétrie et Télédétection*, 2013).

Cette gamme correspond généralement aux domaines du visible et du proche infrarouge. Elle permet d'exploiter au mieux l'information, car elle offre une résolution spectrale plus fine que les capteurs multispectraux traditionnels. Cette imagerie facilite la détection précise des caractéristiques du sol ou d'identifier finement des matériaux et substances comme des gaz ou des particules atmosphériques. C'est cette technique unique qui a permis de fournir des données pour la surveillance d'écosystèmes ou de subtils changements environnementaux.

L'imagerie LIDAR ou Light Detection And Ranging, comprendre la télédétection par laser, est une révolution dans un bon nombre de disciplines comme l'archéologie. Des capteurs laser sont déployés depuis les airs ou des unités portables et illuminent la zone à cartographier. Les brèves pulsations lumineuses envoyées se reflètent à la surface du sol et rejoignent l'instrument de mesure. L'enregistrement du temps nécessaire à la lumière pour rejoindre l'appareil de mesure crée un nuage de points. Chaque mesure est convertie en tracé à l'aide d'un GPS. Cet outil permet

de détecter avec précisions les légères anomalies de surfaces et produire des cartes topographiques très fines. « Le prototype LIDAR est créé dans les années 1960 par Hugues Aircraft Company » (*Erin Blakemore, 2019*). Ce prototype a permis de cartographier la Lune au cours de la mission Apollo 15 en 1971.

Ces deux innovations technologiques ont amélioré considérablement le domaine de la télédétection en termes de précision d'images et d'analyse encore plus conséquente des phénomènes terrestres.

2.6. Intégration de l'intelligence artificielle (années 2010 à aujourd'hui).

L'intelligence artificielle (IA), en particulier l'apprentissage automatique, a été intégrée à la télédétection pour automatiser la classification des images et améliorer l'analyse des données.

Plus largement, les algorithmes d'intelligence artificielle ont fait de nombreux progrès, jusqu'à devenir de plus en plus présents dans notre quotidien. Cette nouvelle technologie applicative est très sollicitée pour le traitement et l'analyse de données de manière générale. Dans le domaine de la géomatique, ces méthodes sont moins utilisées, mais tendent vers un avenir concluant. Pour permettre de répondre aux besoins de cartographie thématique ou d'analyses de catastrophes naturelles par exemple, c'est la technologie de « réseaux de neurones convolutifs » (*Arthur Picard, 2022*) qui est utilisée.

Cette technique consiste à entraîner les algorithmes à détecter les objets. Cette phase est déterminante pour obtenir par la suite des résultats de qualité. Une fois l'algorithme entraîné, il est apte à la mise en production. Pendant la phase de production, il extrait les éléments distinctifs voulus de l'image, puis les classe. Par exemple, dans le domaine de la classification des couverts végétaux, l'IA peut distinguer différentes espèces de plantes en analysant les signatures spectrales.

Ainsi, nous considérons que l'intelligence artificielle représente une avancée intéressante, qui offre des outils puissants pour la compréhension et la gestion de notre environnement, ce, à différentes échelles.

3. Études antérieures sur le sujet

3.1. La recherche sur les remontées de nappes

La recherche sur les inondations par remontées de nappes est un domaine en évolution, avec un accent croissant sur la modélisation, la prévision, la gestion des risques et l'adaptation aux changements climatiques. Néanmoins ces travaux portent actuellement essentiellement sur des pays asiatiques et les États-Unis. En Europe les travaux sont peu nombreux et encore plus rares en France.

Plus proche de nous, l'université de Rennes mène un projet d'étude nommé « rivages normands 2100 » depuis 2019. Ce projet est sur 5 ans et le but est d'anticiper l'impact du changement climatique sur l'évolution des risques hydrogéologiques le long des côtes basses de Normandie. Les deux grands objectifs sont de modéliser les effets du changement climatique sur les inondations par les remontées de nappes phréatiques et la migration du biseau salé sur la bande arrière littorale Normande, puis d'analyser les impacts socio-économiques. Néanmoins, il s'agit essentiellement d'un travail de modélisation. La méthodologie de ce mémoire c'est d'utiliser la télédétection pour localiser les débordements de nappe, c'est novateur.

3.2. L'utilisation de la télédétection pour l'étude des remontées de nappes phréatiques

De multiples études ont été publiées sur les inondations de cours d'eau, mais sur les inondations par remontées de nappes, excepté les travaux des Irlandais.

Concernant les inondations, la télédétection est depuis longtemps utilisée pour leur étude. En 2003, Renaud Hostache, Christian Puech et Damien Raclot ont mené une étude sur la caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites radar. Plus récemment, en 2015, R. Hostache a publié des travaux sur l'analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique. De manière encore plus actuelle, il y a deux ans, le travail de Yassine Hammoud sur la machine learning appliqué aux risques naturels (Contribution de l'algorithme supervisé « Artificial Neural Network [ANN] » sous R pour cartographier le risque des inondations, exemple de la partie amont du bassin versant de l'Oued Toudgha) est à souligner. Ces exemples montrent que l'utilisation de l'outil télédétection s'est considérablement développée et améliorée au fil du temps, notamment grâce à

l'automatisation des traitements grâce à des outils tels que le machine learning et des logiciels comme R, facilitant ainsi les travaux.

En ce qui concerne les inondations par remontées de nappe, bien que les travaux soient moins nombreux, ils existent. Les principaux sont des travaux irlandais. Ils ont tenté d'étudier ces inondations en utilisant la télédétection (Campanyà, 2020). En effet, les inondations souterraines liées au karst représentent un risque important dans de nombreuses communautés rurales d'Irlande depuis quelques années. Il était donc nécessaire de quantifier l'emplacement et la probabilité d'occurrence de ces inondations. C'est pourquoi l'utilisation de techniques de télédétection a été privilégiée pour délimiter l'étendue des inondations et surveiller les zones sujettes aux inondations à l'aide d'images satellites du projet Copernicus (Sentinel-1).

L'étude des inondations par débordements de nappes par télédétection est différente des études classiques de télédétection sur l'aléa d'inondation (comme les débordements de cours d'eau). Dans cette étude, l'inondation vient du sol, donc on peut la repérer avant qu'elle soit visible à l'œil nu grâce à l'humidité du sol.

Ce travail, récent et en combinaison avec les technologies d'aujourd'hui de machine learning et d'intelligence artificielle, apportera sans doute une ouverture à la fin du mémoire que nous écrivons.

Ainsi, le travail que nous mènerons se basera sur ces différentes études, et apportera de nouvelles informations sur le phénomène de débordement de nappes dans la Manche par l'usage de la télédétection.

Conclusion chapitre 3

L'étude des débordements de nappes phréatiques constitue un domaine complexe et multidimensionnel, avec des implications environnementales, agricoles et socio-économiques significatives. Le phénomène de remontées de nappes, souvent déclenché par des précipitations abondantes et des infiltrations, représente un risque majeur pour les régions concernées.

Prenons comme exemple les inondations de 2001 en Basse-Normandie. Les propriétés hydrogéologiques des sols jouent un rôle déterminant dans ces phénomènes, en particulier dans les zones littorales où la continuité hydraulique avec la mer amplifie la vulnérabilité. Les impacts sur l'agriculture sont notables, avec des pertes de cultures et des perturbations des pratiques agricoles dues à l'inondation des champs. La télédétection a évolué comme un outil crucial pour l'étude des inondations, offrant des méthodes de surveillance et d'analyse de plus en plus précises. Depuis ses débuts avec les ballons captifs au début du 20e siècle jusqu'à l'intégration des technologies hyperspectrales et LIDAR, la télédétection a constamment innové. L'ère numérique a permis des avancées significatives avec le développement des systèmes d'information géographique (SIG) et l'intégration de l'intelligence artificielle pour l'analyse des données. Les recherches antérieures ont démontré le potentiel de la télédétection pour la modélisation des inondations par débordement de nappes.

Des travaux récents, notamment ceux utilisant le machine learning, ont ouvert de nouvelles perspectives pour la cartographie et la gestion des risques. Le projet "Rivages Normands 2100" en cours à l'Université de Rennes illustre l'importance de la modélisation et de l'anticipation des impacts du changement climatique sur les risques hydrogéologiques.

En somme, cette étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux en utilisant les technologies avancées de télédétection pour analyser les débordements de nappes phréatiques dans la

Manche. Cette approche nous permettra, nous l'espérons, de fournir des informations précises et utiles pour la gestion des risques et la planification territoriale, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et à une réduction des impacts de ces phénomènes naturels, au service des acteurs de la région.

Chapitre 4 – Acquisition et mise en forme des résultats

Introduction du chapitre 4

Ce chapitre décrit en détail l'acquisition et la mise en forme des résultats de notre recherche, en présentant les méthodologies employées pour collecter et analyser les données. Une compréhension précise de ces méthodes est essentielle pour évaluer la rigueur et la fiabilité des conclusions de notre étude.

Le chapitre est structuré en plusieurs parties, chacune consacrée à une méthode spécifique utilisée dans notre recherche.

La première partie traite de l'usage de la télédétection pour la profondeur temporelle. Nous y décrivons les techniques de télédétection mises en œuvre, les types d'images utilisés et les procédés de traitement des données. Cette partie met en évidence comment la télédétection nous permet d'analyser les variations spatio-temporelles des inondations par remontée nappes phréatiques sur notre site d'étude.

La deuxième partie se concentre sur l'usage du drone pour le contrôle terrain. Nous expliquons ici les protocoles de vol, les équipements embarqués et les méthodes de collecte des données sur le terrain. Cette approche complémentaire permet de valider et d'affiner les observations faites par télédétection, assurant ainsi une cohérence et une précision des résultats.

Enfin, la troisième partie présente la méthodologie appliquée aux différents dispositifs posés au sol. Nous détaillons les types d'instruments utilisés, leur implantation sur le terrain et les procédures de mesure et de collecte de données. Elle explique comment ces dispositifs fournissent des informations de contrôle pour compléter les données obtenues par télédétection et par drone.

En combinant ces méthodes, ce chapitre expose la stratégie méthodologique intégrée que nous avons adoptée pour assurer une acquisition de données exhaustive et fiable, permettant ainsi une analyse rigoureuse des phénomènes étudiés.

1.Méthodologie générale

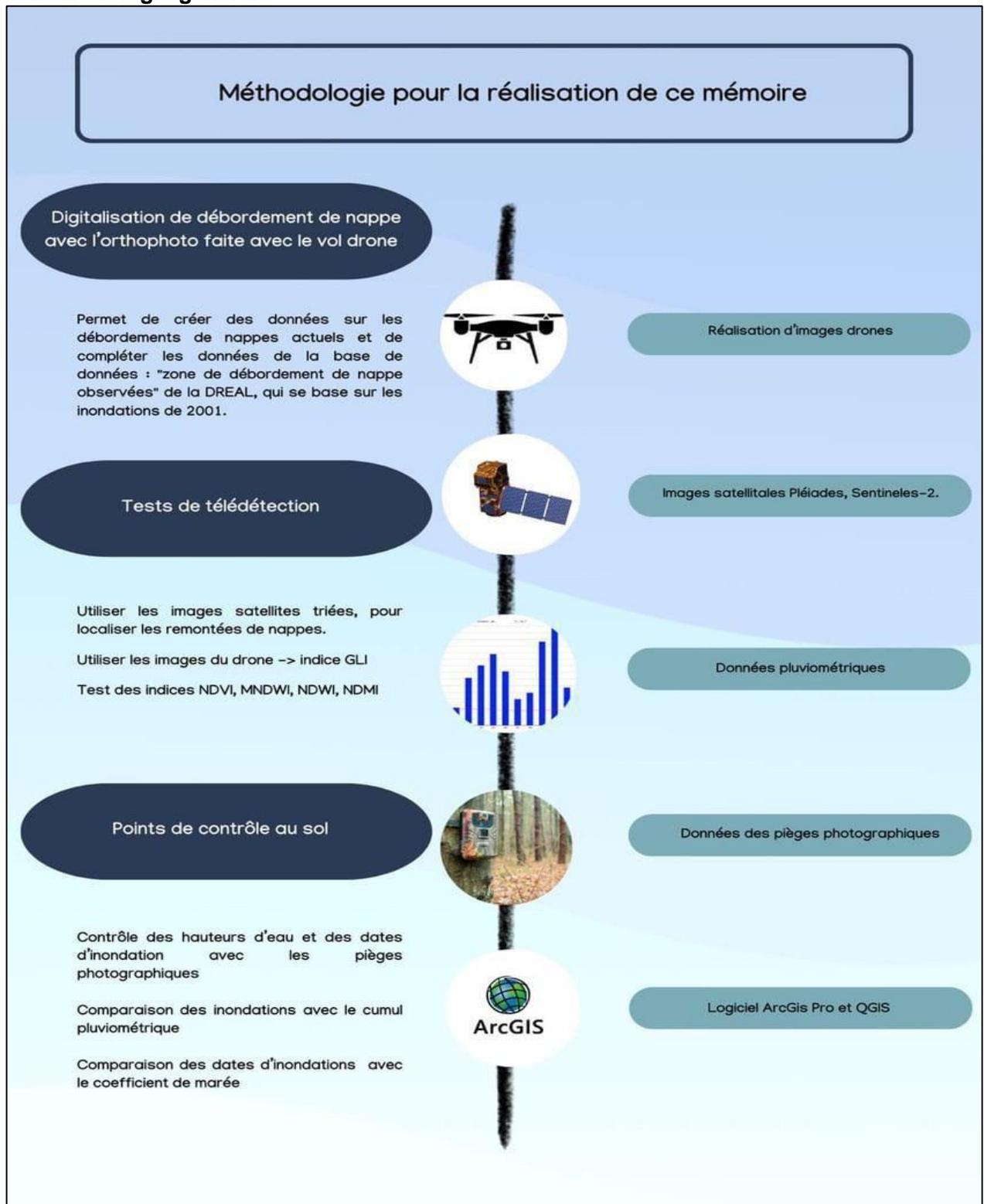


Figure 16 : Schéma de la méthodologie générale. (Charpentier, 2024)

2.L'usage de la télédétection pour l'évaluation de la profondeur temporelle

2.1. Intérêts et caractéristiques des images satellites sélectionnées

Copernicus est un programme européen initié à la fin des années 90. Ce projet collecte des données actualisées quotidiennement, portant sur la planète terre et son environnement. Les données fournies servent au suivi des effets du changement climatique, ainsi qu'à la gestion de la sécurité environnementale et des catastrophes naturelles. Copernicus est géré par la commission européenne et l'Agence spatiale européenne (ESA). ESA est une agence spatiale intergouvernementale fondée en 1975, elle comprend aujourd'hui 22 États membres.

Les **images Sentinel-2** sont utiles dans cette recherche pour deux raisons. Premièrement, elles permettent de suivre historiquement les débordements de nappes observés (date, localisation). Deuxièmement, elles servent à la surveillance continue de cet aléa. Issues du programme européen Copernicus, les images Sentinel-2 sont en open data, c'est-à-dire qu'elles sont en libre accès.

2.1.1. Caractéristiques des images Sentinel-2

Les images Sentinel-2 possèdent 13 bandes spectrales. Ainsi la résolution spatiale des images Sentinel-2 varie selon les bandes spectrales. Pour Sentinel-2, les résolutions spatiales disponibles sont :

- Résolution spatiale des bandes optiques (bandes 2,3,4) :
- 10 mètres pour les bandes 2,3 et 4.

- Résolution spatiale des bandes du proche infrarouge (bandes 8,8A) :
- 20 mètres pour la bande 8A
- 10 mètres pour la bande A

- Résolution spatiale des bandes de l'infrarouge court (11,12) :
- 20 mètres pour les bandes 11 et 12

- Résolution spatiale pour les bandes des autres domaines (1,5,6,7,9 et 10)
- 60 mètres pour les bandes 1, 9 et 10
- 20 mètres pour les bandes 5,6 et 7

2.1.2. Fondements et raisons de l'inclusion de ces images dans ce mémoire

Dans le cadre de cette étude, les images Sentinel-2 ont une importance majeure, pour plusieurs raisons. Pour commencer, les inondations observées se produisent principalement **en hiver**, généralement entre décembre et avril, et peuvent parfois s'étendre jusqu'en mai. Leur durée varie, allant de quelques jours à plusieurs semaines, voire plusieurs mois, selon les années.

La probabilité de pouvoir surveiller ces inondations par télédétection est d'avoir **plusieurs images sur une période donnée**. L'occurrence de passage du programme copernicus étant de 5 jours, ceci est suffisant pour trouver des images aux dates d'inondations.

La **résolution** des images Sentinel-2 est comprise entre 10 et 60 mètres. Une telle résolution permet de faire de simples traitements comme des **combinaisons de bandes** ou le calcul d'**indices spectraux**. Ces traitements facilitent l'observation d'entités géographiques comme les surfaces en eau ou la végétation. Tous les traitements utilisés dans cette étude sont détaillés dans Le chapitre 4, partie 2.2.

Le but d'utiliser ces images est de **comprendre la dynamique temporelle des inondations par remontées de nappes**, depuis 2024. Des années de référence en termes d'inondations sur la côte Ouest de la Manche comme 2001 et 2021 vont servir comme année de référence pour ce travail.

La zone d'étude choisie est de taille considérable et comprend six communes. La **fauchée** capturée par le programme Sentinel-2 est de 290 kilomètres, ce qui est suffisant pour étudier un espace comme le nôtre.

Pour finir, la **disponibilité** de ces images en fait un atout. Effectivement, ces données sont téléchargeables gratuitement via l'interface Theia.

2.1.3. Caractéristiques des images Pléiades

Les **images pléiades** ont une résolution spatiale précise, de l'ordre de 0,50 à 2 mètres. Elles sont récupérables via l'organisme Theïa, à des tarifs abordables pour les établissements publics. Des images satellites sont prises tous les 2 à 4 jours sur les territoires survolés. Elles possèdent 5 bandes spectrales dans la gamme du visible, du proche infrarouge et du panchromatique. Ce programme ayant débuté en 2012, nous disposons actuellement de 12 années de données de grande qualité, fournissant des images à haute résolution.

Plus précisément, les images Pléiades sont acquises "à bord du satellite à 70cm de résolution pour le mode spectral **panchromatique** (noir et blanc) et à 2,8 m de résolution pour le mode **multispectral** (couleur). Elles sont ensuite ré-échantillonnées au sol à 50 cm et 2 mètres chacune. Pour rendre les produits robustes aux différents traitements informatiques qui seront réalisés ensuite" (*dinamis.data-terra.org*).

L'entreprise qui délivre ces images est Airbus. C'est une société spécialisée dans les systèmes spatiaux et les services géospatiaux. Les satellites Pléiades sont gérés par le Centre national d'études spatiales (CNES) en France.

Les images **pléiades** possèdent cinq bandes spectrales :

- Panchromatique
- Bleu
- Vert
- Rouge
- Proche infra-rouge

Elles sont ensuite délivrées sous différents formats. Il y a le format **fusionné** : C'est un produit qui intègre l'information spectrale du multispectral et du panchromatique. C'est-à-dire que ces deux bandes spectrales sont déjà fusionnées. Ce processus est appelé un affinage panchromatique ou pansharpening. Le but est d'avoir en une seule image la résolution de la bande panchromatique

et la couleur de la bande multispectrale. Puis le format **bundle** qui délivre les images multispectrales et panchromatiques séparément. Le pansharpening est alors effectué par l'utilisateur.

Le choix de ces images pour cette recherche vient compléter celui des images Sentinel-2. Avec les Pléiades, l'avantage est d'avoir une **résolution spectrale** beaucoup plus fine que les Sentinelles. La **multispectralité** de ces images permet d'étudier différents aspects de l'environnement et notamment les surfaces en eau pour ce travail.

2.2. Traitements utilisés sur ces images

2.2.1. Le pré-traitement

2.2.1.1. Pré-traitement des images Sentinel-2

Pour les images Sentinel-2, le pré-traitement n'est pas nécessaire car elles sont téléchargées au **niveau L2A**. C'est-à-dire qu'il y a déjà une **correction atmosphérique et radiométrique** sur ces images.

2.2.1.2. Pré-traitement des images Pléiades

Pour les images Pléiades, **plusieurs étapes de pré-traitement** sont indispensables avant de pouvoir les utiliser. La figure 17 ci-dessous, réalisé par S.Griffin, résume parfaitement ces différentes étapes.

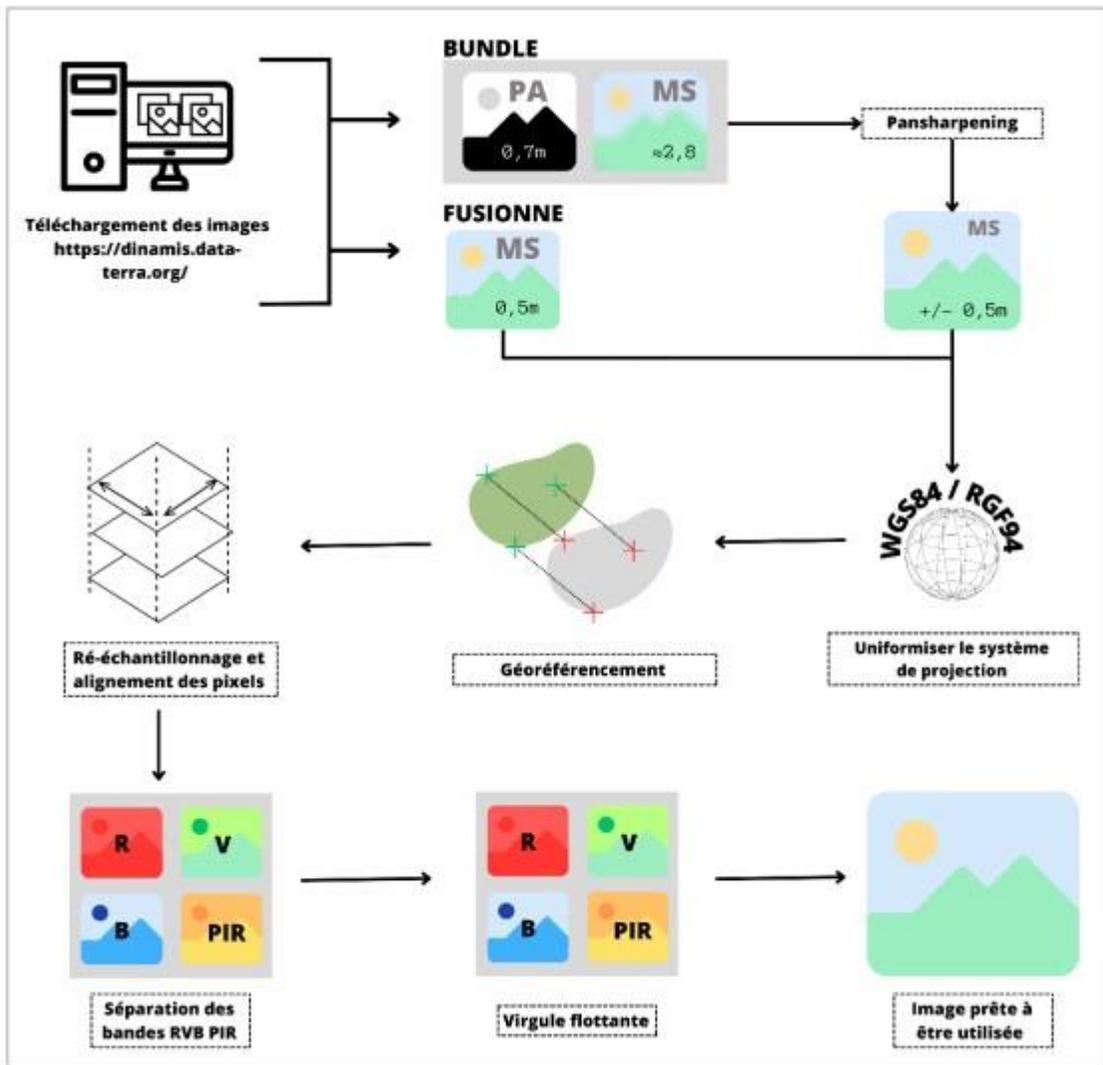


Figure 17 : Étapes de pré-traitement des images Pléiades. (S.Griffin, 2023)

2.2.2. Les combinaisons de bandes spectrales

Les principales **bandes spectrales** utilisées en télédétection sont les RVB, l'infrarouge, et le proche infrarouge.

Il est possible de combiner différentes bandes spectrales d'images, c'est une approche appelée la synthèse. Cette technique peut être soit additive, soit soustractive.

La **synthèse additive** consiste à additionner différentes bandes spectrales pour créer une nouvelle image (figure 18). Cette nouvelle image créée peut mettre en évidence certaines caractéristiques de la surface terrestre. Par exemple, en combinant les bandes dans le spectre

visible et de l'infrarouge proche, on obtient des images qui mettent en évidence la végétation. En effet, les plantes réfléchissent fortement la lumière dans ces gammes spectrales.

Quant à la **synthèse soustractive**, celle-ci consiste à soustraire une bande spectrale d'une autre pour créer une nouvelle image. Cette méthode est particulièrement utilisée pour mettre en avant les différences ou les changements entre deux bandes spectrales. Par exemple, si l'on soustrait une image dans le rouge d'une image dans le proche infrarouge, on peut obtenir une image qui met en évidence la santé des végétaux. En effet, la chlorophylle absorbe la lumière rouge et réfléchit la lumière dans le proche infrarouge.

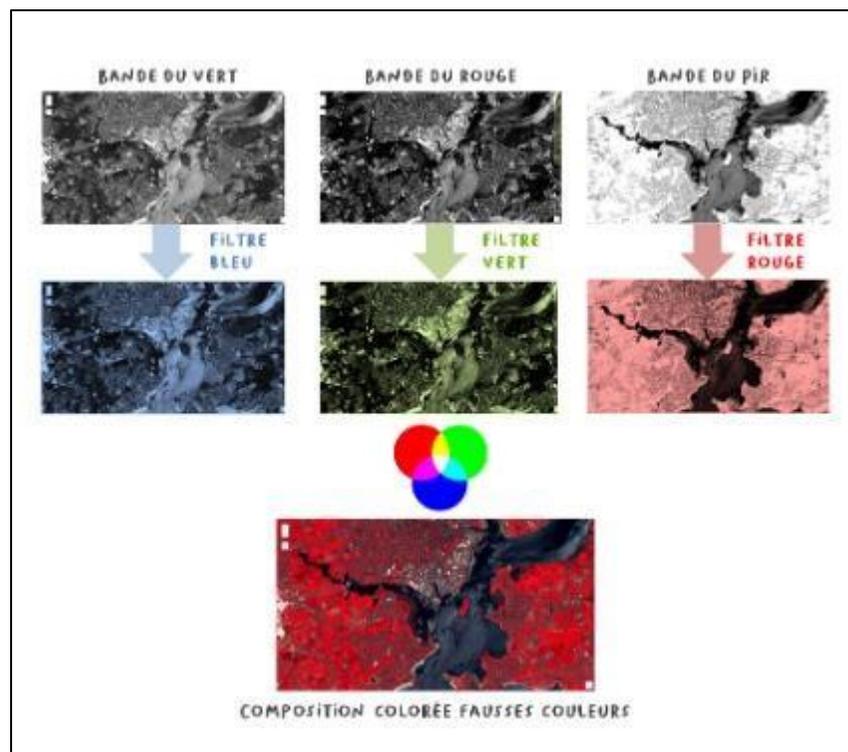


Figure 18 : Composition colorée assemblant les bandes du vert, du rouge et du proche infrarouge. (cms.geobretagne.fr)

2.2.3. Les indices

Afin d'augmenter la précision des données extraites de la combinaison de bandes spectrales, on peut utiliser des indices. Un **indice** "c'est essentiellement un rapport de valeurs dans différentes bandes spectrales pour mesurer le degré élevé ou faible de réflexion d'une caractéristique

particulière” (Eos data Analytics). C’est pourquoi pour la réalisation de ce mémoire nous allons utiliser de simples indices pour voir la **cohérence des inondations avec les images satellites**.

Ces indices vont aussi permettre de visualiser le **taux d’humidité dans le sol**.

Par exemple, je vais utiliser l’indice qui permet de calculer le taux de chlorophylle des plantes. C’est l’**indice de végétation par différence normalisé (NDVI)**. Celui-ci est très utilisé pour évaluer la santé et la vigueur de la végétation. Il mesure la différence entre la réflectance dans les bandes rouges et proches infrarouges.

Son expression est la suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Rouge}) / (\text{NIR} + \text{Rouge})$$

Résolution images Sentinel-2 : 10 mètres

Résolution images Pléiades : 0,5 mètres

Ou NIR représente la réflectance dans le proche infrarouge et Rouge dans la bande rouge.



Figure 19 : Indice NDVI sur l’image Sentinel-2 du 15 Février 2021. (Charpentier, 2024)

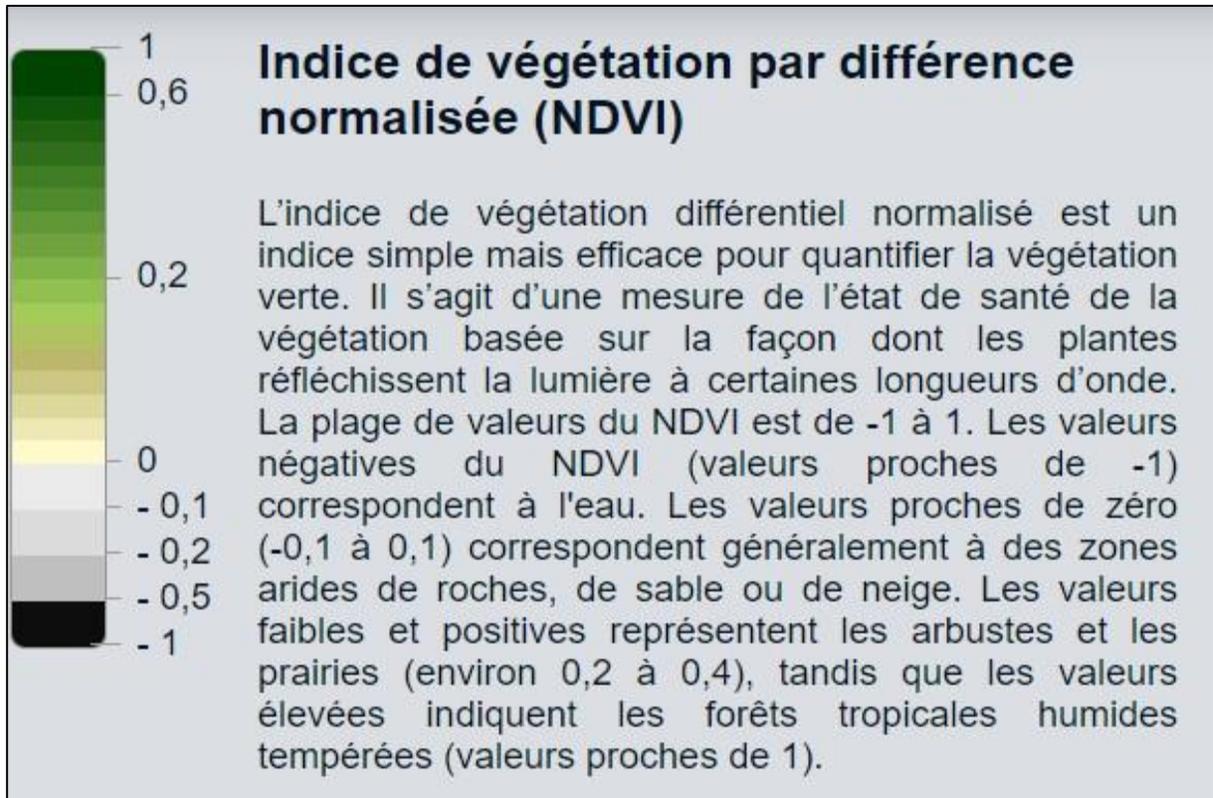


Figure 20 : Caractéristiques de l'indice NDVI (browser.dataspace.copernicus)

Un autre indice qui peut être utile est celui qui calcule le taux d'humidité dans le sol. L'indice d'humidité par différence normalisé (NDMI) est sensible aux différents niveaux d'humidité dans la végétation. Il utilise les canaux SWIR et NIR dans le but de créer un équilibre conçu pour atténuer l'éclairage et les effets atmosphériques.

Voici son expression :

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{SWIR1}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1})$$

Résolution images Sentinel-2 : 20 mètres

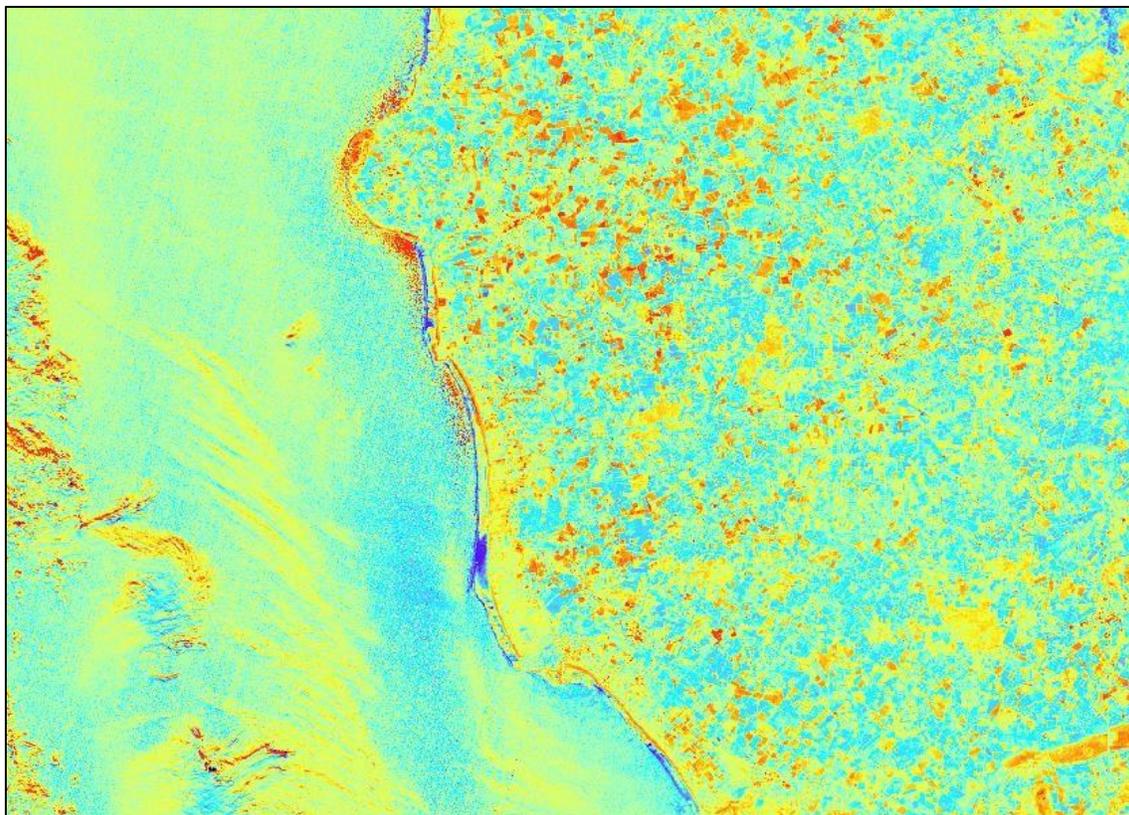


Figure 21 : Indice NDMI sur l'image Sentinel-2 du 15 Février 2021(Charpentier, 2024)

NIR est la valeur de pixel du proche infrarouge et SWIR 1 les valeurs de pixels du canal d'onde courte infrarouge 1.

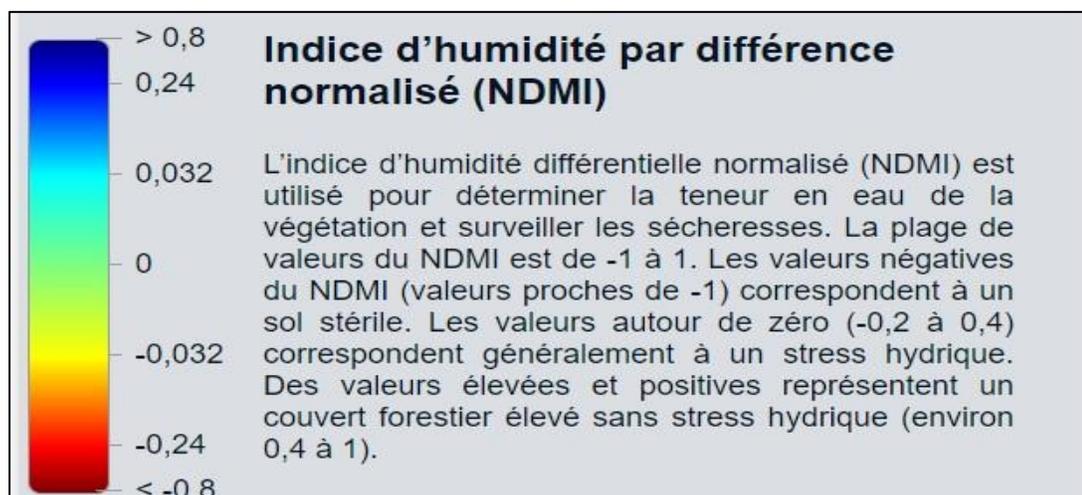


Figure 22 : Caractéristiques de l'indice NDMI. (browser.dataspace.copernicus)

Un troisième indice est l'indice modifié de l'eau par différence normalisée (MNDWI). Celui-ci utilise les canaux verts et SWIR pour améliorer les entités hydrographiques ouvertes. Cependant la résolution est de 20 mètres, ce qui ne permet pas une analyse fine des entités hydrographiques.

Son expression est :

$$\text{MNDWI} = (\text{vert} - \text{SWIR}) / (\text{vert} + \text{SWIR})$$

Résolution images Sentinel-2 : 20 mètres

Le vert est la valeur de pixel du canal vert et le SWIR la valeur de pixel du canal d'onde courte infrarouge.

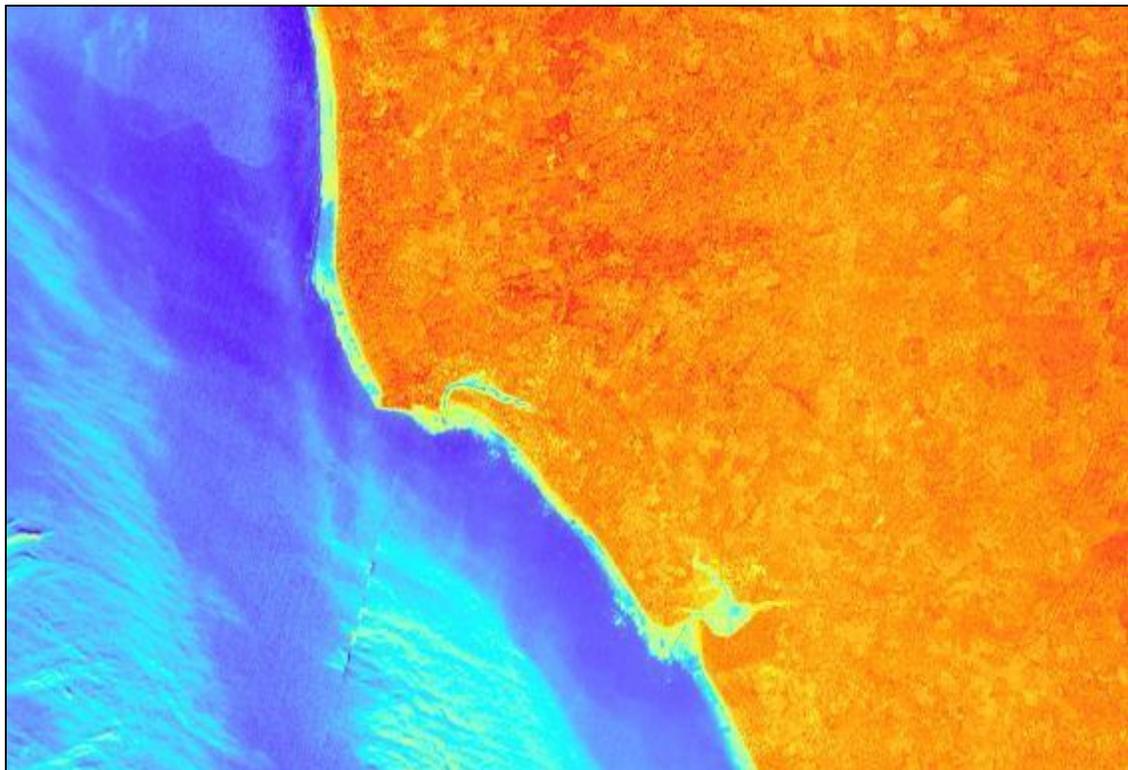


Figure 23 : Indice MNDWI sur l'image Sentinel-2 du 15 Février 2021. (Charpentier, 2024)

L'indice de différence d'eau normalisé (NDWI), sera utilisé en complément de l'indice MNDWI dans cette étude. Celui-ci est utilisé pour la cartographie des masses d'eau, mais n'est pas assez précis pour les inondations peu profondes et de petites tailles. Cependant, la résolution est de 10 mètres contre 20 mètres, pour l'indice MNDWI. Le croisement de ces deux indices, peut permettre une meilleure visibilité du phénomène étudié.

L'indice MNDWI est un dérivé de l'indice NDMI. C'est Xu et al. qui l'ont modifié dans le cadre d'une étude pour la détection optique en 2006. C'est l'utilisation du moyen infrarouge qui a été choisi à la place du proche infrarouge, pour former l'indice MNDWI. En effet, avec ce nouvel indice

“Les corps d'eau sont mieux délimités avec une plus grande discrimination entre les surfaces sèches et celle qui sont en eau” (Laventure.S, 2009).

Voici son équation :

$$\text{NDWI} = (\text{vert} - \text{NIR}) / (\text{vert} + \text{NIR})$$

Résolution images Sentinel-2 : 10 mètres

Le vert est la valeur de pixel du canal vert et le NIR la valeur de pixel du canal moyen infrarouge.

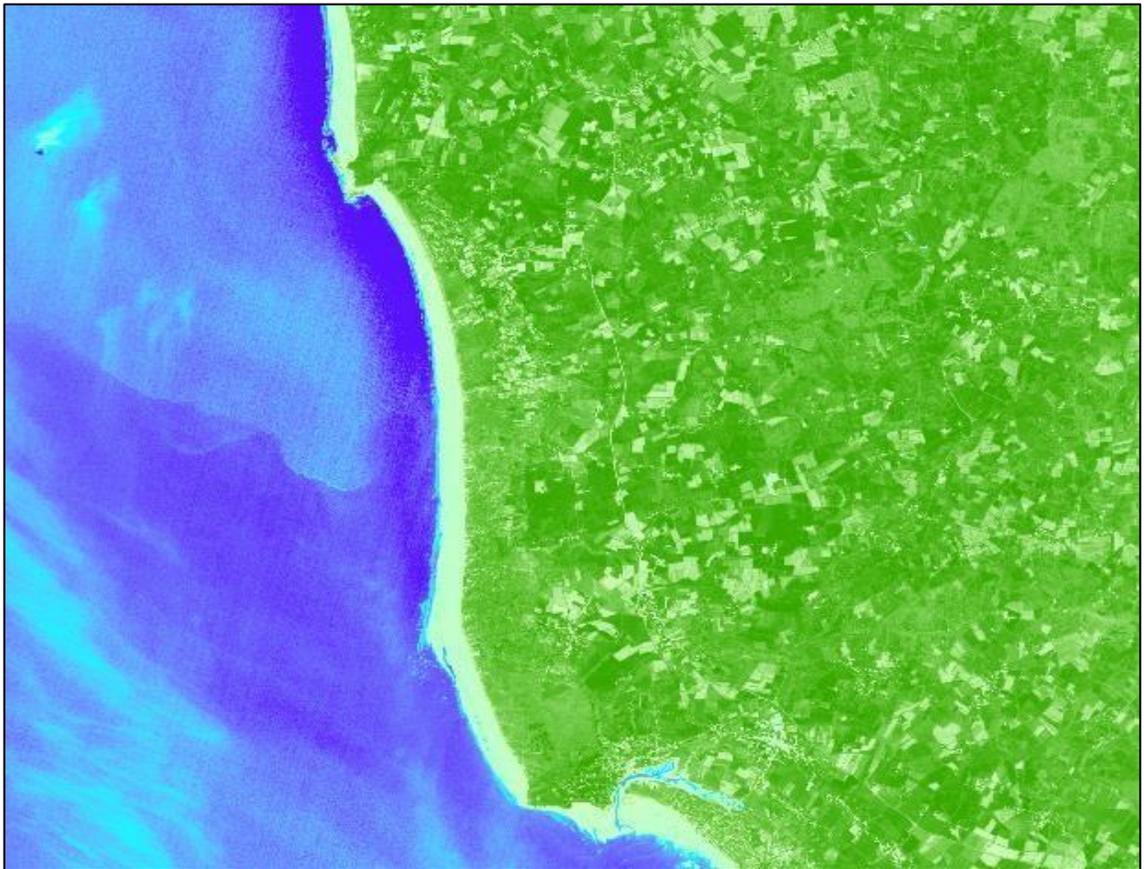


Figure 24 : Indice NDWI sur l'image Sentinel-2 du 15 Février 2021 (Charpentier, 2024)

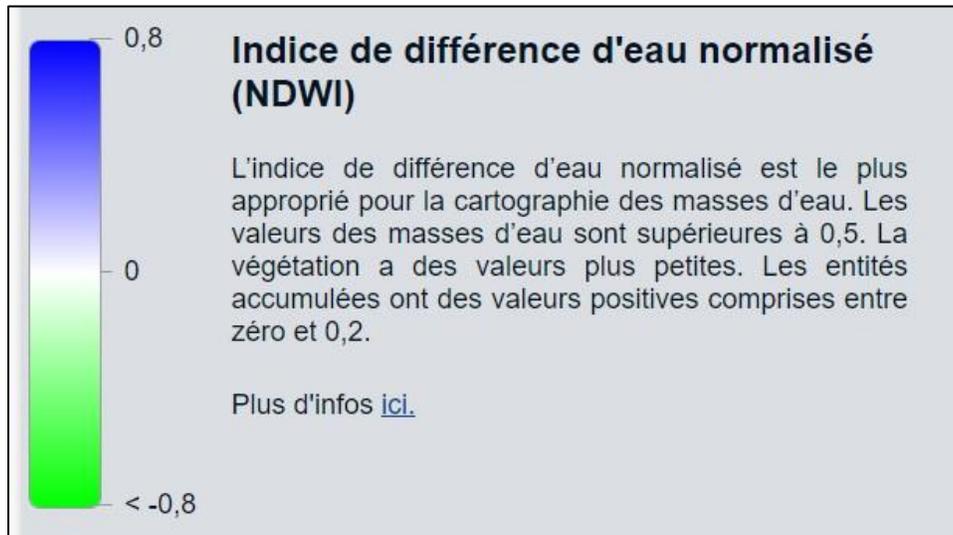


Figure 25 : Caractéristiques de l'indice NDWI (browser.dataspace.copernicus)

Les expressions décrites ci-dessus peuvent être rentrées dans des logiciels SIG comme ArcGis pro pour créer de nouvelles images et analyser l'objet voulu. Le logiciel étudie chaque pixel d'une image de différentes bandes selon l'indice renseigné. Ces calculs devront être effectués sur différentes photographies aux périodes propices des inondations.

3.L'utilisation du drone pour obtenir des images supplémentaires

3.1. Les intérêts du drone

L'utilisation du **drone** revêt d'une importance capitale dans notre étude sur les remontées de nappes par télédétection, apportant des avantages significatifs à notre recherche. Ce dispositif possède de **multiples avantages** tels que sa forte résolution, la flexibilité de son usage et son coût. Tous ces éléments sont détaillés dans le chapitre 6, partie 1.1.

Tout d'abord, au cours de l'hiver 2024, plusieurs inondations ont eu lieu sur la côte ouest de la Manche. Utiliser le drone a permis d'obtenir des images les jours où le phénomène de remontées de nappes était visible sur le terrain d'étude. Cette méthode facilite l'acquisition de données visuelles précieuses pour analyser l'étendue et l'impact de ces événements.

Ensuite, toutes ces images acquises simultanément à une période donnée, font l'objet d'un traitement dans le but de produire de nouvelles données shapefiles. Cela donne des informations sur la date et la localisation des inondations pour essayer de les comprendre. Il est également possible de réaliser des tests de télédétection sur les images obtenues avec le drone. Comme expliqué dans le chapitre 5, partie 2.2, c'est le Green Leaf Index (GLI) qui est utilisé pour ce mémoire. Ainsi, le drone enrichit la base de données spatiales, favorisant une analyse plus approfondie et précise.

Enfin, la résolution spatiale et temporelle élevée du drone garantit que nous disposons de données détaillées à des intervalles réguliers. Cela offre la possibilité de suivre l'évolution des remontées de nappes dans le temps et dans l'espace avec une grande précision.

3.2. Méthodologie pratiquée pour le drone

3.2.1. Le choix des vols et la méthodologie utilisée pour le logiciel Dronelink

Avant de procéder au vol du drone, il est essentiel de planifier les vols en amont. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer où les vols auront lieu.

Pour commencer, il faut se référer aux observations du terrain :

- A-t-on déjà vu des remontées de nappes les années précédentes ?
- Où étaient-elles situées ?

Pour répondre à ces questions, il suffit de s'appuyer sur les données produites par le Bureau de Recherches Géologiques et minières (BRGM). Les grandes périodes d'inondations en France et plus particulièrement en Normandie, sont en 2001 et 2021. La direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement en Normandie (DREAL) a développé des cartes sur les zones inondées observées en 2001, disponible sur l'interface "prédisposition aux risques naturels en Normandie–Inondation".

En téléchargeant ces données, il a été possible de réaliser des cartes similaires sur notre terrain d'étude (figure n°26).



Figure 26 : Carte des inondations par remontées de nappes observées en 2001. (Charpentier, 2024)

Les inondations sont principalement situées à proximité du littoral. Plus particulièrement à l'arrière des cordons dunaires, dans les parcelles agricoles. Il n'est pas possible de réaliser des vols sur toutes les surfaces inondées aux vues de l'étendue spatiale de la zone qui s'étend sur six communes. Il est donc nécessaire de sélectionner des endroits judicieux pour avoir de bons résultats.

Un premier tri consiste à identifier les zones non survolables. Avant tout, il faut vérifier si les vols sont autorisés dans les zones choisies. Pour cela, il convient de se rendre sur Géoportail et d'aller dans la catégorie "Restrictions UAS catégorie Ouverte et aéromodélisme". Certaines zones sont interdites de vol, tandis que d'autres sont simplement soumises à des restrictions. La hauteur des restrictions de vol varie de 30 à 120 mètres et est représentée par une gamme de couleurs allant de l'orange au rouge, comme illustré sur la figure 27.

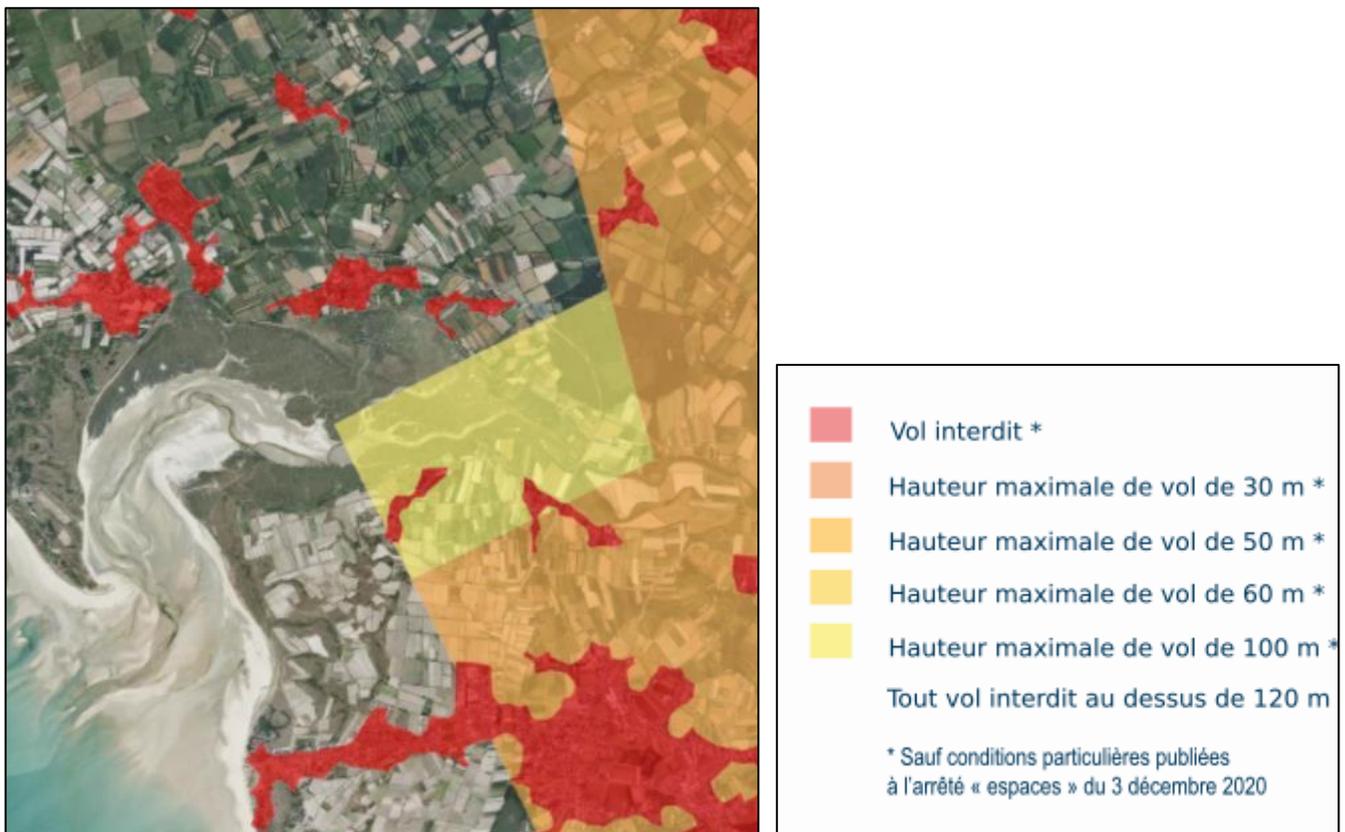


Figure 27 : Différentes restrictions de vol sur le territoire Français (Géoportail)

Une fois les vérifications faites, le pilote du drone doit se rendre sur la plateforme Dronelink. Celle-ci est conçue pour simplifier et améliorer le processus de planification de vol et de collecte de données avec des drones. Elle offre la possibilité aux utilisateurs de planifier des missions de vols en définissant des trajectoires, des altitudes et des points d'intérêts sur une carte interactive (figure 28). Une fois que la mission est planifiée, il est possible de mettre le drone en mode "autopilote", automatisant les mouvements et assurant une collecte de données concise.

Cette plateforme prend en charge une large variété de drones et de capteurs. Cette gamme de matériel rend ce logiciel adaptable à différents besoins de collecte de données, allant de la cartographie à la surveillance ou autre.



3.2.2. Présentation du drone et les paramètres de vols

Le drone du laboratoire IDEES, à l'université de Caen Normandie : c'est le modèle DJI Air2S. Plutôt léger, la manipulation de ce drone est assez intuitive, et un plan de vol peut y être intégré à l'aide du logiciel Dronelink.



Figure 29 : Photo du drone utilisé. (<https://www.lesnumeriques.com/drone/dji-air-2sp63051.html>)

Le capteur CMOS de 1 pouce peut prendre des photographies aériennes de 20 millions de pixels. Il peut filmer avec une résolution de 5,4K à 30 images par seconde. Il est aussi possible de filmer en 4K à 60 images par seconde ou en FULL HD à 120 images par seconde.

Le drone présenté ici possède une autonomie de vol de 31 minutes, et a une portée pouvant aller jusqu'à 12 kilomètres. Sa vitesse peut atteindre 68 km/h, et sa hauteur de vol peut atteindre les

80 mètres d'altitude.

3.2.3. Configuration des vols drones réalisés sur la côte Manchoise (hiver 2024)

Pour tous les vols réalisés dans le cadre de ce mémoire en hiver 2024, des caractéristiques bien précises ont été définies. Voir la figure ci-dessous :

Altitude de vol	Inclinaison de la nacelle	Taux de recouvrement	Vitesse de vol	Intervalle de prise photos
80 mètres	90°	75%	18km/h	2 secondes

Figure 30 : Paramètres des vols drone (Charpentier, 2024)

La hauteur de vol est fixée à 80 mètres d'altitude. En effet, sur la zone étudiée de la côte Ouest de la Manche, il n'y a pas de zones restrictives. Alors pour un souci de résolution spatiale et de fauchée le seuil a été défini à 80 mètres d'altitude.

Etant donné que la zone étudiée est assez plate, l'inclinaison de la nacelle est réglée à 90°.

Il faut respecter une certaine vitesse horizontale pour éviter de "bruiter" ou "flouter" les photographies (B.Peuziat, 2022). Pour avoir un recouvrement optimal de la photographie, il faut une prise de vue automatique selon un intervalle défini. B.Pieuzat utilise un intervalle de 5 secondes. Pour s'adapter à la topographie du terrain, il faut déterminer l'angle d'inclinaison de la nacelle. Pour mieux définir les reliefs, il est préférable d'incliner la caméra à 85°.

Dans le cadre d'un processus d'ortho-images, il est recommandé de programmer un fort taux de recouvrement entre chaque photo. Le taux suggéré entre chaque cliché est de 75%. (*DronesImaging*)

La vitesse est programmée à 18 km/h pour faciliter la capture photo et éviter les zones "floues". Comme les vols se concentrent sur quelques parcelles, il est judicieux de choisir une vitesse plutôt lente.

Le choix de la hauteur de vol résulte de la nécessité de trouver un équilibre entre le temps de vol et la résolution des images acquises. Une altitude de vol inférieure aurait permis d'obtenir une meilleure résolution, mais aurait considérablement allongé le temps de vol.

Un autre critère déterminant dans la sélection des zones de vol est leur répartition équilibrée sur les six communes étudiées.

En résumé, trois facteurs principaux ont guidé le choix des zones de vol :

1. L'absence de restrictions aériennes
2. Les zones ou les débordements de nappes phréatiques ont été observées au cours des années précédentes

3. Une répartition spatiale représentative de l'ensemble des communes

Cette approche méthodologique vise à optimiser l'acquisition de données pertinentes pour l'étude, tout en tenant compte des contraintes opérationnelles et de la représentativité spatiale des phénomènes étudiés.

3.2.4. Inventaire des vols

Après avoir réalisé les étapes de localisation et de paramétrage des vols, il faut les créer sur dronelink. Pendant l'hiver 2024, 11 vols de drones ont été effectués. Voici les différentes dates et la durée de chaque vol (figure 31). La date de chacun des vols a été défini en fonction de la force du vent, de l'ensoleillement, et des précipitations, voir chapitre 3, partie 3.2.

Nom du vol	Date d'acquisition	Résolution (m)	Durée du vol	Heure du vol	Vent(nœuds)	Station
Vol1_100media_Créances	01/02/2024	0,06	4	11h16	9	Anneville_sur-Mer
Vol2_101media_Créances	01/02/2024	0,06	20	11h20	9	Anneville_sur-Mer
Vol2_102media_Créances	01/02/2024	0,06	1h15	14h44	6	Anneville_sur-Mer
Vol1_Créances	05/03/2024	0,06	1h20	15h27	13	Anneville_sur-Mer
Vol2_Créances	05/03/2024	0,06	56min	9h47	12	Anneville_sur-Mer
Vol3_St_Germain	05/03/2024	0,06	42min	17h05	13	Anneville_sur-Mer
Vol4_St-Germain	06/03/2024	0,06	1h	10h35	8	Anneville_sur-Mer
Vol5_Surtainville	06/03/2024	0,06	1h12	15h19	7	Barneville-Plage
Vol6_Surtainville	06/03/2024	0,06	20min	16h46	6	Barneville-Plage
Vol8_Rozel	06/03/2024	0,06	33min	18h02	4	Barneville-Plage
Surtainville_11_01_24	31/01/2024	0,06	58min	11h29	10	Barneville-Plage

Figure 31 : Détails des différents vols drone (Charpentier, 2024)



h

Figure 32 : Vent à Barneville-Plage le 5 et 6 mars 2024 (Windguru, 2024)



Figure 33 : Vent à Barneville-Plage le 31 janvier 2024(Windguru, 2024)



Figure 34 : Vent à la Station Anneville-sur-Mer, le 5 et 6 mars 2024 (Windguru, 2024)



Figure 35 : Vent à la station Anneville-sur-Mer, le 1 février 2024 (Windguru, 2024)

Pour obtenir la résolution de chaque vol, le calcul suivant a été fait : **Résolution** (en cm par pixel) = (altitude de vol (m) x taille du pixel (micromètre) / distance focale (mm)). Et tout a été converti en centimètres.

La localisation des vols drones présentés dans le tableau précédent est illustré par la carte suivante (figure n°31).

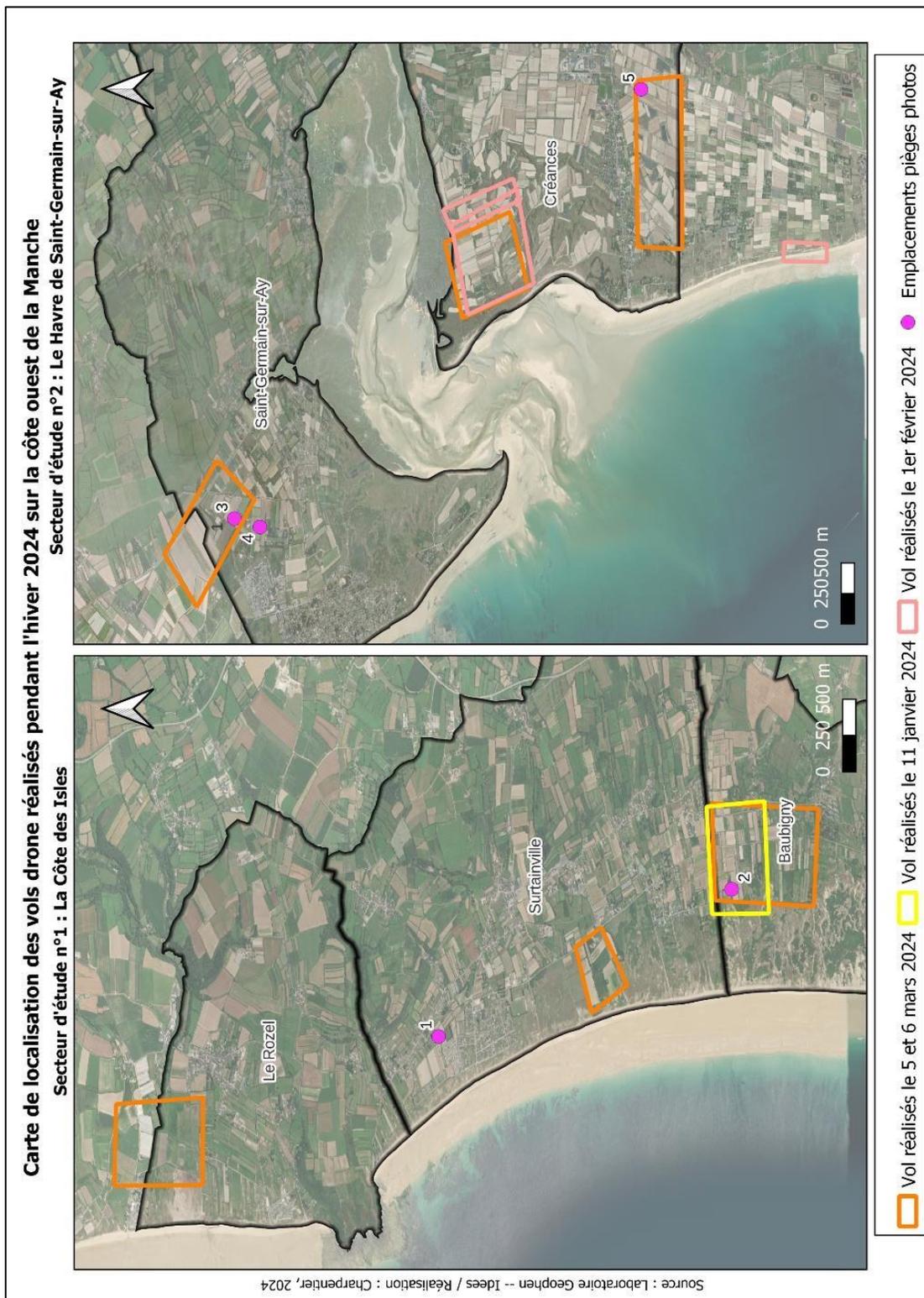


Figure 36 : Carte de localisation des vols drone réalisés pendant l'hiver 2024 sur la côte ouest de la Manche (Charpentier, 2024)

3.2.5. Application de la méthodologie avec le logiciel Métashape

Comme évoqué précédemment, les images acquises par drone font l'objet d'un traitement photogrammétrique. Le traitement mis en place s'appelle une orthophotographie. C'est une technique de traitement d'image qui corrige les distorsions géométriques et les effets de perspective présents dans les images aériennes ou satellitaires (IGN,2021).

L'objectif principal de ce traitement est de produire une image où chaque pixel représente une surface plane de manière précise. Une orthophotographie est géoréférencée, "c'est un document où l'échelle est la même partout" (GroupeTifide, 2012) et peut être utilisée pour des applications nécessitant une précision géographique élevée (cartographie, planification urbaine, gestion de ressources naturelles). L'orthophotographie par drone possède les mêmes principes que l'orthophotographie classique, mais les images sont capturées par drone plutôt que par avions ou satellites.

Cette manipulation est faite à l'aide du logiciel Agisoft Métashape. C'est un logiciel de photogrammétrie utilisé dans le domaine de la cartographie, de la topographie, de l'archéologie, ou d'autres domaines liés à la géomatique et à la modélisation 3D. Cette plateforme utilise différentes techniques photogrammétriques pour reconstruire des modèles 3D à partir d'ensembles de photographies aériennes, satellites ou terrestres. Il utilise les informations de position et d'orientation de chaque image pour déterminer la position de l'objet ou d'un point dans l'espace 3D.

Dans le cas de cette étude, plusieurs étapes sont effectuées sous ce logiciel avant d'obtenir une orthophotographie, ces étapes sont détaillées dans le schéma suivant (figure 37).

Construire une orthophotographie avec Agisoft métashape



Figure 37 : Construire une orthophotographie avec Agisoft métashape (Charpentier, 2024)

Cette méthode permet de produire des orthophotographie à très haute résolution (figure 38). Plusieurs détails sont visibles sur les parcelles (figure 34 et 35) : le type de sol, les inondations, les herbes. Ces multiples détails permettent de faciliter les analyses concernant la dispersion des inondations, la présence d'humidité, ou encore la turbidité de l'eau.



Figure 38 : Image de l'orthophotographie du vol 1 (Charpentier, 2024)



Figure 39 : Zoom 1 sur l'orthophotographie du vol 1 (Charpentier, 2024)

3.2.6. Les traitements réalisés sur les orthophotographies

3.2.6.1. Digitalisation des débordements de nappes observés en 2024

Les ortho-photos réalisées suite à ces vols drone permettent de repérer des inondations par débordement de nappe et de les digitaliser (figure 41). Pour les digitaliser il suffit d'utiliser l'outil

polygone dans le logiciel QGIS ().



Figure 41 : Exemple de digitalisation d'une inondation par remontée de nappe phréatique (Charpentier, 2024)

Le but de cette étape est de compléter la base de données du BRGM, sur les inondations par débordements de nappes de 2001. En intégrant à QGIS (SIG), les orthophotos, il est possible de créer une couche shapefile. "Un shapefile est un format de stockage des données vectorielles permettant d'archiver l'emplacement, la forme et les attributs des entités géographiques. Il est stocké sous la forme d'un ensemble de fichiers associés et contient une classe d'entités unique"(ESRI).

Ce format shapefile, sera composé des débordements de nappes observés en 2024 sur les six communes étudiées, en fonction des dates.

Par la suite, il sera possible de partager facilement dans un fichier ZIP, les données obtenues, pour qu'elles puissent servir à d'autres recherches.

3.2.6.2. Un indice spectral spécifique au canal RVB

On pourra ensuite tester sur ortho-images, les techniques de **télé-détection**. Un seul indice spectral est possible sur les orthophotographies. En effet, sur le drone du laboratoire IDEES dont nous disposons, seul le **capteur RVB** (Rouge vert et bleu) est présent et non l'infrarouge. « L'un des problèmes du calcul de l'indice de végétation avec des drones est la nécessité de disposer de capteurs fonctionnant dans l'infrarouge. » (GisandBeers, 2019). En effet, la chlorophylle absorbe le canal rouge, mais reflète l'infrarouge. C'est pourquoi, l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, un indice fréquemment utilisé pour l'étude des effets d'inondations sur la végétation) utilise les différences de réflectances dans le rouge et le proche infrarouge pour faire ressortir le taux de chlorophylle. Ainsi, pour pouvoir contrer ce problème et utiliser les images produites par le drone, on utilisera l'**indice GLI** (Green Leaf Index) mis en place par le chercheur Athos Agapiou. (Agapiou, 2020)

En réalité, la végétation possède également une forte réflectance dans le canal vert. Il est donc possible d'utiliser les canaux verts et rouge d'une caméra RVB pour produire un indice de tolérance aux ombres et à la faible luminosité appelé l'indice de feuilles mortes ou Green Leaf Index (GLI). « Le GLI à spectre visible est un outil très utile, suffisamment utile pour remettre en question le coût supplémentaire de la collecte professionnelle de données NDVI. » (Allen, 2017).

Cet indice nous permettra de contrer le problème rencontré.

Pour calculer le Green Leaf Index en l'absence de capteurs infrarouges, nous utiliserons les bandes suivantes :

$$GLI = ([\text{VERT} - \text{ROUGE}] + [\text{VERT} - \text{BLEU}]) / ([2 * \text{VERT}] + (\text{ROUGE} + \text{BLEU}))$$

4.Méthodologie appliquée aux différents dispositifs placés au sol

Dans le cadre de notre mémoire, divers dispositifs au sol seront mis à contribution (les pièges photographiques, les stations météorologiques et les données marégraphiques). L'objectif

principal est d'obtenir des points de contrôle terrain afin de valider les résultats obtenus par télédétection.

Plusieurs informations clés seront disponibles grâce à ces dispositifs : la hauteur d'eau des inondations observées, le cumul pluviométrique et le coefficient de marée. Ces données terrain serviront de référence pour l'hiver 2024 et permettront d'effectuer des analyses comparatives avec la saison hivernale 2021.

L'intégration de ces observations permet de renforcer la fiabilité de l'interprétation des données de télédétection. Cette approche combinée, alliant mesures terrain et télédétection, est essentielle pour une compréhension approfondie des phénomènes d'inondation et d'humidité étudiés.

4.1. Les pièges photographiques

4.1.1. Présentation des pièges photographiques

Un piège photographique sert à prendre des photographies sans intervention humaine. Les pièges photos du laboratoire IDEES se présentent de la manière suivante :

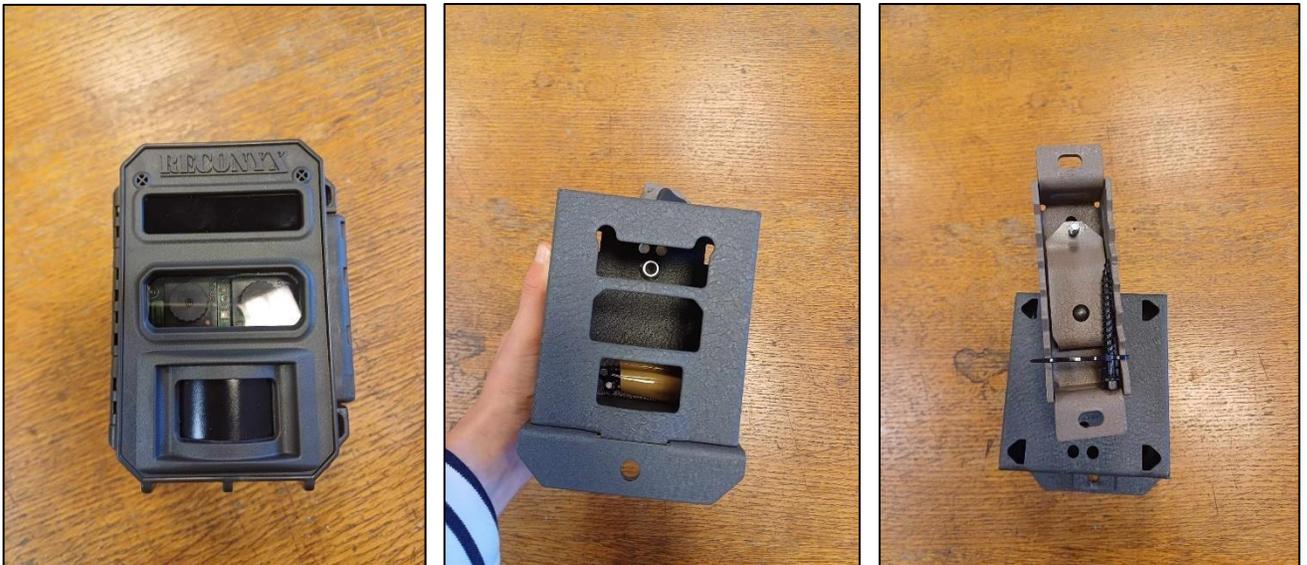


Figure 42 : Présentation d'un piège photographique (Mesnage, 2023)

Des câbles et un cadenas sont nécessaires pour pouvoir les attacher à tous types de surfaces.

Une échelle limnimétrique est plantée à quelques mètres du piège pour pouvoir mesurer les hauteurs d'eau par la suite.

4.1.2. Caractéristiques

Avant d'installer les pièges photos, il faut les paramétrer pour répondre à nos besoins. Pour cette étude C.mesnage a programmé tous les pièges de la façon suivante :

Intervalle de prise photo	Capacité de stockage de la carte mémoire	Résolution de la caméra	Type de batterie	Autonomie
1heure	32 GO	ultra HD jour et nuit	Piles au lithium	4,5 mois avec 4 photos par heure pendant 24 h

Figure 43 : Paramètres des pièges photographiques (Charpentier, 2024)

Chaque piège photo possède deux cartes SD. Il est possible d'interchanger ces cartes pour récupérer les données.

4.1.3. Photos des pièges

Sur le terrain étudié, cinq pièges ont été installés. En voici quelques illustrations :



Figure 44 : Piège photo n°1 (Mesnage, 2023)



Figure 45 : Piège Photo N°2 (Mesnage, 2023)



Figure 46 : Piège photo n°3 (Mesnage, 2023)



Figure 47 : Piège photo n°4 (Mesnage, 2023)



Figure 48 : Piège photo n°5 (Mesnage, 2023)

4.1.4. Localisation des pièges

Ces cinq appareils sont installés aux endroits où les inondations par remontées de nappes sont visibles presque chaque année. Pour déterminer leur emplacement, C. Mesnage s'est basée sur les débordements de nappes de 2001 en Normandie. De plus, ses contacts avec certains propriétaires de parcelles lui ont permis d'affiner les localisations. Ces pièges sont disposés dans un ordre précis au sein de parcelles agricoles (figure 49 et 50).



Figure 49 : Carte de localisation des pièges photographiques sur la côte des Isles (Charpentier, 2024)

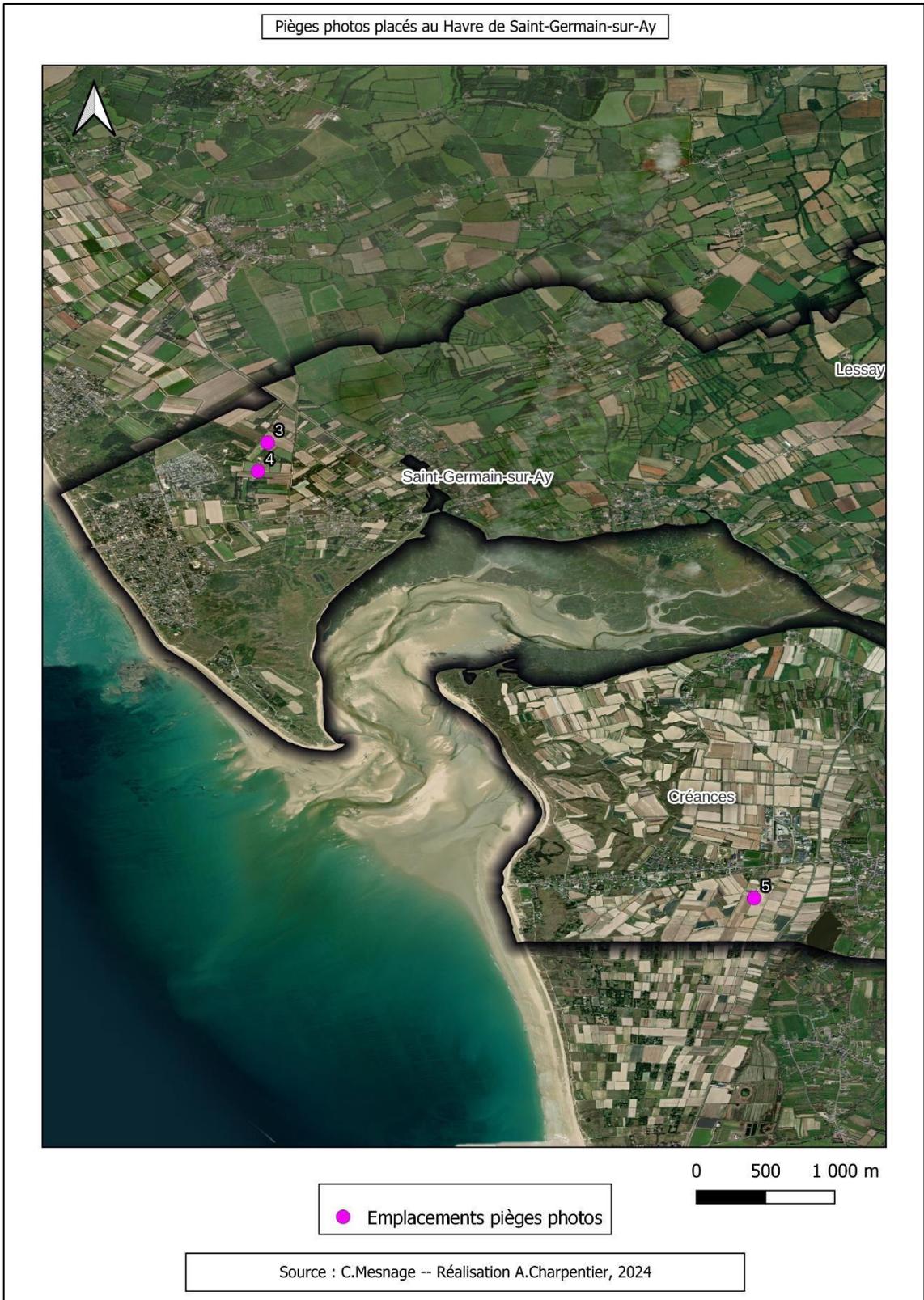


Figure 50 : Carte de localisation des pièges photographiques au Havre de Lessay (Charpentier, 2024)

4.1.5. Distance à la mer de chaque piège photographique

Chacun des pièges photographiques est positionné à moins de 2 kilomètres de la mer (figure 51).

Cela montre la proximité entre les parcelles inondées et la mer.

Piège N°	Distance à la mer
1	460 mètres
2	735 mètres
3	1700 mètres
4	1500 mètres
5	1820 mètres

Figure 51 : Distance à la mer de chaque piège photographique (Charpentier, 2024)

4.1.6. Intérêts

4.1.6.1. L'usage de ce dispositif est motivé par plusieurs raisons.

(1) L'acquisition de données au sol permet de valider les résultats obtenus à partir des images satellites. Lorsque les pièges photographiques confirment la présence d'une inondation, le calcul des indices spectraux peut être interprété avec une plus grande certitude. La corrélation entre les observations terrain issues des pièges photographiques et les signatures spectrales dérivées des images satellitaires renforce la fiabilité de l'identification des zones inondées.

(2) Les hauteurs d'eau sont assez importantes dans ce travail. Pouvoir produire des documents avec l'évolution des hauteurs d'eau au cours des mois, et les comparer à la pluviométrie et aux marées. Le but est de savoir quel facteur influence l'arrivée de ces inondations.

(3) Puis pouvoir illustrer notre analyse, les photos des inondations prises par le piège pourront être assez représentatives.

4.2. Les stations météorologiques

4.2.1. Intérêts

Les données enregistrées par les stations météorologiques seront utiles à notre recherche.

D'abord la pluviométrie quotidienne est intéressante pour pouvoir confirmer les différents résultats obtenus (télédétection, digitalisation sur image drone, piège photo, etc). En effet, le but est de savoir si la pluie influence les inondations par remontées de nappes. Par conséquent, si la pluviométrie est en lien avec ce phénomène, il sera plus simple de savoir la date des inondations en 2021, pour les détecter avec la télédétection.

4.2.2. Présentation des stations météorologiques



Figure 52 : Description des différentes stations météorologiques utilisées (Charpentier, 2024)

4.2.3. Localisation des différentes stations météorologiques

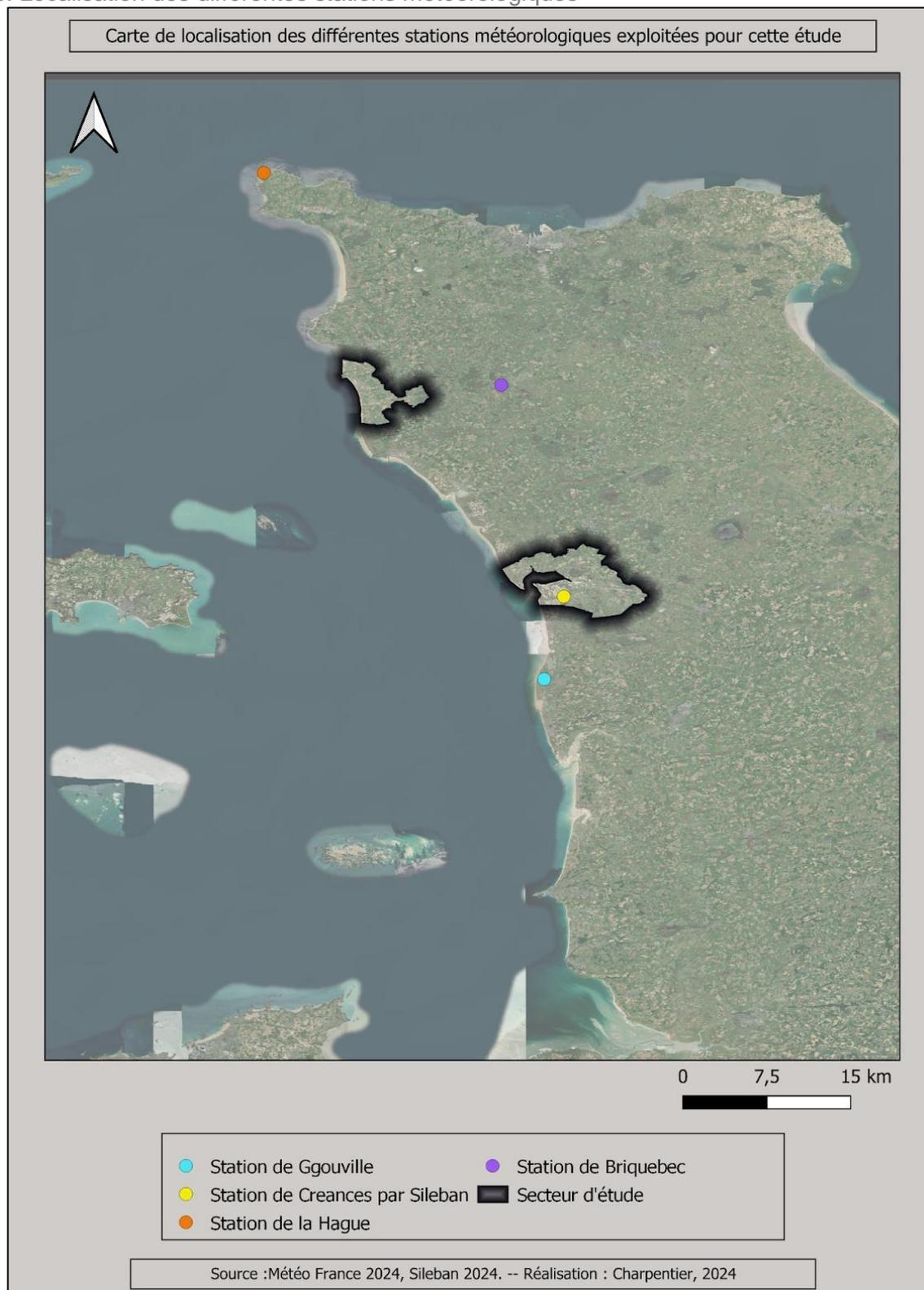


Figure 53 : Carte de localisation des stations météorologiques (Charpentier, 2024)

4.3. Le modèle Safran-ISBA-Modcou, un complément météorologique

4.3.1. Présentation du modèle

En complément, afin d'avoir une meilleure représentativité du climat et surtout des précipitations, le **modèle Safran-Isba-Modcou (SIM)** est aussi propice à cette étude. Pour la zone du Havre de Saint-Germain-sur-Ay, deux stations météorologiques sont proches (Gouville-sur-mer, Créances) et représentatives. Cependant, pour le secteur de Côte des Isles les stations dont nous disposons (pointe de la Hague et Bricquebec) ne sont pas forcément représentatives de par leur distance.

Ce modèle est né d'une coopération entre le CNRM-GAME et le Centre de géosciences de Mines Paris Tech. Le but de cette chaîne est "d'étudier les paramètres hydrologiques de surface [...] pour évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau". (*Ministère de la transition écologique*).

Trois modèles hydrométéorologiques sont utilisés pour cette opération (figure 54). Avant de présenter chaque modèle, il faut considérer que trois composantes intègrent ces différents modèles : (1) le forçage atmosphérique (2) un schéma de surface (3) et un module hydrogéologique.

Le modèle SAFRAN analyse les paramètres météorologiques. Il permet de "reconstruire des profils verticaux de l'atmosphère sur des zones climatiquement homogènes" (*ministère de la transition écologique*). La chaîne ISBA (Interaction sol-biosphère-atmosphère) se concentre sur les flux d'eau et d'énergie à la surface du sol (évaporation, neige, ruissellement ou infiltration).

Quant au système MODCOU, c'est un modèle hydrologique qui permet de calculer l'évolution des nappes et le débit des rivières.

Schéma de fonctionnement de la chaîne Safran-ISBA-Modcou (*Météo France, 2021*)

Les paramètres utilisés par cette chaîne sont réinterpolés sur une grille de 8 x 8 km de côté à l'échelle de toute la France.

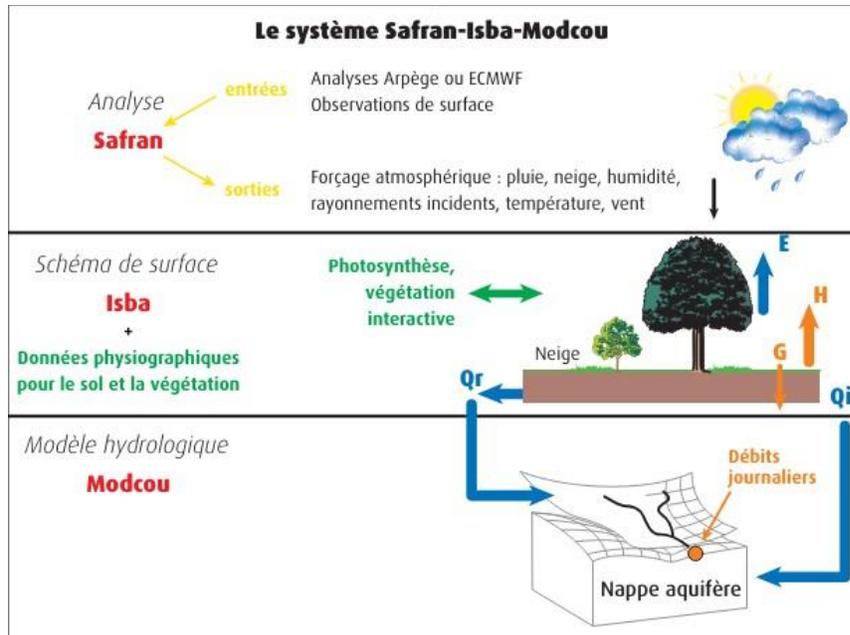


Figure 54 : Schéma de fonctionnement de la chaîne Safran-ISBA-Modcou (Météo France, 2021)

4.3.2. Données choisies

Pour cette étude, 6 points de cette grille seront utilisés, voir figure 55.

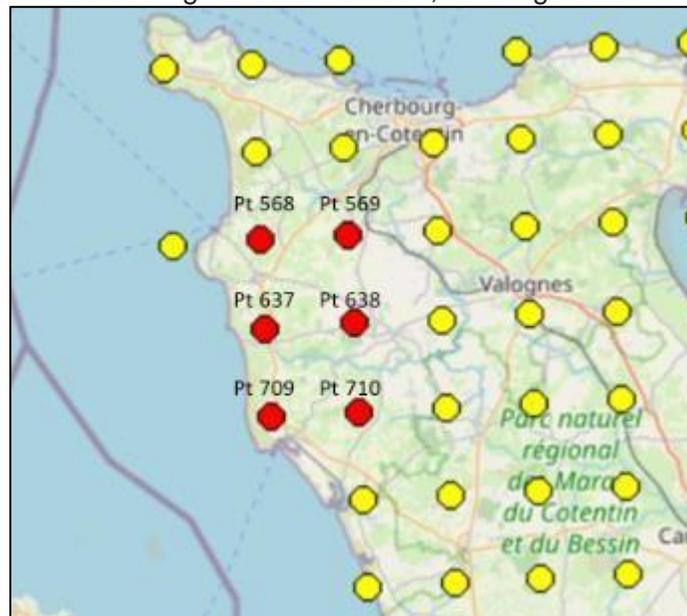


Figure 55 : Illustration des 6 points de grille choisis du modèle Safran-ISBA-MODCOU (Charpentier, 2024)

Les données récupérées présentent trois variables : (1) le numéro des points, (2) leurs coordonnées géographiques en Lambert 93, (3) le cumul des précipitations quotidiennes en millimètres (mm).

Nous avons récupéré ces données sur la période novembre 2023 à Mars 2024. Puis de septembre 2020 à mars 2021.

4.3.3. Utilité du modèle dans cette étude

Ces données vont nous permettre premièrement de voir la **répartition** des précipitations quotidiennes sur les périodes de l'hiver 2021 et 2024. Ainsi des cartes de zonages permettant de visualiser quel espace est le plus arrosé selon les années, pourront nous aider à comprendre les inondations observées sur cette zone.

Dans un second temps, ce modèle pourra **améliorer l'analyse des précipitations** quotidiennes sur cette zone. En effet, les stations météorologiques proches du secteur de la côte des Isles ne représentent pas ce secteur avec suffisamment de précision. Elles sont soit trop loin, soit trop dans les terres.

C'est pourquoi le modèle précisera les données sur ce site, puisqu'il croise les données de plusieurs stations météorologiques se trouvant autour de la zone. Pour finir, pouvoir distinguer la différence de pluviométrie sur une période donnée entre le littoral et les terres peut être intéressant. En effet, distinguer le littoral et la terre pourrait expliquer pourquoi certaines zones sont plus inondées que d'autres à certains endroits.

4.4. Les données marégraphiques

Nous retiendrons également les données du site mareespeche.com. Celui-ci est une ressource en ligne pour les pêcheurs sportifs qui offre des informations détaillées sur les horaires des marées, les phases lunaires, les coefficients de marée, et les périodes d'activité maximale des poissons. Il fournit également des données météorologiques, ainsi que les heures de lever et de coucher du soleil et de la lune. Un tableau annuel des coefficients de marée pour l'année 2024, est disponible sur ce site.

Le coefficient de marée est calculé à partir de variables solaires et lunaires, indique l'ampleur de la marée prévue. Ce chiffre peut varier considérablement d'un lieu à un autre.

Les données récupérées seront celles des mois de novembre 2023 à mars 2024, puis de novembre 2020 à mars 2021.

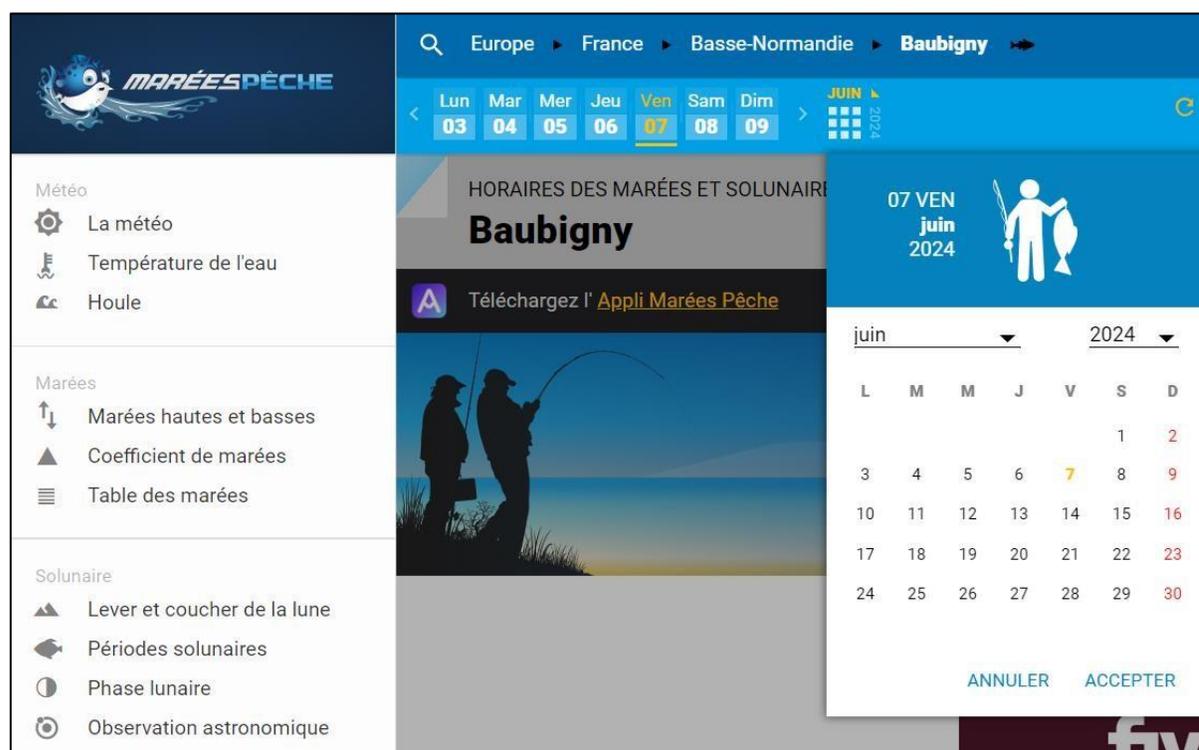


Figure 56 : Photo du site marée pêche.com (Charpentier, 2024)

Cependant, le site marée pêche.com, ne représente pas des données réelles. C'est-à-dire que ce ne sont que des estimations. C'est pourquoi nous allons également récupérer les données du **SHOM** (service hydrographique et océanographique de la marine). Cet organisme public produit des informations géographiques maritimes et littorales de référence. Ses missions sont d'observer le niveau de la mer, de rendre public la connaissance et la description de l'environnement marin, et de faire des prévisions de l'évolution marine. C'est le référent national pour les observations du niveau de la mer dans les zones sous juridiction française.

Alors récupérer les données de cet organisme permet de les comparer au site marée pêche pour estimer sa fiabilité.

Conclusion du chapitre 4

Cette partie du mémoire présente en détail la **méthodologie** employée pour analyser les **remontées de nappes phréatiques** par **télétection**. La méthodologie s'articule autour de **trois dispositifs principaux** : les drones, les images satellites et trois instruments au sol. **Les drones** fournissent des images aériennes de haute résolution, permettant une observation précise des variations de la surface terrestre, utile pour détecter les signes visibles des remontées de nappes, comme les zones humides et les changements de végétation, à l'aide de l'**indice GLI**.

Toutes les images collectées sont intégrées dans le logiciel **Métashape** pour créer des **orthophotographies** de haute résolution. Les **images satellites** offrent une couverture spatiale et temporelle étendue, permettant de surveiller les changements sur de vastes zones et d'accéder à des données historiques. Les satellites **Sentinel-2** et **Pléiades** sont utilisés pour identifier les variations de l'humidité du sol et d'autres indicateurs indirects des remontées de nappes, à l'aide d'**indices spectraux (NDVI, NDMI, NDWI, MNDWI)**.

Sur le terrain, trois dispositifs différents sont utilisés. Ils incluent des **pièges photographiques** pour mesurer les niveaux d'eau des inondations, des **stations météorologiques** pour collecter le cumul pluviométrique par jour et par heure, et des **données marégraphiques** pour avoir les coefficients de marée par jour. Ces trois derniers complètent les observations aériennes et satellitaires. Ces mesures permettent de **valider et analyser** les données obtenues par télétection. Chaque technique nécessite des outils spécifiques, notamment des **logiciels SIG** pour le traitement et l'analyse des données, ainsi que des sorties de terrain régulières pour collecter et vérifier les informations.

La collaboration de plusieurs spécialistes du laboratoire Geophen-Idées est essentielle pour assurer la précision et la fiabilité des résultats. L'objectif de cette méthodologie est de répondre à la question suivante : est-il possible de détecter les remontées de nappes phréatiques avec la télétection ?

En combinant les données obtenues par drone, satellite et dispositifs au sol, nous espérons démontrer que la télétection peut effectivement fournir des informations

précieuses sur la dynamique des inondations par remontées de nappes phréatiques sur la **côte ouest de la Manche**.

Chapitre 5– Résultats et traitements

Introduction du chapitre 5

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus au cours de notre recherche.

La première partie expose les résultats des différents indices spectraux utilisés sur les images Sentinel-2 et Pléiades. Nous présentons ici les analyses effectuées à partir de ces indices pour détecter et suivre les variations des nappes phréatiques. Les résultats montrent comment les indices spectraux permettent de caractériser les zones d'inondation et d'identifier les dynamiques temporelles et spatiales des remontées de nappes.

La seconde partie se concentre sur la digitalisation des débordements de nappes observés en 2024 avec l'utilisation du drone, ainsi que sur les résultats de l'indice GLI (Green Leaf Index). Cette section détaille la cartographie précise des débordements de nappes grâce aux images de drones et l'interprétation des données GLI pour évaluer l'état de la végétation et potentiellement prédire la présence d'une inondation.

Enfin, la troisième partie compare les hauteurs d'eau observées avec les pièges photographiques aux données de pluviométrie et de coefficients de marée. L'objectif est d'identifier le facteur prédominant influençant les inondations par remontées de nappes phréatiques. En examinant ces comparaisons, nous cherchons également à déterminer la méthode la plus appropriée pour choisir les dates des images satellites, optimisant ainsi la précision et la pertinence de nos observations.

1. Utilisation de la télédétection : comparaison des hivers 2021 et 2024

1.1. Présentation des données téléchargées

Type d'image	Identifiant de l'image	Année	Date	Couverture nuageuse (en %)
Sentinel-2	SENTINEL2X_20201215-000000-000_L3A_T30UWV_D	2020-2021	15/12/2020	1
	SENTINEL2X_20210115-000000-000_L3A_T30UWV_D		15/01/2021	3
	SENTINEL2X_20210215-000000-000_L3A_T30UWV_D		15/02/2021	2
	SENTINEL2X_20210315-000000-000_L3A_T30UWV_D		15/03/2021	0
	SENTINEL2B_20240210-111736-157_L2A_T30UWV_D	2023-2024	10/02/2024	31
	SENTINEL2B_20240311-111731-950_L2A_T30UWV_D		11/03/2024	44
Pléiades	IMG_PHR1B_MS_202105031125426_SEN_5713577201-2_R1C1	2020-2021	03/05/2021	0
	IMG_PHR1B_P_202105031125426_SEN_5713577201-1_R1C1			0
	Pas de données		2023-2024	Pas de données

Figure 57 : Tableau des images Sentinel-2 et Pléiades téléchargées (Charpentier, 2024)

Seules deux des images **Sentinel-2** téléchargées ont pu être exploitées (images en vert).

Pour commencer, un premier tri est fait en choisissant toutes images sur l'hiver 2021 et 2024, avec une couverture nuageuse inférieure à 50%. Par la suite, ces images sont intégrées dans un logiciel SIG pour pouvoir être traitées. Cependant, les trois autres images des années 2020-2021 sont inexploitable (chapitre 6, partie 1.2.). Puis pour l'année 2023-2024, le choix a été fait de se concentrer uniquement sur l'image du 11 mars 2024. De fait, les inondations visibles avec le drone sont aux dates du 31 janvier, 1er février et 5 et 6 mars 2024. Alors il est plus révélateur d'exploiter les images du 11 mars 2024 parce que l'on sait que les inondations sont constantes et immobiles. Ces faits sont vérifiés avec les données du piège photo n°2.

Concernant les images **Pléiades**, seule 1 seule a été téléchargée, en format bundle. C'est-à-dire que l'image est séparée en format multispectral et panchromatique, ce qui donne deux images. Sur l'hiver 2020-2021, sur notre zone, les premières images disponibles commencent le 3 mai 2021. Puis sur l'hiver 2023-2024, aucune image n'est disponible (Cf. Chapitre 6, partie 1.2.).

1.2. Localisation de la surface étudiée

Dans cette partie qui se concentre sur la télédétection, nous avons centré nos analyses sur une parcelle en particulier se trouvant au sein de la zone d'étude de la Côte des Isles, à Baubigny (voir figure 58) Cette parcelle est déterminée en fonction des inondations par remontées nappes observées. La sélection d'une zone constamment inondée permet d'affirmer les résultats que nous obtenons avec les indices spectraux.

Deux raisons motivent ce choix :

(1) Il est difficile de trouver des images satellites réellement exploitables du fait de la **couverture nuageuse**. Par exemple, sur l'hiver 2024, seules deux images Sentinel-2 ont été retenues, car la couverture nuageuse sur la plupart des images est trop élevée. Ainsi, choisir une parcelle constamment inondée pendant l'hiver laisse plus de possibilités quant

à la sélection des images satellites. La **plage temporelle** sera alors de novembre à mars 2023, au lieu de janvier à mars 2024.

(2 De plus, cela permet de conforter nos résultats quant aux indices spectraux. En effet, comme la parcelle choisie est constamment inondée de novembre à mars 2023, cette approche facilite l'analyse des différents indices. Il sera plus simple de savoir quel indice fonctionne sur les images Sentinel-2 et Pléiades, pour la détection des débordements de nappes phréatiques.

Cette zone est choisie selon les données produites par les **pièges photos**. Des graphiques ont été réalisés (Chapitre 5, partie 3.1) pour observer l'évolution des hauteurs d'eau pendant l'hiver 2024, avec ces données. Les résultats concluent que sur le piège photo numéro 2, les inondations sont importantes et constantes du 16 novembre 2023 au 10 mars 2024. Ainsi, il est intéressant d'étudier la parcelle se situant en face du piège photo, entre Surtainville et Baubigny à l'aide de la télédétection, pour les raisons évoquées ci-dessus.

Cette partie est consacrée au traitement des images Sentinel-2. Plusieurs indices décrits dans le chapitre 4, partie 2.2 seront utilisés. Les résultats de ces différents traitements sont exposés ici. Le but est de comprendre quel indice est le plus **efficace** sur les images Sentinel-2. Une fois ces résultats analysés, il sera intéressant de garder les traitements les plus efficaces, pour reproduire cette méthode sur les images **Sentinel-2 de 2021**.

Une seule des images Sentinel-2 est sélectionnée sur l'hiver 2024, voir figure 57.

Sur ces cartes, les indices seront comparés aux **inondations repérées** avec le drone en 2024. Considérant que les images sélectionnées ne vont pas au-delà du 11 mars 2024, ce sont les inondations perçues le 31 janvier 2024 et le 6 mars 2024 qui sont comparées. Comme nous savons que sur le site choisi, les inondations sont constamment présentes entre novembre 2023 et mars 2024, alors nous pourrions confirmer ces inondations à l'aide des différents indices.

1.3. Résultats des combinaisons en fausse couleurs sur l'image Sentinel-2 du 11 mars 2021

La combinaison de bande utilisée pour l'agriculture utilise trois bandes d'une image Sentinel-2. Les bandes SWIR-1 (11), proche infrarouge (8), et bleu (2). Il permet de surveiller la santé des cultures grâce aux bandes d'onde courtes infrarouges et du proche infrarouge. Ces deux bandes sont efficaces pour mettre en valeur la végétation dense, apparaissant en vert.

Cependant, nous ne l'utiliserons pas dans cette étude. En effet, la résolution spectrale est trop faible pour pouvoir définir quelle parcelle est inondée, voir figure 60.

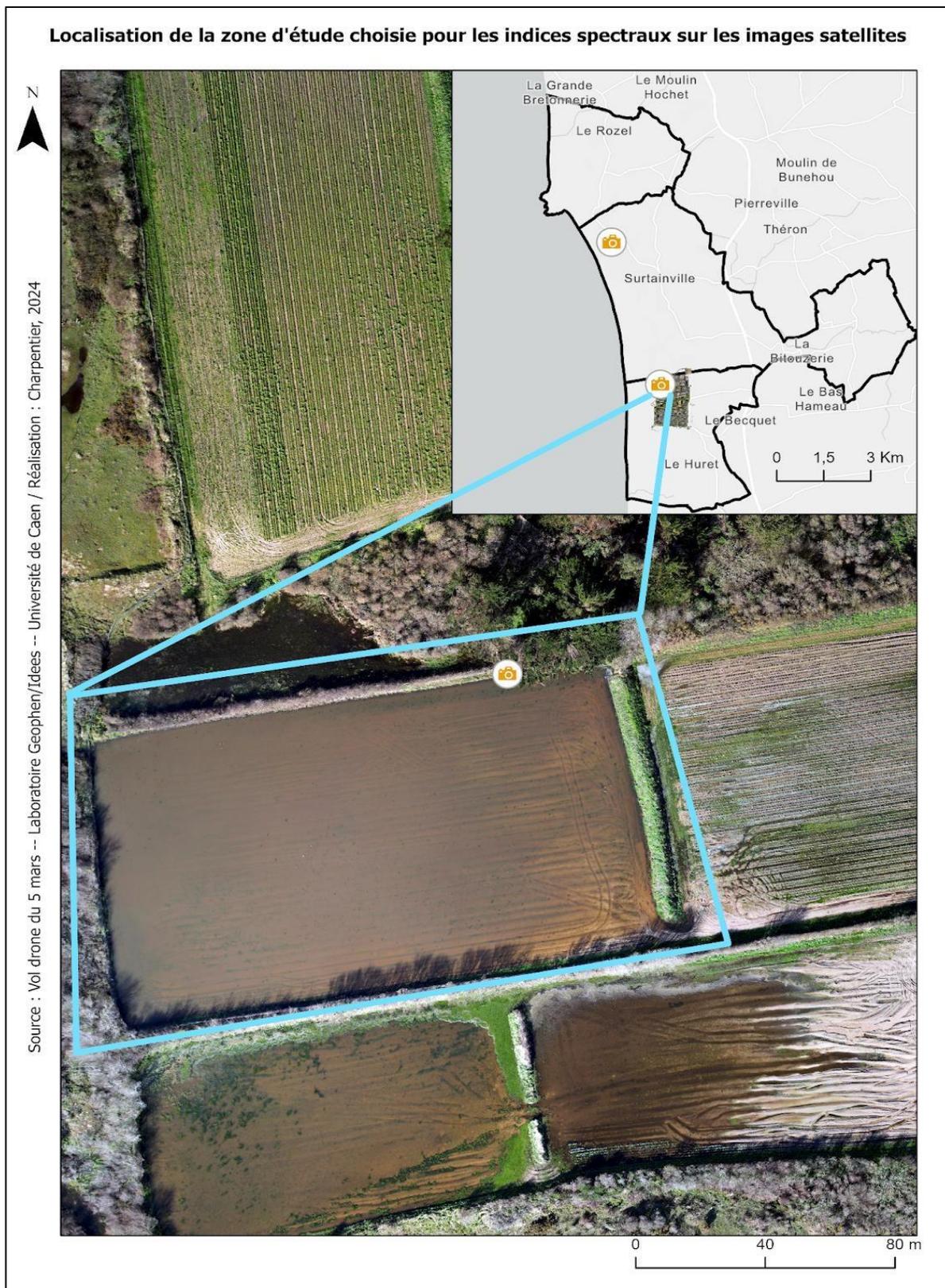


Figure 58 : Carte de localisation de la parcelle en face du piège photographique n°2 (Charpentier, 2024)



Figure 59 : Représentation des combinaisons de bandes spectrales utilisée pour l'agriculture (11,8,2) (Charpentier, 2024)



Figure 60 : Image de la faible résolution des combinaisons de bandes (Charpentier, 2024)

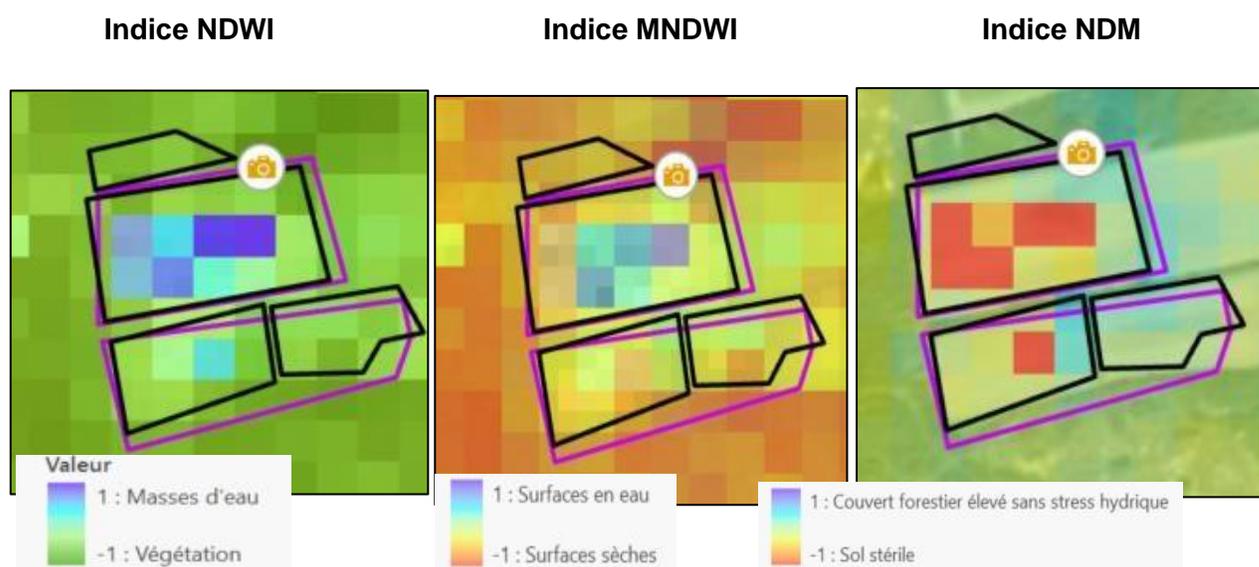
1.4. Résultats des différents indices sur l'image Sentinel-2 du 11 mars 2024

1.4.1. Interprétation des résultats des différents indices testés

1.4.1.1. Quatre indices révélant la présence d'eau

Les cartes présentées ci-dessus sont représentatives d'une parcelle à la date du 11 mars 2024. Le test des différents indices a révélé une efficacité certaine. En effet, chacun des quatre indices vérifie la présence d'eau au sein de cette parcelle. Par exemple, pour l'indice **Normalized Difference Vegetative Index** (NDVI), qui indique la santé de la végétation en mesurant la teneur en chlorophylle des plantes : "les valeurs positives représentent la biomasse végétale. Plus les valeurs sont importantes, plus la végétation est dense." (*Rémi de Spotifarm, 2020*).

Puis selon la plateforme browser.dataspace.copernicus, les valeurs proches de -1 caractérisent les masses d'eau, donc les pixels colorés en noir. Les valeurs proches de 1 représentent une végétation dense, illustrés par les pixels vert foncé (figure 64). Sur la carte qui symbolise l'indice NDVI, des pixels noirs, gris et marrons clairs sont situés au même endroit que les inondations vues avec le drone. Il est alors possible de supposer la présence d'une masse d'eau plus ou moins étendue le 11 mars 2024 grâce à la télédétection sur les images Sentinel-2. Le piège photo numéro 2, permet de vérifier cette information. Il en est de même pour les quatre indices testés (figure 64, 62 et 63).



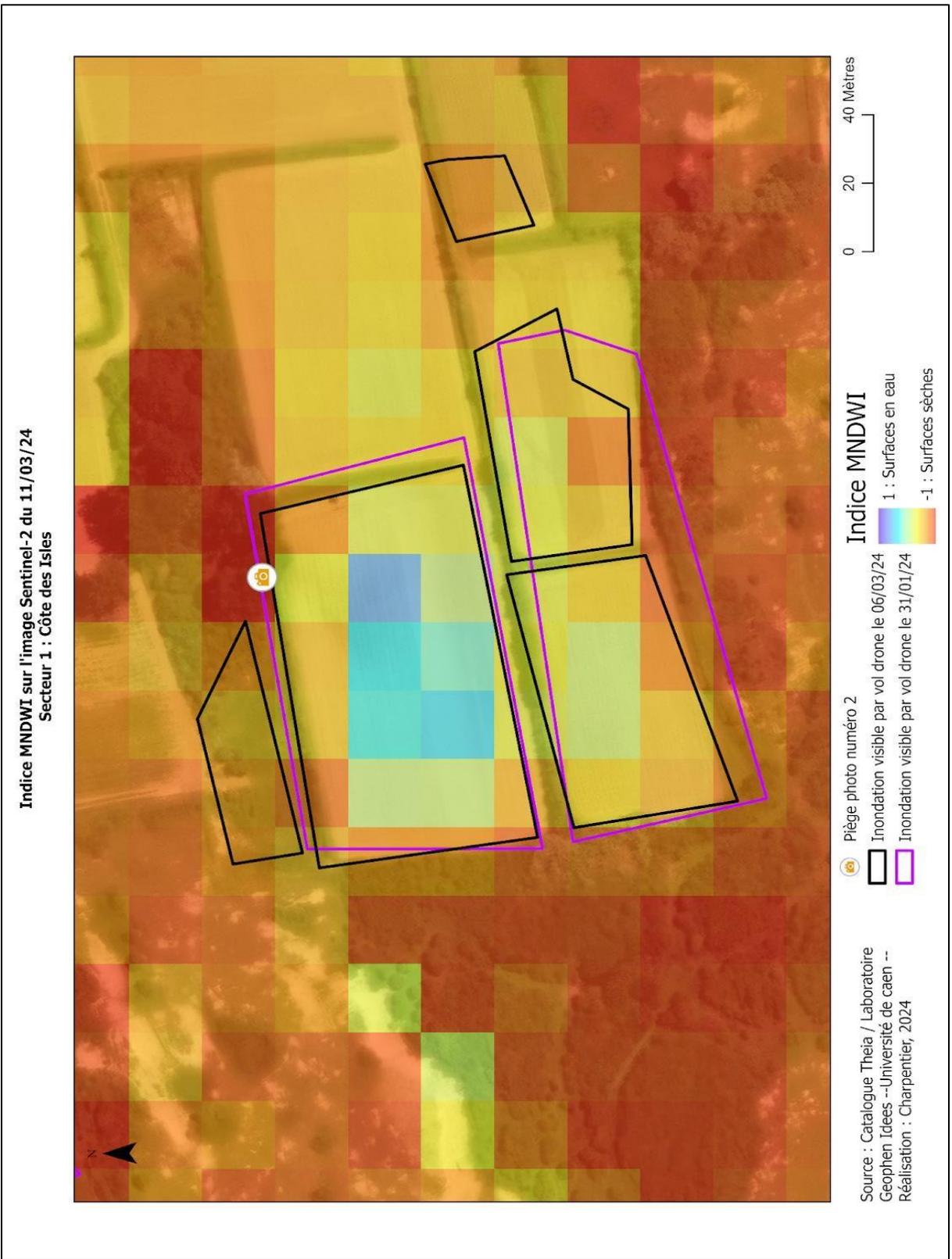


Figure 61 : Carte de l'indice MNDWI sur l'image Sentinel-2 du 11/03/24 (Charpentier, 2024)

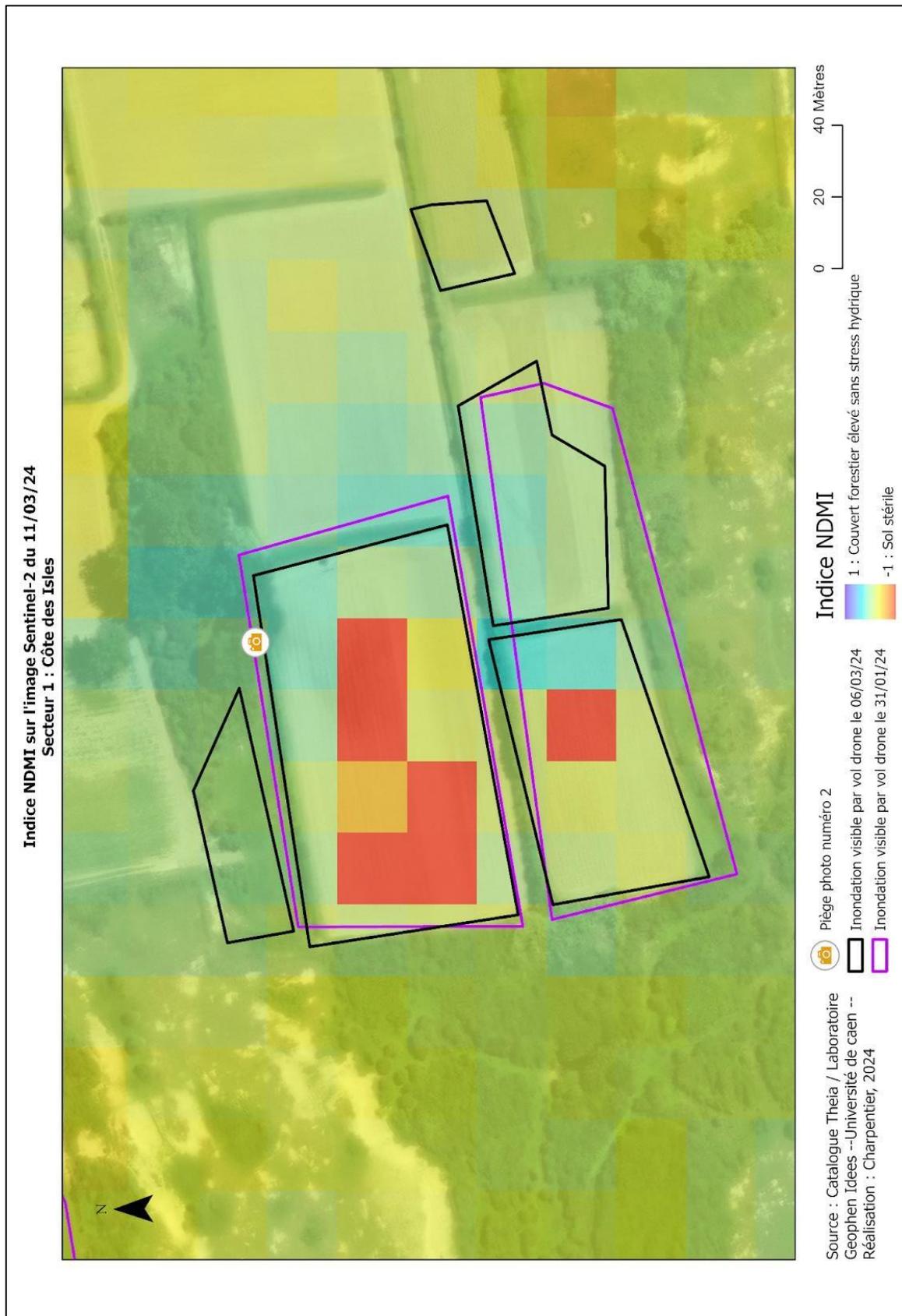


Figure 62 : Carte de l'indice NDMI sur l'image Sentinel-2 du 11/03/24 (Charpentier, 2024)

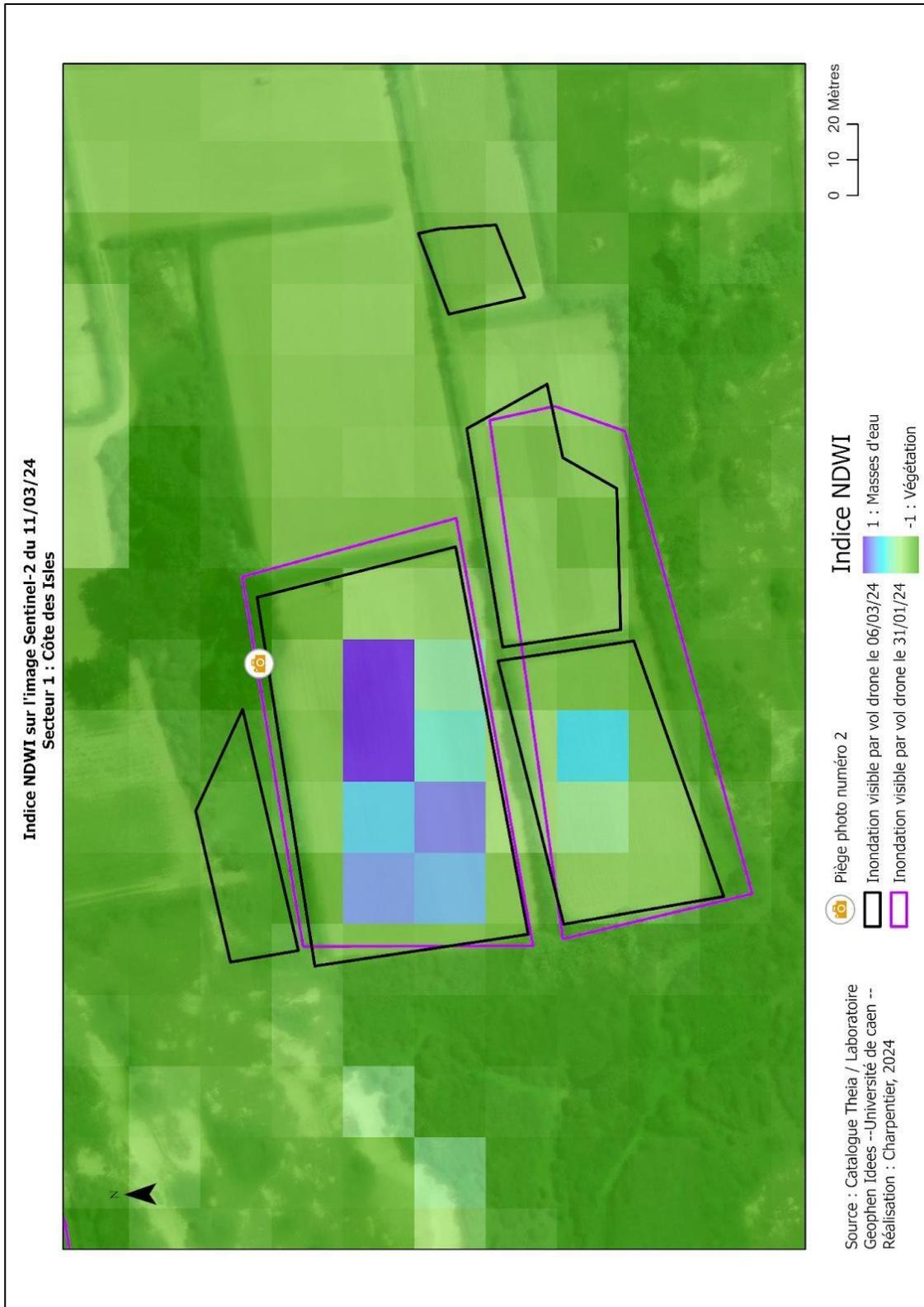


Figure 63 : Carte de l'indice NDWI sur l'image Sentinel-2 du 11/03/24 (Charpentier, 2024)



Figure 64 : Carte de l'indice NDVI sur l'image Sentinel-2 du 11/03/24 (Charpentier, 2024)

1.5. Résultats des différents indices sur l'image Sentinel-2 du 15 février 2021

1.5.1. Efficacité des indices sur les images Sentinel-2, pour un suivi historique

Les indices calculés à partir des images satellites fournissent des informations intéressantes sur les inondations, mais avec une interprétation à multiple choix pour certains indices. En effet, sans données précises sur la localisation, il est difficile de définir avec certitude s'il s'agit d'une inondation. Par exemple, avec l'indice NDVI (figure 64), plusieurs parcelles de la zone d'étude apparaissent colorées en noir et gris, ce qui peut signifier la présence d'eau. Cependant, la présence d'inondation ne peut être assurée.

Les résultats dépendent de la signification de l'indice utilisé. L'indice NDVI indique la santé de la végétation, les valeurs proches de -1 peuvent représenter de l'eau car la végétation n'est plus hydratée. L'indice NDMI (figure 62), quant à lui, indique si le sol est stérile ou si la végétation n'est pas en stress hydrique. Les valeurs proches de -1 (pixels rouges) correspondent aux terres constituées de cailloux, graviers, argiles ou sables, tandis que les valeurs proches de 1 (en bleu) représentent des terres cultivées ou une végétation assez hydratée.

Cependant, cet indice peut avoir deux significations dans l'étude des inondations. Une terre stérile peut être une terre ayant subi une inondation, où toute la végétation est morte, ou bien une terre prête à être cultivée. Inversement, les valeurs colorées en bleu, représentant une végétation sans stress hydrique, peuvent signifier que les cultures sont en bonne santé et qu'elles ne manquent pas d'eau. Ou au contraire, qu'il y a une abondance d'eau, donc qu'elles sont inondées.

Enfin, l'indice NDWI (figure 63) spécifie s'il s'agit de végétation (valeurs proches de -1) ou d'une masse d'eau (valeurs proches de 1). Toutefois, les masses d'eau représentées peuvent être des mares, des rivières, des piscines, des lacs, etc.

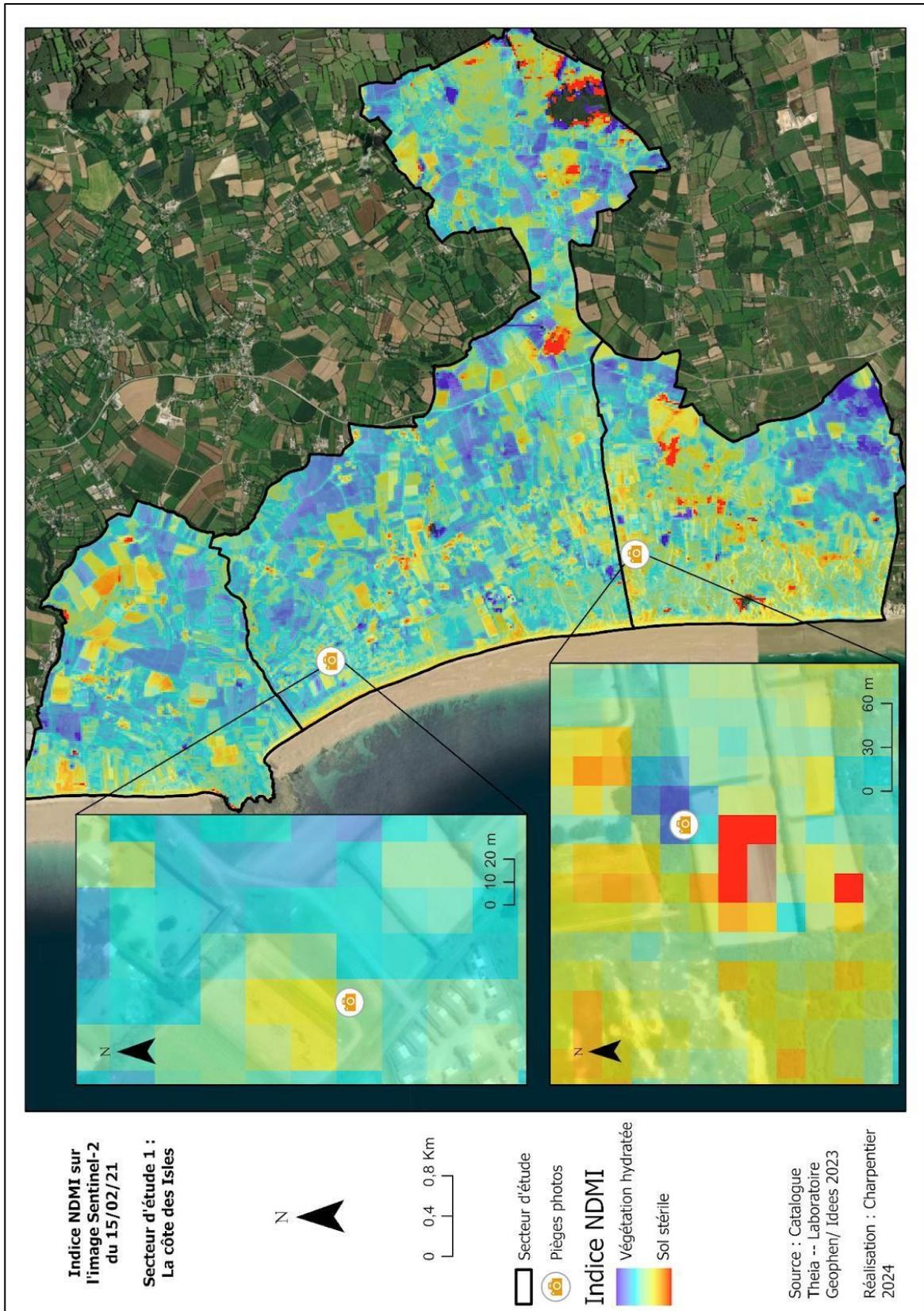


Figure 65 : Carte de l'indice NDMI sur l'image Sentinel-2 du 15/02/21 (Charpentier, 2024)



Figure 66 : Carte de l'indice NDVI sur l'image Sentinel-2 du 15/02/21 (Charpentier, 2024)

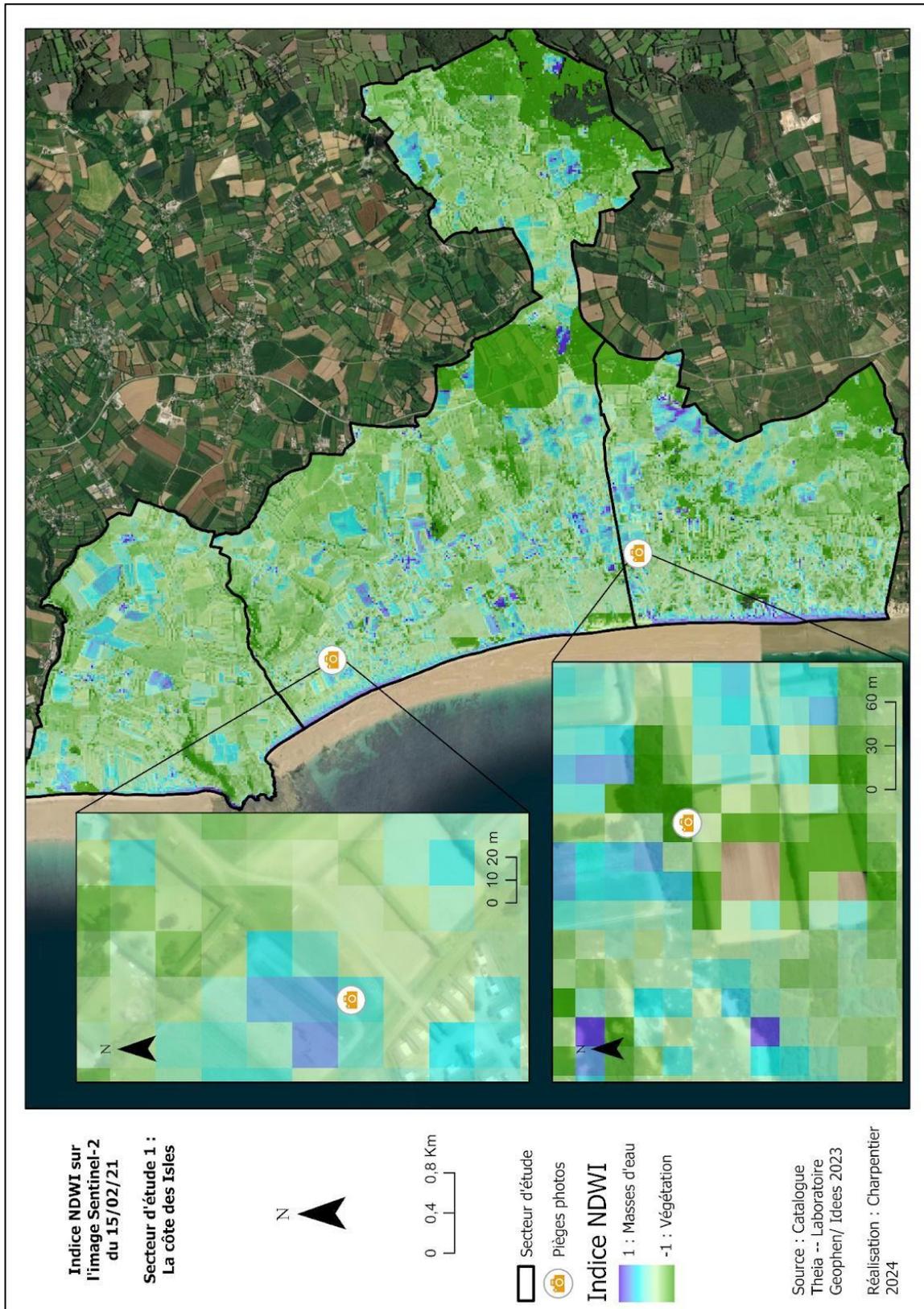


Figure 67 : Carte de l'indice NDWI sur l'image Sentinel-2 du 15/02/21 (Charpentier, 2024)

Les indices spectraux se basent sur les signatures spectrales de chaque objet

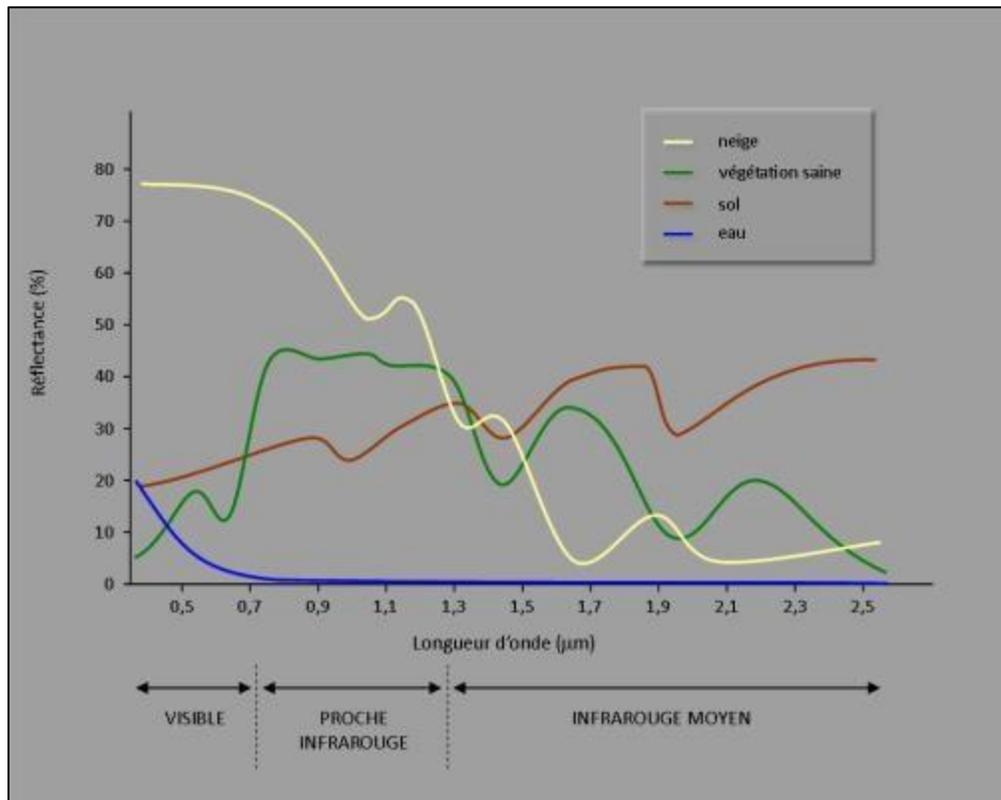


Figure 68 : Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen (<http://www.uved.fr>, 2008)

Comme indiqué par la figure 68, l'eau a une réflectance assez faible dans les trois domaines spectraux présentés. Sa couleur bleue est due à sa plus forte absorption dans les ondes courtes du domaine visible. Cependant la signature spectrale de l'eau dépend de plusieurs facteurs : l'agitation de surface sous l'effet du vent et des houles, la présence d'un flottant (polluant ou navire), la charge de sédiments en suspension, la présence de phytoplanctons et de pigments chlorophylliens dans les eaux, les substances dissoutes, et la présence d'eau de flottabilité de températures et de densités différentes (L.Picon et al, 2023)

Par exemple, "plus l'eau est turbide, plus elle contient de matériaux sédimentaires, plus sa réflectance augmente dans toutes les longueurs d'ondes, et particulièrement pour les ondes les plus longues (rouge)" voir figure 69. (<http://www.uved.fr>, 2008)

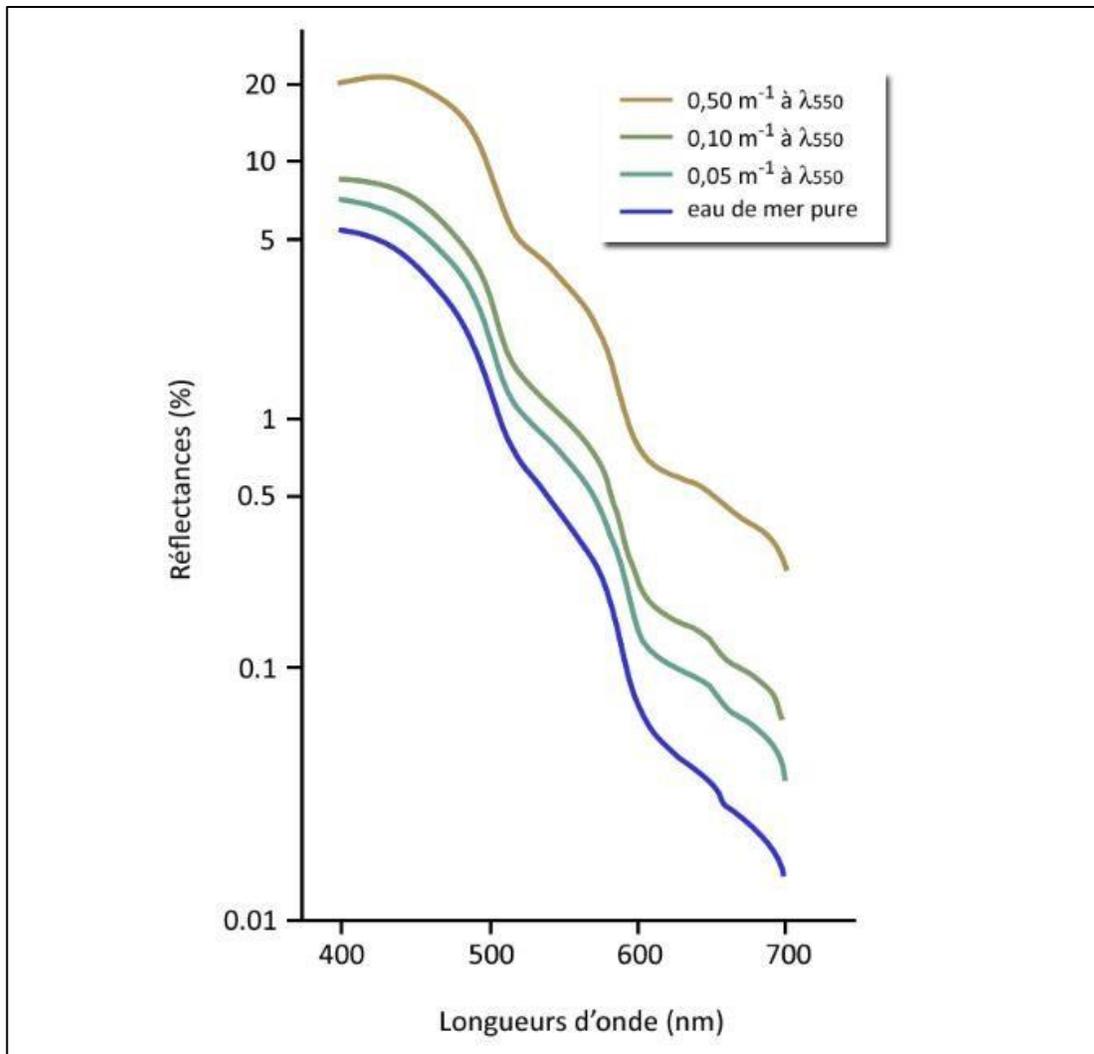


Figure 69 : Réflectance de l'eau de mer pour diverses valeurs du coefficient d'atténuation à 550 nm (Thomas, Y.F., 1978).

Ici le coefficient d'atténuation de l'eau mesure la perte d'énergie du rayonnement (ici à 550 nm) traversant la colonne d'eau. Il permet d'apprécier la transparence de l'eau liée à la présence de particules en suspension, qui gênent la transmission de la lumière.

La réflectance de l'eau et sa composition est alors à prendre en compte dans l'analyse des différents indices. Comme évoqué précédemment, il est difficile de savoir avec seulement le calcul d'indices, si une zone est inondée. Les indices permettent alors de créer des hypothèses mais il faut les justifier par la suite à l'aide d'un contrôle sur le terrain.

1.6. Résultats de l'indice NDVI sur l'image Pléiade du 3 mai 2021

Le lieu choisi pour le calcul des indices sur les images Pléiades reste maintenu, malgré un doute qui s'installe. En effet, cette année (2024), à cette période (en mai), les parcelles étaient encore en eau, mais pour l'année 2021 nous ne savons pas. Ainsi l'utilisation de l'image du 3 mai 2021, est contraignante pour cette étude, mais comme l'accessibilité des images pléiades est limitée sur l'interface Theia, alors nous la conservons.

L'indice NDVI appliqué aux images Pléiades améliore la détection des surfaces végétales. Avant le calcul de l'indice NDVI, figure 72, la coloration des pixels au niveau de la parcelle étudiée révèle une tache au centre, suggérant la présence d'une inondation. Avec l'indice NDVI calculé, figure 73, cette anomalie devient plus apparente en raison de couleurs plus marquées, indiquant un sol nu sans végétation.

L'analyse aurait bénéficié du calcul d'autres indices, mais la segmentation des canaux de l'image affinée s'est avérée impossible. En effet, extraire les canaux aurait permis d'obtenir des indices hydrologiques nécessitant le canal infrarouge, présent sur les images Pléiades. Néanmoins, il est plausible de formuler une hypothèse concernant cette inondation potentielle en utilisant les données du coefficient de marée et du cumul pluviométrique observés à cette date.

En effet, le 28 avril 2021, un coefficient de marée de 113 est observé à Baubigny, voir figure 71.

Concernant la pluviométrie, sur cette zone, les stations de référence sont la Pointe de la Hague ou Bricquebec. Le cumul pluviométrique du mois d'avril et mai 2021 n'est pas disponible sur la station de Bricquebec. Alors on observe cette variable, sur le mois d'avril et mai 2021, à la station de la pointe de la Hague (figure 70)

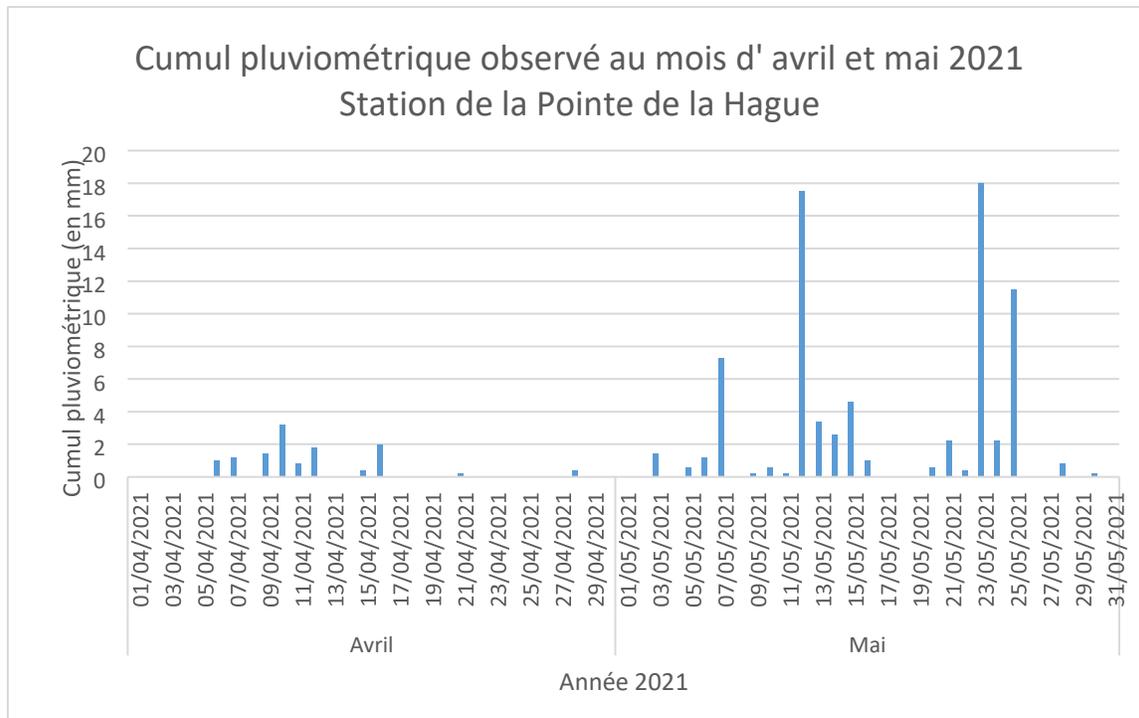


Figure 70 : Cumul pluviométrique observé au mois d'avril et mai 2021, à la station météorologique de la pointe de la Hague (Charpentier, 2024)

Les valeurs pluviométriques observées ne sont pas extrêmes. Toutefois le 3 mai 2021, le cumul est de 1,4 mm. Cependant, il faut comprendre, comme expliqué dans le chapitre 6, partie 2.4, que cette station n'est pas forcément représentative de la commune de Surtainville.

Alors il est impossible, au vu du cumul pluviométrique observé, du coefficient de marée et du calcul de l'indice NDVI, de dire si cette zone est inondée à la date du 3 mai 2021. En effet, avec le calcul de l'indice NDVI, on ne voit pas d'inondation et les valeurs pluviométriques ne sont pas assez représentatives pour déduire une inondation.

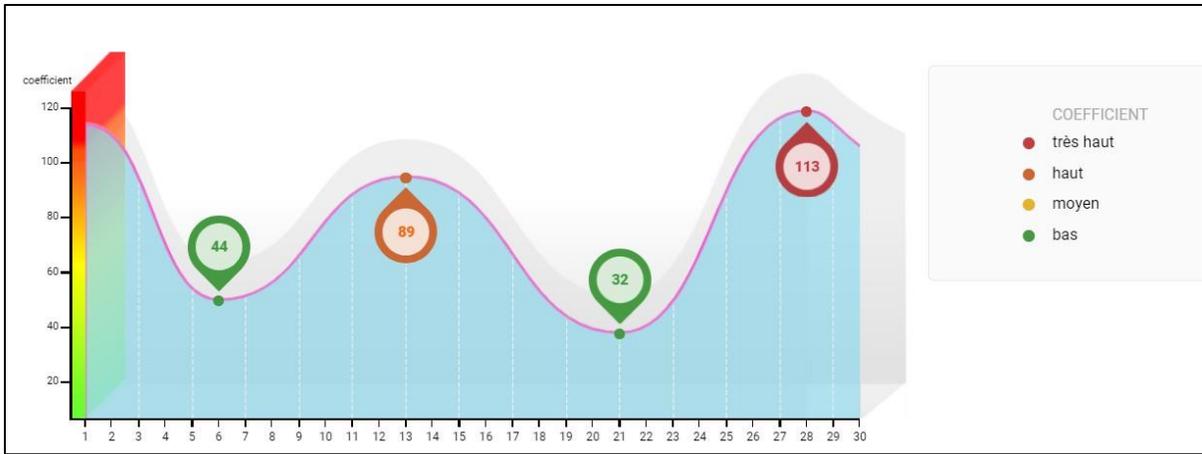
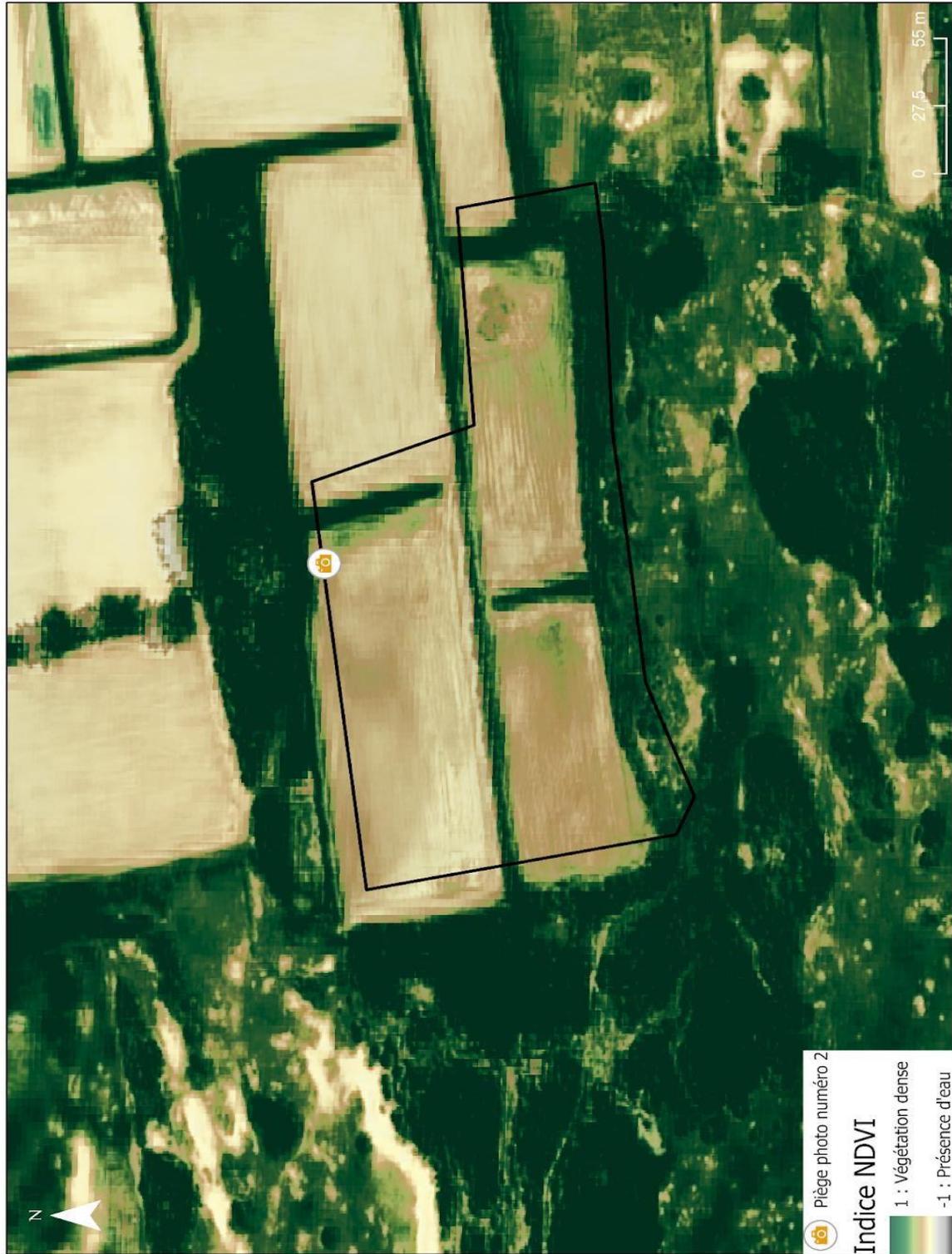


Figure 71 : Coefficient de marée estimé à Baubigny, au mois d'avril 2021 (Charpentier, 2024)



Figure 72 : Image pléiade du 3 mai 2021, sans calcul d'indices (Charpentier, 2024)

Calcul de l'indice NDVI sur une image Pléiade du 3 mai 2021



Source : Pléiades-Theia.cnes / Réalisation : Charpentier, 2024

Figure 73 : Calcul de l'indice NDVI sur une image Pléiade du 3 mai 2021 (Charpentier, 2024°

Cette analyse aurait pu bénéficier d'une argumentation plus développée en réalisant l'indice NDVI ou d'autres indices hydrologiques sur une image Sentinel-2. Cependant, aucune image Sentinel-2 n'est disponible à la date du 3 mai 2021. L'une est disponible le 1^{er} mai et une autre le 4 mai, cependant, la couverture nuageuse de ces images dépasse les 50%, alors elles sont inexploitable.

Les images pléiades possèdent un fort potentiel dans l'analyse d'un phénomène hydrologique comme évoqué dans cette partie, mais pour cela, il faut résoudre le problème de leur indisponibilité en ligne.

2.Utilisation du drone : comparaison des hivers 2001 et 2024

Maintenant que les images satellites ont été testés, il faut à présent analyser les images obtenues avec le drone.

2.1. Répertoire des débordements de nappes observés avec le terrain

Sur chaque document obtenu, seuls trois des 11 vols sont exempts d'inondations visibles à l'œil nu (Figure 74).

Nom du vol	Date d'acquisition	Présence d'inondation
Vol1_100media_surtainville	01/02/2024	non
Vol2_101media_créances	01/02/2024	oui
Vol2_102media_surtainville	01/02/2024	non
Vol1_Créances	05/03/2024	oui
Vol2_Créances	05/03/2024	non
Vol3_St_Germain	05/03/2024	oui
Vol4_St-Germain	06/03/2024	oui
Vol5_Surtainville	06/03/2024	oui
Vol6_Surtainville	06/03/2024	oui
Vol8_Rozel	06/03/2024	oui
Créances_11_01_24	31/01/2024	oui

Figure 74 : Tableau représentant la présence d'inondation ou non sur chaque vol drone réalisé

(Charpentier, 2024)

Les inondations de 2024 sont principalement localisées le long du littoral. Les six communes étudiées, notamment Créances et Saint-Germain-sur-Ay, ont principalement été inondées en mars pour cette année 2024 (voir figure 75 et 76). Cependant, les inondations de janvier et mars se chevauchent dans certaines communes. En février, peu d'inondations sont observées, à l'exception d'une petite zone au sud de Créances.

Figure 75 : Carte des inondations par remontées de nappes observées sur l'année 2024 : secteur de la côte des Isles (Charpentier, 2024)

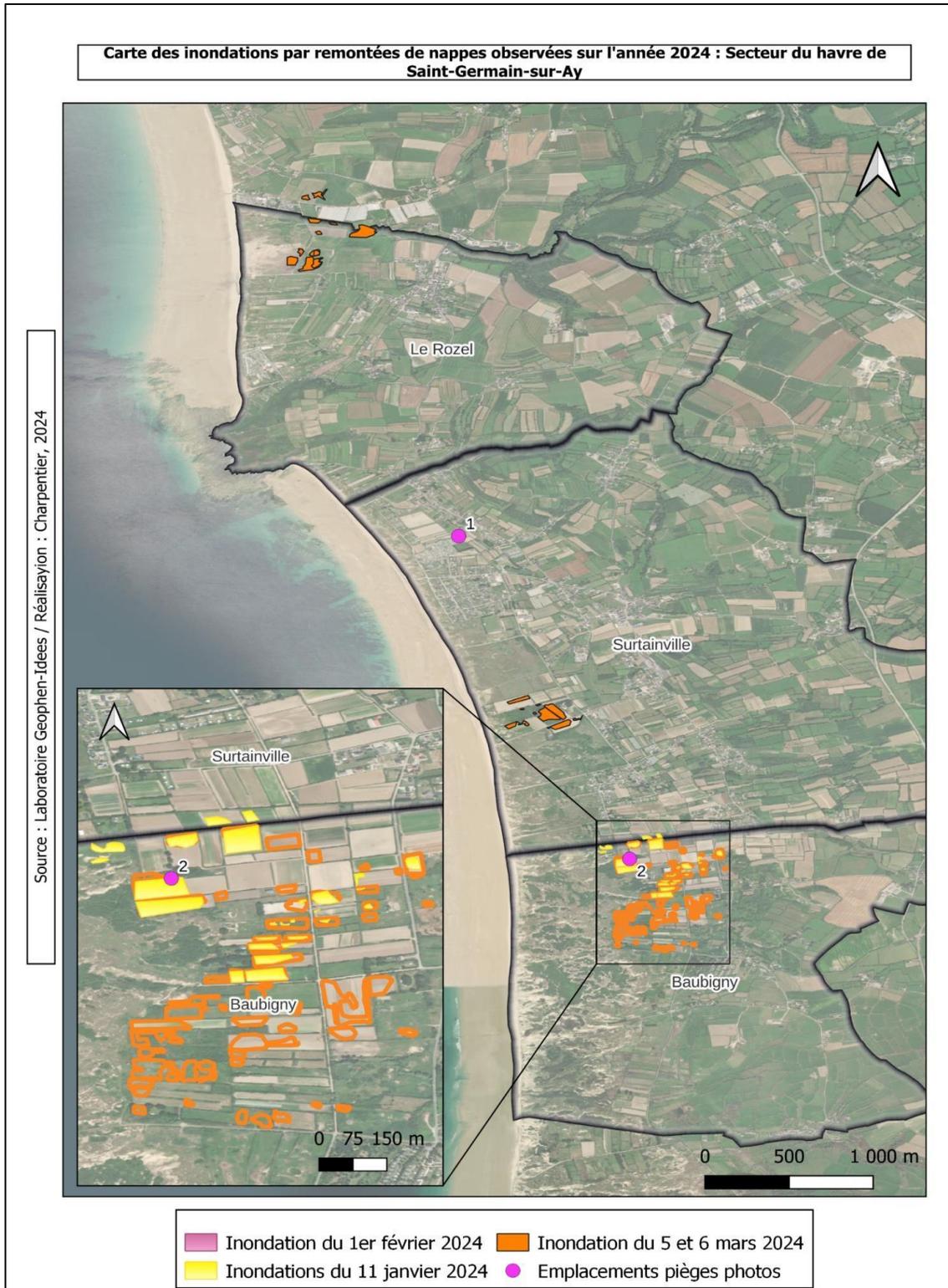


Figure 75 : Carte des inondations par remontées de nappes observées sur l'année 2024 : secteur de la côte des Isles (Charpentier, 2024)

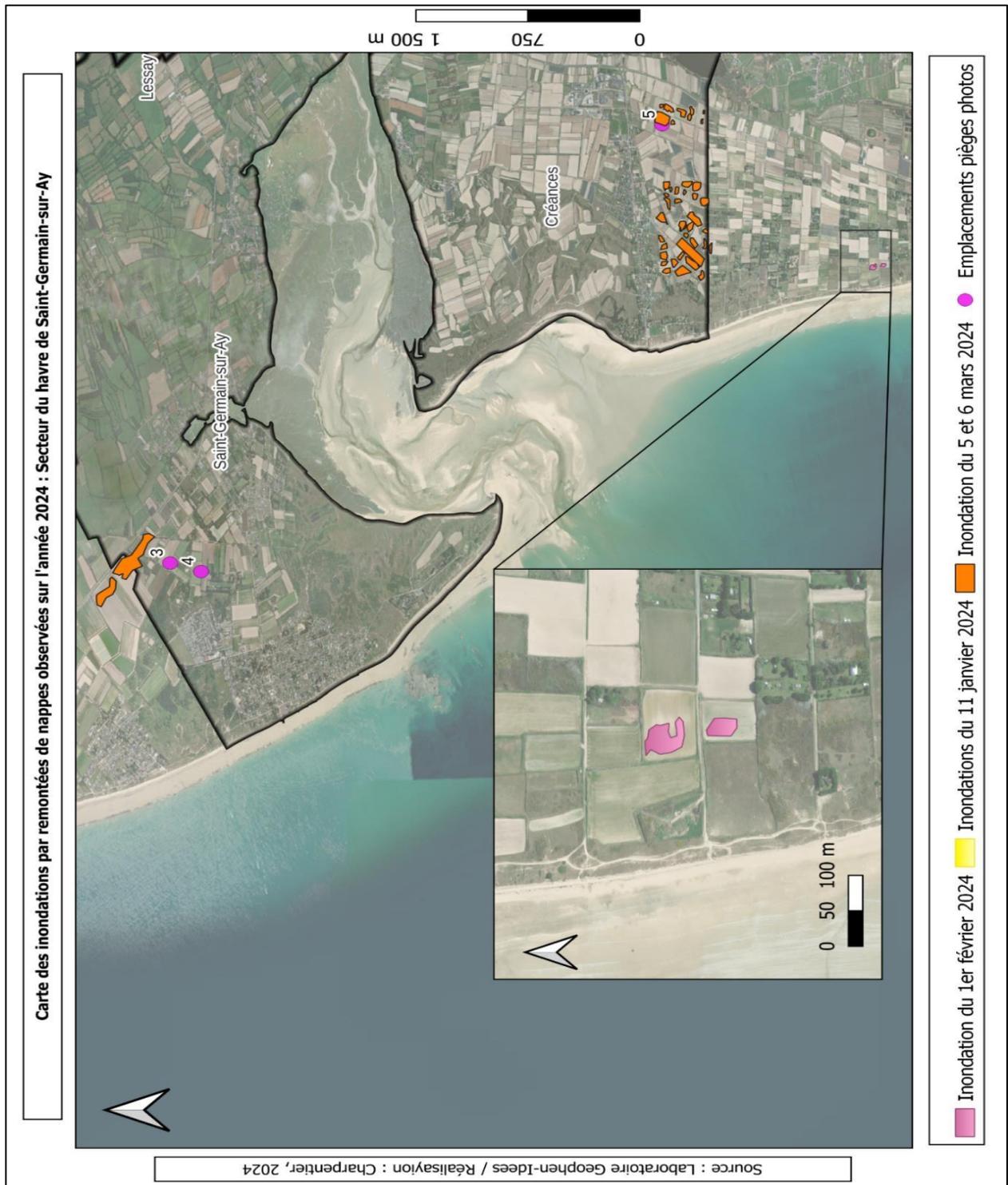


Figure 76 : Carte des inondations par remontées de nappes observées sur l'année 2024 : secteur du havre de Saint-Germain-sur-Ay (Charpentier, 2024°)

2.2. Test du Green Leaf Index

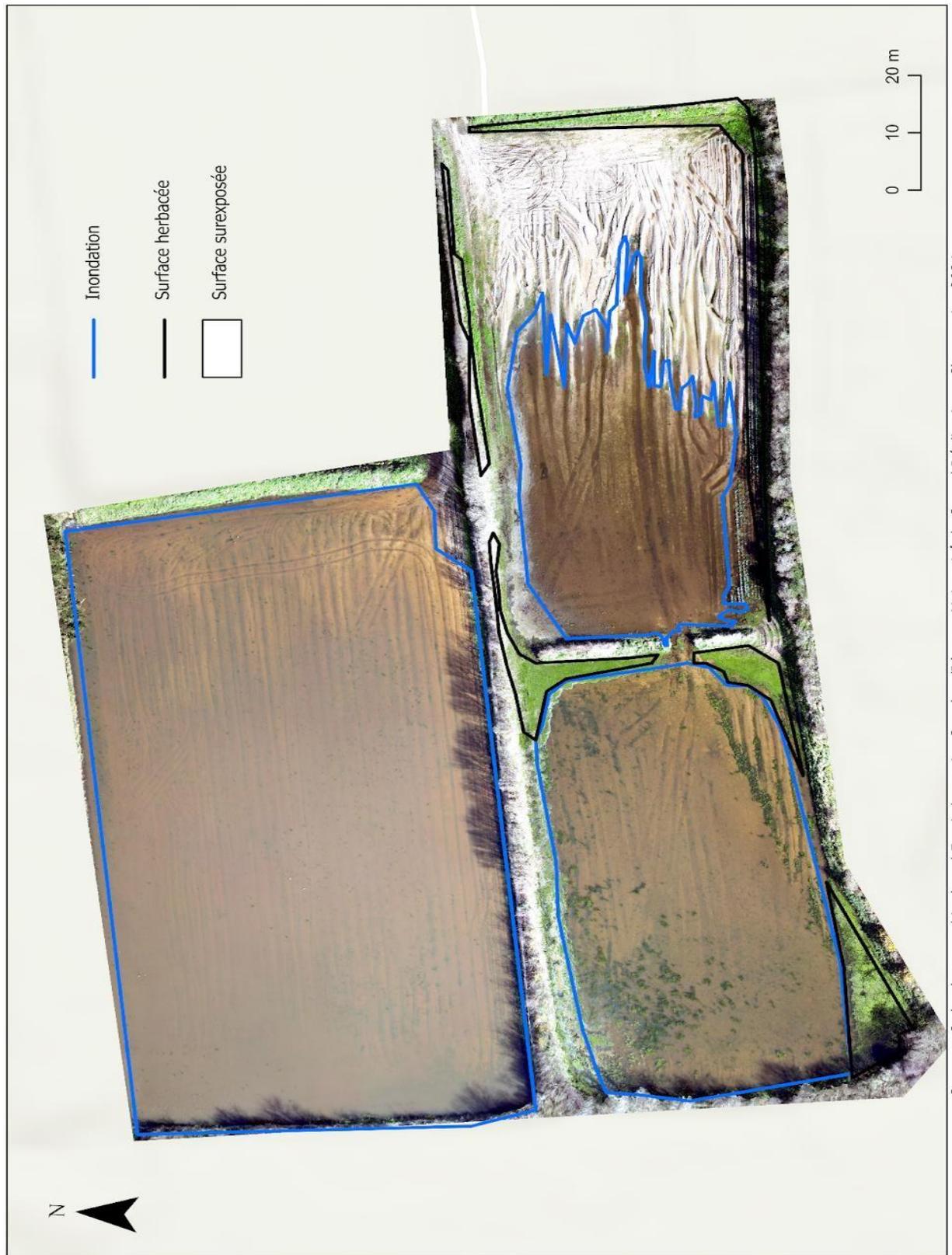
2.2.1. Test de l'indice GLI sur des zones inondées

Les vols où aucune inondation n'est visible à l'œil nu, sont tout de même des zones où la nappe peut être contenue dans le sol et que le débordement peut faire surface, alors on peut repérer l'humidité. Comme on peut le voir sur la figure représentant toutes les zones survolées avec le drone, sur les deux vols enregistrés en février sans aucune trace d'eau, ces zones sont inondées en mars. Il est alors possible de savoir si un espace est touché par ces inondations avec l'indice GLI. La soustraction des différentes bandes du canal RVB de l'orthophotographie peuvent révéler des traces d'inondation en identifiant la santé de la végétation. Un premier test est effectué sur un périmètre déjà inondé : le vol 5 à Surtainville, le 5 mars 2024 (figure 77). Pour rappel, l'indice GLI est l'indice de feuilles mortes, qui met en avant les surfaces où la végétation n'est pas vivante, en utilisant le domaine du visible, c'est pourquoi on peut seulement utiliser cet indice sur le drone, car il dispose juste d'un capteur RVB.

La carte présentée sur la figure 77, met en évidence une parcelle unique située face au piège photographique numéro deux. Plusieurs entités sont identifiables : une surface inondée, une zone herbacée et une partie blanche. Cette dernière semble correspondre à une surface surexposée, probablement due à une forte exposition solaire lors de l'acquisition par drone.

L'objectif est d'évaluer la capacité de l'indice GLI à détecter les zones inondées. Les différentes réflectances spectrales des surfaces devraient permettre de distinguer ces entités. Une analyse approfondie des signatures spectrales est nécessaire pour valider l'efficacité de cette méthode dans la cartographie des inondations (Cf partie 1.4, du chapitre 5).

**Parcelles inondées au niveau du piège photo numéro 2, à Surtainville.
Basé sur le vol drone n°5 du 5 mars 2024**

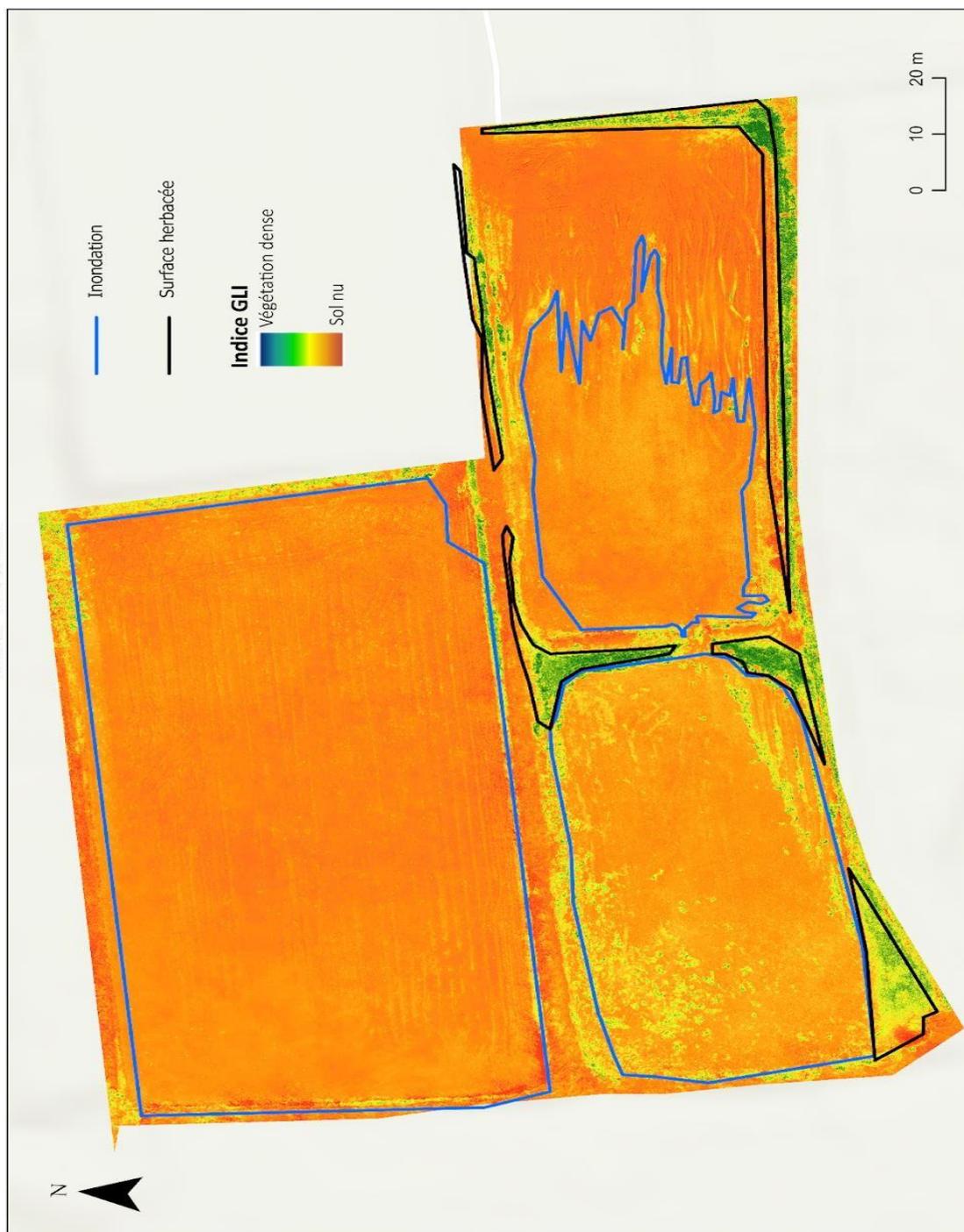


Source : Orthophotographie du vol 5 -- Laboratoire Geophen/Idees -- Université de Caen / Réalisation : Charpentier, 2024

Figure 77 : Carte de la parcelle inondée en face du piège photo n°2 à Surtainville (Charpentier, 2024)

**Parcelles inondées au niveau du piège photo numéro 2, à Surtainville.
Basé sur le vol drone n°5 du 5 mars 2024**

Test de l'indice GLI



Source : Orthophotographie du vol 5 -- Laboratoire Geophen/Idees -- Université de Caen / Réalisation : Charpentier, 2024

Figure 78 : Test de l'indice GLI sur la parcelle inondée en face du piège photo n°2 à Surtainville (Charpentier, 2024)

Sur cette carte, les surfaces orange représentent le sol nu et les surfaces vertes la densité de végétation. Dans un contexte d'inondation par débordement de nappes, les zones orange peuvent aussi représenter les zones inondées ou ayant subi une inondation. Mais les "sols nus", peuvent aussi refléter des parcelles déjà « nues » ou qui sont devenues inutilisables, à cause des inondations, alors l'indice GLI est à relativiser. L'image ci-dessus présente des zones colorées en orange, indiquant potentiellement la présence d'eau. Cependant, cette teinte est également attribuée aux surfaces surexposées, compliquant l'identification précise des zones inondées. La couleur verte caractérise de manière fiable la présence de végétation. Les zones jaunâtres suggèrent l'existence de mousses aquatiques (figure 78)

L'indice GLI permet de détecter efficacement les régions où la végétation est présente. Néanmoins, l'identification des zones inondées s'avère plus complexe avec cet indice. Des techniques complémentaires sont nécessaires pour une détection précise des inondations.

2.2.2. Test de l'indice GLI sur des parcelles non-inondées

L'indice GLI révèle des zones orangées correspondant à des remontées de nappes phréatiques visibles. Pour certaines parcelles, la surface colorée en orange épouse la forme de l'inondation. Cependant, pour d'autres, la surface en eau est plus restreinte que la zone orangée. Cela suggère que la surface inondée s'est réduite dans le temps, mais que la parcelle a été entièrement submergée précédemment.

Ce test démontre que l'indice GLI permet de détecter des inondations visibles à l'œil nu, situées sous la surface terrestre, ou des événements d'inondation survenus les mois précédents.

L'application de cette méthode sur les trois zones non inondées de l'année 2024, sur les figures 79, 80 et 81, s'avère intéressante à des fins de comparaison.

L'indice GLI est appliqué sur trois zones où aucune inondation n'a été détectée sur l'année 2024. Ces cartes présentent plusieurs zones colorées en orange, jaune ou vert. Avec cet indice, seules des hypothèses peuvent être formulées. Par exemple, sur le vol numéro 1 du 1er février 2024, la bande ensablée apparaît également colorée en orange, sans pour autant indiquer la présence d'eau ou d'humidité.

Lors de l'analyse de cet indice, il est crucial d'avoir l'orthophotographie brute pour identifier les différentes entités géographiques. Sur ces trois cartes, certaines parcelles sont colorées en orange, ce qui pourrait suggérer la présence d'humidité dans le sol d'une ancienne inondation, ou d'une inondation à venir. Cependant, comme mentionné précédemment, des techniques d'analyse complémentaires, telles que des points de contrôle au sol, sont nécessaires pour confirmer ces hypothèses

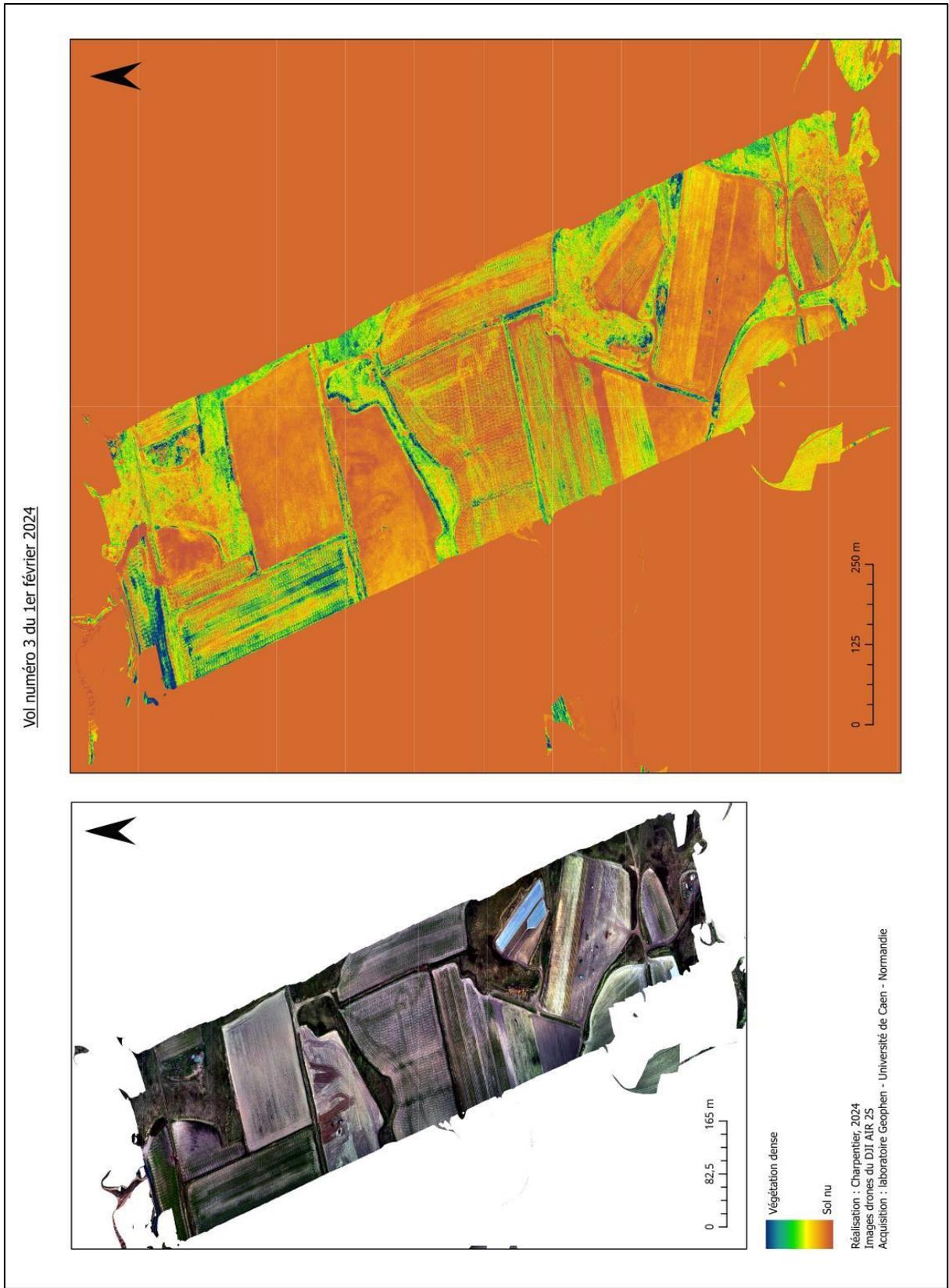


Figure 79 : Test de l'indice GLI sur l'orthophotographie du vol n°3 du 1^{er} février 2024 (Charpentier, 2024)

Vol numéro 2 du 1er février 2024

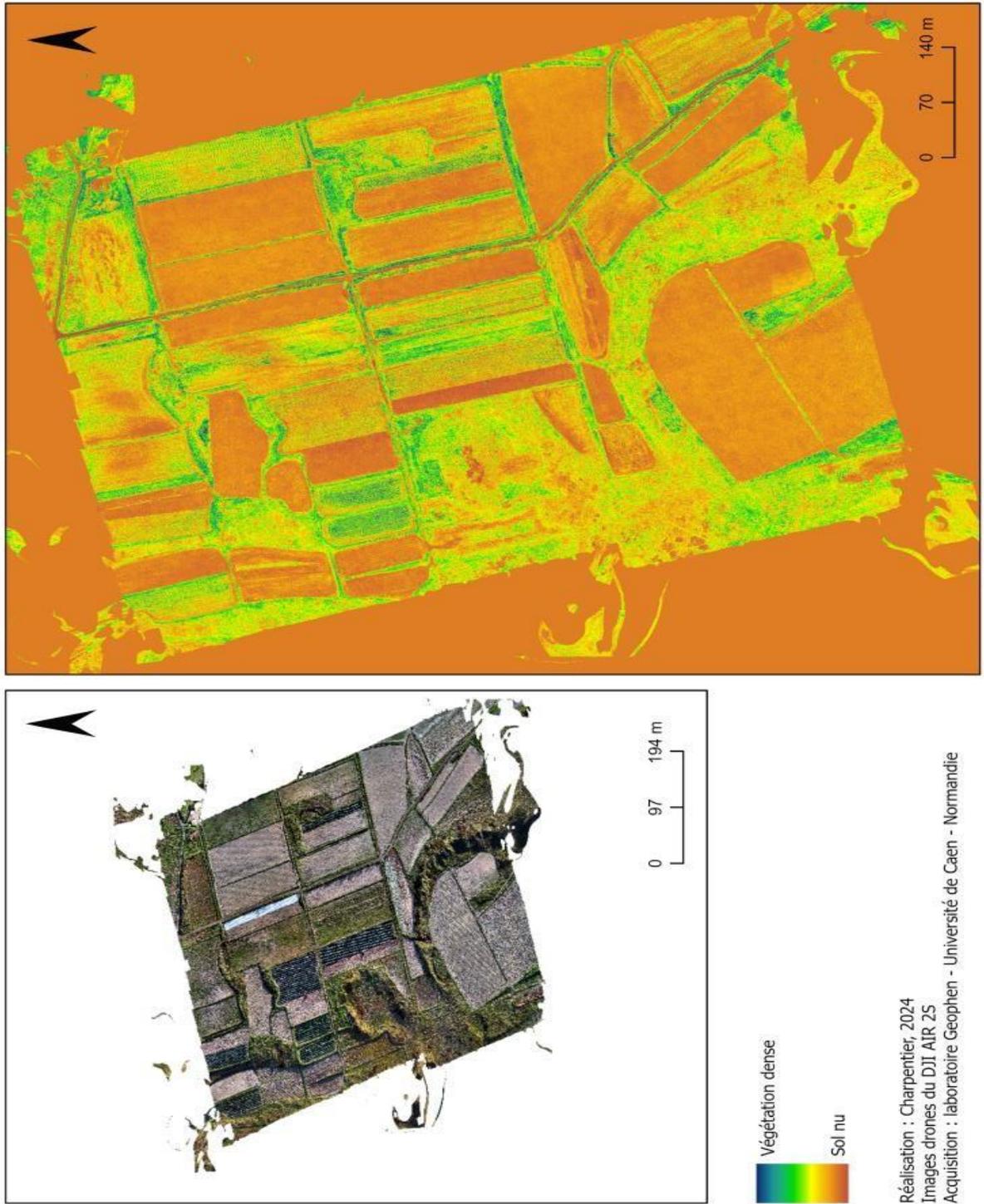


Figure 80 : Test de l'indice GLI sur l'orthophotographie du vol n°2 du 1er février 2024 (Charpentier, 2024)

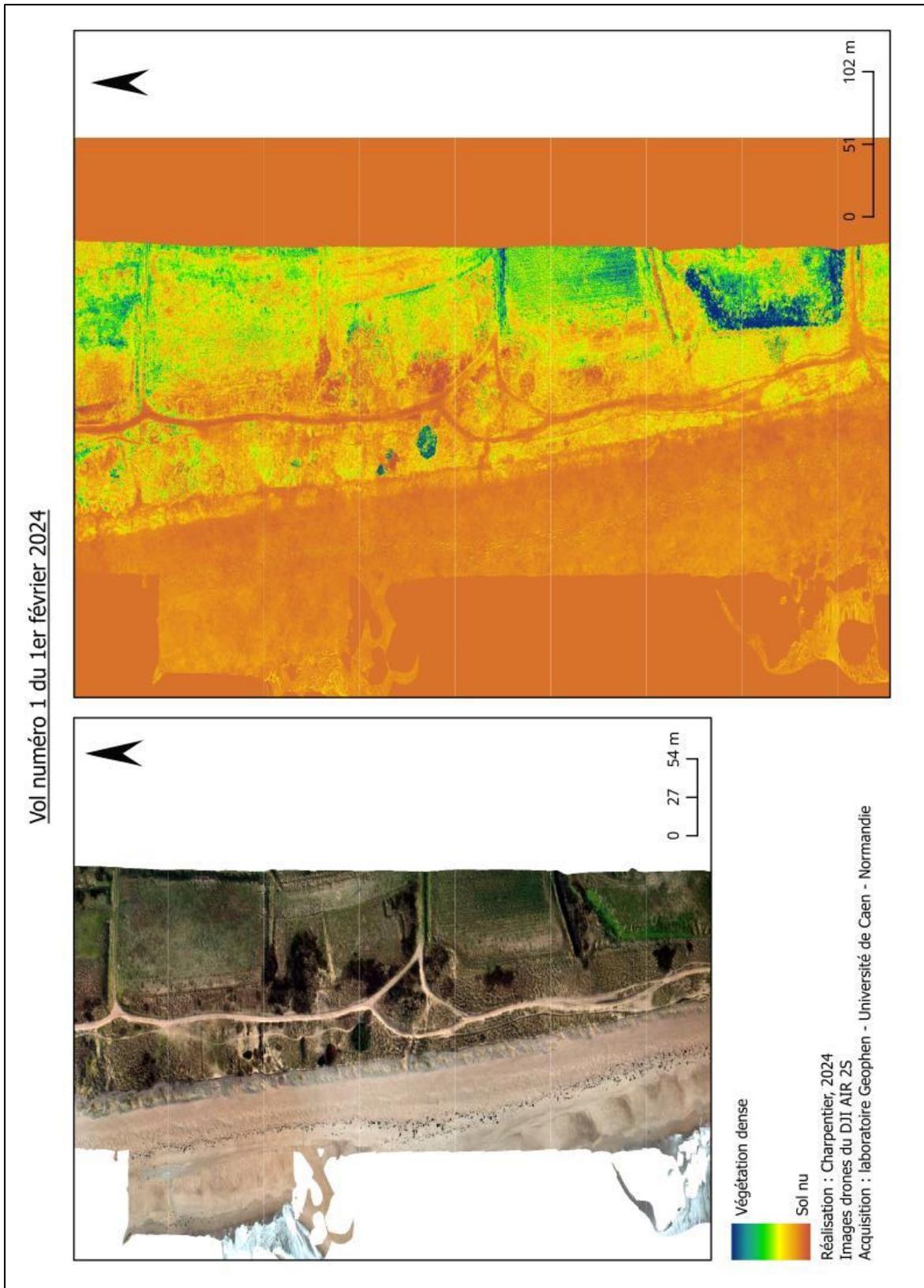


Figure 81 : Test de l'indice GLI sur l'orthophotographie du vol n°1 du 1er février 2024 (Charpentier, 2024)

2.3. Comparaison des inondations entre 2001 et 2024

Les inondations identifiées en 2001 et en 2024 ont des localisations similaires. Deux tendances sont remarquables :

(1) la localisation : En 2001, la DREAL a enregistré des inondations dans le secteur de la côte des Isles. Ces inondations étaient principalement situées en avant du cordon dunaire. En revanche, au Havre de Saint-Germain-sur-ay, les inondations étaient plus présentes sur les parcelles agricoles. En 2024, les inondations sont positionnées au même endroit que celles de 2001. On observe quelques décalages au niveau des parcelles inondées, mais cela peut être dû aux dates.

(2) la quantité : En 2024, moins d'inondations sont visibles qu'en 2001. En effet, il est nécessaire de prendre en compte que toute la zone inondée identifiée en 2001, n'a pas pu être survolée en 2024. Cependant, au niveau de Baubigny (figure 82), les parcelles inondées sont plus nombreuses.

Pour utiliser la couche shapefile des remontées de nappes potentielles du BRGM, certains critères sont à prendre en compte concernant la méthode employée. En effet, le BRGM a créé un rapport en 2018 sur la fiabilité de la méthode employée pour mettre au point ces données. Ainsi, la carte réalisée n'est pas exploitable à une échelle supérieure au 1/100 000ème. Puis cette carte n'est pas valide pour les zones karstiques, les zones urbaines et les secteurs après mine. Alors il convient d'utiliser des masques sur les différentes zones non-valides pour accompagner sa lecture et son interprétation.

Finalement, des travaux d'actualisation ont été menés en 2021 et comprennent les points suivants :

- Plusieurs centaines de « points et polygones » géoréférencés, avec un total de 1698 points et polygones.
- Presque toute la totalité des informations bancarisées et digitalisées proviennent de rapports d'expertise et de supports structurés qui permettent de caractériser l'inondation par remontée de nappe.

La fiabilité des données a été réévaluée selon deux indicateurs : la fiabilité du MNT (Modèle Numérique de Terrain) et des eaux souterraines. Relativement à la fiabilité globale des résultats, il est possible d'en tirer la conclusion suivante : « une très large majorité du territoire national est caractérisée par une fiabilité faible.

Ceci peut s'expliquer de différentes manières : forte hétérogénéité spatiale pour les données « eau souterraine », densité de points insuffisante pour les besoins de l'exercice, précision altimétrique assez faible sur une large part du territoire » (BRGM, 2018). Sur la carte de fiabilité globale actualisée, on remarque que le département de la manche est en zone caractérisée comme « faible » (voir annexe 1). Ainsi, pour la lecture des cartes suivantes, il est crucial de prendre en compte les éléments détaillés ci-dessus.

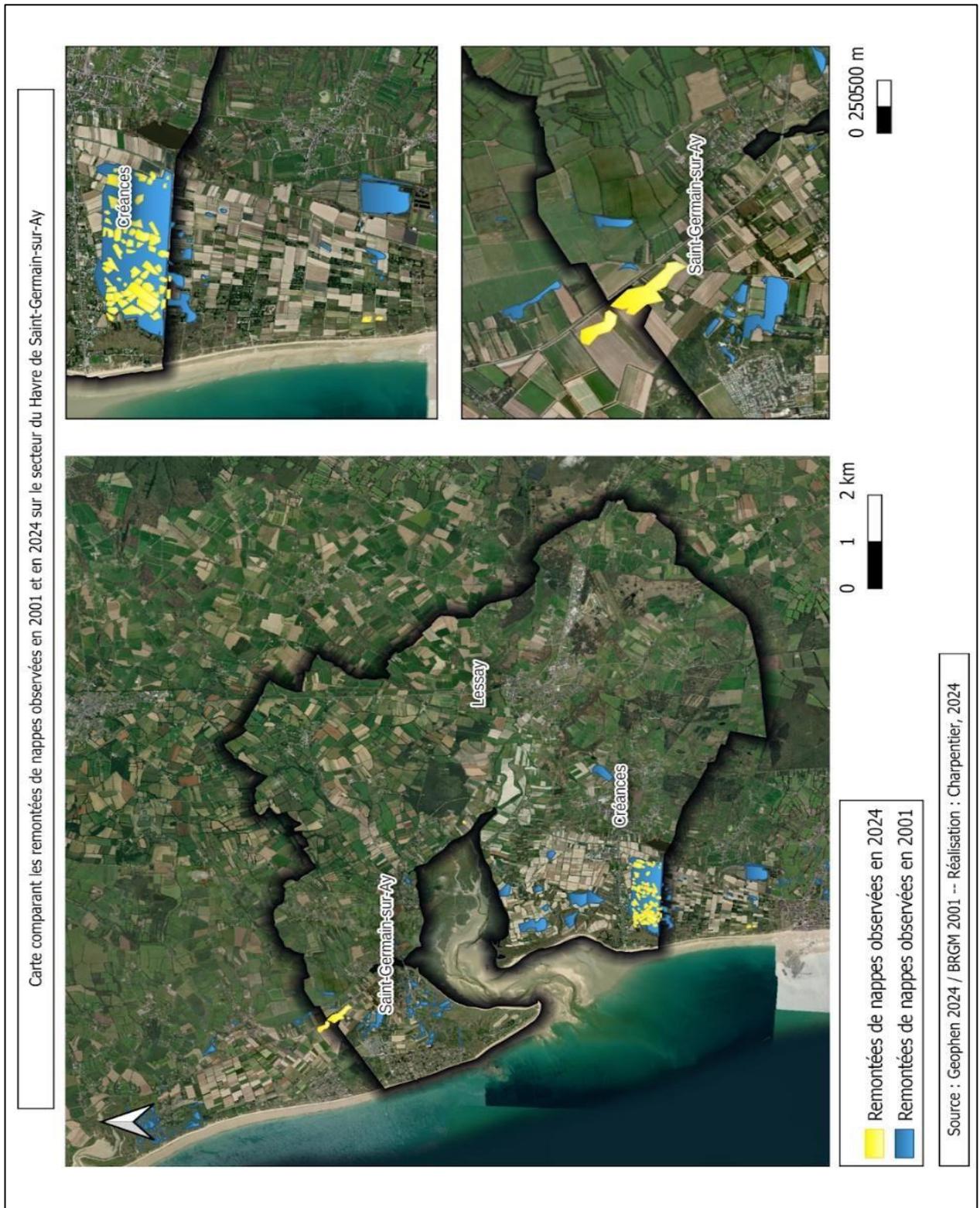


Figure 82 : Carte des remontées de nappes observées en 2001 et en 2024 au Havre de Saint-Germain-sur-Ay (Charpentier, 2024)

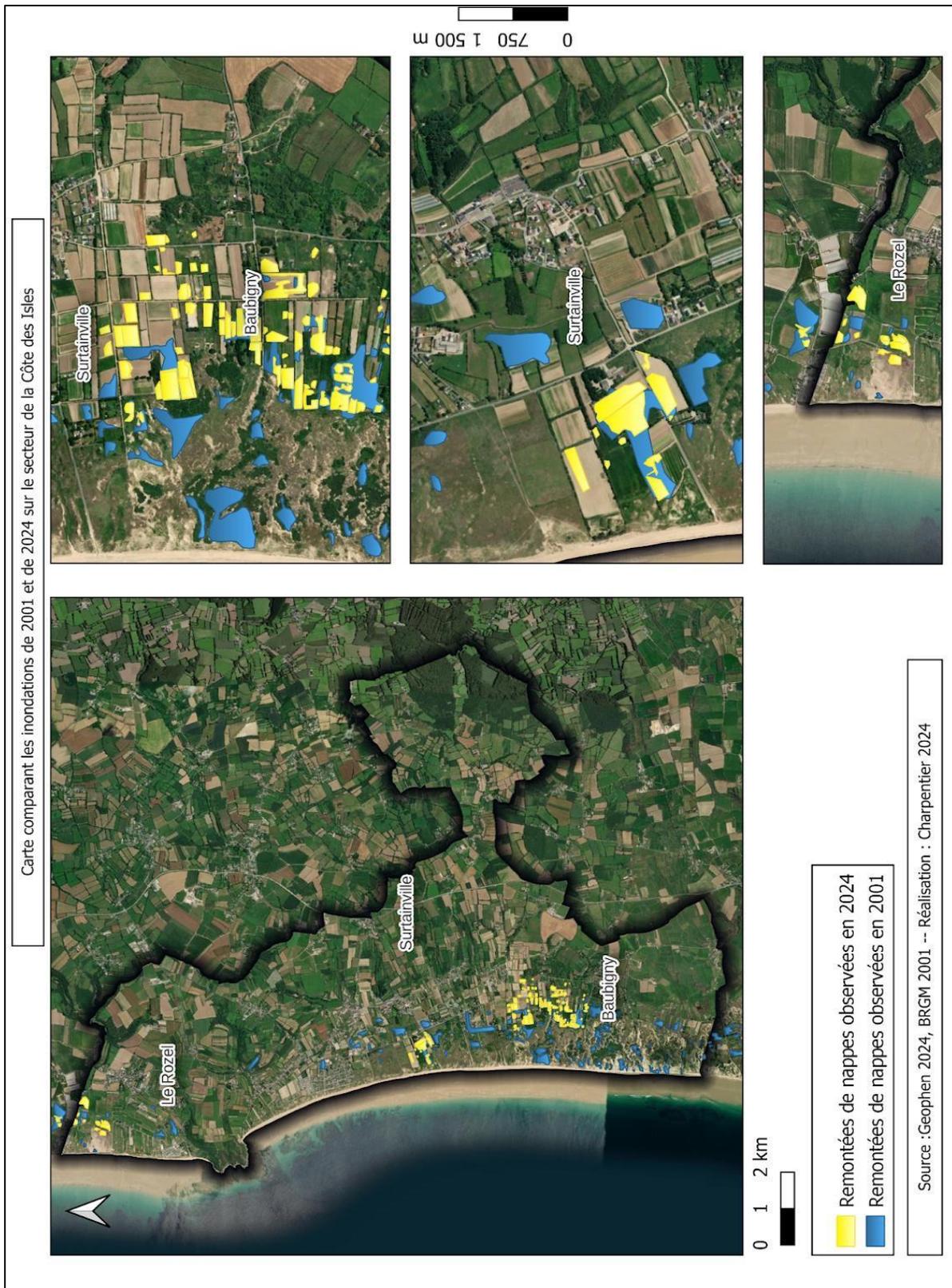


Figure 83 : Carte des remontées de nappes observées en 2001 et en 2024 au secteur de la côte des Isles (Charpentier, 2024)

3. Le contrôle terrain : des outils indispensables

Dans le but de confirmer nos résultats obtenus avec le drone et les images satellites et d'analyser les facteurs influençant les inondations, nous allons croiser nos résultats avec différentes données. Tout d'abord, nous utiliserons les pièges photographiques, qui nous permettent de savoir s'il y avait une inondation à une date donnée. Ensuite, nous examinerons les données météo-marines pour identifier le rôle de ces deux facteurs dans nos inondations.

3.1. Inondations observées avec les pièges photographiques

Les données des pièges photos ont été récupérées le 18 mai 2024. Sur les cinq pièges déposés, seuls deux d'entre eux montrent des valeurs chiffrées. En effet, les échelles limnimétriques des trois autres pièges ne sont pas disposées au niveau des inondations, donc nous ne pouvons pas avoir les hauteurs d'eau. Voici les données récupérées entre le 16 novembre 2023 et le 18 mai 2024, sur les pièges photos n°2 et 3 :

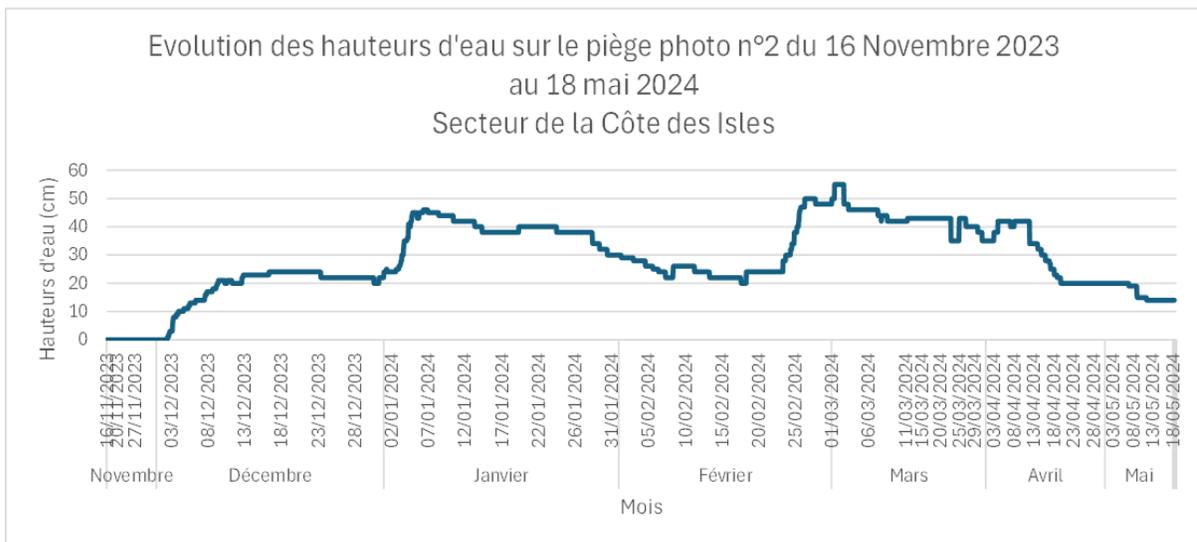


Figure 84 : Graphique représentant l'évolution des hauteurs d'eau sur le piège photo n°2 au cours de l'hiver 2023-2024 (Charpentier, 2024)

	Piège photo N°2	
Numéro du pic	1	2
Hauteur d'eau maximum (en cm)	46	55
Date de début	01/01/2024	18/02/2024
Date de fin	13/02/2024	18/04/2024

Figure 85 : Tableau des dates de pic d'inondation sur le piège photo n°2 (Charpentier, 2024)

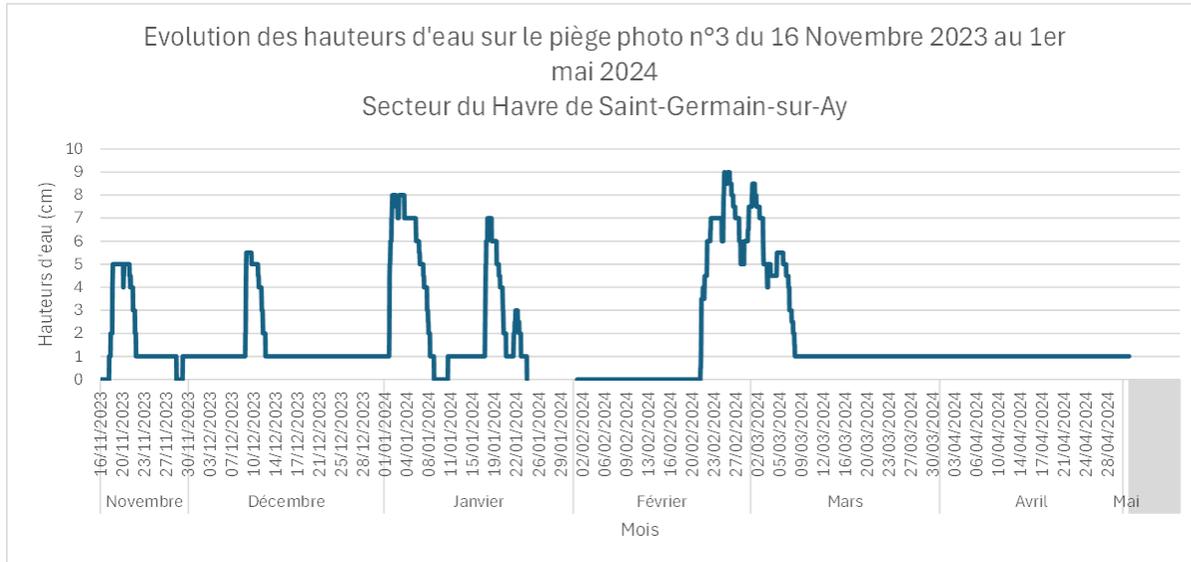


Figure 86 : Graphique représentant l'évolution des hauteurs d'eau sur le piège photo n°3 au cours de l'hiver 2023-2024 (Charpentier, 2024)

	Piège photo N°3				
Numéro du pic	1	2	3	4	5
Hauteur d'eau maximum (en cm)	5	5,5	8	7	9
Date de début	18/11/2023	09/12/2023	01/01/2024	17/01/2024	22/02/2024
Date de fin	21/11/2023	11/12/2023	08/01/2024	19/01/2024	07/03/2024

Figure 87 : Tableau des dates de pic d'inondation sur le piège photo n°3 (Charpentier, 2024)

Les inondations sont toujours présentes sur les deux pièges photos de novembre 2023 à mai 2024. Mis à part du 26 au 29 janvier où l'on observe un trou sur le piège photo numéro 3. En effet, il y a eu une erreur d'affichage dans le tableau excel.

En complément des graphiques, à l'aide des tableaux Excel obtenus, c'est intéressant de noter la durée des pics d'inondation ainsi que la date à laquelle les hauteurs d'eau sont les plus hautes, sur chaque piège, figure 87.

Le piège photo numéro 2 indique des pics qui sont assez longs. Le premier pic dure 12 jours et le deuxième deux mois. En dehors des valeurs extrêmes, les hauteurs d'eau moyennes sont aux alentours des 20 centimètres. Pour le piège photo numéro 3, les pics sont généralement de 5 jours, sauf le pic numéro 5 qui s'étend sur 16 jours. Les hauteurs d'eau ne dépassent pas les 9 centimètres. En dehors des cinq pics observés, les hauteurs d'eau moyennes sont de 1 centimètres.

Les pièges photographiques sont un point de contrôle efficace pour l'usage du drone. Des inondations sont repérées à trois dates différentes avec le drone. Certaines d'entre elles sont vérifiées avec les résultats des pièges photos. Les vols numéro 4 et 5 du 5 et 6 mars 2024 sont vérifiés par les pièges numéro 2 et 3.

3.2. Comparaison des conditions météorologiques avec les inondations observées en 2024

Suite à un débordement général des aquifères normands lors de l'année 2001, le service géologique national (BRGM) s'est lancé dans des études sur ce sujet. Selon eux, ces nombreux débordements d'eaux souterraines sont dus à un facteur bien précis : **la pluviométrie**. En effet, "la principale cause de ces hautes eaux est due aux fortes précipitations, largement excédentaires depuis deux ans, qui dépassent souvent les valeurs annuelles observées depuis plus de 20 ans sur plusieurs stations météorologiques." (BRGM, 2001). Malgré les nombreux facteurs anthropiques aggravants ces remontées de nappes phréatiques, la pluie reste l'une des causes principales, qui est "fonction de l'ampleur de ces débordements".

Les années 2021 et 2024 sont connues pour leurs grands épisodes d'inondations. C'est pourquoi il est intéressant de comparer les valeurs pluviométriques quotidiennes de ces deux années, avec les normales pluviométriques normandes. Cependant, avant cela, il faut comparer le cumul pluviométrique quotidien aux inondations repérées sur le terrain à l'aide du drone et des pièges photographiques.

Ceci permet de vérifier le lien entre la pluviométrie et les remontées de nappes phréatiques. Une fois cette relation pluie et inondation confirmée, il faut comparer le cumul pluviométrique des quatre stations étudiées, sur les années 2021. Ainsi, l'analyse du cumul pluviométrique contribuera à la sélection des images satellites pour détecter les inondations de 2021.

Croisement de l'évolution des hauteurs d'eau des remontées de nappes phréatiques avec l'intensité de la pluviométrie sur l'année 2024.

Pour vérifier ces faits sur l'année 2024, on se base sur les pièges photos numéro 2 et 3 qui présentent des données conséquentes. Alors les stations météorologiques les plus représentatives de ces zones sont la station de Bricquebec et la station de Gouville-sur-Mer (figure 88 et 89)

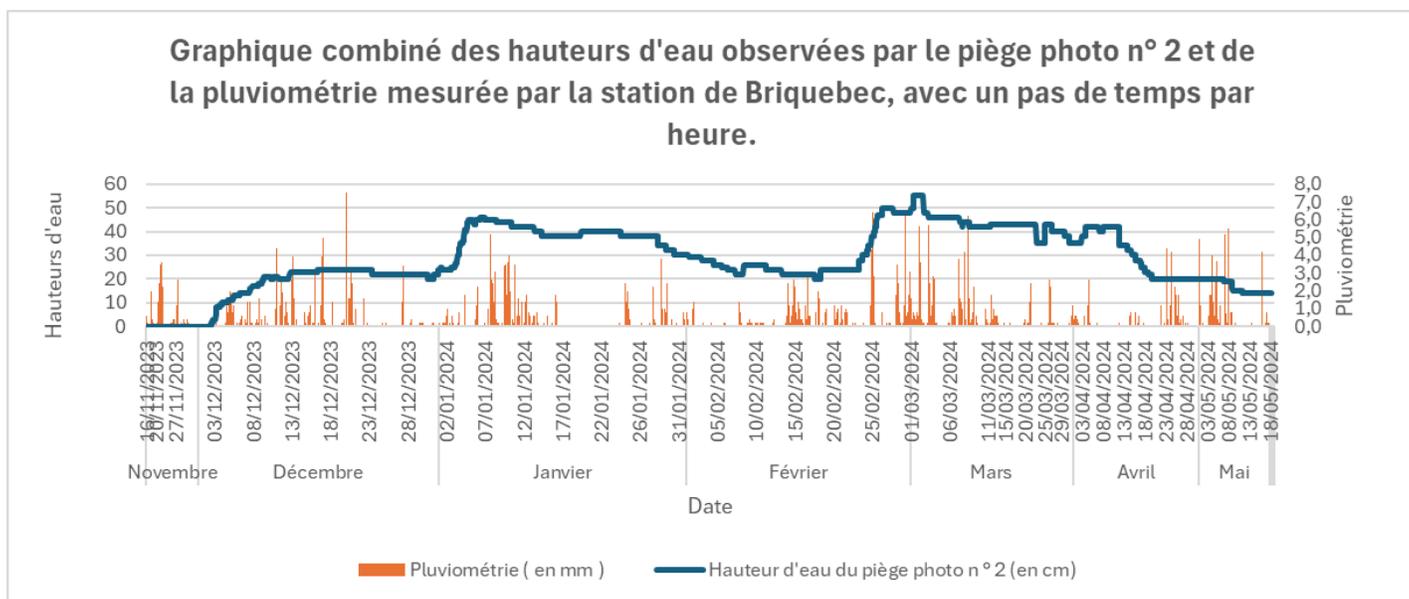


Figure 88 : Graphique comparatif du cumul pluviométrique à la station de Bricquebec et de l'évolution des hauteurs d'eau sur le piège photographique n°2 (Charpentier, 2024)

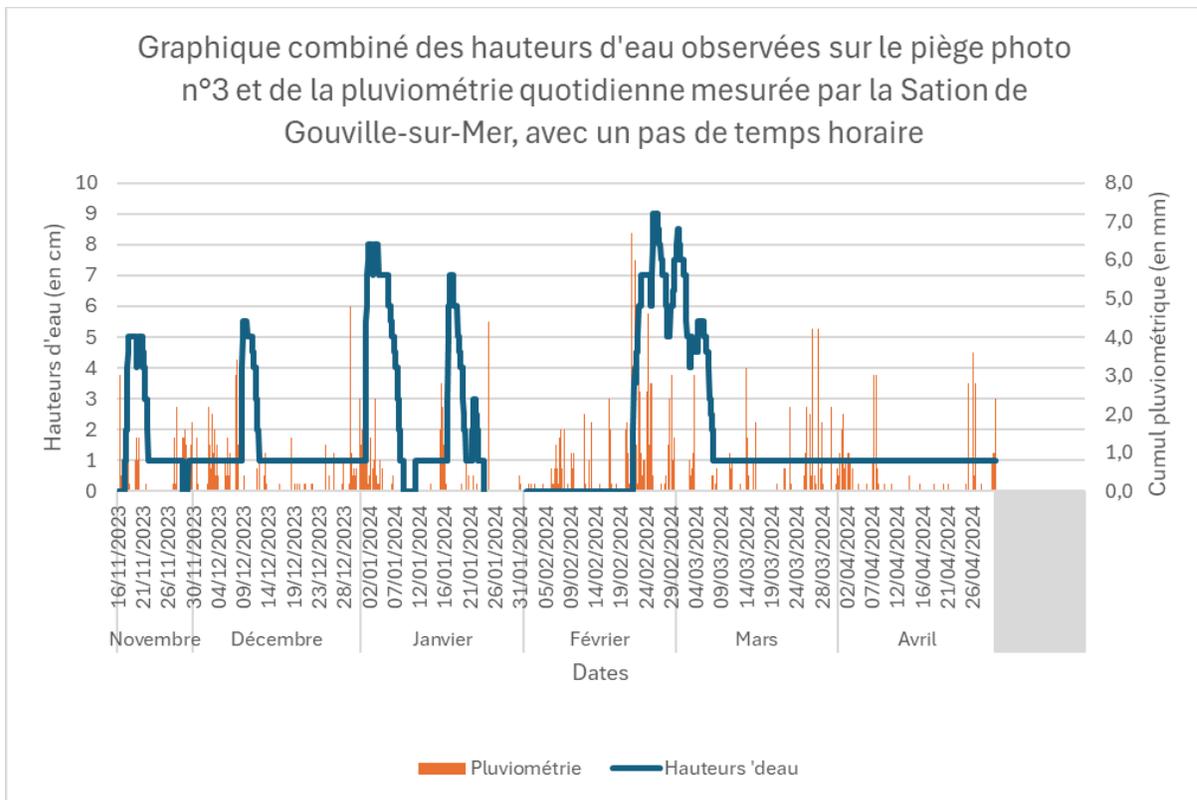


Figure 89 : Graphique comparatif du cumul pluviométrique à la station de Gouville-sur-Mer et de l'évolution des hauteurs d'eau sur le piège photographique n°3 (Charpentier, 2024)

Les données recueillies entre le 16 novembre 2023 et fin mai 2024 sur les deux parcelles distinctes ont pu être mises en corrélation avec la pluviométrie sur la même période. Les graphiques obtenus, représentent l'évolution des hauteurs d'eau par heure au cours des épisodes pluvieux. Ils révèlent une corrélation marquée entre les fortes précipitations et les épisodes d'inondation.

À chaque épisode de précipitations importantes, nous avons observé une augmentation significative du niveau d'eau. Ceci confirme que les pluies intenses provoquent une montée rapide et notable des inondations déjà présentes. Par exemple, pour le piège photo n°2, lors du premier pic le 1er janvier 2024, le cumul pluviométrique augmente quelques jours avant jusqu'à 5 millimètres, le 17 décembre 2023. Cette analyse est valable pour tous les pics observés.

Ces résultats mettent en évidence l'impact direct de précipitations sur la dynamique des inondations par remontées de nappes phréatiques.

Précipitations quotidiennes sur l'année 2021, à partir de quatre stations météorologiques

Tout d'abord, il faut savoir sur quelle station météorologique de l'hiver 2020-2021, les pluies sont les plus abondantes. D'après la figure 90, c'est sur la station de Bricquebec, avec un cumul de 47,4 mm de pluie par jour maximum. Par la suite, ce sont les stations météorologiques de la pointe de la Hague, de Gouville, et de Créances qui suivent. Sur ces quatre stations, le cumul pluviométrique est entre 620 et 1040 mm en sept mois, ce qui correspond à des valeurs élevées, suivant l'annexe 3.

	Hague	Bricquebec	Gouville-sur-Mer	Créances
Cumul annuel (en mm)	726,7	1035,3	703	626,9
Maximum annuel par jour (en mm)	38,6	47,4	30,8	33

Figure 90 : Tableau représentant le cumul annuel et le maximum annuel par jour sur les quatre stations météorologiques en 2024 (Charpentier, 2024)

Ensuite, il faut savoir quels sont les mois les plus arrosés de l'hiver 2020-2021. Selon la figure 91, ce sont les mois d'octobre et décembre 2020 et de janvier 2021, avec un cumul supérieur à 100 mm sur chaque station.

		Cumul pluviométrique mensuel (en mm)			
		La Hague	Bricquebec	Gouville	Créances
Mois	Septembre	40,5	59,0	41,4	19,0
	Octobre	199,3	307,8	184,9	150,4
	Novembre	95,9	82,4	47,9	58,5
	Décembre	162,8	311,0	238,4	230,0
	Janvier	158,2	180,4	118,4	107,5
	Février	45,4	43,6	39,8	31,5
	Mars	24,6	51,1	32,2	30,0

Figure 91 : Tableau représentant le cumul pluviométrique mensuel sur les quatre stations météorologiques en 2021 (Charpentier, 2024)

Notre démarche nous a permis de réaliser les graphiques des trois mois les plus arrosés, dans le but de voir sur quelle date les pics de pluies se sont produits. Notre objectif secondaire est de trouver des dates précises sur lesquelles chercher les images satellites pour l'année 2021.

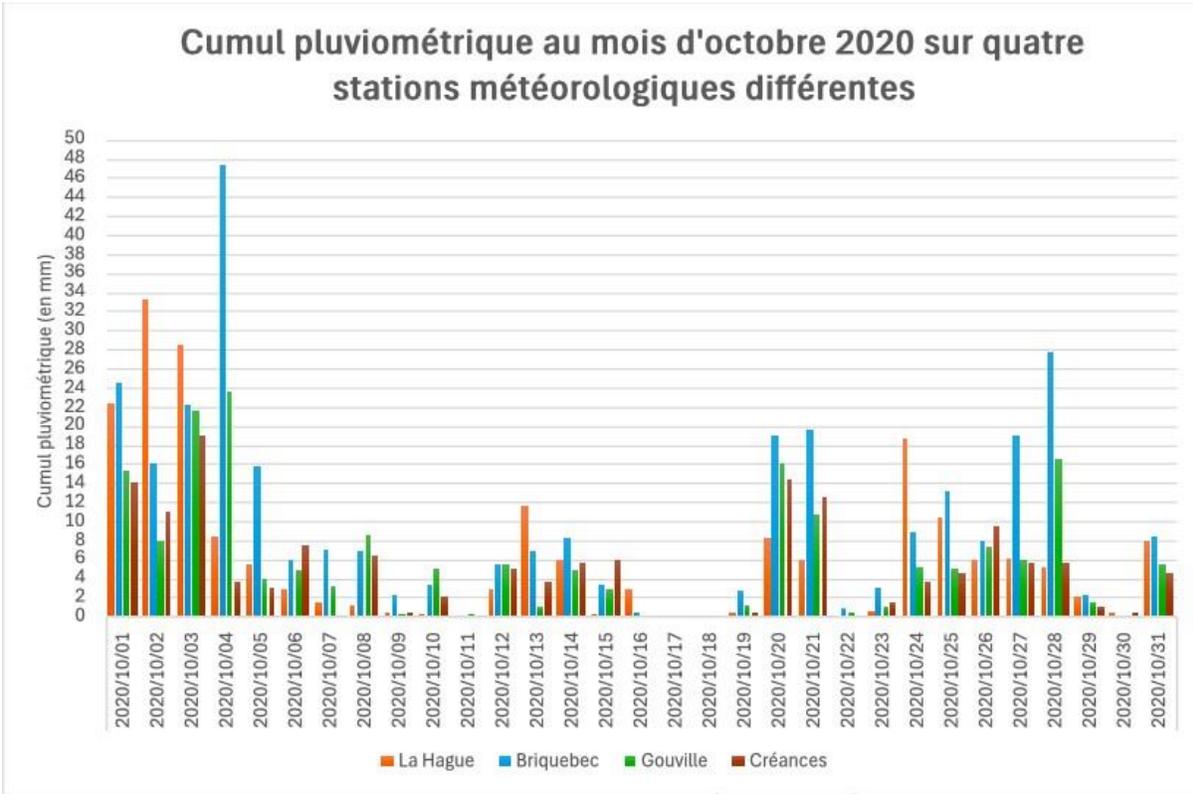


Figure 92 : Cumul pluviométrique au mois d'octobre 2020 sur les quatre stations météorologiques étudiées (Charpentier, 2024)

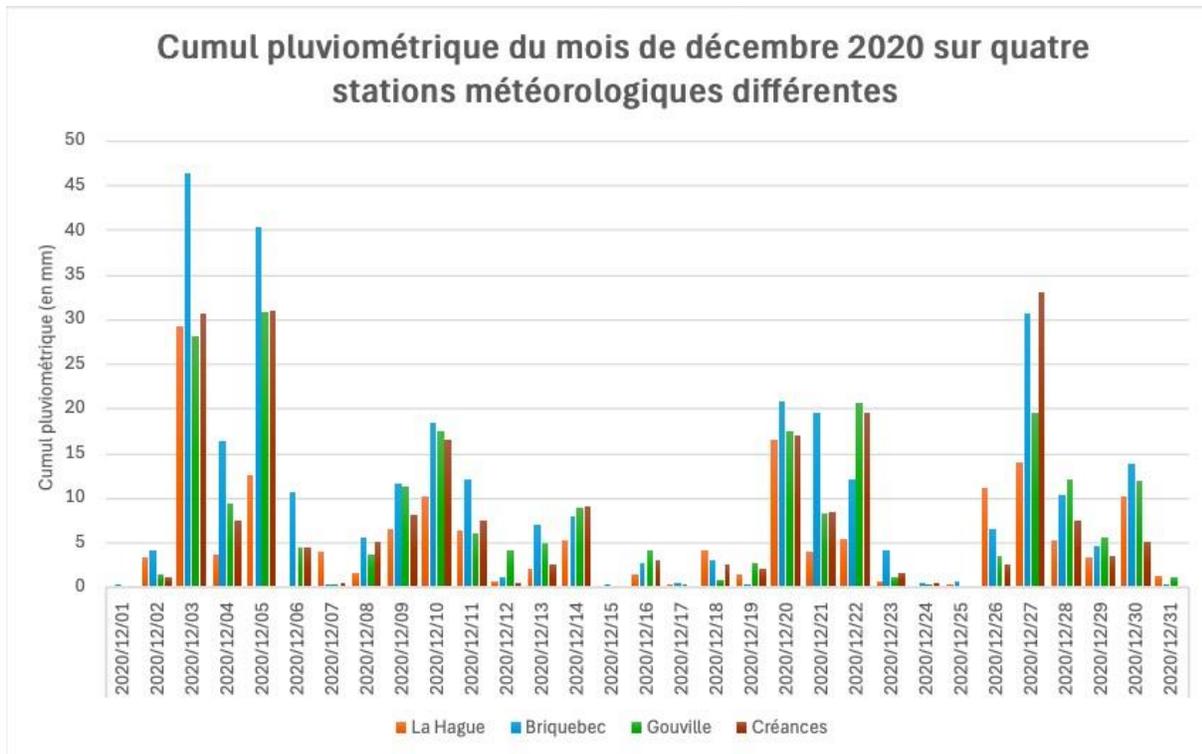


Figure 93 : Cumul pluviométrique au mois de décembre 2020 sur les quatre stations météorologiques étudiées (Charpentier, 2024)

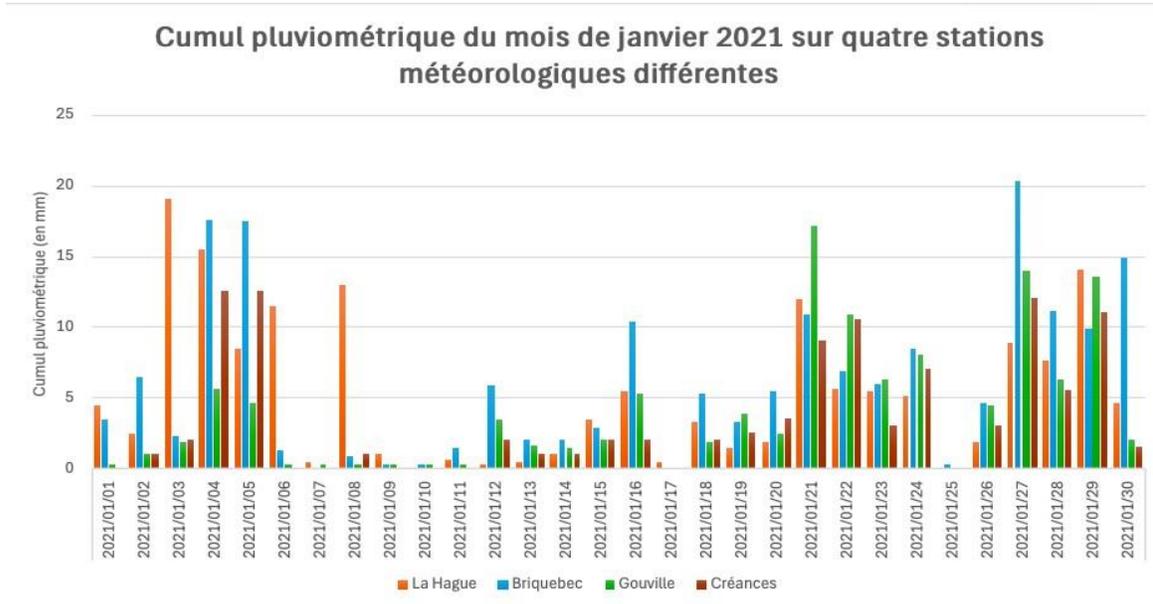


Figure 94 : Cumul pluviométrique au mois de janvier 2021 sur les quatre stations météorologiques étudiées (Charpentier, 2024)

Sur les trois mois présentés, six grandes périodes de précipitations par mois sont visibles. On repère du 1er au 6 octobre, un épisode intense, avec un cumul atteignant les 48 millimètres sur la station météorologique de Bricquebec. Il est possible d'en identifier un autre, du 23 au 29 octobre, avec un cumul de 28 millimètres sur la station de Bricquebec.

L'épisode du 1er au 7 décembre est également significatif, avec un cumul maximum de 46 millimètres par jour sur la station de Bricquebec. Puis du 25 au 31 décembre, cette fois-ci à la station de Créances, qui bat le record journalier, avec un cumul de 33 millimètres.

Au mois de janvier, les précipitations n'excèdent pas les 20 millimètres. Du 2 au 8 janvier 2024, les précipitations sont élevées sur toutes les stations. Mais la station de la pointe de la Hague établit les plus hautes valeurs, avec 18 millimètres. Puis à la fin de ce mois de janvier, c'est du 26 au 30 que les pluies sont les plus fortes, atteignant les 20 millimètres à Bricquebec.

Sur les quatre stations étudiées, on constate une grande différence entre les valeurs de Bricquebec et Créances avec celles de la pointe de la Hague et de Gouville. Cela peut s'expliquer par la différence entre l'intérieur des terres, et le littoral, la figure 95 le prouve.

C'est à l'aide du modèle Safran-Isba-Modcou que la carte figure 95, a été réalisée. Sur les six points de grille présentés, ceux positionnés à l'intérieur des terres Cette différence de précipitations est très représentative sur la carte ci-dessus. Pour le bon déroulement de nos analyses, il est utile de considérer que nos parcelles se trouvent sur la frange littorale et non à l'intérieur des terres. La représentativité de la station de Bricquebec par rapport à la Côte des Isles est alors à discuter.

Lors du choix des images satellites, se référer aux stations de Gouville-sur-Mer et de la Pointe de la Hague présente un certain intérêt. La station de Créances reste représentative de notre terrain d'étude, car elle se situe dans la commune de Créances, localisée au bord du littoral.

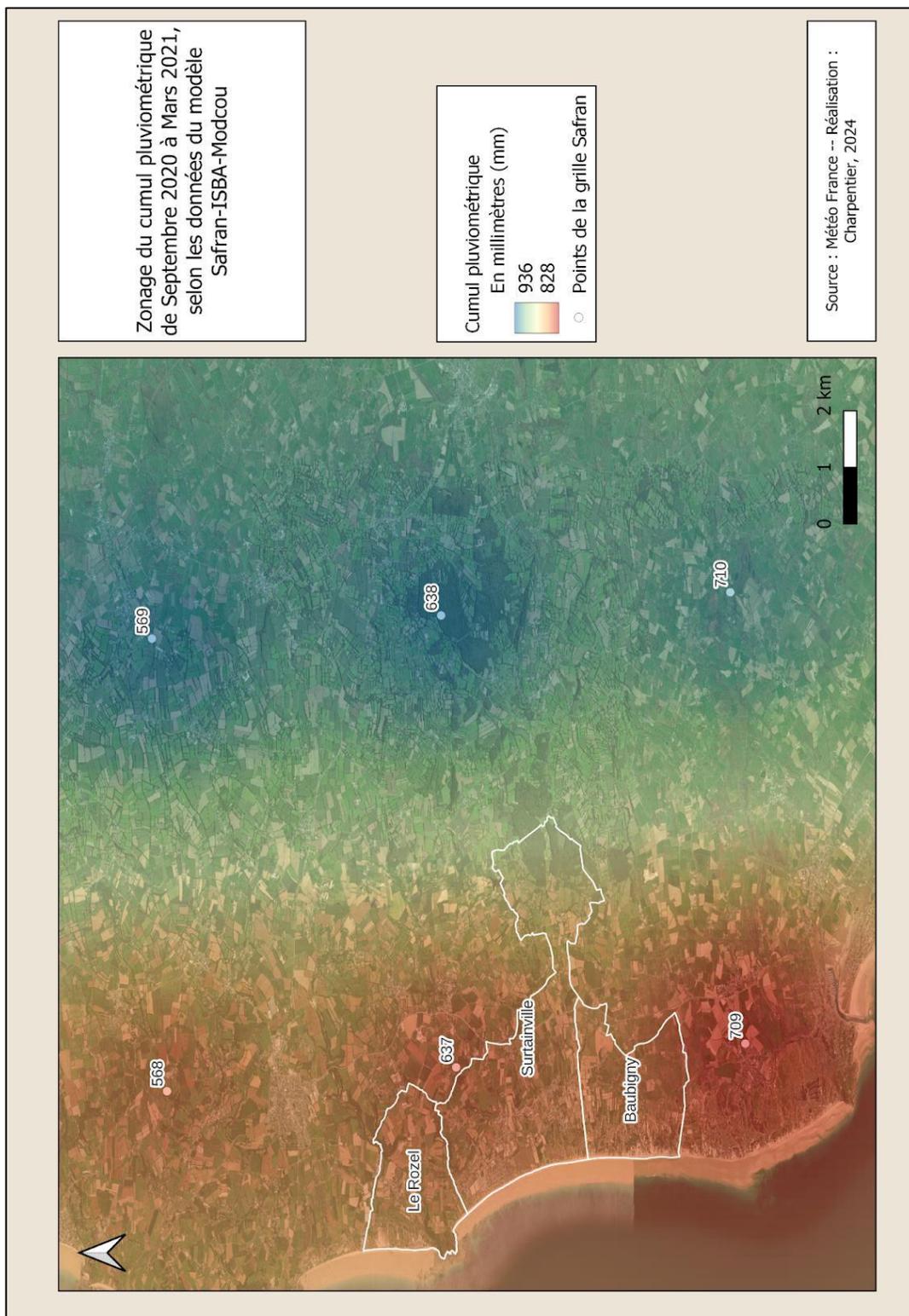


Figure 95 : Zonage du cumul pluviométrique de septembre 2020 à mars 2021, selon le modèle Safran-Isba-Modcou (Charpentier, 2024)

3.3. Comparaison des données marégraphiques avec les inondations observées en 2024

Cette section examine le lien entre le niveau marin et les débordements de nappes phréatiques. Durant les périodes de très hautes eaux, la profondeur des nappes phréatiques varie, comme le signale la Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Normandie (DREAL, 2018).

Spécifiquement dans les zones littorales, surtout les territoires situés sous le niveau de la mer, les écoulements souterrains dépendent du niveau marin. Cependant, les inondations des terrains dues à la remontée de ces nappes ne surviennent pas nécessairement lors des grands coefficients de marée (DREAL, 2018). Comme mentionné auparavant, les précipitations jouent également un rôle crucial dans les inondations par les nappes phréatiques.

Dans ce contexte, la comparaison des coefficients de marée avec les inondations observées durant l'hiver 2023-2024 est prévue. L'objectif est de déterminer si ce lien entre marée et inondation se confirme sur le terrain d'étude sélectionné, à savoir la commune de Baubigny. Comme pour les analyses précédentes, les inondations sont enregistrées de novembre à mars 2024 dans cette zone.

3.3.1. Comparer les coefficients de marées avec les inondations de l'hiver 2024

Pour sélectionner les mois durant lesquels les coefficients de marées seront examinés, la figure 87 est consultée. Les dates de début des deux pics identifiés, le 1er janvier 2024 et le 18 février 2024, sont retenues. Pour cela, décembre 2020 et janvier 2024 ont été choisis, offrant une perspective complète des marées autour de ces dates clés.

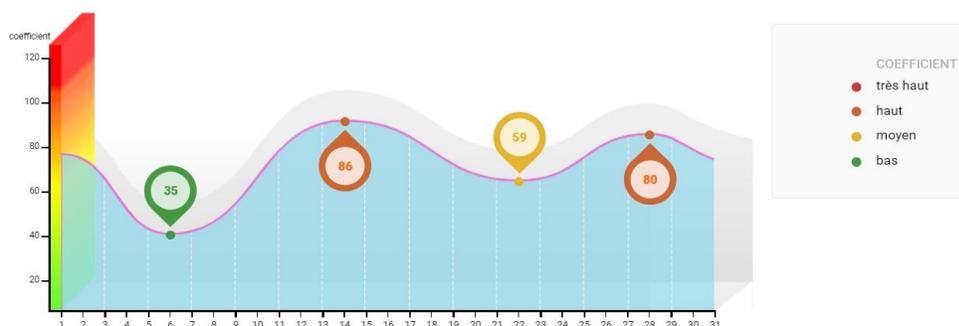


Figure 96 : Coefficients de marée estimés au mois de décembre 2023, à Baubigny
(Mareespeche.com)

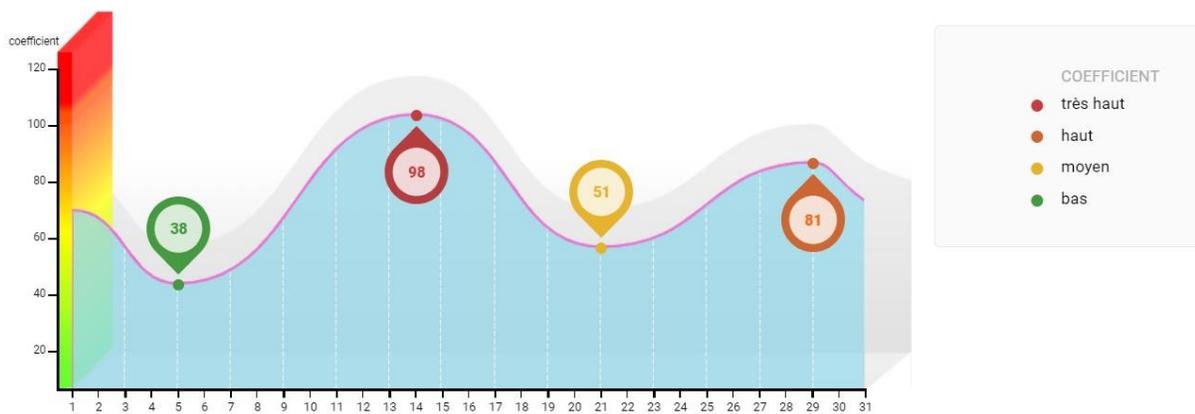


Figure 97 : Coefficients de marée estimés au mois de janvier 2024, a Baubigny.
(Mareespeche.com)

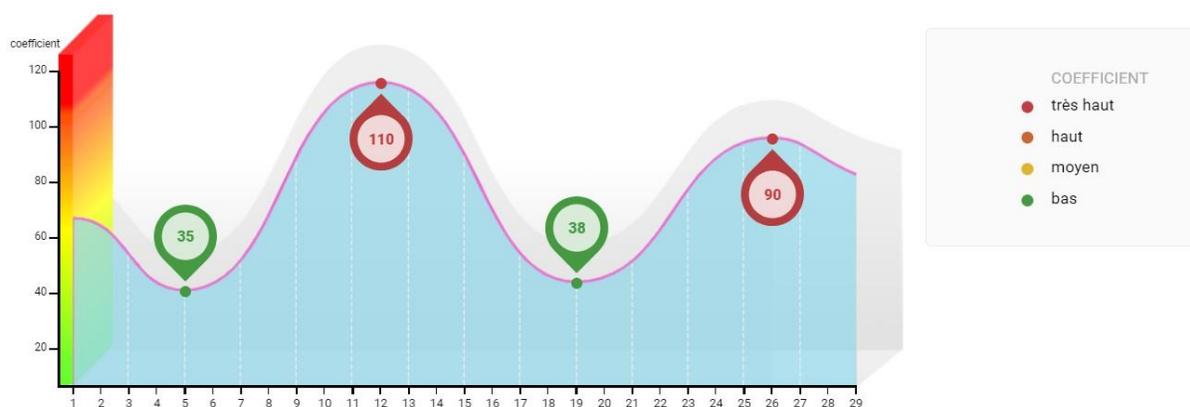


Figure 98 : Coefficients de marée estimés au mois de février 2024, a Baubigny
(Mareespeche.com)

L'analyse de l'inondation du 1er janvier 2024 implique l'examen des conditions maritimes du mois précédent, en particulier la marée du mois de décembre 2023. Cette inondation pourrait résulter d'une montée subite des eaux, affectant le niveau de la nappe phréatique. L'observation se concentre donc sur le dernier épisode de marée significatif de ce mois.

Le 28 décembre, la marée atteint un coefficient de 80, considéré comme élevé selon le site Marée Pêche. Puis elle décroît progressivement jusqu'à un coefficient de 35 le 5 janvier 2024. Cette montée importante peut être corrélée à l'inondation observée. Pour renforcer cette hypothèse, l'inondation du 18 février 2024 est également examinée. À cette date, les niveaux d'eau, mesurés

par les pièges photographiques, sont élevés. Le coefficient de marée atteint 110 le 12 février, un niveau très élevé, proche du maximum mondial de 120.

Ces observations indiquent un lien manifeste entre les grandes marées et les survenances d'inondations, généralement séparées de quelques jours. Cette corrélation étant établie pour les cas de 2024, l'application de cette méthode analytique pour l'année 2021 est envisageable, permettant de prédire ou de comprendre des phénomènes similaires.

3.3.2. Les coefficients de marées de l'hiver 2021

Pour identifier des inondations non datées, le rôle des marées apparaît comme significatif. L'analyse des grands épisodes de marées de l'hiver 2020-2021 est donc entreprise.

L'examen des mois d'hiver 2020-2021 pour le secteur de Baubigny a permis de sélectionner les mois de janvier 2021 et décembre 2020 (figure 92 et 93).

3.3.2.1. Au secteur de Baubigny

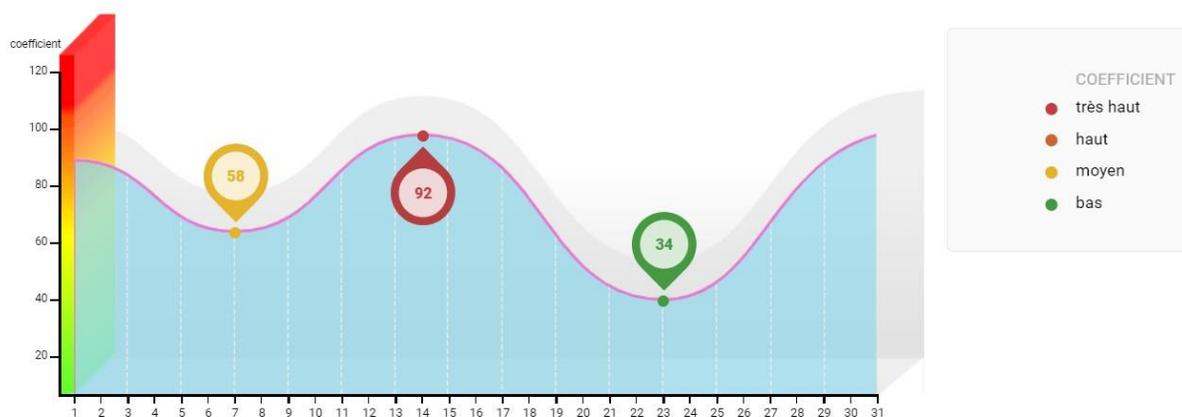


Figure 99 : Coefficients de marée estimés au mois de janvier 2021, a Baubigny
(Mareespeche.com)

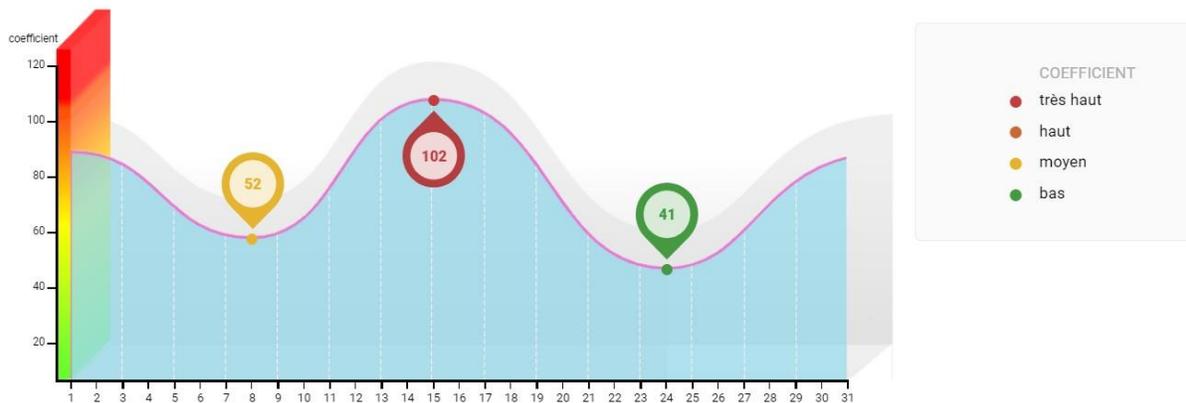


Figure 100 : Coefficients de marée estimés au mois de décembre 2020, a Baubigny (Mareespeche.com)

Durant ces périodes, les coefficients ne dépassent pas 110 mais sont élevés, se classant dans la catégorie des coefficients considérés comme très hauts, c'est-à-dire au-dessus de 80. Cette observation laisse supposer que des inondations ont pu survenir après les 21 décembre et 21 janvier 2021. Notamment, le 14 janvier 2021, le coefficient de marée atteint 92, tandis qu'en décembre, il s'élève à 102.

3.3.3. Vérification de la fiabilité des données utilisées, avec les données du SHOM

Pour vérifier les graphiques utilisés ci-dessus, on se réfère aux données publiées par le SHOM du mois de novembre 2023 au mois de mars 2024, à la station de Saint-Germain-sur-Ay. Pour cela, nous utilisons les coefficients de marée supérieur à 70, car ils représentent les marées de vives eaux, donc les hauts coefficients de marée.

Novembre 2023	Décembre 2023
Mercredi 01 : 84 / 77	Lundi 11 : 70 / 73
Jeudi 02 : 71	Mardi 12 : 77 / 80
Samedi 11 : 71 / 75	Mercredi 13 : 82 / 84
Dimanche 12 : 79 / 82	Jeudi 14 : 85 / 86
Lundi 13 : 84 / 86	Vendredi 15 : 85 / 84
Mardi 14 : 87 / 87	Samedi 16 : 83 / 80
Mercredi 15 : 86 / 84	Dimanche 17 : 77 / 74
Jeudi 16 : 82 / 79	Lundi 18 : 71
Vendredi 17 : 75 / 71	Lundi 25 : 71 / 74
Vendredi 24 : 72 / 77	Mardi 26 : 75 / 77
Samedi 25 : 81 / 85	Mercredi 27 : 78 / 78
Dimanche 26 : 88 / 89	Jeudi 28 : 78 / 78
Lundi 27 : 90 / 90	Vendredi 29 : 77 / 75
Mardi 28 : 89 / 87	Samedi 30 : 73 / 71
Mercredi 29 : 85 / 82	
Jeudi 30 : 78 / 74	

Figure 101 : Coefficients de marée supérieur à 70 observés sur les mois de novembre et décembre 2023, à Saint-Germain-sur-ay (SHOM)

Au mois de décembre 2023, on observe deux grandes périodes où les coefficients de marée sont les plus hauts : du 11 au 18 décembre 2023 et du 25 au 30 décembre 2023. Si l'on compare la figure 101 à la figure 96, les dates de grands coefficients de marée correspondent, avec le coefficient le plus haut enregistré à 86 le 14 décembre, pour le SHOM et le site marépêche.com.

Janvier 2024	Février 2024
Mercredi 10 : 70 / 76	Jeudi 08 : 76
Jeudi 11 : 80 / 85	Vendredi 09 : 83 / 91
Vendredi 12 : 89 / 92	Samedi 10 : 97 / 103
Samedi 13 : 95 / 96	Dimanche 11 : 107 / 109
Dimanche 14 : 97 / 96	Lundi 12 : 110 / 110
Lundi 15 : 94 / 91	Mardi 13 : 107 / 103
Mardi 16 : 87 / 82	Mercredi 14 : 97 / 90
Mercredi 17 : 76	Jeudi 15 : 83 / 74
Jeudi 18 : 70	Vendredi 23 : 73 / 77
Mercredi 24 : 70	Samedi 24 : 80 / 82
Jeudi 25 : 73 / 76	Dimanche 25 : 84 / 86
Vendredi 26 : 78 / 79	Lundi 26 : 86 / 86
Samedi 27 : 80 / 81	Mardi 27 : 86 / 84
Dimanche 28 : 80 / 80	Mercredi 28 : 82 / 79
Lundi 29 : 78 / 76	Jeudi 29 : 76 / 72
Mardi 30 : 74 / 71	

Figure 102 : Coefficients de marée supérieur à 70 observés sur les mois de janvier et février 2024, à Saint-Germain-sur-ay (SHOM)

Sur la figure 102, du 10 au 18 janvier et du 24 au 30 janvier 2024, les coefficients de marée sont haut. Le plus haut coefficient enregistré est de 97 le 14 janvier. Pour le site marée pêche, les dates correspondent, et la seule différence réside dans le coefficient de marée le plus haut enregistré le 14 janvier qui est de 98 au lieu de 97 pour le SHOM.

Et concernant le mois de février 2024, la conclusion est la même que celle du mois de janvier 2024, avec aucune différence observée.

Mars 2024	
Vendredi 08	: 70 / 80
Samedi 09	: 89 / 97
Dimanche 10	: 104 / 110
Lundi 11	: 114 / 116
Mardi 12	: 117 / 115
Mercredi 13	: 111 / 106
Jeudi 14	: 99 / 90
Vendredi 15	: 82 / 72
Samedi 23	: 72 / 76
Dimanche 24	: 80 / 83
Lundi 25	: 85 / 87
Mardi 26	: 88 / 88
Mercredi 27	: 87 / 86
Jeudi 28	: 85 / 82
Vendredi 29	: 79 / 75
Samedi 30	: 70

Figure 103 : Coefficients de marée supérieur à 70 observés sur les mois de janvier et février 2024, à Saint-Germain-sur-ay (SHOM)

Alors, on peut conclure que les données que nous avons utilisé pour nos analyses, provenant du site marépêche.com, correspondent avec les données du SHOM. Alors on peut valider, nos hypothèses émises concernant la corrélation entre les inondations observées et les coefficients de marée.

Conclusion du chapitre 5

L'utilisation des indices spectraux avec les images Sentinel-2 et Pléiades permet de détecter des zones potentiellement inondées. L'indice GLI quant à lui, possède un potentiel d'utilisation sur les orthophotographies, mais la qualité de l'orthophotographie (floutage dû au vent, surexposition due au soleil) est primordiale pour son bon fonctionnement.

Les données marégraphiques et météorologiques permettent de confirmer ce que nous avons repéré avec les indices, et aussi de choisir la date de nos images satellites, afin d'établir un suivi historique. Cependant cette approche nécessite d'avoir des stations représentatives du terrain d'étude. Bien que les résultats obtenus soient concluants, un manque de précision persiste.

Par exemple, concernant les indices spectraux, pour obtenir plus de détails, il faudrait pouvoir délimiter des seuils afin d'établir une classification et obtenir ainsi plus de catégories de pixels. Cette technique permettrait d'identifier davantage d'entités géographiques par la couleur du pixel. Également plusieurs méthodes pourraient être développées pour faciliter les traitements. Se servir du script Python pour le téléchargement d'images satellite Copernicus Sentinel-2 à l'aide du package `sentinelsat` faciliterait leur téléchargement selon des critères spécifiques, tels que la couverture nuageuse.

De plus, l'automatisation des traitements d'indices comme le GLI éviterait d'avoir à extraire manuellement les bandes spectrales de l'orthophotographie, de la même façon que l'indice NDVI et MNDWI, déjà automatisés sur ArcGIS Pro. À noter, l'automatisation du prétraitement de toutes les images satellites représente un gain de temps supplémentaire.

Pour aller plus loin dans cette étude, il était prévu d'utiliser les images radar et de les combiner avec un modèle numérique de terrain (MNT). Cela pourrait fournir des informations sur les hauteurs d'eau des inondations, offrant ainsi une solution pour se séparer partiellement des outils de contrôle de terrain. Une comparaison des hauteurs d'eau avec la topographie, à l'aide de données LiDAR, permettrait d'étudier le lien de ce phénomène avec le relief, apportant ainsi un éclairage complémentaire à cette recherche.

Cependant, il convient de souligner que les données au sol restent indispensables au suivi des inondations par télédétection. Cette approche pourrait devenir un outil d'aide à la décision pour

les exploitants agricoles. En s'appuyant sur la mise en place d'un système automatisé, le gain de temps serait considérable.

Chapitre 6 – Pertinence de l’approche complémentaire et limites

Introduction du chapitre 6

Ce chapitre se consacre à l'évaluation de la pertinence des approches complémentaires utilisées dans cette étude.

La première partie de ce chapitre aborde les avantages et les limites de chaque méthode utilisée pour ce mémoire. Nous passons en revue les techniques de télédétection, l'utilisation de drones et les dispositifs posés au sol, en soulignant leurs forces respectives et les défis associés.

La seconde partie se concentre sur la pertinence du croisement de ces méthodes. Nous analysons comment la combinaison de ces différentes approches permet de pallier les limites individuelles et d'obtenir une compréhension plus complète et nuancée des phénomènes étudiés. En illustrant les synergies créées par l'intégration des données issues de la télédétection, des drones et des dispositifs au sol, nous démontrons l'intérêt d'une approche méthodologique multidisciplinaire.

1. Avantages et limites de chaque méthode

1.1. Utilisation du drone pour la recherche scientifique

1.1.1. Le drone : un outil qui contrebalance avec les images satellites

1.1.1.1. La flexibilité

Contrairement aux images satellites, l'usage du drone dans la recherche scientifique représente des avantages. La **flexibilité** prend une grande place dans le choix de cette méthode pour l'analyse de notre terrain. Il est possible de faire voler le drone dès que l'on est disponible et aussi de choisir la **récurrence** à laquelle nous voulons analyser le phénomène étudié.

Dans le cas de l'analyse des inondations par remontées de nappes, il est intéressant de choisir les dates de vol en fonction de la météorologie. Suivant les grandes périodes pluviométriques, des inondations peuvent survenir. Pendant l'hiver 2024, entre janvier et mars, nous avons trouvé judicieux de choisir trois moments différents. Une fois par mois semblait être la bonne solution.

Nous avons pu capturer des images avant et pendant les inondations. Ainsi, la production de données a été paramétrée selon les caractéristiques voulues. Il s'agissait par exemple de la

hauteur de vol, de la vitesse, du taux de recouvrement de chaque image, etc. Le drone permet ainsi de **produire des données selon des caractéristiques bien précises**. Il réduit drastiquement la dépendance aux données en libre accès telles que les images satellites, tout en garantissant la production de résultats.

Le poids et la taille du drone sont également des atouts dans la recherche. Tout le matériel rentre dans un seul et même sac à dos, ce qui facilite le transport en différents points, sur le terrain d'étude.

1.1.1.2. La couverture nuageuse

Un drone peut voler à une altitude maximum de 120 mètres dans la catégorie ouverte. Dans tous les cas, il se trouve sous la couverture nuageuse, ce qui est avantageux contrairement aux images Sentinel-2. En effet, les nuages peuvent **réduire la visibilité** et la clarté des images capturées par les drones, ce qui peut **compromettre la qualité des données collectées**, en particulier dans le cas de missions nécessitant une imagerie à haute résolution.

1.1.1.3. Résolution, fauchée et accessibilité du terrain

Les 10 vols réalisés en 2024 pour cette étude, ont une résolution de 0,06 mètres. Cette résolution est suffisante pour un sol plat et où on peut voir les inondations. Si nous avions voulu analyser des falaises avec un relief accidenté, nous aurions paramétré le vol autrement. En effet, les vols entre 2021 et 2023 ont été faits aux falaises des vaches noires, donc une zone avec un relief accidenté.

Ce dispositif garantit **le choix de la zone d'étude**. Premièrement, sa faible fauchée nécessite un déplacement sur le terrain pour obtenir des informations à coordonnées géographiques éloignées. De ce fait, contrairement aux images satellites, il est possible d'obtenir des données précises sur un espace précis. Puis, il offre la possibilité d'accéder à des zones infranchissables (grande étendue d'eau, relief accidenté, etc.).

1.1.2. Les environnements aériens non-permissifs

Pendant la programmation des vols, la **vérification des zones restrictives** est indispensable. En effet, les zones interdites pour faire voler un drone comprennent généralement les **zones peuplées** telles que les centres-villes, les aéroports, les **sites historiques** et les **installations militaires**. Ces restrictions sont mises en place pour des raisons de sécurité et de confidentialité.

Dans les zones urbaines denses, le risque de collision avec des personnes ou des biens est élevé. En dehors des zones urbaines, le risque de voler au-dessus de quelqu'un reste tout de même présent. Dans le cadre du **droit à l'image**, étant donné que nous ne faisons pas partie des services de la police et de la gendarmerie, il nous est interdit de capturer des images si des personnes non-consentantes sont en dessous du drone. Concernant les aéroports, le risque d'interférence avec le trafic aérien est accru. De même, les sites historiques sont souvent protégés contre les nuisances sonores et visuelles des drones. Quant aux installations militaires, elles exigent une protection contre l'espionnage et les intrusions non autorisées. (M.Cahen, 2024)

1.1.3. La réalité du terrain

1.1.3.1. L'autonomie de vol

Le drone DJI Air 2s possède une **autonomie de vol supposée** de 31 minutes, comme évoqué plus haut. Avant de partir en mission, il faut prendre les 8 batteries dont dispose le laboratoire Geophen -- Idees. En prenant en compte le décollage et l'atterrissage du drone, le temps de vol en hauteur avec une seule batterie est plutôt estimé à 15-20minutes. C'est pourquoi les missions peuvent prendre plusieurs jours si la zone étudiée est large. Il faut pouvoir recharger les batteries pour poursuivre la mission.

1.1.3.2. Les missions du pilote et du copilote

Pendant une mission, il est obligatoire d'être **au minimum deux personnes**. Il faut un pilote et un copilote pour assurer un vol en toute sécurité. Le pilote s'occupe de respecter les distances minimums avec le drone et sa trajectoire. Il a les yeux rivés sur la tablette de contrôle et s'assure de garder le signal. Tandis que le copilote doit suivre le drone avec ses yeux, pour protéger le drone. S'il aperçoit un obstacle (arbre, oiseau, éolienne, pylône électrique), il doit envoyer un signal rapide au pilote, pour faire atterrir le drone en urgence.

Par exemple, lors du vol réalisé avec le **Cerema**, il y avait plusieurs rôles attitrés. En dehors du pilote et du copilote, quatre personnes ont été placées aux extrémités de l'espace de vol pour

garantir la sécurité. Si l'une de ses personnes identifiaient une personne, un oiseau ou autre, elle devait le signaler au talkie-walkie. Donc il faut s'assurer de respecter toutes les réglementations et de maintenir un contrôle constant sur votre drone pour garantir la sécurité des personnes et des biens lors du vol.

1.1.3.3. Le coût

Le coût d'un vol de drone varie en fonction de divers facteurs. Les **coûts initiaux** dus à l'achat ou à la location sont un investissement. Il faut compter minimum 2 000 euros pour acheter un drone de gamme moyenne avec les accessoires tels que les batteries de rechange, les hélices et les caméras. Les **coûts opérationnels**, comme l'énergie nécessaire pour recharger les batteries, les éventuelles réparations sont à considérer. Mais si l'on compare le drone aux hélicoptères dans la cartographie aérienne, la différence de prix est majeure. En effet, " les tarifs de location d'un hélicoptère varient selon les modèles et peuvent aller de 600 à 800 euros par heure"(F.Domain, 2023).

1.1.3.4. La prévention des agriculteurs

Dans le cas de cette étude, les vols ont été réalisés au-dessus de parcelles. Ces parcelles étant privées, il faut si possible, prévenir les propriétaires du vol prévu. Cependant, dans la majorité des cas, il est difficile de contacter toutes ces personnes.

Sur le terrain, il est fréquent de rencontrer des problèmes, c'est pourquoi il faut pouvoir s'adapter à tout type de situation concernant le drone. Une réflexion anticipée sur les éventuels problèmes est fondamentale.

1.1.4. La météorologie : un facteur indispensable à prendre en compte

1.1.4.1. Le vent

Les conditions météorologiques, en particulier le vent, jouent un **rôle crucial** dans l'usage et l'efficacité d'un drone. Avant la mission, il faut regarder la météo sur la météo, et surtout le vent. Pour cela, le site **Windguru** a été très utile. C'est un site dédié aux sports nautiques et aux

activités liées au vent. Il offre des informations détaillées sur la vitesse, la direction, la houle, les marées, les températures, etc. Pour un vol de drone, il faut regarder **les rafales**, figure 104 Il ne faut pas dépasser les 14 nœuds pour pouvoir faire voler le drone.

Updated: 22.4. 13:02 CEST	Lu 22. 11h	Lu 22. 13h	Lu 22. 15h	Lu 22. 17h	Lu 22. 19h	Lu 22. 21h
Vent (noeuds)	9	8	10	9	8	6
Rafales (noeuds)	14	13	14	14	11	10

Figure 104 : Vent au rozel le 22 avril 2024 (Windguru)

Par exemple, pour le lundi 22 avril, le vent aurait été idéal pour une mission drone. Peu importe l'heure de la journée, le vent reste faible.

Si les rafales sont trop élevées, l'impact est significatif sur les photos capturées. Le drone peut être déstabilisé et créer des images floues. Les vents forts peuvent également affecter la durée de vie de la batterie, car le drone devra fournir des efforts nécessaires pour contrer les conditions météorologiques difficiles.

1.1.4.2. Le soleil

Il est préférable de réaliser le vol sous une couverture nuageuse. La présence des rayons du soleil va **surexposer** la photo (figure 105) et rendre les données inexploitable. En effet, les couleurs de la photo n'étant pas représentatives du réel, alors les **valeurs radiométriques** deviennent absurdes. Ainsi pour garder une bonne qualité d'images, il est préférable d'éviter l'ensoleillement.



Figure 105 : Photographie surexposée prise par le drone (Charpentier, 2024)

1.1.5. Le traitement des orthophotographies par drone

Le choix de fabriquer des orthophotographies par drone est avantageux pour cette recherche. Mais il faut prendre en compte certains détails qui peuvent nuire à la production correcte de celles-ci :

(1) Le temps de traitement :

Le temps de traitement d'une orthophotographie est très long. Les vols drone parcourant une zone pendant plus d'une heure, capturent des centaines d'images. Lors du traitement, surtout pour la génération du nuage dense, il faut que le logiciel traite toutes les photos. Les traitements les plus longs ont été de cinq heures.

(2) Le classement des photos de chaque vol drone :

La classification des images capturées pendant les missions, par date et par nom de vol est une étape importante. Si certaines images sont confondues dans les dossiers, et mal classées, alors on obtient deux orthophotographies en une seule (figure 106).

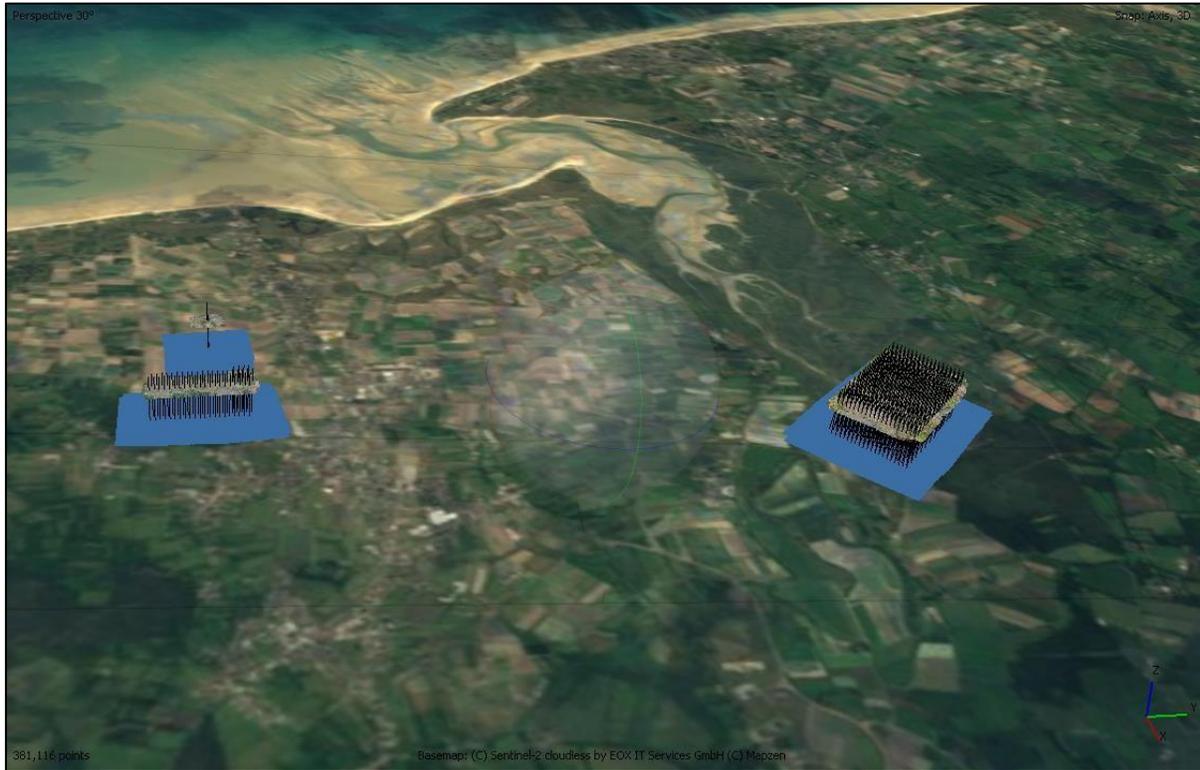


Figure 106 : Capture d'écran d'une orthophotographie sur le logiciel Métashape (Charpentier, 2024)

(3) Le stockage :

Une orthophotographie peut prendre beaucoup de place, jusqu'à 3 à 4 Go. Alors il faut prévoir de la place sur des clés USB, disque dur et ordinateur pour pouvoir les stocker et les traiter depuis ces espaces de stockage.

(4) Le géoréférencement :

Le géoréférencement est automatique lors du vol. En effet, les récepteurs GPS intégrés au drone enregistrent la position exacte du drone à ce moment-là. Ces données de position sont ensuite enregistrées avec chaque photo prise par drone. L'inconvénient d'utiliser cette technique est qu'il peut y avoir un décalage entre l'orthophotographie et les images satellites de l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN), comme sur la figure 107.



Figure 107 : Décalage géographique entre l'orthophotographie réalisée au laboratoire GeophenIdees et les images de l'IGN (Charpentier, 2024)

Mais ce géoréférencement reste satisfaisant. Le décalage est léger. Cependant deux solutions peuvent permettre d'améliorer cet axe :

- 1) Soit de géoréférencer les image nous même à partir de repères (arbres, angles de bâtiments, etc), sur le logiciel SIG
- 2) Soit le jour du vol drone, disposer des cibles sur le terrain qui sont géoréférencé avec le GPS.

1.2. Utilisation de l'imagerie satellitaire Sentinel-2 et Pléiades

1.2.1. Images Sentinel-2

1.2.1.1. Exemple de données sentinel-2 non-exploitable

Lors de l'import des images Sentinel-2 téléchargées, dans un logiciel SIG, certaines sont inexploitable. Lors du téléchargement sur le catalogue Theia, il est possible de visualiser la

donnée avant de la télécharger, figure 108. Cela permet de voir **l'ampleur** de la couverture nuageuse et de l'image en elle-même. Cependant, l'image peut être différente lorsqu'elle est téléchargée, voir figure 109. Alors aucune donnée sur le terrain d'étude n'est disponible par cette image.

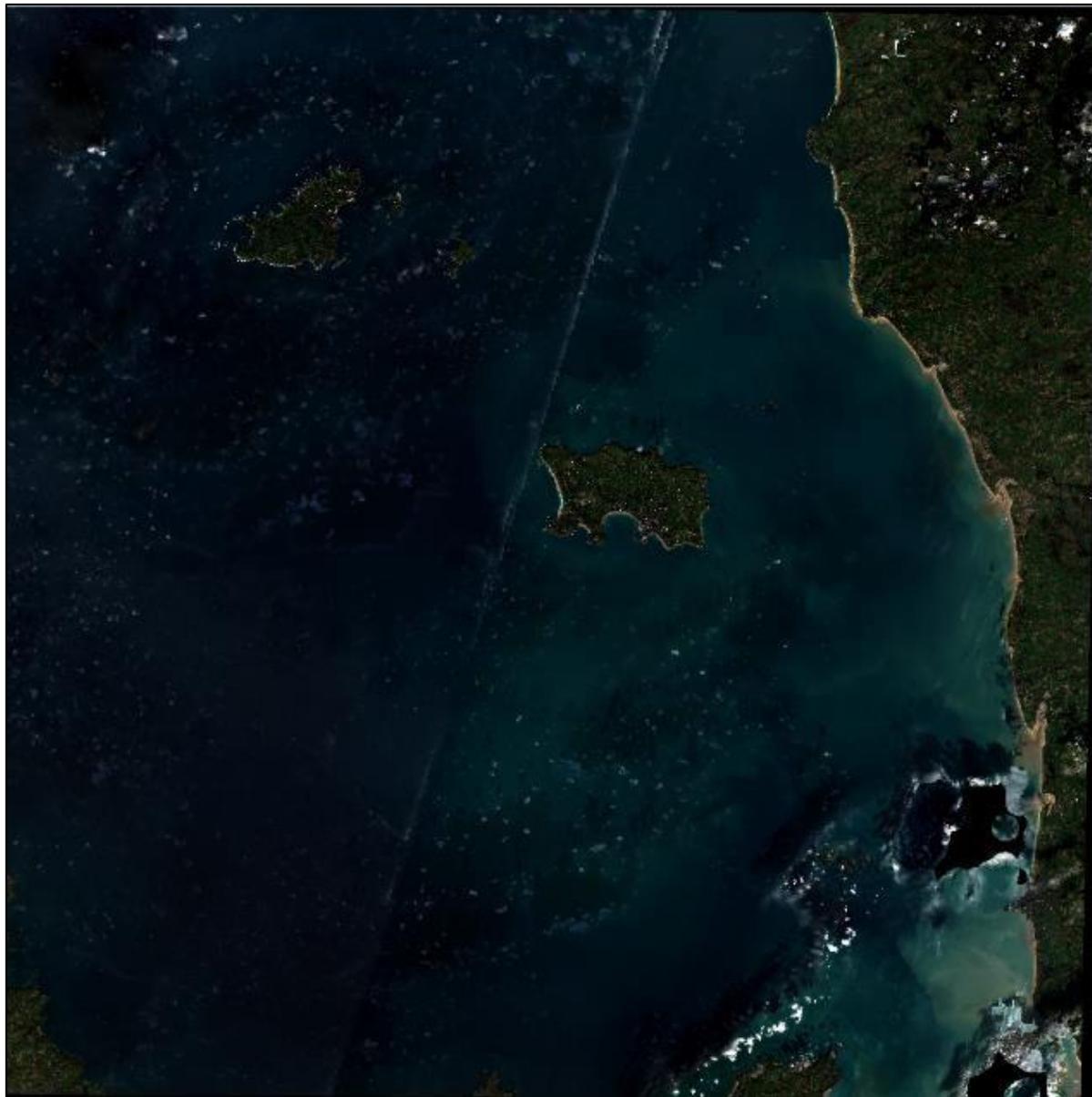


Figure 108 : Prévisualisation de l'image Sentinel-2 du 15/01/21 (Catalogue.theia-land.fr, 2024)

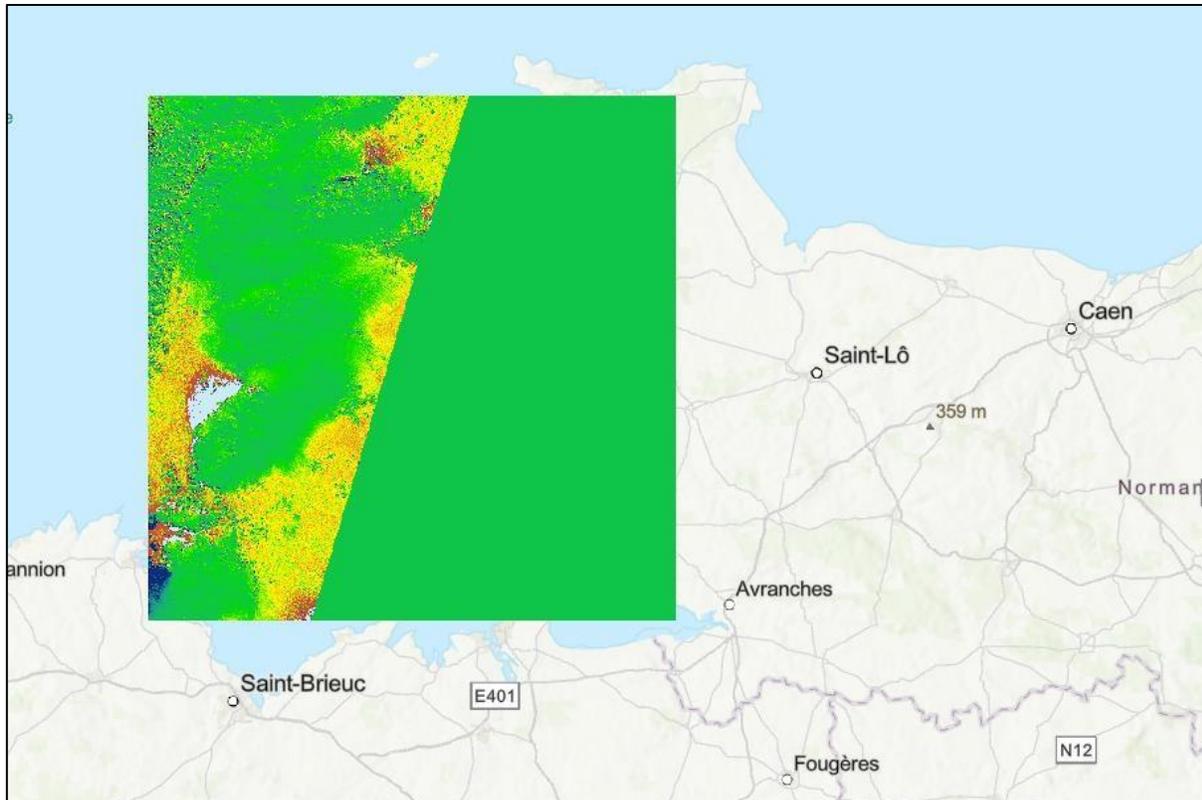


Figure 109 : Image Sentinel-2 du 15/01/21. (Arcgis Pro, Charpentier 2024)

1.2.1.2. La couverture nuageuse

La **couverture nuageuse** peut aussi poser un problème, lors du calcul d'indices. Les images Sentinel-2 téléchargées ont déjà une correction atmosphérique et radiométrique. Supprimer la couverture nuageuse, n'offre rien d'intéressant : "Cela entraîne un trou au niveau des données se situant en dessous des nuages" (T.Lopez, Cerema, 2024). Alors, la couverture nuageuse présente lors de l'import d'images dans un logiciel SIG n'est pas supprimée. Cependant, il est possible de rencontrer des problèmes lors du calcul d'indices. Par exemple, sur la figure 110, la couche nuageuse forme des carrés vert foncé. Ceci fausse les résultats sur l'indice NDVI. En effet, ces carrés ne peuvent représenter aucune donnée puisque c'est la réflectance du nuage qui est prise en compte. La réflectance du sol reste en dessous de la couverture nuageuse et n'est pas prise en compte par les capteurs du satellite.

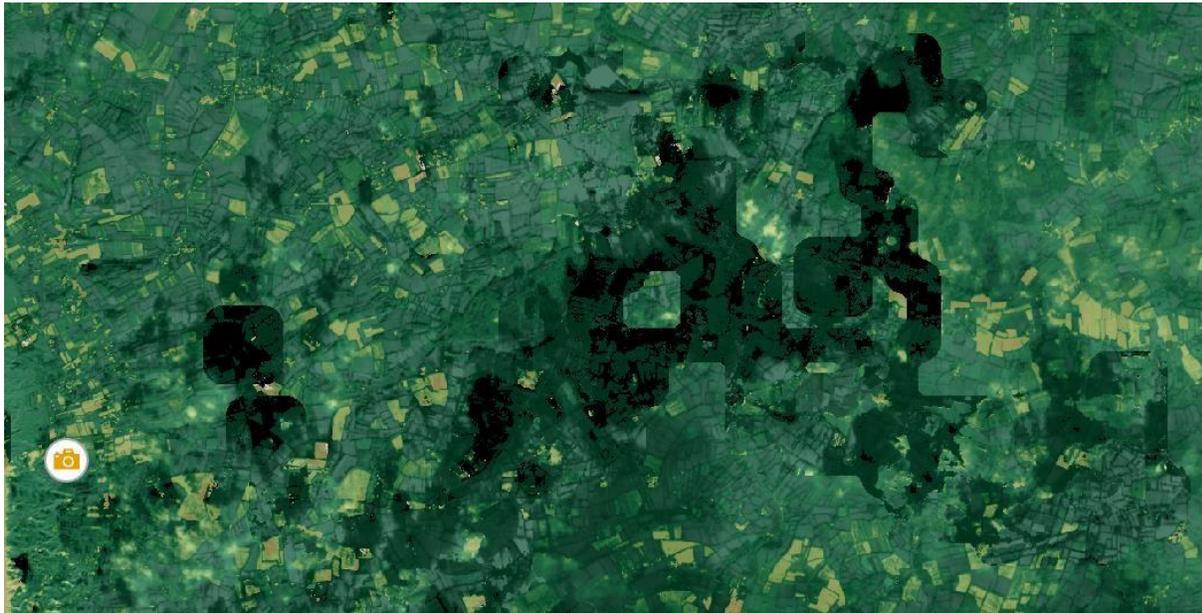


Figure 110 : Image Sentinel-2 du 15/02/21, après le calcul de l'indice NDVI. (Arcgis Pro, Charpentier 2024)

1.2.2. Images Pléiades

Les images Pléiades, caractérisées par leur haute résolution, s'avèrent extrêmement utiles. Toutefois, l'accès à ces images se complique en raison des dysfonctionnements de l'interface Theia et de la nécessité d'un compte universitaire, les images étant payantes. Les gestionnaires des ressources graphiques dans les institutions universitaires sont alors des intermédiaires essentiels.

L'acquisition des images Pléiades présente des difficultés. Une seule image s'est avérée compatible avec les besoins de l'étude ayant été localisée. Les problèmes rencontrés incluent la disparition de nombreuses images sur le site une fois connecté via l'identifiant universitaire, malgré la disponibilité initiale annoncée des images de 2023 et 2024. La fréquence de mise à jour est censée être de cinq jours, conformément aux indications du CNES. En conséquence, il a fallu se limiter aux images disponibles uniquement en mai 2021 pour les deux années concernées.

Lors du traitement de ces images avec le logiciel Argis Pro, même avec l'aide technique de S. Griffin et M. Medjkane, certaines bandes de certaines images se sont avérées défectueuses. De

plus, il est devenu impossible d'extraire les canaux de l'image affinée lors du calcul d'indices, seul l'indice NDVI ayant pu être calculé correctement

1.2.2.1. Utilité de l'affinage panchromatique

Concernant l'affinage, l'indice NDVI a été appliqué à l'image Pléiade. Il est à noter que la résolution de cette image diffère substantiellement de celle obtenue avec les images Sentinel-2. Les images Pléiades récupérées étaient au format bundle, où les images panchromatiques et multispectrales étaient séparées. Il a donc été nécessaire d'appliquer une technique d'affinage panchromatique (figure 112) pour combiner la résolution élevée de l'image panchromatique avec les couleurs de l'image multispectrale (figure 111). Voici le résultat :



Figure 111 : Image pléiade avant l'affinage panchromatique (Charpentier, 2024)



Figure 112 : Image pléiade après l'affinage panchromatique (Charpentier, 2024)

1.3. Utilisation de points de contrôles au sol

1.3.1. Les pièges photographiques

L'utilisation de pièges photographiques s'avère cruciale pour des études hydrologiques similaires à cette recherche. Ce dispositif fournit des données quantitatives sur la hauteur d'eau lors d'inondations et sert de point de contrôle efficace pour l'emploi de la télédétection. En l'absence de ce système, la durée, la fréquence et l'intensité des inondations resteraient inconnues. Le piège photographique offre également l'avantage de collecter des données sans nécessiter une présence constante sur le terrain. En effet, un paramétrage initial à intervalles de temps définis suffit.

Ce dispositif peut être installé sur un site pendant des mois, sans risque de vol ou de dégradation. Toutefois, l'un des inconvénients réside dans la nécessité de se déplacer pour remplacer les cartes SD, surtout si le site d'étude est éloigné, compliquant la récupération des données. En raison de leur capacité limitée, les cartes SD se remplissent rapidement.

Trois autres défis concernent l'installation et le traitement des images capturées.

(1) La précision des mesures de hauteur d'eau peut être affectée par la turbidité, rendant les données illisibles, voire figure 113.

(2) L'assemblage nécessaire de différentes échelles crée des décalages qui peuvent fausser les relevés, figure 114.

Figure 113 : Exemple d'une échelle limnimétrique illisible (Charpentier, 2024)



Figure 114 : Exemple de deux échelles limnimétriques assemblées (Charpentier, 2024)

(3) La prévision de la localisation exacte des inondations est difficile. Cela entraîne la perte de données si les échelles métriques ne sont pas correctement placées. C'est le cas pour les pièges photographiques numéro 1, 4 et 5 (figure 115, 116, 117)



Figure 115 : Photo du piège numéro 4, le 10 décembre 2023 (Charpentier, 2024)



Figure 116 : Photo du piège photographique numéro 1, le 2 janvier 2024 (Charpentier, 2024)



Figure 117 : Photo du piège numéro 5, le 2 décembre 2023 (Charpentier, 2024)

Pour installer un piège photographique, il est également essentiel d'obtenir l'autorisation des propriétaires des terrains, ce qui représente une contrainte supplémentaire. En résumé, bien que les pièges photographiques soient essentiels, les données qu'ils fournissent peuvent manquer de précision, ce qui peut remettre en question leur fiabilité.

1.3.2. Les données météorologiques

Concernant les données météorologiques, la nécessité de modifier les données est apparue en raison de la synchronisation des pièges photographiques sur le temps universel coordonné (UTC). Cependant, les données météorologiques sont également enregistrées en UTC pour permettre une comparaison avec d'autres ensembles de données. Alors il n'y a pas eu besoin de modification.

L'emplacement des stations météorologiques ne reflète pas toujours les conditions spécifiques du terrain à étudier. Une variance significative dans le cumul des précipitations a été observée entre les zones intérieures et la zone littorale, figure 118. La station de la pointe de la Hague est située loin du site d'étude. Celle de Bricquebec est positionnée à l'intérieur des terres et possède des

données souvent extrêmes. Cela nécessite une fusion des données des deux stations pour une représentation adéquate.

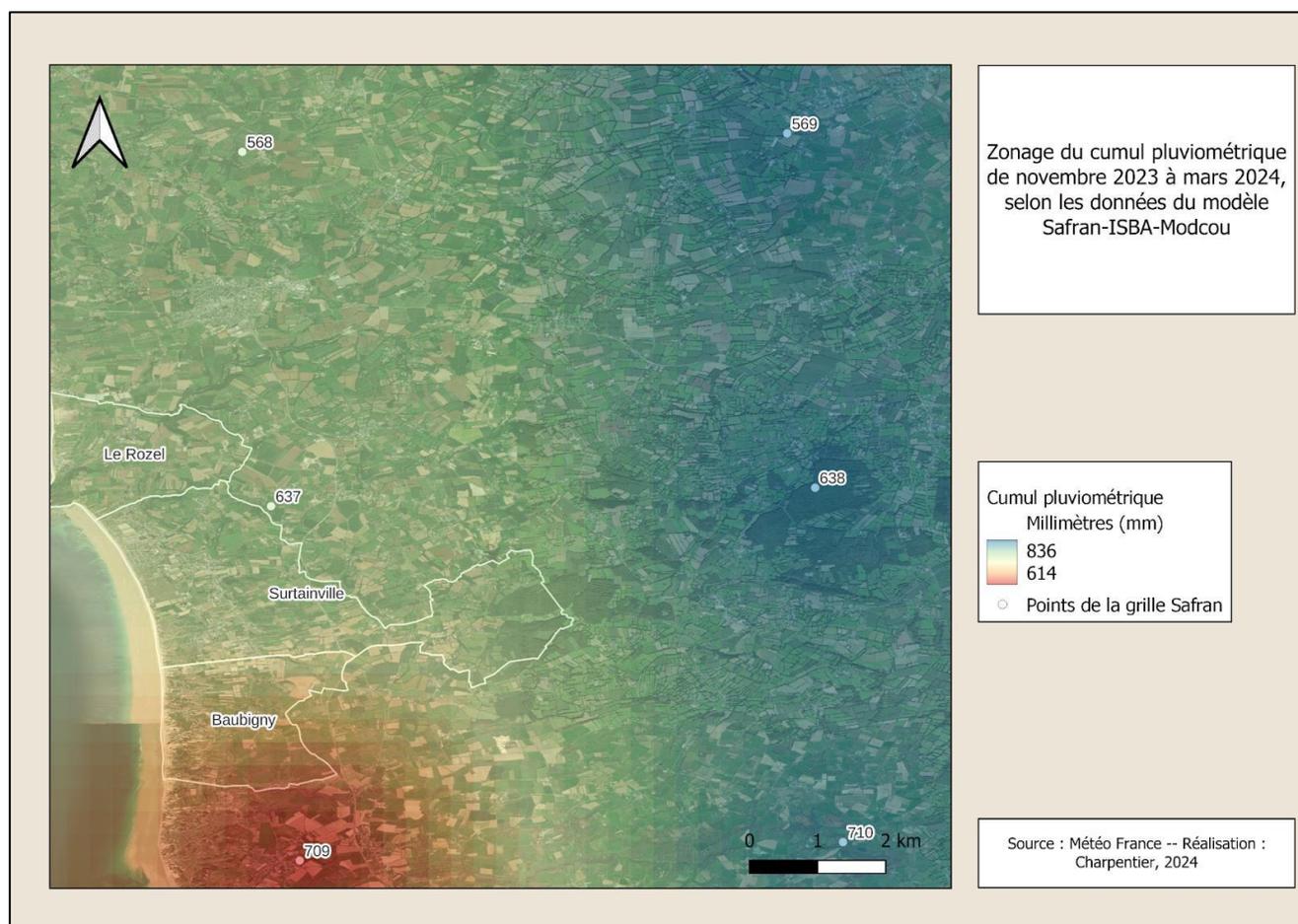


Figure 118 : Carte du zonage pluviométrique du mois de novembre 2023 au mois de mars 2024, selon les données du modèle Safran-ISBA-Modcou (Charpentier, 2024)

La station de Créance, installée par le SILEBAN, offre une représentativité plus précise du terrain étudié, se trouvant dans la commune de Créance. Toutefois, cette station a cessé de fonctionner en février 2024, entraînant une pénurie de données. Quant au matériel utilisé, celui-ci pourrait être moins performant que celui de Météo-France. Par conséquent, la station de Gouville a été utilisée bien qu'elle soit moins représentative ; elle fournit néanmoins des données complètes et de haute qualité.

2. Pertinence du croisement de chaque méthode

Cette partie se base sur deux figures qui résument les propos évoqués. Ces deux figures mettent en avant le croisement de chaque méthode utilisée dans cette recherche.

TABLEAU COMPARATIF DES IMAGES SATELLITES ET AERIENNES			
	SENTINEL-2	PLÉIADES	DRONE
 AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité • Multispectralité • Traitement • Grande fauchée • Répétitivité temporelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Fine résolution • Bande infrarouge • Orthorectifiées 	<ul style="list-style-type: none"> • Résolution fine • Pas de temps et fauchée au choix
INCONVENIENTS	<ul style="list-style-type: none"> • Résolution • Couverture nuageuse • Besoin d'une autre série d'images complémentaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité • Traitement • Couverture nuageuse • Faible fauchée • Produit lourd 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépend de la météo • Pas de caméra infrarouge • Coût • Autonomie de vol
FAUCHEE	290 kilomètres	20 kilomètres	Au choix
PAS DE TEMPS	5 jours	5 jours	Au choix
RESOLUTION (EN M)	10 à 60 mètres	50 centimètres à 2 mètres	0.06 mètres

Figure 119 : Tableau comparatif des images satellites et aériennes (Charpentier, 2024)

	Piège photo numéro 2		Piège photo numéro 3				
Numéro du pic	1	2	1	2	3	4	5
Date du pic d'inondation	01/01/2024	18/02/2024	18/11/2023	09/12/2023	01/01/2024	17/01/2024	22/02/2024
Hauteur d'eau maximum (cm)	46	55	5	5,5	8	7	9
Coefficient de marée maximum correspondant	80	110	87	92	80	98	110
Date du coefficient de marée maximum	28/12/2023	12/02/2024	15/11/2023	27/12/2023	28/12/2023	14/01/2024	12/02/24
Lieu du relevé de la marée	Baubigny		Bretteville-sur-Ay				
Cumul pluviométrique maximum correspondant (en mm)	30,5	15,5	24	31	33	12,5	11
Date du cumul pluviométrique maximum	27/12/2023	16/02/2024	15/11/2023	05/12/2023	27/12/2023	04/01/2024	29/01/
Station météorologique	Bricquebec		Créances				

Figure 120 : Tableau récapitulatif du croisement des données au sol (Charpentier, 2024)

2.1. Utilité du croisement des données au sol et dans l'air pour pouvoir faire une analyse dans le temps

Croiser les données obtenues au sol et par voie aérienne est essentiel pour réaliser une analyse temporelle approfondie. Cela sert de points de contrôle pour valider les observations terrain via drone et constitue un outil précieux pour les analyses historiques. Selon la figure 120, chaque pic d'inondation observé coïncide avec une augmentation du cumul pluviométrique et du coefficient de marée presque aux mêmes dates. Les images satellites permettent de localiser les zones potentiellement inondées et les données terrestres (pièges photographiques, stations météorologiques et marégraphes) de confirmer ou de poser l'hypothèse d'une inondation réelle. Les pièges photographiques sont particulièrement fiables, fournissant des données factuelles et quantifiées.

2.2. Croiser les images du drone avec les images satellites

Utiliser le drone plus les images satellites permet aussi une analyse complète d'un intérêt d'études. En effet, le drone permet d'avoir une résolution beaucoup plus fine, c'est-à-dire de 0,6 m. Il nous permet de voir des détails que l'on ne pourrait pas voir avec les images satellites. De plus, nous pouvons choisir à quelle date nous voulons avoir des images et selon le budget déterminé il est

possible d'avoir différents capteurs pour observer différentes situations. Cependant il nécessite du temps et de l'énergie c'est pourquoi les images satellites sont utilisés en complément du drone elles ont une plus grande fauchée qui nous permet de couvrir des territoires plus larges, et nous n'avons pas besoin de nous déplacer sur le site étudié.

2.3. Croisement des images Sentinel-2 et Pléiades

Le croisement de divers types d'images satellites est indispensable, surtout lors de l'utilisation des images Sentinel-2. Leur large portée permet l'analyse de vastes territoires, mais leur résolution limite l'obtention d'indices précis. En ce sens, les images Pléiades sont parfaitement complémentaires grâce à leur haute résolution. Et inversement, l'analyse à large échelle du territoire est limitée par la faible couverture spatiale des images Pléiades. Il est donc indispensable de les compléter avec les images Sentinel-2. Ces dernières sont reconnues pour leur qualité multispectrale, permettant le calcul de divers indices, comme ceux utilisés dans cette étude (NDVI, NDMI, NDWI, MNDWI). En revanche, les images Pléiades ne disposent que de quatre bandes spectrales, restreignant les possibilités à deux indices (NDVI, NDWI) pour cette recherche.

De plus, les images Sentinel-2 sont accessibles gratuitement avec une fréquence de revisite de cinq jours, facilitant leur acquisition. À l'inverse, l'obtention des images Pléiades s'avère plus complexe. Cette complémentarité des deux types d'imagerie est cruciale pour une analyse exhaustive du territoire étudié.

Dans le cadre d'une étude comme la nôtre, les indices spectraux sont représentatifs quand on est sûrs qu'il y'a des inondations, mais lorsqu'on ne sait pas où elles sont situées ce ne sont que des hypothèses.

2.4. Croisement des données marégraphiques et pluviométriques

Les données issues des pièges photographiques sont indispensables dans cette étude pour l'analyse des remontées de nappe phréatique, que ce soit en combinaison avec les données pluviométriques ou marégraphiques. Les photographies des pièges constituent des données réelles permettant de valider les méthodes complémentaires choisies. Comme illustré à la figure

120, chaque pic d'inondation est confirmé par une hausse du cumul pluviométrique ou du coefficient de marée.

Il est observé que le coefficient de marée n'est pas toujours représentatif des pics d'inondation, contrairement à la pluviométrie. En effet, lors des très hauts coefficients de marée, c'est à ces moments que les hauteurs d'eau les plus élevées sont enregistrées par les pièges photographiques. Par exemple, pour le pic du 18 février 2024 sur le piège numéro 2, la hauteur d'eau est estimée à 55 cm, et quelques jours auparavant, le 12 février 2024, le coefficient de marée correspondant était de 110, l'un des plus élevés. De même, pour le piège numéro trois, la hauteur d'eau maximale de 9 cm a été observée le 22 février 2024, avec un coefficient de marée de 110 le 12 février 2024.

En revanche, les données pluviométriques semblent moins représentatives, probablement en raison de la position de la station météorologique, comme évoqué dans la partie référencée. À Baubigny, le plus haut cumul pluviométrique observé est de 30,5 mm, mais ne correspond pas au pic le plus élevé enregistré par le piège photographique numéro 2.

Conclusion du chapitre 6

Cette partie sur les limites et la complémentarité des méthodes nous a permis de déduire plusieurs éléments d'analyse concernant l'utilisation de ces **techniques variées**. Chaque méthode apporte des **avantages** uniques, mais présente également des **défis** spécifiques. En comprenant ces limites, nous pouvons mieux exploiter la complémentarité des méthodes pour obtenir des résultats plus précis et plus fiables.

Concernant notre étude, le croisement des données des pièges photo (les hauteurs d'eau) avec les coefficients de marée et le cumul pluviométrique est très intéressant. En effet, ces deux indicateurs sont étroitement liés à l'évolution des hauteurs d'eau dans les parcelles. Cela permet non seulement de sélectionner judicieusement les dates des images satellites, mais aussi de vérifier le bon fonctionnement de nos indices hydrologiques. L'utilisation des **drones** présente des limitations, comme l'impact du vent, particulièrement élevé dans les zones littorales. Cependant, leur haute résolution et la flexibilité de leur usage restent des atouts majeurs.

La **multispectralité des images Sentinel-2** constitue un point fort, permettant de calculer plusieurs indices et ainsi obtenir divers indicateurs hydrologiques. Ces images vérifient efficacement la présence d'eau, mais nécessitent une comparaison avec des images Pléiades pour une meilleure précision sur l'étendue des inondations.

Les images **Pléiades**, bien que leur résolution soit très fine, sont difficiles à obtenir et limitées en termes d'indices hydrologiques connus. Elles s'avèrent néanmoins très utiles en complément d'autres images grâce à leur haute résolution.

S'agissant des données au sol, la **représentativité** des stations météorologiques et marégraphiques est cruciale. En effet, le choix des stations nécessite une attention particulière sur la distance et la représentativité des données. Trouver des stations adéquates s'avère relativement complexe, en raison des différences climatiques entre l'intérieur des terres et le littoral.

Enfin, les pièges photographiques sont indispensables pour ce type d'étude, mais leur positionnement optimal et la lisibilité des données présentent quelques inconvénients notables.

Ils comprennent la difficulté de placement exact par rapport à l'inondation et les limites de visibilité liées à la turbidité de l'eau ou à l'échelle limnimétrique.

En somme, chaque méthode présente des limites spécifiques, mais en les combinant de manière stratégique, nous espérons obtenir une analyse fiable des remontées de nappes phréatiques par télédétection.

Conclusion générale

Notre recherche examine l'efficacité de l'analyse des inondations par remontées de nappes phréatiques via la télédétection. Elle s'appuie sur une diversité de données d'imagerie multisources telles que les satellites Pléiades et Sentinel-2, et les prises de vue par drone. L'étude utilise divers indices de télédétection — NDVI, NDMI, MNDWI, et NDWI — afin de détecter ces phénomènes au cours de l'année 2024. Bien que ces indices parviennent à identifier les zones inondées, ils présentent quelques limites en termes de précision. Notamment l'indice GLI, lorsqu'il est appliqué aux images de drone, nécessite l'utilisation d'un capteur PIR pour détecter efficacement les étendues d'eau. Ce déficit d'efficacité souligne la nécessité d'une classification plus fine des données.

Par ailleurs, notre analyse met en évidence que l'interconnexion des méthodologies et des sources de données est cruciale. Les images Sentinel-2, en particulier, doivent être complétées par des données plus détaillées pour localiser avec précision les inondations. Les satellites Pléiades et les drones offrent des alternatives prometteuses, quoique chacun présente des défis spécifiques. Il s'agit par exemple de la difficulté d'accès et de traitement pour les Pléiades, des contraintes liées aux conditions météorologiques et de la fréquence des vols pour les drones. De plus, la validation des résultats à travers des mesures de pluviométrie et des pièges photographiques est essentielle, bien que la représentativité de ces derniers nécessite une analyse approfondie.

Les résultats de cette étude aboutissent à des conclusions significatives concernant l'utilisation optimale des diverses sources de données et méthodes de traitement pour ce type d'analyse. Cependant, en dépit de nos efforts, notre recherche ne parvient pas totalement à résoudre la question de la localisation précise des inondations dans le temps. Un développement complémentaire et ultérieur serait nécessaire. À titre d'illustration, l'intégration de l'automatisation des processus et des données LiDAR pour une analyse topographique pourrait considérablement améliorer la précision et l'efficacité des futures analyses. Cette approche permettrait d'élaborer un outil potentiellement précieux pour les gestionnaires de territoires et les exploitants agricoles.

Aussi, l'importance d'une démarche interdisciplinaire fut manifeste tout au long de l'étude. Elle illustre le potentiel de ces méthodes à évoluer en outils décisionnels robustes pour les

gestionnaires de territoires et les exploitants agricoles. Nous souhaitons souligner ici la nécessité de poursuivre les observations sur le terrain pour une validation rigoureuse des résultats.

Pour approfondir ces recherches, il serait pertinent d'explorer l'intégration d'autres technologies de pointe telles que l'intelligence artificielle pour le traitement automatisé des données de télédétection. Également, l'examen des modèles prédictifs basés sur l'analyse historique des inondations pourrait offrir de nouvelles perspectives pour anticiper ces événements. Enfin, une collaboration accrue avec les hydrologues pour améliorer la compréhension des dynamiques des nappes phréatiques contribuerait significativement à la précision des localisations et prédictions d'inondations futures.

Références bibliographiques

Aquifères de socle en Normandie (ex-Basse-Normandie) - SIGES Seine-Normandie - ©2024. (s. d.). <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article288>

Bioresita, F. (2019). *Exploitation de séries temporelles d'images multisources pour la cartographie des surfaces en eau*. [Université de Strasbourg]. <https://theses.hal.science/tel-02316363>

Bousbih, S. (s. d.). *Synergie optique-radar pour l'estimation des états de surface continentale*.

Campanyà, J. et McCormack, T. (2020, mai). *Remote Sensing for Monitoring and Mapping Karst Groundwater Flooding in the republic of Ireland*. Ireland.

Chamaillé, L. (2008). *Apport de la télédétection pour la détection de l'eau et la caractérisation des propriétés de l'eau*. https://agritrop.cirad.fr/548843/1/document_548843.pdf

Crombette, P., Le Corre, S. et Tinel, C. (2014). *Traitement d'images satellitaires à Très Haute Résolution Spatiale et identification de zones à enjeux dans l'aménagement des Trames Vertes urbaines*, (208). <https://rfpt.sfpt.fr/index.php/RFPT/article/view/130>

Charbonniaud, J. (2015). *Profil environnemental de Basse-Normandie*. Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Basse-Normandie.

Domain, F. (2023, 29 janvier). Drones : les avantages et les inconvénients [Billet de blog]. *Campustech*. <https://www.campustech.fr/avantages-et-inconvenients-des-drones/>

Dörfliger, N. (2013). Entre terre et mer, les eaux souterraines du littoral. *Géosciences*, (17), 74-81. https://brgm.hal.science/hal-01062271/file/08_Dorfliger.pdf

Dörfliger, N. et Augeard, B. (2013). *Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ?* ONEMA.

DRIAS, Les futurs du climat - Accompagnement. (s. d.). <https://www.driasclimat.fr/accompagnement/sections/165>

Drones Imaging. (s.d.). *Conseils utiles pour la capture d'images*. Documentation utile et conseils en photogrammétrie. <https://www.dronesimaging.com/wp-content/uploads/pages/documentation/conseils%20utiles%20sur%20la%20capture%20d'images.pdf>

Equilbey, E. (2001). *Inondations par débordement des eaux souterraines Synthèse des constats de l'hiver et du printemps 2001 (Calvados)*. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-51122-FR.pdf>

Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Gaudel-Vacaresse, A., Languille, F., Alhammoud, B., Viallefont, F., Pflug, B., Bieniarz, J., Clerc, S., Pessiot, L., Trémas, T., Cadau, E., ... Fernandez, V. (2017). Copernicus Sentinel-2A Calibration and Products Validation Status. *Remote Sensing*, 9(6), 584. <https://doi.org/10.3390/rs9060584>

Girard, M.-C. et Girard, C. (2010). *Traitement des données de télédétection environnement et ressources naturelles* (2^e éd., vol. 553 pages). Dunod.

GLI, el indice de vegetacion alternativo para drones. (2019, 17 août). *Gisandbeers*. <https://www.gisandbeers.com/gli-indice-de-vegetacion-alternativo-drones/>

Griffin, S. (2023). *Evaluer le rôle de la végétation dans lutte contre les instabilités Le cas des falaises des Vaches Noires* [Mémoire de master 2], Université de Caen, Normandie.

Gueye, I. (2013). *Application de la Télédétection aérospatiale pour l'évaluation de la dégradation des ressources naturelles : cas des sols de la région de Kaolack située dans le Bassin arachidier du Sénégal* [Mémoire, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Faculté des Sciences et Techniques]. <https://www.institut-numerique.org/application-de-la-teledetection-aerospatialepour-levaluation-de-la-degradation-des-ressources-naturelles-cas-des-sols-de-la-region-dekaolack-situee-dans-le-bassin-arachidier-du-senegal-52eca9e714ff3>

Imagerie panchromatique et ses combinaisons de bandes utilisées. (2021, 24 septembre). *EOS Data Analytics*. <https://eos.com/make-an-analysis/panchromatic/>

Images Pléiades disponibles sur le territoire national. (s. d.). GEOSUD. Récupéré le 15 mars 2024 de <https://ids-dinamis.data-terra.org/images-pleiades>

Laurent, A., Calastrenc, C. et Poirier, N. (2019, septembre). *Compte-rendu de mission. Acquisition 3D par photogrammétrie. Nissan-Lez-Enserune (34)*. TRACES UMR 5608. <https://hal.science/hal04270083>

Les dunes et le havre de Saint-Germain-sur-Ay | Parc des Marais du Cotentin. (s. d.). <https://parccotentin-bessin.fr/les-dunes-et-le-havre-de-saint-germain-sur-ay>

Les inondations par remontées de nappes. (2024, 24 janvier). Notre-environnement.

<http://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/risques/les-inondations-ressources/article/basede-donnees-15>

Les méthodes d'observation aérienne au début de la Première Guerre mondiale - Lumni | Enseignement. (s. d.).

Lidar - comment fonctionne la technologie ? (2021, 15 novembre).

<https://www.cadden.fr/fonctionnement-technologie-lidar/>

Madrolles, F., Lefèvre, S., Pille, L., De Pinel, M. et Durand, P. (2013). UN DRONE POUR DÉTECTER ET DÉLIMITER LES ZONES HUMIDES : UNE RÉALITÉ IMMINENTE ? *Revue Forestière Française*, (6), 547. <https://doi.org/10.4267/2042/53988>

Mesnager, C. (2021a). *Étude de la vulnérabilité de l'agriculture littorale normande aux risques hydrologiques et hydrogéologiques dans un contexte de changement climatique.*

Mesnager, C. (2021b). *Étude de la vulnérabilité de l'agriculture manchoise face aux risques de débordement de nappe et de submersion marine dans un contexte de changement climatique.*

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03549086>

Obregón, M. Á., Rodrigues, G., Costa, M. J., Potes, M. et Silva, A. M. (2019). Validation of ESA Sentinel-2 L2A Aerosol Optical Thickness and Columnar Water Vapour during 2017–2018. *Remote Sensing*, 11(14), 1649. <https://doi.org/10.3390/rs11141649>

Outils de télédétection — Documentation Briques de Géomatique 0.1. (s. d.). <https://briques-degeomatique.readthedocs.io/fr/latest/outils-teledection.html>

Paul, S., Depecker, L., Goillot, C. et Lenco, M. (1991). *Introduction à l'étude de la télédétection aérospatiale et de son vocabulaire* (La Documentation Française, vol. 1).

Photogrammétrie et orthophoto par drones. (s. d.). Prestations de Prise de vues par Drone à Marseille et en Provence <https://www.drone-pictures.fr/photogrammetrie>

Picard, A. (2022, 5 août). L'intelligence artificielle au service de la géomatique | Géomètres Experts. *Géomètres experts.* <https://www.tt-geometres-experts.fr/fr/entreprise/billets-experts/964intelligence-artificielle-geomatique>

Principe de l'imagerie hyperspectrale – Imagerie hyperspectrale.
(s. d.). https://www.sfpt.fr/hyperspectral/?page_id=168

Schläpfer, D., Borel, C. C., Keller, J. et Itten, K. I. (1998). Atmospheric Precorrected Differential Absorption Technique to Retrieve Columnar Water Vapor. *Remote Sensing of Environment*, 65(3), 353-366. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00044-3)

Soubeyroux, J.-M., Martin, E., Franchisteguy, L., Habets, F., Noilhan, J., Baillon, M., Regimbeau, F., Vidal, J.-P., Lemoigne, P. et Morel, S. (2008). Safran-Isba-Modcou (SIM) : Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études. *La Météorologie*, 8(63), 40. <https://doi.org/10.4267/2042/21890>

Sylvio, L. (s. d.). Suivi temporel des points d'eau du Parc Régional du W (Burkina Faso, Bénin, Niger). *Burkina Faso*.

Trifide, G. (2012, 1^{er} février). *Orthophoto : un document cartographique de choix*. Groupe Trifide. <https://www.groupetrifide.com/orthophoto/>

Valéry, L. (2020). *Téledétection par drones : procédures d'acquisition et de traitement d'images RVB*. [Mémoire de master 2, Agro Paris Tech]. Dumas <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas03383086v1>

Siccard, V. (2019). *Le drone, un outil indispensable en cas de crise hydrogravitaire : de l'inventaire à la caractérisation de l'aléa au Japon [Thèse de doctorat, Université de Caen, Normandie]*. Dumas. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03044098v1>

Vintrou, E. (2012). *Cartographie et caractérisation des systèmes agricoles au Mali par téledétection à moyenne résolution spatiale* [Agro Paris Tech]. https://www.researchgate.net/figure/Principaux-capteurs-fournissant-des-images-de-basse-atres-haute-resolution-spatiale_fig5_257890723

Liste des figures

Figure 1 : Photo d'une inondation par remontée de nappes à Surtainville (Mesnage, 2024)	6
Figure 2 : Carte de localisation du secteur d'étude. (Charpentier, 2023)	13
Figure 3 : Carte altimétrique du secteur de la côte des Isles et du havre de Saint-Germain-sur-Ay. (Charpentier, 2023)	16
Figure 4 : Croquis des différents types de climats en Normandie (G. Escourrou, 1978)	17
Figure 5 : Carte hydrogéologique de la Côte des Isles et du havre de Saint-Germain-sur-Ay. (Charpentier, 2024)	20-21
Figure 6 : Carte de localisation du département de la Manche, en Normandie. (Charpentier, 2023)	30
Figure 7 : Carte représentant le nombre d'exploitations par communes en Normandie, en 2010 (Mesnage, 2020)	31
Figure 8 : Calendrier cultural pour les cultures de maïs, poireaux et carottes (L.Petit, N.Deverre, N.Guibout, J.Oehlmann)	33
Figure 9 : Carte du registre parcellaire graphique de 2022 sur la côte des Isles (Mesnage, 2024)	34
Figure 10 : Carte du registre parcellaire graphique de 2022 au Havre de Lessay (Mesnage, 2024)	35
Figure 11 : Shéma d'un aquifère (L.Petit, N.Deverre, N.Guibout, J.Oehlmann)	43
Figure 12 : Photo d'illustration d'une remontée de nappe phréatique, en février 2024, au Havre de Lessay (L.Petit, N.Deverre, N.Guibout, J.Oehlmann, 2024)	44
Figure 13 : Carte des débordements de nappes observés en 2001, ainsi que les risques pour les sous- sols (L.Petit, N.Deverre, N.Guibout, J.Oehlmann, 2024)	45
Figure 14 : Tableau récapitulatif des grandes inondations dans la région Normande depuis 1980. (Charpentier, 2024).	47
Figure 15 : Inondation par débordement de nappes dans les parcelles de Surtainville, 2021, (France 3 Normandie).	48
Figure 16 : Schéma de la méthodologie générale. (Charpentier, 2024)	61
Figure 17 : Étapes de pré-traitement des images Pléiades. (S.Griffin, 2023)	66
Figure 18 : Composition colorée assemblant les bandes du vert, du rouge et du proche infrarouge. (cms.geobretagne.fr)	67
Figure 19 : Indice NDVI sur l'image Sentinel-2 du 15 Février 2021. (Charpentier, 2024).....	68
Figure 20 : Caractéristiques de l'indice NDVI (browser.dataspace.copernicus)	69
Figure 21 : Indice NDMI sur l'image Sentinel-2 du 15 Février 2021(Charpentier, 2024)	70
Figure 22 : Caractéristiques de l'indice NDMI (browser.dataspace.copernicus)	70
Figure 23 : Indice MNDWI sur l'image Sentinel-2 du 15 Février 2021. (Charpentier, 2024)	71
Figure 24 : Indice NDWI sur l'image Sentinel-2 du 15 Février 2021 (Charpentier, 2024).....	72
Figure 25 : Caractéristiques de l'indice NDWI (browser.dataspace.copernicus)	73
Figure 26 : Carte des inondations par remontées de nappes observées en 2001(Charpentier, 2024)	75

Figure 27 : Différentes restrictions de vol sur le territoire Français (Géoportail)	76
Figure 28 : Plan d'un vol drone sur Dronelink (Charpentier, 2024)	77
Figure 29 : Photo du drone utilisé. (https://www.lesnumeriques.com/drone/dji-air-2s-p63051.html)	78
Figure 30 : Paramètres des vols drone (Charpentier, 2024)	79
Figure 31 : Détails des différents vols drone (Charpentier, 2024)	80
Figure 32 : Vent à Barneville-Plage le 5 et 6 mars 2024 (Windguru, 2024)	80
Figure 33 : Vent à Barneville-Plage le 31 janvier 2024(Windguru, 2024)	81
Figure 34 : Vent à la Station Anneville-sur-Mer, le 5 et 6 mars 2024 (Windguru, 2024).....	81
Figure 35 : Vent à la station Anneville-sur-Mer, le 1 février 2024 (Windguru, 2024)	81
Figure 36 : Carte de localisation des vols drone réalisés pendant l'hiver 2024 sur la côte ouest de la Manche (Charpentier, 2024).....	82
Figure 37 : Construire une orthophotographie avec Agisoft métashape (Charpentier, 2024)	84
Figure 38 : Image de l'orthophotographie du vol 1 (Charpentier, 2024)	85
Figure 39 : Zoom 1 sur l'orthophotographie du vol 1 (Charpentier, 2024)	86
Figure 40 : Zoom 2 sur l'orthophotographie du vol 1 (Charpentier, 2024)	86
Figure 41 : Exemple de digitalisation d'une inondation par remontée de nappe phréatique (Charpentier, 2024)	86
Figure 42 : Présentation d'un piège photographique (Mesnage, 2023)	87
Figure 43 : Paramètres des pièges photographiques (Charpentier, 2024)	89
Figure 44 : Piège photo n°1 (Mesnage, 2023)	91
Figure 45 : Piège Photo N°2 (Mesnage, 2023)	91
Figure 46 : Piège photo n°3 (Mesnage, 2023)	92
Figure 47 : Piège photo n°4 (Mesnage, 2023)	92
Figure 48 : Piège photo n°5 (Mesnage, 2023)	93
Figure 49 : Carte de localisation des pièges photographiques sur la côte des Isles (Charpentier, 2024) ..	94
Figure 50 : Carte de localisation des pièges photographiques au Havre de Lessay (Charpentier, 2024)...	95
Figure 51 : Distance à la mer de chaque piège photographique (Charpentier, 2024)	96
Figure 52 : Description des différentes stations météorologiques utilisées (Charpentier, 2024)	98
Figure 53 : Carte de localisation des stations météorologiques (Charpentier, 2024)	99
Figure 54 : Schéma de fonctionnement de la chaîne Safran-ISBA-Modcou (Météo France, 2021)	101
Figure 55 : Illustration des 6 points de grille choisis du modèle Safran-ISBA-MODCOU (Charpentier,2024)	101
Figure 56 : Photo du site marépêche.com (Charpentier, 2024)	103
Figure 57 : Tableau des images Sentinel-2 et Pléiades téléchargées (Charpentier, 2024)	108
Figure 58 : Carte de localisation de la parcelle en face du piège photographique n°2 (Charpentier, 2024)	110
Figure 59 : Représentation des combinaisons de bandes spectrales utilisée pour l'agriculture (11,8,2) (Charpentier, 2024)	112
Figure 60 : Image de la faible résolution des combinaisons de bandes (Charpentier, 2024)	113

Figure 61 : Carte de l'indice MNDWI sur l'image Sentinel-2 du 11/03/24 (Charpentier, 2024) 113

Figure 62 : Carte de l'indice NDMI sur l'image Sentinel-2 du 11/03/24 (Charpentier, 2024) 114

Figure 63 : Carte de l'indice NDWI sur l'image Sentinel-2 du 11/03/24 (Charpentier, 2024) 115

Figure 64 : Carte de l'indice NDVI sur l'image Sentinel-2 du 11/03/24 (Charpentier, 2024)..... 116

Figure 65 : Carte de l'indice NDMI sur l'image Sentinel-2 du 15/02/21 (Charpentier, 2024) 117

Figure 66 : Carte de l'indice NDVI sur l'image Sentinel-2 du 15/02/21 (Charpentier, 2024)..... 118

Figure 67 : Carte de l'indice NDWI sur l'image Sentinel-2 du 15/02/21 (Charpentier, 2024) 120

Figure 68 : Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen (<http://www.uved.fr>, 2008) 121

Figure 69 : Réflectance de l'eau de mer pour diverses valeurs du coefficient d'atténuation à 550 nm (Thomas, Y.F.,1978). 122

Figure 70 : Cumul pluviométrique observé au mois d'avril et mai 2021, à la station météorologique de la pointe de la Hague (Charpentier, 2024) 123

Figure 71 : Coefficient de marée estimé à Baubigny, au mois d'avril 2021 (Charpentier, 2024) 124

Figure 72 : Image pléiade du 3 mai 2021, sans calcul d'indices (Charpentier, 2024) 126

Figure 73 : Calcul de l'indice NDVI sur une image Pléiade du 3 mai 2021 (Charpentier, 2024) 127

Figure 74 : Tableau représentant la présence d'inondation ou non sur chaque vol drone réalisé (Charpentier, 2024) 127

Figure 75 : Carte des inondations par remontées de nappes observées sur l'année 2024 : secteur de la côte des Isles (Charpentier, 2024) 128

Figure 76 : Carte des inondations par remontées de nappes observées sur l'année 2024 : secteur du havre de Saint-Germain-sur-Ay (Charpentier, 2024) 129

Figure 77 : Carte de la parcelle inondée en face du piège photo n°2 à Surtainville (Charpentier, 2024) . 131

Figure 78 : Test de l'indice GLI sur la parcelle inondée en face du piège photo n°2 à Surtainville (Charpentier, 2024) 132

Figure 79 : Test de l'indice GLI sur l'orthophotographie du vol n°3 du 1^{er} février 2024 (Charpentier, 2024) 134

Figure 80 : Test de l'indice GLI sur l'orthophotographie du vol n°2 du 1^{er} février 2024 (Charpentier, 2024) 135

Figure 81 : Test de l'indice GLI sur l'orthophotographie du vol n°1 du 1^{er} février 2024 (Charpentier, 2024) 138

Figure 82 : Carte des remontées de nappes observées en 2001 et en 2024 au Havre de Saint-Germain-sur-Ay (Charpentier, 2024) 139

Figure 83 : Carte des remontées de nappes observées en 2001 et en 2024 au secteur de la côte des Isles (Charpentier, 2024) 140

Figure 84 : Graphique représentant l'évolution des hauteurs d'eau sur le piège photo n°2 au cours de l'hiver 2023-2024 (Charpentier, 2024) 143

Figure 85 : Tableau des dates de pic d'inondation sur le piège photo n°2 (Charpentier, 2024) 144

Figure 86 : Graphique représentant l'évolution des hauteurs d'eau sur le piège photo n°3 au cours de l'hiver 2023-2024 (Charpentier, 2024) 145

Figure 87 : Tableau des dates de pic d'inondation sur le piège photo n°3 (Charpentier, 2024) 146

Figure 88 : Graphique comparatif du cumul pluviométrique à la station de Bricquebec et de l'évolution des hauteurs d'eau sur le piège photographique n°2 (Charpentier, 2024) 146

Figure 89 : Graphique comparatif du cumul pluviométrique à la station de Gouville-sur-Mer et de l'évolution des hauteurs d'eau sur le piège photographique n°3 (Charpentier, 2024) 146

Figure 90 : Tableau représentant le cumul annuel et le maximum annuel par jour sur les quatre stations météorologiques en 2024 (Charpentier, 2024) 148

Figure 91 : Tableau représentant le cumul pluviométrique mensuel sur les quatre stations météorologiques en 2021 (Charpentier, 2024) 149

Figure 92 : Cumul pluviométrique au mois d'octobre 2020 sur les quatre stations météorologiques étudiées (Charpentier, 2024) 150

Figure 93 : Cumul pluviométrique au mois de décembre 2020 sur les quatre stations météorologiques étudiées (Charpentier, 2024) 150

Figure 94 : Cumul pluviométrique au mois de janvier 2021 sur les quatre stations météorologiques étudiées (Charpentier, 2024) 151

Figure 95 : Zonage du cumul pluviométrique de septembre 2020 à mars 2021, selon le modèle Safran-Isba-Modcou (Charpentier, 2024)..... 152

Figure 96 : Coefficients de marée estimés au mois de décembre 2023, a Baubigny (Mareespeche.com) 152

Figure 97 : Coefficients de marée estimés au mois de janvier 2024, a Baubigny. (Mareespeche.com) .. 154

Figure 98 : Coefficients de marée estimés au mois de février 2024, a Baubigny (Mareespeche.com) 155

Figure 99 : Coefficients de marée estimés au mois de janvier 2021, a Baubigny (Mareespeche.com) ... 156

Figure 100 : Coefficients de marée estimés au mois de décembre 2020, a Baubigny (Mareespeche.com) 157

Figure 101 : Coefficients de marée supérieur à 70 observés sur les mois de novembre et décembre 2023, à Saint-Germain-sur-ay (SHOM) 158

Figure 102 : Coefficients de marée supérieur à 70 observés sur les mois de janvier et février 2024, à Saint-Germain-sur-ay (SHOM) 159

Figure 103 : Coefficients de marée supérieur à 70 observés sur les mois de janvier et février 2024, à Saint-Germain-sur-ay (SHOM) 160

Figure 104 : Vent au rozel le 22 avril 2024 (Windguru) 161

Figure 105 : Photographie surexposée prise par le drone (Charpentier, 2024) 170

Figure 106 : Capture d'écran d'une orthophotographie sur le logiciel Métashape (Charpentier, 2024) ... 171

Figure 107 : Décalage géographique entre l'orthophotographie réalisée au laboratoire Geophen-Idees et les images de l'IGN (Charpentier, 2024) 172

<i>Figure 108 : Prévisualisation de l'image Sentinel-2 du 15/01/21 (Catalogue.theia-land.fr, 2024)</i>	<i>173</i>
<i>Figure 109 : Image Sentinel-2 du 15/01/21. (Arcgis Pro, Charpentier 2024)</i>	<i>174</i>
<i>Figure 110 : Image Sentinel-2 du 15/02/21, après le calcul de l'indice NDVI. (Arcgis Pro, Charpentier 2024)</i>	<i>175</i>
<i>Figure 111 : Image pléiade avant l'affinage panchromatique (Charpentier, 2024)</i>	<i>176</i>
<i>Figure 112 : Image pléiade après l'affinage panchromatique (Charpentier, 2024)</i>	<i>177</i>
<i>Figure 113 : Exemple d'une échelle limnimétrique illisible (Charpentier, 2024)</i>	<i>178</i>
<i>Figure 114 : Exemple de deux échelles limnimétriques assemblées (Charpentier, 2024)</i>	<i>179</i>
<i>Figure 115 : Photo du piège numéro 4, le 10 décembre 2023 (Charpentier, 2024)</i>	<i>179</i>
<i>Figure 116 : Photo du piège photographique numéro 1, le 2 janvier 2024 (Charpentier, 2024)</i>	<i>180</i>
<i>Figure 117 : Photo du piège numéro 5, le 2 décembre 2023 (Charpentier, 2024)</i>	<i>181</i>
<i>Figure 118 : Carte du zonage pluviométrique du mois de novembre 2023 au mois de mars 2024, selon les données du modèle Safran-ISBA-Modcou (Charpentier, 2024)</i>	<i>182</i>
<i>Figure 119 : Tableau comparatif des images satellites et aériennes (Charpentier, 2024).....</i>	<i>184</i>
<i>Figure 120 : Tableau récapitulatif du croisement des données au sol (Charpentier, 2024)</i>	<i>185</i>

Table des matières

Remerciements.....	1
Sommaire	4
Introduction générale	6
Chapitre 1 – Présentation des zones d'étude.....	10
Introduction du chapitre 1.....	11
1.Sélection des sites d'étude	11
1.1. Justification du choix du site d'étude	11
1.2. Situation de la Normandie	14
2.Présentation environnementale des six communes étudiées.....	14
2.1. Topographie	14
2.2. Climat	17
2.2.1. Le climat particulier de la Manche.....	17
2.3. Hydrogéologie	18
Conclusion du chapitre 1.....	24
Chapitre 2 –Contexte et pertinence de l'étude.....	26
Introduction du chapitre 2.....	28
1.Objectifs de l'étude	28
2. Contexte environnemental et socio-économique du secteur d'étude : la côte ouest du Cotentin	29
2.1. L'agriculture normande	30
2.2. L'agriculture littorale, spécificité de notre terrain d'étude	32
2.3. Les défis pour l'agriculture locale	36
Conclusion du chapitre 2.....	38
Chapitre 3 – État de l'art	40
Introduction du chapitre 3.....	42
1.Le phénomène de remontées de nappes	42

1.1. Explication du phénomène	42
1.2. L'exemple des inondations de 2001	44
1.3. L'importance des propriétés hydrogéologiques	46
1.4. Calendrier de l'aléa.....	46
1.5. La particularité du littoral.....	47
1.6. Effets des remontées de nappes sur l'agriculture	48
2.Évolution de la télédétection.....	49
2.1. Débuts : 1900 – 1950 : prémices de la télédétection au début du 20 ^e siècle	49
2.2. L'ère spatiale (1957-1970)	50
2.3. L'évolution des capteurs : les années 1970 à 1990.....	50
2.4. Ère numérique (années 1990-2000).....	50
2.5. Télédétection hyper-spectrale et LiDAR (années 2000 à aujourd'hui).....	51
2.6. Intégration de l'intelligence artificielle (années 2010 à aujourd'hui).	52
3.Études antérieures sur le sujet	53
3.1. La recherche sur les remontées de nappes	53
3.2. L'utilisation de la télédétection pour l'étude des remontées de nappes phréatiques	53
Conclusion chapitre 3.....	56
Chapitre 4 – Acquisition et mise en forme des résultats	58
Introduction du chapitre 4.....	60
1.Méthodologie générale	61
2.L'usage de la télédétection pour l'évaluation de la profondeur temporelle	62
2.1. Intérêts et caractéristiques des images satellites sélectionnées.....	62
2.1.1. Caractéristiques des images Sentinel-2.....	62
2.1.3. Caractéristiques des images Pléiades	64
2.2. Traitements utilisés sur ces images	65
2.2.1. Le pré-traitement.....	65
3.L'utilisation du drone pour obtenir des images supplémentaires	73

3.1. Les intérêts du drone	73
3.2. Méthodologie pratiquée pour le drone	74
3.2.1. Le choix des vols et la méthodologie utilisée pour le logiciel Dronelink	74
3.2.2. Présentation du drone et les paramètres de vols	77
3.2.3. Configuration des vols drones réalisés sur la côte Manchoise (hiver 2024).....	78
3.2.4. Inventaire des vols	80
3.2.5. Application de la méthodologie avec le logiciel Métashape	83
3.2.6. Les traitements réalisés sur les orthophotographies	87
4.Méthodologie appliquée aux différents dispositifs placés au sol	88
4.1. Les pièges photographiques	89
4.1.1. Présentation des pièges photographiques	89
4.1.2. Caractéristiques	90
4.1.3. Photos des pièges	90
4.1.4. Localisation des pièges.....	93
4.1.5. Distance à la mer de chaque piège photographique	96
4.1.6. Intérêts.....	96
4.2. Les stations météorologiques	97
4.2.1. Intérêts	97
4.2.2. Présentation des stations météorologiques	97
4.2.3. Localisation des différentes stations météorologiques	99
4.3. Le modèle Safran-ISBA-Modcou, un complément météorologique	100
4.3.1. Présentation du modèle.....	100
4.3.2. Données choisies.....	101
4.3.3. Utilité du modèle dans cette étude	102
4.4. Les données marégraphiques	102
Conclusion du chapitre 4.....	104
Chapitre 5– Résultats et traitements	106

Introduction du chapitre 5.....	108
1.Utilisation de la télédétection : comparaison des hivers 2021 et 2024	108
1.1. Présentation des données téléchargées.....	108
1.2. Localisation de la surface étudiée.....	109
1.3. Résultats des combinaisons en fausse couleurs sur l'image Sentinel-2 du 11 mars 2021	110
1.4. Résultats des différents indices sur l'image Sentinel-2 du 11 mars 2024	114
1.4.1. Interprétation des résultats des différents indices testés.....	114
1.5. Résultats des différents indices sur l'image Sentinel-2 du 15 février 2021	119
1.5.1. Efficacité des indices sur les images Sentinel-2, pour un suivi historique	119
1.6. Résultats de l'indice NDVI sur l'image Pléiade du 3 mai 2021	125
2.Utilisation du drone : comparaison des hivers 2001 et 2024	129
2.1. Répertoire des débordements de nappes observés avec le terrain	129
2.2. Test du Green Leaf Index.....	133
2.2.1. Test de l'indice GLI sur des zones inondées	133
2.2.2. Test de l'indice GLI sur des parcelles non-inondées	136
2.3. Comparaison des inondations entre 2001 et 2024	141
3.Le contrôle terrain : des outils indispensables	145
3.1. Inondations observées avec les pièges photographiques.....	145
3.2. Comparaison des conditions météorologiques avec les inondations observées en 2024	147
3.3. Comparaison des données marégraphiques avec les inondations observées en 2024	155
3.3.1. Comparer les coefficients de marées avec les inondations de l'hiver 2024.....	155
3.3.2. Les coefficients de marées de l'hiver 2021	157
3.3.3. Vérification de la fiabilité des données utilisées, avec les données du SHOM ..	158
Conclusion du chapitre 5.....	162
Chapitre 6 – Pertinence de l'approche complémentaire et limites	164

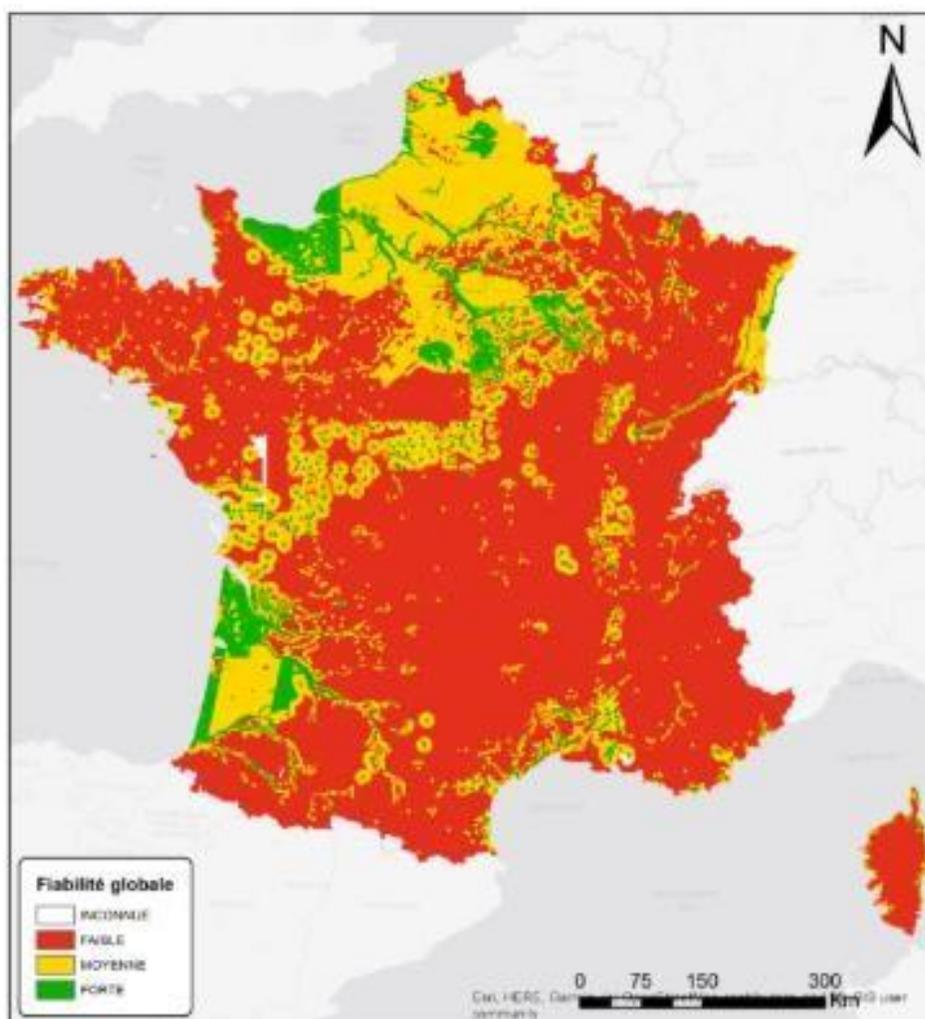
Introduction du chapitre 6.....	166
1.Avantages et limites de chaque méthode	166
1.1. Utilisation du drone pour la recherche scientifique	166
1.1.1. Le drone : un outil qui contrebalance avec les images satellites	166
1.1.2. Les environnements aériens non-permissifs	167
1.1.4. La météorologie : un facteur indispensable à prendre en compte	169
1.1.5. Le traitement des orthophotographies par drone.....	171
1.2. Utilisation de l'imagerie satellitaire Sentinel-2 et Pléiades	173
1.2.1. Images Sentinel-2.....	173
1.2.2. Images Pléiades	176
1.3. Utilisation de points de contrôles au sol	178
1.3.1. Les pièges photographiques.....	178
1.3.2. Les données météorologiques	181
2.Pertinence du croisement de chaque méthode.....	182
Conclusion du chapitre 6	188
Conclusion générale	190
Références bibliographiques.....	192
Liste des figures.....	196
Table des matières.....	201
Annexes.....	206

Annexes

Annexe 1.

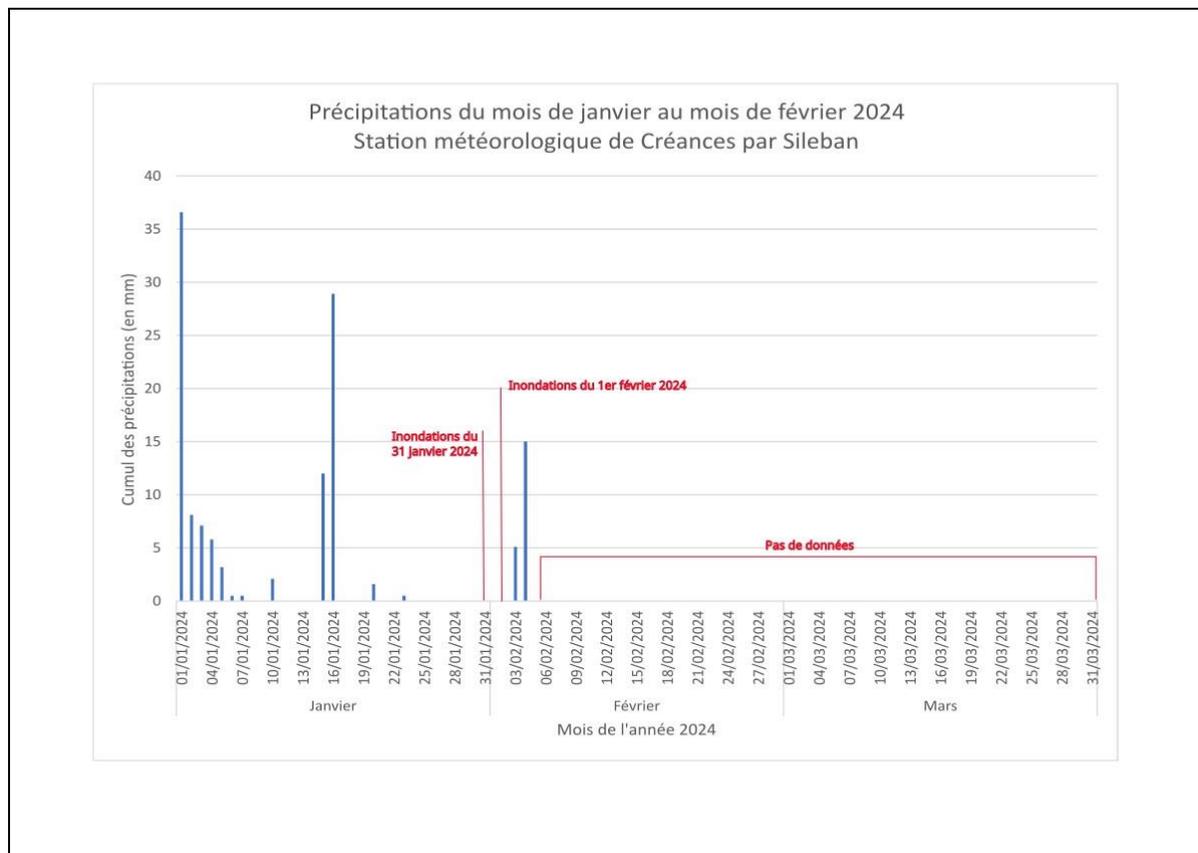
Carte de la fiabilité globale pour la méthode employée pour la digitalisation des débordements de nappes phréatiques observés en 2001.

(<https://www.georisques.gouv.fr/articlesrisques/inondations/les-inondations-par-remontee-de-nappe>)



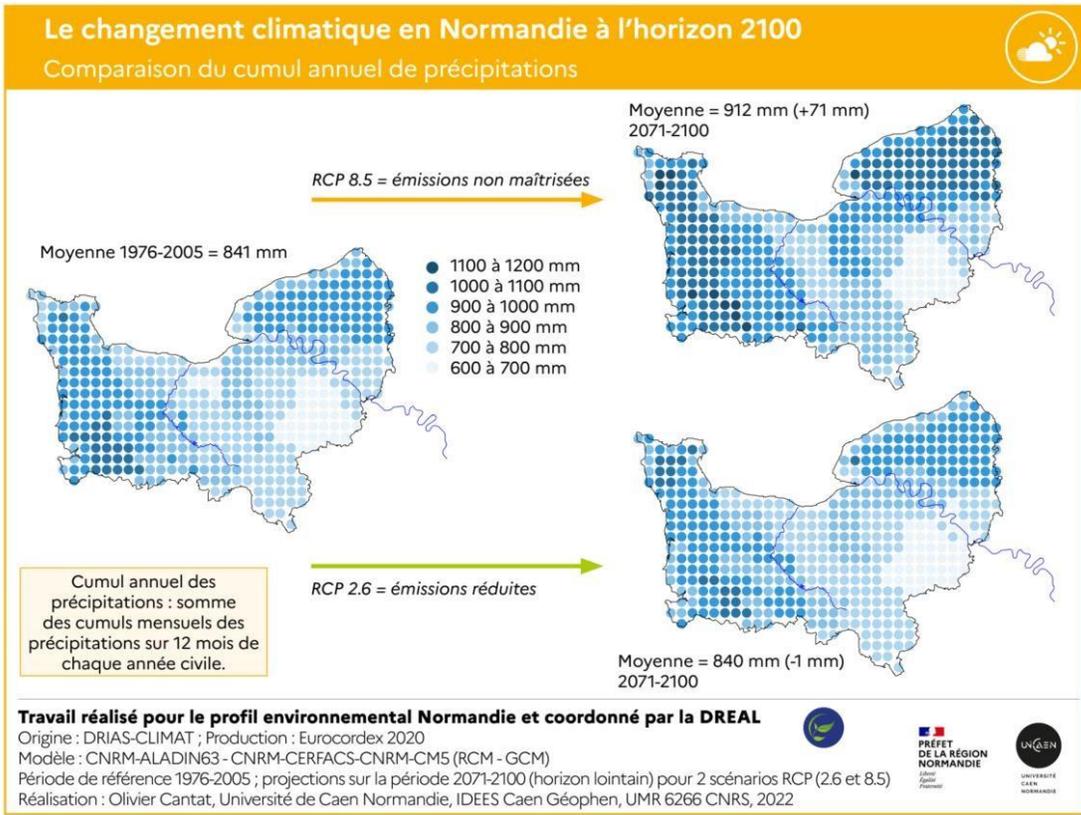
Annexe 2.

Graphique des précipitations du mois de janvier au mois de février 2024 sur la station météorologique de Créances. (Charpentier, 2024)



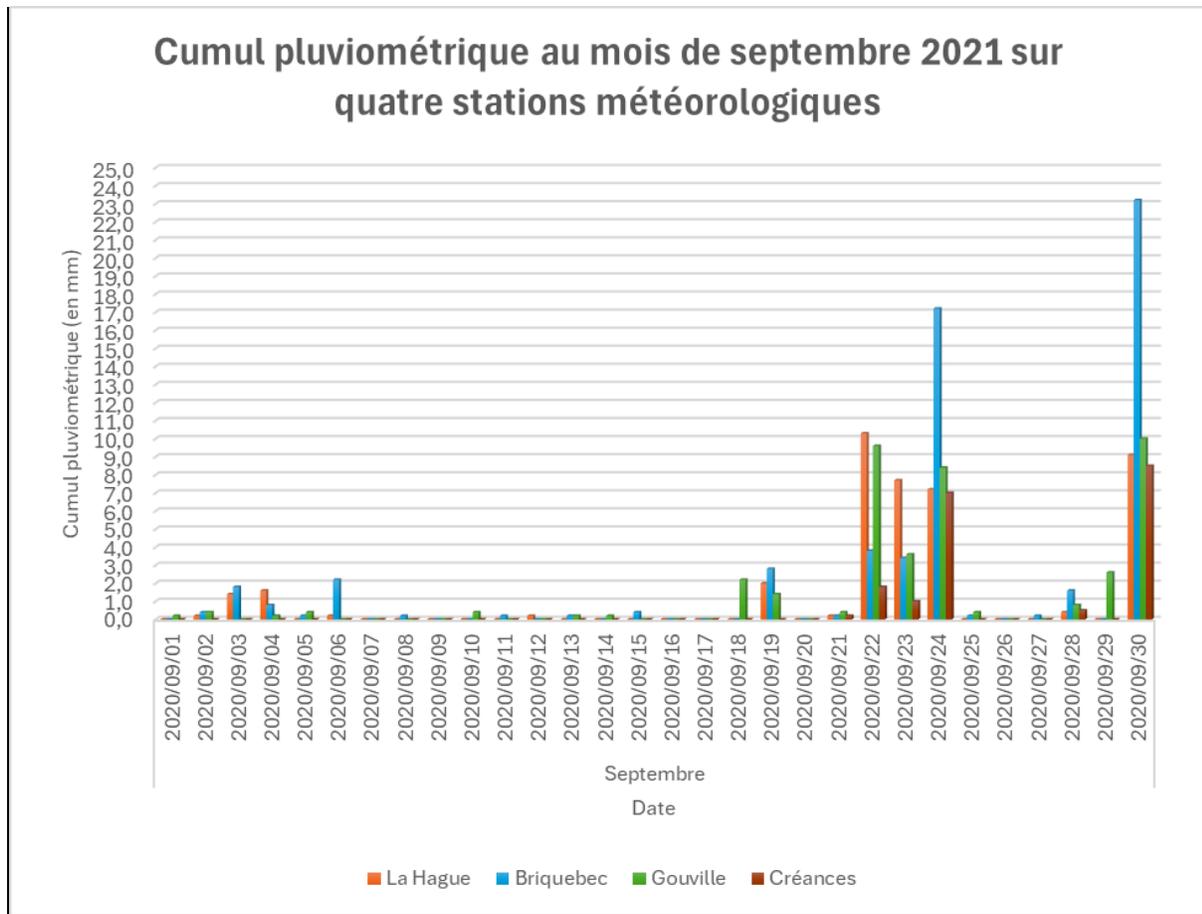
Annexe 3

Carte du changement climatique en Normandie à l'horizon 2100. Comparaison du cumul annuel de précipitations. (<https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-51122-FR.pdf>)



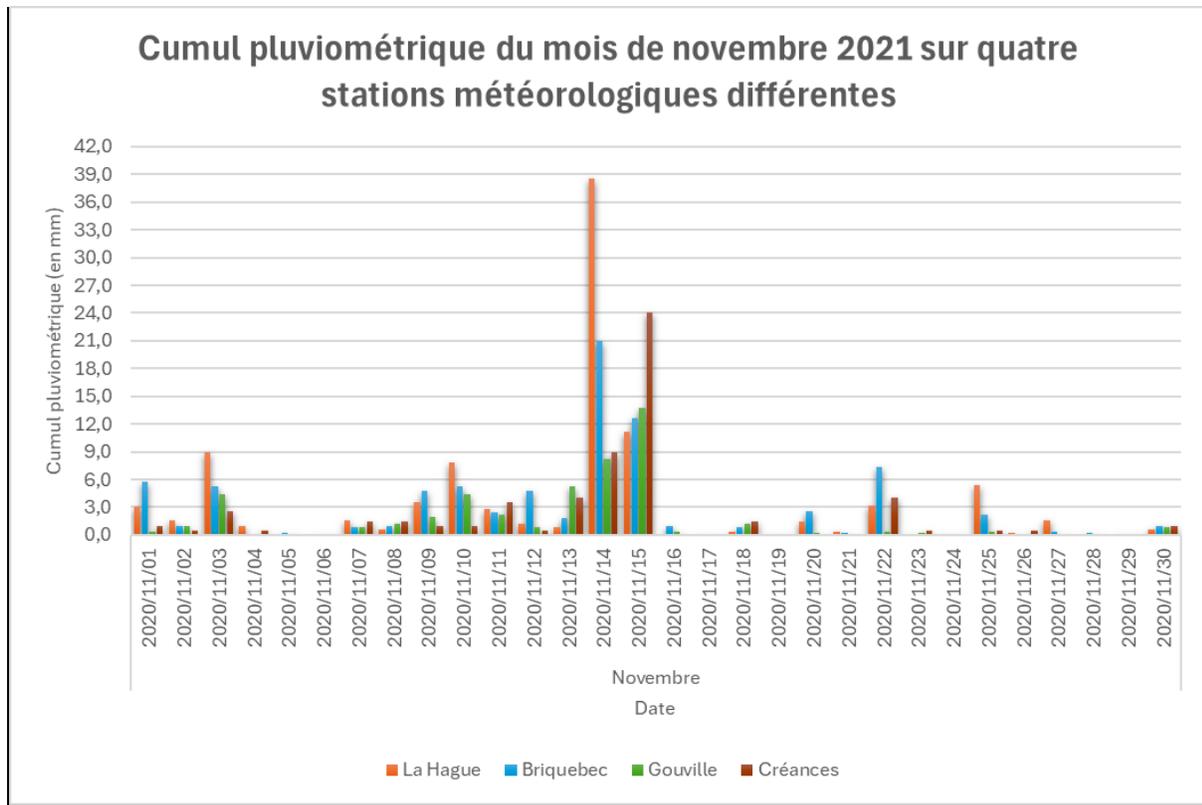
Annexe 4

Graphique du cumul pluviométrique au mois de septembre 2021 sur quatre stations météorologiques. (Charpentier, 2024)



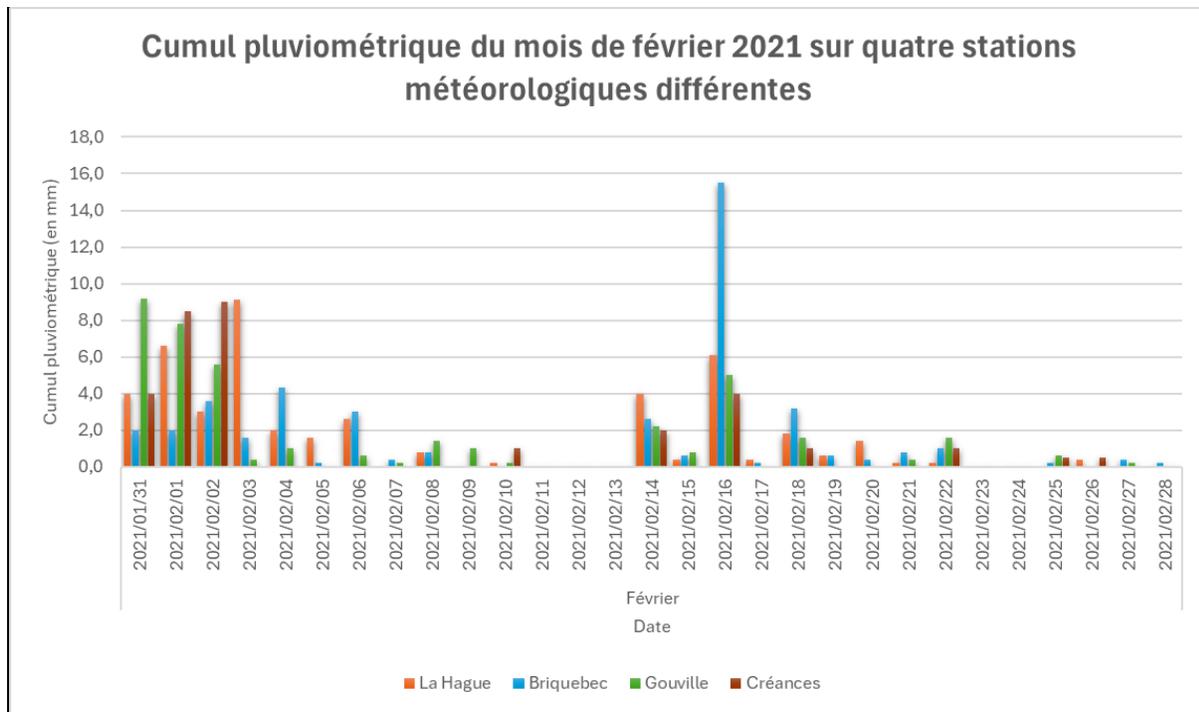
Annexe 5

Graphique du cumul pluviométrique au mois de novembre 2021 sur quatre stations météorologiques. (Charpentier, 2024)



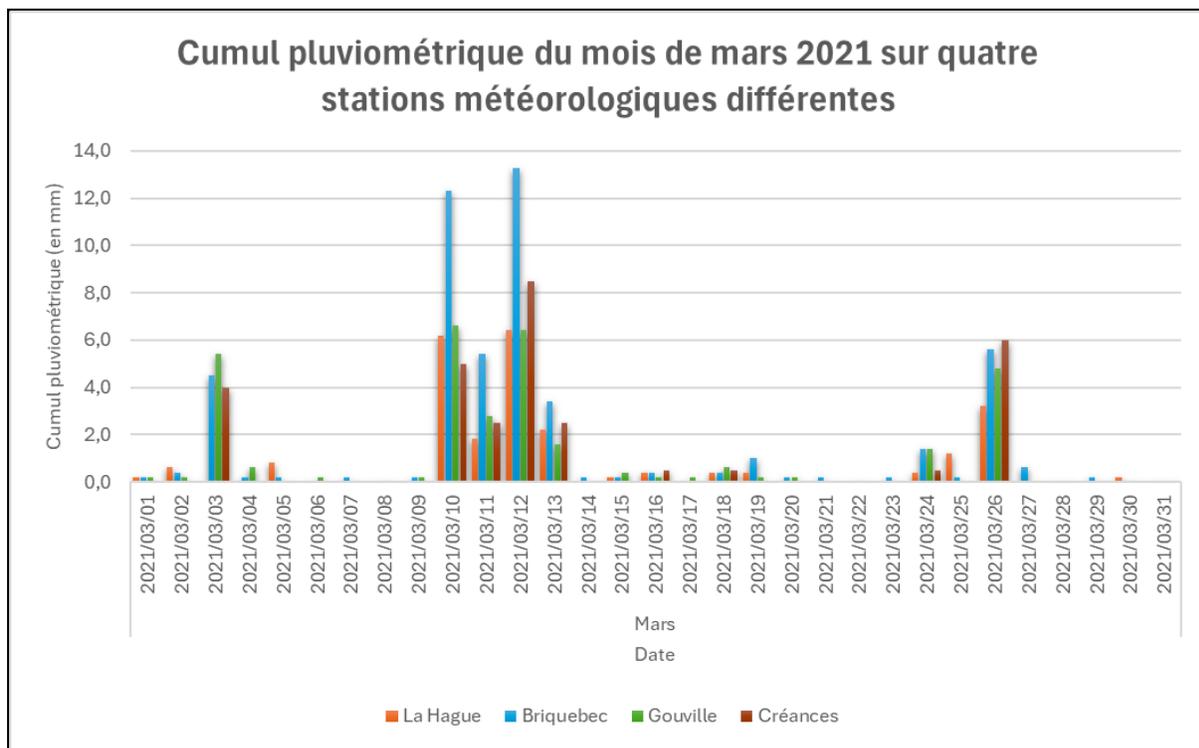
Annexe 6

Graphique du cumul pluviométrique au mois de février 2021 sur quatre stations météorologiques. (Charpentier, 2024)



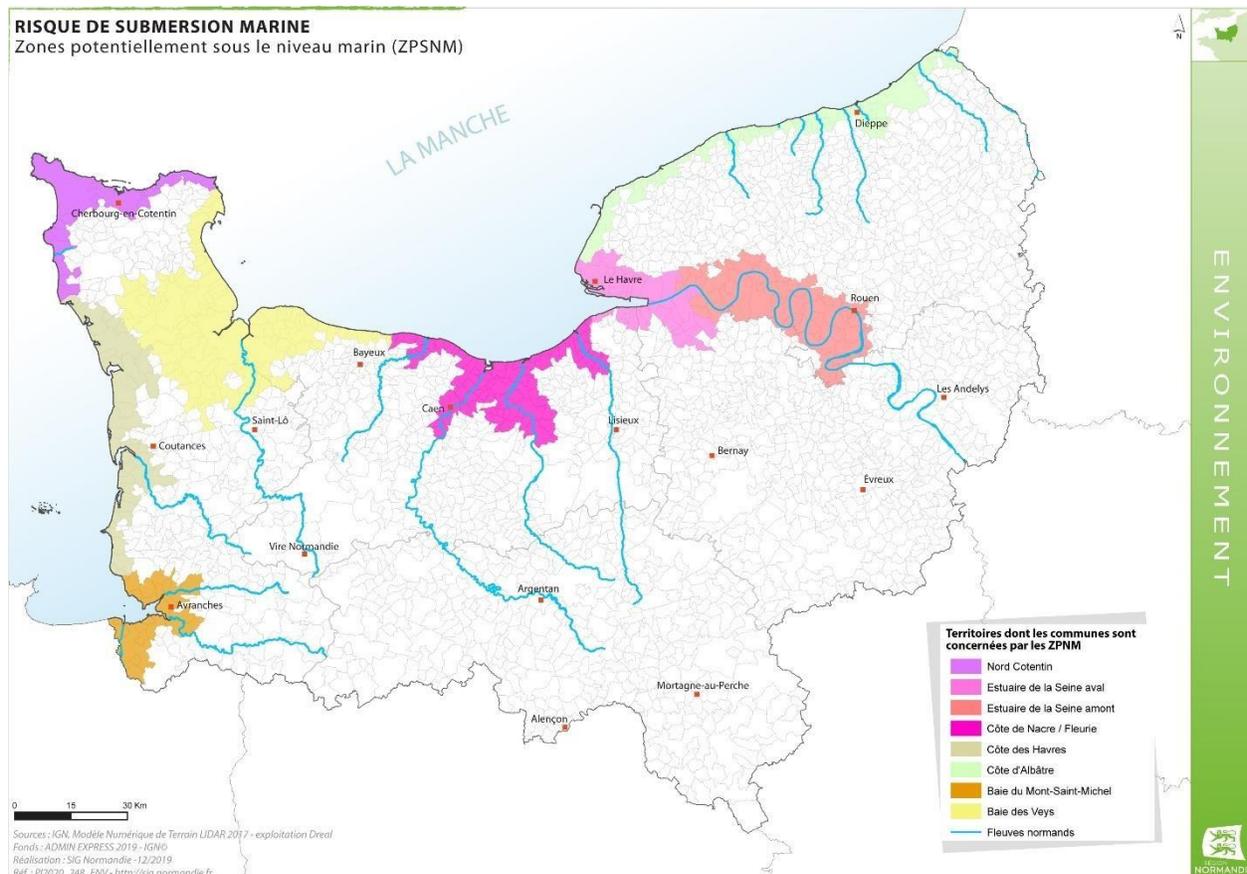
Annexe 7

Graphique du cumul pluviométrique au mois de mars 2021 sur quatre stations météorologiques. (Charpentier, 2024)



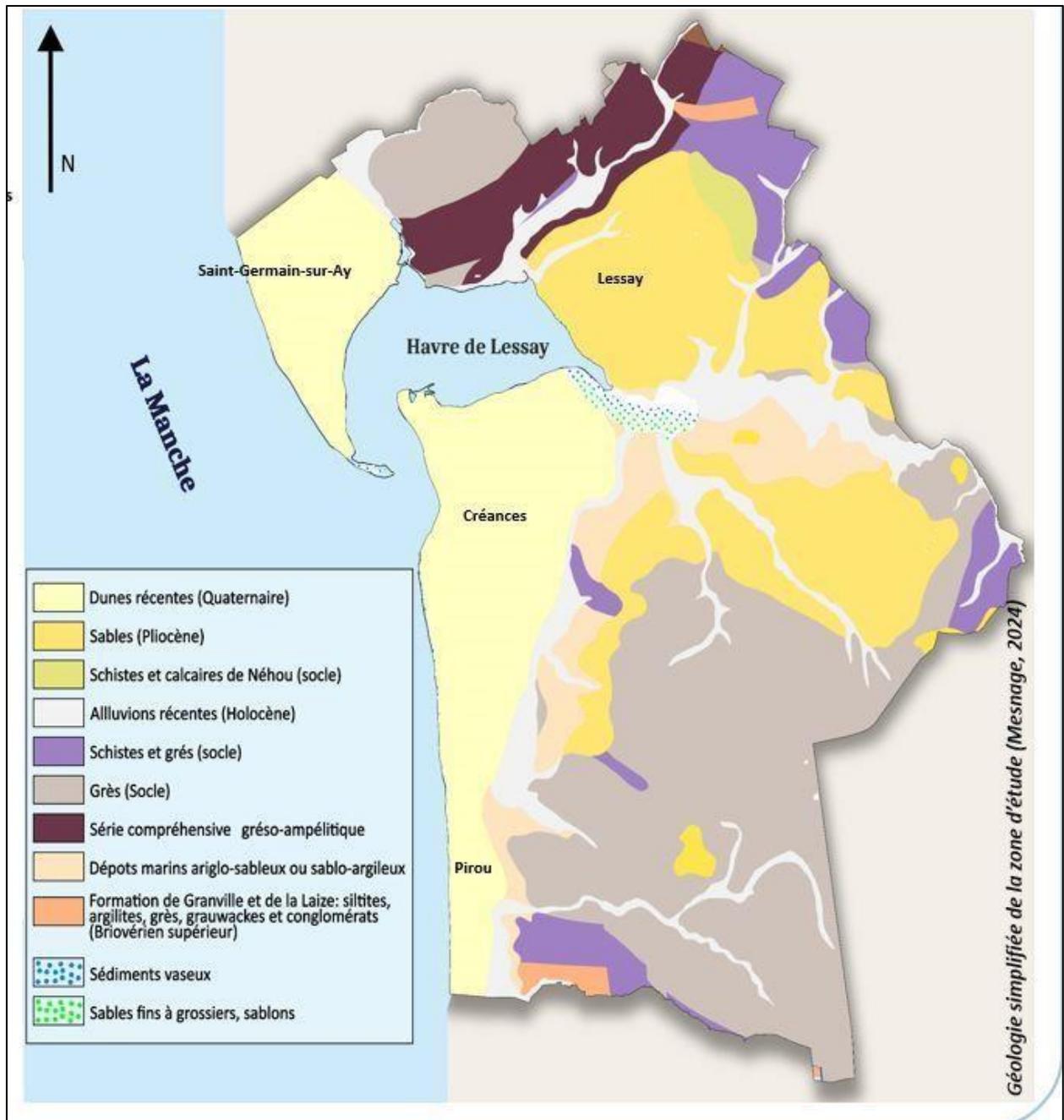
Annexe 8

Carte des zones potentiellement sous le niveau marin. (<https://sig.normandie.fr/risque-desubmersion-marine-zones-potentiellement-sous-le-niveau-marin-zpsnm>)



Annexe 9

Cartes géologiques des zones d'étude. (Mesnage, 2024)



Géologie simplifiée de la zone d'étude (Mesnage, 2024)

