Apport de la télédétection optique au suivi des crues dans la Bassée

Paul Passy[1*], Anaëlle Puisais[1]

[1] UMR PRODIG, Université Paris-Cité
[*] paul.passy@u-paris.fr

Résumé

Ce rapport fait le point sur la disponibilité spatio-temporelle des données Landsat et Sentinel-2 pour le suivi des crues dans la Bassée. Une seule tuile Landsat (198-026) permet de suivre l'intégralité de la zone à une date donnée. Une tuile Sentinel-2 (31UEP) couvre 91 % de la zone. Malgré une bonne fréquence de revisite de ces deux capteurs, la présence de nuages reste un obstacle majeur, nous empêchant même de suivre la crue de 2016. En calculant l'indice d'extraction des surfaces en eau MNDWI, il est possible d'extraire les surfaces en eau à partir des images Landsat et Sentinel-2. Les deux satellites fournissent des résultats comparables, mais sous-estiment grandement la quantité d'espaces en eau réellement sur la zone tels que cartographiés par la BD TOPAGE. En 2018, le pic de crue est atteint en février et près de 30 km² apparaissent inondés. Spatialement les inondations ne touchent que la partie amont et les inondations se présentent sous forme de taches plus ou moins grandes et plus ou moins connectées entre elles. Certaines portions inondées ne sont connectées ni à la Seine, ni à une gravière. Il s'agit alors peut-être de zones inondées par remontées de nappes ou par submersion pluviale. Enfin, un résultat inattendu est la mise en évidence des étangs historiques sur la zone du fait de leur propension à être inondés.

Points clefs

- ✓ *L'utilisation de la télédétection optique permet de suivre la crue de 2018, mais pas celle de 2016 du fait de la présence de nuages.*
- ✓ *Le pic de crue en 2018 est atteint en février et près de 30 km² sont détectés comme étant inondés.*
- ✓ *Les surfaces inondées ne représentent pas un bloc, mais au contraire une mosaïque de taches d'inondations, plus ou moins connectées, toutes localisées à l'amont de la zone.*

Abstract

This report reviews the spatiotemporal availability of Landsat and Sentinel-2 data for flood monitoring in the Bassée floodplain. A single Landsat tile (198-026) tracks the entire area on a given date. A Sentinel-2 tile (31UEP) covers 91% of the area. Despite a good frequency of revisiting time of these two sensors, the presence of clouds remains a major obstacle, even preventing us from monitoring the 2016 flood. By calculating the water surface extraction index MNDWI, it is possible to extract water surfaces from Landsat and Sentinel-2 images. The two satellites provide comparable results but greatly underestimate the actual amount of water areas in the study area as mapped by the TOPAGE database. In 2018, the flood peak was reached in February and nearly 30 km² appeared to be flooded. Spatially, the floods only affect the upstream part of the floodplain and the floods appear

in the form of more or less large spots and more or less connected to each other. Some flooded portions are connected neither to the Seine nor to a gravel pit. These may then be areas flooded by rising water tables or by rain flooding. Finally, an unexpected result is the highlighting of historic ponds in the area due to their propensity to be flooded.

Key points

- ✓ The use of optical remote sensing allows to follow the 2018 flood but not that of 2016 due to the presence of clouds.
- ✓ The flood peak in 2018 is reached in February and almost 30 km² are detected as being flooded.
- ✓ The flooded surfaces do not represent a block but on the contrary a mosaic of flood spots, all located upstream of the Bassée floodplain.

Introduction

1. Contexte et questions de recherche

De nombreuses publications et de nombreux rapports produits dans le cadre du programme PIREN-Seine ont déjà traité la question de l'importance de la Bassée dans l'hydrologie du bassin séquanien. Nous ne rappellerons ici que l'aspect qui nous intéresse directement, à savoir le rôle que peut jouer cette zone humide en tant que zone d'expansion des crues. De par sa situation en amont de l'agglomération parisienne et à la confluence entre la Seine et l'Yonne, elle constitue en effet une zone de stockage potentiel de l'eau intéressante et « naturelle ». Ce rôle de rétention et d'atténuation est bien connu, mais encore peu d'études ont cherché à quantifier les surfaces ennoyées sur toute la zone lors des épisodes de crues, à estimer les limites des plus hautes eaux sur tout le territoire et à caractériser le rythme de la crue et de la décrue.

C'est à ces différentes tâches que s'attelle le présent rapport en apportant des éléments de réponses aux questions suivantes :

- Quelle est la disponibilité spatio-temporelle des données satellites au regard d'un épisode de crue donné ?
- Dans quelle mesure les images satellites permettent-elles de quantifier les rythmes hydrologiques et l'extension des crues dans la Bassée ?
- Peut-on cartographier les différentes étapes d'une crue, et plus particulièrement son pic ?

L'ensemble du travail synthétisé dans la suite de ce rapport est issu d'un stage de première année du master *Géographie, Aménagement, Environnement et Développement* de l'Université Paris-Cité. Ce stage a été effectué par Anaëlle Puisais au second semestre de l'année universitaire 2021-2022 sous la direction de Paul Passy, maître de conférences en télédétection à l'UMR PRODIG (Université Paris-Cité). Ce stage a bénéficié d'un soutien financier du PIREN-Seine.

2. L'outil utilisé : la télédétection

2.1. Rapides notions de base

Il existe deux grands types de télédétection, la télédétection optique et la télédétection radar. Ici, il ne sera question que de télédétection optique. Cette dernière est la forme historique et la plus couramment utilisée. Il s'agit de la télédétection qui observe la surface terrestre dans ce qui est appelée la partie optique du spectre électromagnétique. En télédétection spatiale, il s'agit du domaine du visible, s'étalant du domaine du bleu ($\lambda \approx 450$ nm, où λ désigne la longueur d'onde) jusqu'au domaine du rouge ($\lambda \approx 740$ nm), et du domaine de l'infrarouge. Dans ce domaine de l'infrarouge, ce sont surtout les portions dites du proche infrarouge ($\lambda \approx 860$ nm) et du moyen infrarouge ($\lambda \approx 2.15$ µm) qui sont utilisées.

La télédétection optique est qualifiée de passive, car elle se contente de mesurer la proportion d'énergie solaire réfléchie par la surface dans certaines gammes de longueurs d'ondes. Cette proportion d'énergie réfléchie est appelée réflectance et dépend de la longueur d'onde considérée et du type de surface observé. Par exemple, une surface en eau réfléchit un peu dans le domaine du bleu, très peu dans les autres domaines du visible et pas du tout dans le domaine de l'infrarouge. Au contraire, une surface en végétation réfléchit moyennement dans le domaine du visible, avec un pic dans le domaine du vert, mais réfléchit énormément dans le proche infrarouge.

Finalement, la télédétection optique repose totalement sur ce concept de signatures spectrales pour identifier les différents états de la surface et leur évolution dans le temps. L'avantage de cette forme de télédétection est justement qu'elle repose sur ce concept de signatures spectrales, très robuste d'un point de vue physique, même si ces signatures sont moyennées à une échelle plus ou moins fine selon la résolution spatiale du capteur utilisé. D'autre part, de nombreuses missions d'observation de la Terre sont basées sur cette technologie, ce qui fournit de nombreuses observations dans le temps et l'espace, avec une profondeur historique de 50 ans. Un autre avantage majeur de ces images est qu'elles sont distribuées gratuitement au travers de portails très ergonomiques par les agences spatiales étasunienne et européenne.

Spatialement, les images sont fournies sous forme de scènes. Avec les satellites que nous utilisons ici (Landsat 8 et Sentinel-2), ces scènes représentent des portions de territoires d'une centaine de kilomètres de côté. En termes de disponibilité spatiale, il est fréquent qu'une région d'étude donnée soit recouverte par plus d'une scène.

Le principal inconvénient de la télédétection optique est la présence de nuages. En effet, dans ces domaines de longueurs d'ondes, si un nuage est présent au moment de l'observation, le capteur mesurera la réflectance en haut du nuage et non au niveau de la surface. La surface sera donc masquée au moment de l'acquisition, ce qui s'avère très problématique pour le suivi des crues qui sont souvent corrélées à une forte couverture nuageuse.

2.2. La télédétection et le suivi des surfaces en eau

Le suivi des surfaces en eau constitue, après le suivi de la végétation, l'utilisation principale de la télédétection. En télédétection optique, de nombreux indices radiométriques ont été développés pour mettre en évidence les surfaces en eau. Ces indices sont basés sur des combinaisons de bandes spectrales qui profitent de la signature spectrale particulière de l'eau. Il existe de nombreux indices différents, avec chacune des variantes selon le capteur ou la nature de la surface. Dans cette étude nous nous intéresserons seulement à l'utilisation du plus répandu de ces indices, à savoir le MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*). Cet indice a fait ses preuves pour la détection des surfaces en eau dans de nombreux environnements différents (Cordeiro et al., 2021 ; Du et al., 2016 ; Zhou et al., 2017). Il se calcule par un simple calcul raster en combinant les bandes spectrales du domaine du *Vert* et du *Moyen Infrarouge*, comme indiqué sur l'équation suivante. Cet indice a l'avantage d'être basé sur des bandes spectrales existantes sur la majorité des capteurs satellites.

$$MNDWI = \frac{(Vert - MIR)}{(Vert + MIR)}$$

Avec *Vert* la bande spectrale du domaine du *Vert* et *MIR* la bande spectrale du domaine du *Moyen Infrarouge*

Comme beaucoup d'indices radiométriques, il prend des valeurs comprises entre -1 et +1 où 0 est une valeur seuil. Un pixel de territoire en eau présentera, par définition, un MNDWI positif, alors qu'un pixel de territoire en terre aura un MNDWI négatif. Il est ainsi aisé de séparer l'eau de la terre, même si une certaine incertitude subsiste pour les pixels mélangés et les zones en eau très chargées en turbidité ou matière organique.

3. Zone d'étude et crues suivies

3.1. Rapide contexte géographique

La Bassée est la plus vaste plaine alluviale du bassin de la Seine. Cette plaine s'étend approximativement de la confluence entre l'Aube et la Seine à l'amont et à la confluence de la Seine avec l'Yonne à l'aval, soit à peu près 75 km de long à vol d'oiseau et sur approximativement 4 km de large. Pour cette étude, les limites fournies par Anne Jost, hydrologue à l'UMR METIS et au sein du programme PIREN-

Seine, ont été utilisées. Selon ces limites, la Bassée s'étend jusqu'à la confluence de la Seine avec le Loing, ce qui représente une zone d'à peu près 400 km² (Fig. 1).

Figure 1. Localisation de la Bassée, sur la Seine, à l'amont de la confluence de la Seine et de l'Yonne.

La topographie de la zone est très plate, avec une altitude moyenne de 59.5 m (calculée depuis le SRTM), et une altitude maximale et minimale de respectivement 114 m et 30 m. L'altitude de la Seine à l'amont est de 74 m et de 41 m à l'aval, ce qui représente une pente approximative de 0.4 $mm.m^{-1}$.

Cette faible topographie, couplée à un climat qui cumule 740 mm de précipitations annuelles (à Monterault-Fault-Yonne) explique le caractère humide de la plaine alluviale. Ce caractère humide se traduit également par une hydrologie complexe avec de nombreux bras fluviaux et anciens méandres, mais aussi de nombreux canaux et fossés de drainage. L'hydrologie et l'hydrogéologie sont encore compliquées par la présence d'étangs et de gravières (Jost et al., 2017) qui résultent de l'extraction des matériaux de la plaine alluviale (Guillon et al., 2021 ; Labarthe et al., 2013).

Du point de vue de l'occupation des sols, selon les données Theia, la Bassée est dominée par les cultures, qui représentent une superficie cumulée de 140 km². Suivent ensuite la forêt avec 110 km², le bâti avec 80 km² et finalement l'eau avec 40 km². La zone est occupée par près de 110 000 habitants, soit une densité d'à peu près 275 habitants par km². La commune la plus peuplée est Montereau-Fault-Yonne (17 000 habitants) et la moins peuplée est Passy-sur-Seine, avec seulement 52 habitants.

L'ensemble de ces éléments montre bien le potentiel de cette plaine alluviale pour l'expansion des crues, mais indique clairement qu'il s'agit d'une zone habitée et d'importance économique non négligeable. Il y a donc un double enjeu autour de cette zone : laisser les crues s'étendre sans remettre en cause l'intégrité du territoire et des citoyens qui l'habitent.

3.2. Les crues suivies

Dans ce travail, nous avons suivi par télédétection deux crues aux caractéristiques différentes. La première crue est une crue printanière qui s'est déroulée entre mi-mai et mi-juin 2016. La seconde est une crue hivernale qui s'est produite entre janvier et février 2018.

Selon les données mesurées par la station « *la Seine à Montereau-Fault-Yonne* » (station F400 0001), le pic de crue pour la crue de 2016 a eu lieu le 5 juin (Flipo et al., 2018). Le débit journalier a alors atteint la valeur de 813 $m^3.s^{-1}$, ce qui est bien au-dessus d'une valeur classique du mois de juin qui est plutôt aux alentours de 70 – 100 $m^3.s^{-1}$.

La crue hivernale de 2018, à la même station, a atteint son pic le 27 janvier avec une valeur de 1030 $m^3.s^{-1}$. Un mois de janvier classique connait plutôt des débits de l'ordre de 100 – 400 $m^3.s^{-1}$.

Dans la suite de ce travail, nous avons donc étudié les images de télédétection disponibles pour ces deux périodes :

- Printemps 2016 : entre mai et juillet
- Hiver 2018 : entre décembre 2017 et avril 2018

4. Données et méthodes

Comme exposé plus haut, pour ce présent rapport, nous n'avons utilisé que des images issues de la télédétection optique. Nous avons plus particulièrement utilisé les images issues de deux grandes missions d'observation de la Terre, à savoir des images Landsat 8 et Sentinel-2.

4.1. Images Landsat

Le premier type de données optiques utilisées sont les images issues du programme d'observation de la Terre Landsat. Landsat est un programme scientifique bien connu, piloté conjointement par la NASA et l'USGS. Ce programme couvre 50 ans d'observation de la Terre, depuis les premières observations effectuées par Landsat 1 en 1972 aux observations courantes effectuées par Landsat 8 et 9. Pour les deux périodes qui nous intéressent, nous ne disposons que des images Landsat 8. En effet, Landsat 9 n'a été mis en orbite qu'en septembre 2021.

Landsat 8 embarque un capteur nommé OLI, qui prend des images de la surface de la Terre tous les 16 jours dans 11 bandes spectrales différentes. La résolution spatiale, pour les bandes qui nous intéressent ici, est de 30 m. Cela signifie qu'un pixel d'une image Landsat représente une portion de territoire de 30 m sur 30 m. Les images Landsat sont librement téléchargeables et utilisables à partir du portail EarthExplorer de l'USGS. La zone étudiée tombe entre deux tuiles Landsat. La partie amont de la Bassée se trouve dans la tuile correspondant au *path and row* 198 – 26 et la partie aval dans le *path and row* 199 – 26.

Pour cette étude, nous avons travaillé avec les images déjà corrigées en réflectance de surface telles que proposées par l'USGS et la NASA. Il s'agit des images issues de la *Collection 2 Level 2*. Un simple réétalonnage de ces images permet de bien obtenir des réflectances exprimées entre 0 et 1.

4.2. Images Sentinel-2

Le second corpus d'images optiques utilisées est composé des images de la mission d'observation de la Terre Sentinel-2. Cette mission fait partie du programme européen Copernicus et est pilotée par l'ESA. En 2016, seul le satellite Sentinel-2A était en orbite, mais un Sentinel-2B a depuis été mis en fonctionnement courant 2017. Ainsi, pour l'épisode de crue de 2018, nous disposons des images des deux satellites. Chaque satellite ayant un temps de retour de 10 jours, à partir de 2017, chaque portion terrestre est revisitée tous les 5 jours.

Ces satellites Sentinel-2 ont à leur bord un capteur nommé MSI, qui observe la surface dans 12 bandes spectrales différentes. Ces bandes spectrales ont des résolutions variant de 10 m à 20 m. Les images Sentinel-2 sont également librement téléchargeables et utilisables depuis le portail Open Access Copernicus Hub. Ici aussi, la zone étudiée tombe entre deux tuiles Sentinel-2. La partie amont se trouve dans la tuile 31UEP, et la partie aval dans la tuile 31UDP.

Les images Sentinel-2 récupérées sont de niveau L1C, soit en réflectance haute de l'atmosphère (réflectance TOA). Nous les avons ensuite corrigées en réflectance de surface par application d'une correction atmosphérique de type DOS. La figure suivante présente deux compositions colorées en fausses couleurs où la bande du proche infrarouge a été colorée en rouge. Ce type de composition permet de bien rendre les contrastes entre les zones végétalisées, les sols nus et les surfaces en eau. L'image du haut est une composition faite en mai 2018, à un moment où l'hydrologie est « moyenne », à partir d'une image Landsat 8. La seconde est une composition sur une image de février 2018 au moment du pic de crue à partir d'une image Sentinel-2. Nous pouvons voir visuellement la différence en termes de résolution spatiale entre les deux capteurs, 30 m pour Landsat et 10 m pour Sentinel-2 (Fig. 2).

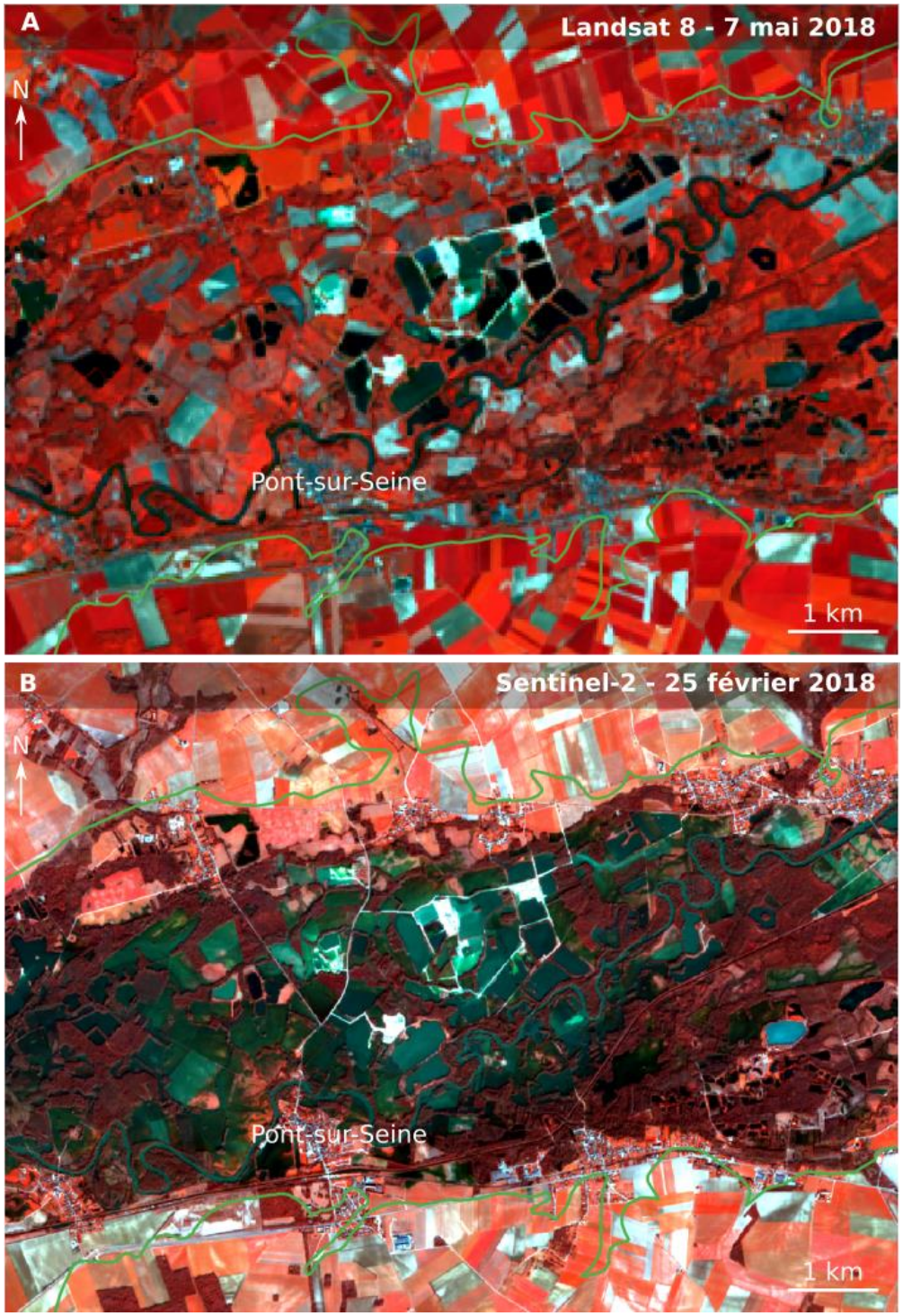

Figure 2. Composition colorée avec fausses couleurs Landsat 8 de mai 2018 en situation « moyenne » (A) et Sentinel-2 de février 2018 au pic de crue (B). Dans les deux cas, la bande du proche infrarouge a été colorée en rouge.

4.3. Méthode suivie

4.3.1. Disponibilité spatio-temporelle

Afin d'évaluer la disponibilité spatiale des données, nous avons commencé par croiser notre zone d'étude avec les tuiles Landsat d'un côté et les tuiles Sentinel-2 de l'autre. Ce faisant, nous pouvons précisément délimiter les zones que nous sommes potentiellement capables de suivre à chaque date. La disponibilité temporelle correspond théoriquement à une fréquence de retour de 16 jours pour Landsat et de 5 jours pour Sentinel-2. Néanmoins, comme précisé plus haut, la présence de nuages fait grandement chuter cette fréquence théorique. Pour évaluer la disponibilité temporelle des images vis-à-vis des nuages, il n'y a pas

d'autre possibilité que d'analyser les métadonnées de chaque image renseignant sur le taux de couverture nuageuse au moment de la prise de vue.

4.3.2. Quantification de la sensibilité des images

Avant d'extraire les surfaces inondées, il est important de quantifier dans quelle mesure les images Landsat et Sentinel-2 sont capables de reconnaître les surfaces en eau en situation normale. Pour ce faire, une date correspondant à une hydrologie moyenne a été sélectionnée et les surfaces en eau de cette date ont été extraites à la fois sur une image Landsat et une image Sentinel-2. Ces deux extractions ont été comparées entre elles, mais également avec les surfaces en eau de référence telles que fournies par la BD TOPAGE sur la zone. La comparaison de nos extractions avec cette donnée de référence nous permet de quantifier l'incertitude en termes de détection des surfaces en eau.

4.3.3. Quantification des crues

L'extraction des surfaces en eau s'est effectuée en utilisant un indice radiométrique dédié à l'analyse de l'eau. Comme indiqué précédemment, nous avons utilisé un indice éprouvé, à savoir le MNDWI, qui a été calculé pour chaque image exprimée en réflectance de surface. Ce MNDWI a tout d'abord été calculé pour une image représentative d'une hydrologie moyenne, afin d'extraire les surfaces en eau pérenne de la zone. Cet indice a ensuite été calculé pour les différentes images sélectionnées, avec un focus particulier pour l'image temporellement la plus proche du pic de crue.

Une fois les MNDWI calculés, les rasters obtenus varient entre -1 et +1. Par définition, une valeur de MNDWI positive traduit une surface en eau. Ces rasters ont donc été seuillés selon cette valeur pivot de 0 afin de créer des rasters binaires eau / terre.

Le raster binaire obtenu pour la situation « moyenne » a été soustrait du raster binaire obtenu pour le pic de crue afin de faire ressortir seulement les zones inondées, c'est-à-dire les zones en eau au moment de la crue, mais pas en eau en situation normale.

5. Résultats

5.1. Disponibilité spatio-temporelle

Nous avons commencé par identifier la couverture de notre zone d'étude par les tuiles Landsat et Sentinel-2. Les tuiles Landsat sont caractérisées par un *path* et un *row* qui les localisent précisément à la surface du globe dans un système de référence nommé WRS-2. Chaque tuile Landsat correspond à une portion de territoire de 180 km sur 180 km et chaque tuile superpose la suivante sur à peu près un tiers de sa surface. Deux tuiles Landsat recouvrent la Bassée, l'une entièrement et l'autre partiellement. La tuile recouvrant la Bassée dans sa totalité est la tuile identifiée par le *path* 198 et le *row* 26. La tuile de *path* 199 et de *row* 26 recouvre la Bassée sur 263 km², soit 65 %. Ces 65 % sont localisés sur la partie aval de la zone.

Les tuiles Sentinel-2 sont référencées dans un système plus complexe que celui utilisé par Landsat. Chaque tuile Sentinel-2 recouvre un territoire de 110 km sur 110 km. La Bassée se trouve entre les tuiles 31UEP et 31UDP. La première recouvre 365 km² (91 %) et oublie les 35 km² les plus en aval. La seconde tuile recouvre la partie aval sur 85 km² (22 %). La tuile Sentinel-2 la plus intéressante sera donc la 31UEP. Néanmoins, à certaines dates, toute la tuile n'est pas capturée et une large zone peut être absente de la prise de vue. Il serait possible de créer des mosaïques d'images issues de tuiles adjacentes afin d'obtenir des vues sur l'intégralité de la Bassée. Toutefois, ce type de traitement produit des images temporellement composites avec des pixels représentant des états de surface à des dates différentes sur une même image. Dans certains cas, une telle hétérogénéité temporelle n'est pas importante, mais elle n'est pas souhaitable pour étudier un phénomène hydrologique qui varie rapidement dans le temps. Ici, nous avons pris le parti de ne pas utiliser de telles mosaïques.

Le tableau (Tab. 1) suivant résume la disponibilité spatiale des images Landsat et Sentinel-2 pour la Bassée.

Tableau 1. Tuiles Landsat et Sentinel-2 pour la Bassée.

Capteur	*Tuile*	*Recouvrement*	*Amont/aval*
Landsat	*198 - 026*	*100 %*	*Totalité*
Landsat	*199 - 026*	*65 %*	*Aval*
Sentinel-2	*31UEP*	*91 %*	*Amont*
Sentinel-2	*31UDP*	*22 %*	*Aval*

Au final, malgré la multiplicité des sources, une seule tuile Landsat recouvre 100 % de la zone à une date donnée, et une seule dalle Sentinel-2 recouvre plus de 90 % de la zone à une date donnée.

D'un point de vue temporel, comme vu précédemment, pour une même tuile, Landsat a un temps de revisite de 16 jours et Sentinel-2 de 5 jours. Néanmoins, ces temps de revisite sont théoriques, puisque la surface peut être masquée par le couvert nuageux. Pour les deux épisodes de crue, nous avons recensé les images disponibles des deux capteurs et leurs couvertures nuageuses associées afin de ne comptabiliser que les images utilisables. Pour la crue de 2016, nous avons analysé la disponibilité des images entre le 1er mai 2016 et le 31 juillet 2016. Concernant la tuile Landsat 198 – 026 recouvrant 100 % de la Bassée, le minimum de nuages atteint tout de même 26 % pour l'image du 20 juillet 2016, ce qui est bien trop tard pour étudier la crue. Même la tuile 199 – 026, qui recouvre moins bien la zone, est toujours couverte d'au moins 15 % de nuages. Ces 15 % sont atteints le 9 juin 2016, mais malheureusement ces 15 % de nuages sont justement regroupés juste au-dessus de la Bassée (Fig. 3).

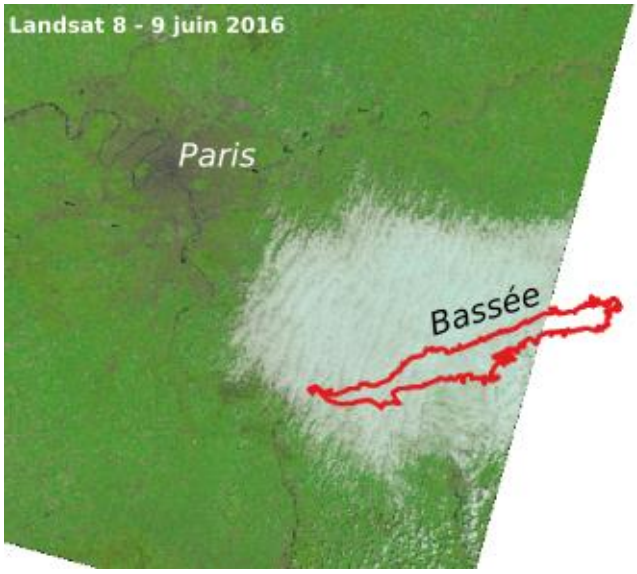

Figure 3. Couverture nuageuse juste au-dessus de la Bassée le 9 juin 2016.

Concernant les images Sentinel-2, le constat est le même. Pour la tuile 31UEP, seules les images des 10 et 17 juillet 2016 affichent une couverture nuage de 5 % et 6 % respectivement. Là encore, des dates en juillet sont trop isolées et trop tardives pour pouvoir être exploitables. Les autres dates sont toujours recouvertes par au moins 42 % de nuages.

La crue de 2016, bien qu'ayant eu lieu à une période de l'année normalement propice aux observations satellites, s'avère donc être impossible à suivre par télédétection optique.

Le même exercice d'analyse de la disponibilité des images a été réalisé pour la crue de 2018. La couverture nuageuse des images a été répertoriée pour la période allant du 1er décembre 2017 au 30 avril 2018 pour les deux capteurs. Concernant les données Landsat, pour la tuile 198 – 026, deux images présentent une couverture nuageuse inférieure à 15 %. La première est une image du 16 février 2018, soit proche du pic de crue, où la Bassée est bien visible. La seconde est une image du 21 avril 2018, à un moment où la crue est déjà bien passée. Pour la tuile 199 – 026, recouvrant seulement les deux tiers aval de la Bassée, une image du 23 février est utilisable avec un couvert nuageux proche de 0 %.

Concernant les images Sentinel-2, nous disposons de plus d'images. Nous avons en tout trois images pendant l'épisode de crue avec une couverture nuageuse inférieure à 5 %. Les trois dates utilisables sont les suivantes : 25 février, 6 avril et 21 avril 2018.

Pour récapituler, il ne sera pas possible d'analyser la crue de 2016 avec les images de télédétection optique. Par contre, quelques dates pourront être suivies pour la crue de 2018, comme résumé dans le tableau suivant.

Tableau 2. Images exploitables pour la crue de 2018.

Date	*Capteur*	*Tuile*	*Couverture nuageuse*	*Zone recouverte*
16/02/2018	*Landsat*	*198 - 026*	*11.81 %*	*100 %*
23/02/2018	*Landsat*	*199 - 026*	*0.16 %*	*65 %*
25/02/2018	*Sentinel-2*	*31UEP*	*5.33 %*	*91 %*
06/04/2018	*Sentinel-2*	*31UEP*	*0.85 %*	*91 %*
21/04/2018	*Landsat*	*198 - 026*	*0.46 %*	*100 %*
21/04/2018	*Sentinel-2*	*31UEP*	*2.85 %*	*91 %*

Au final, nous disposons de 6 images sur l'épisode de crue prises à 5 dates différentes. Néanmoins, les zones couvertes ne sont pas identiques. Nous pouvons également noter que pour le 21 avril 2018 nous disposons à la fois d'une image Landsat 8 et d'une image Sentinel-2, ce qui sera intéressant pour tester la sensibilité de notre méthode selon l'image employée.

5.2 Sensibilité de la méthode d'extraction des surfaces en eau

Comme expliqué dans la partie dédiée à la méthode, pour chaque image utilisable, le MNDWI a été calculé puis seuillé. Suite à ce seuil, nous obtenons une image binaire qui nous renseigne sur la présence ou l'absence d'eau pour chacun des pixels de la zone étudiée. Avant de suivre quantitativement les surfaces touchées par les inondations et les cartographier, il est nécessaire de tester la sensibilité de notre méthode ainsi que l'effet des différentes résolutions spatiales des images (30 m pour Landsat et 10 m pour Sentinel-2) sur les résultats. Pour ce faire, nous avons d'abord comparé la superficie de surfaces en eau extraites à partir d'images Landsat et Sentinel-2 pour deux dates identiques ou très proches, en contexte de basses eaux et de hautes eaux. Nous avons également comparé l'extraction des superficies en eau en « moyennes » eaux avec une donnée de référence, à savoir les surfaces en eau de la BD TOPAGE. Dans tous les cas, les comparaisons ont été effectuées sur la plus petite emprise spatiale commune. Le tableau suivant résume les comparaisons effectuées.

Tableau 3. Tests de sensibilité.

Donnée 1	*Donnée 2*	*Contexte*
07/05/2018 (Landsat)	*06/05/2018 (Sentinel-2)*	*Situation 'moyenne'*
07/05/2018 (Landsat)	*BD TOPAGE*	*Comparaison avec référence*
06/05/2018 (Sentinel-2)	*BD TOPAGE*	*Comparaison avec référence*
21/04/2018 (Landsat)	*21/04/2018 (Sentinel-2)*	*Hautes eaux*

L'emprise spatiale commune utilisée est celle de la tuile 31UEP de Sentinel-2. Les surfaces en eaux extraites à partir des images Landsat et les surfaces en eau de la BD TOPAGE ont été intersectées avec cette emprise spatiale minimale. Les différences de superficies sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau 4. Différences de superficies en eau.

Donnée 1	*Sup. (km²)*	*Donnée 2*	*Sup. (km²)*	*Diff. (km²)*	*Diff. (%)*
07/05/2018 (L8)	*23.80*	*06/05/2018 (S2)*	*22.30*	*1.5*	*6.3 %*
07/05/2018 (L8)	*23.80*	*BD TOPAGE*	*36.68*	*12.88*	*54.12 %*
06/05/2018 (S2)	*22.30*	*BD TOPAGE*	*36.68*	*14.38*	*64.48 %*
21/04/2018 (L8)	*22.33*	*21/04/2018 (S2)*	*24.98*	*2.65*	*11.9 %*

Cette comparaison des surfaces en eau nous permet de constater qu'en période de « moyennes' eaux les données Landsat et Sentinel-2 présentent des résultats semblables avec seulement 6 % de différence. En période de hautes eaux, cette différence monte à 11 %. Ces résultats montrent que ces deux sources d'images sont comparables entre elles même si une certaine incertitude demeure. Néanmoins, comme attendu, les extractions issues des images satellites sous-estiment grandement les surfaces en eau en période 'normale'. La différence avec la BD TOPAGE est de 54 % et de 64 % pour respectivement Landsat et Sentinel-2. Nous pouvons ainsi estimer qu'en période de crue, les extractions en eau issues de l'analyse des images satellites sous-estimeront également la superficie inondée.

Enfin, nous pouvons également constater que les surfaces en eau détectées avec les images Sentinel-2 sont toujours légèrement inférieures à celles détectées avec Landsat.

5.3 Évolution des superficies en eau

Avec les données disponibles, il n'est pas possible de suivre l'évolution dans le temps de l'intégralité de la Bassée. Les résultats présentés ci-dessous sont l'évolution des surfaces en eau pour la zone d'emprise commune minimale, à savoir celle couverte par la tuile Sentinel-2 31UEP. Les superficies en eau pour chaque date sont reportées dans le tableau suivant.

Tableau 5. Superficies en eau sur la zone d'emprise commune (2018).

Date	*Capteur*	*Sup. en eau (km²)*	*Sup. inondée (km²)*
16/02/2018	*Landsat 8*	*36.16*	*13.86*
25/02/2018	*Sentinel-2*	*51.75*	*29.45*
06/04/2018	*Sentinel-2*	*34.05*	*11.75*
21/04/2018	*Sentinel-2*	*24.98*	*2.68*
06/05/2018	*Sentinel-2*	*22.30*	*0.00*

Dans le tableau ci-dessus, la superficie inondée est calculée comme étant la différence entre la superficie en eau pendant l'épisode de crue retranchée de la superficie en eau du mois de mai, considérée comme étant la superficie en eau 'normale'. D'après cette analyse, le maximum de l'inondation n'est pas atteint le 16 février comme présupposé, mais le 25 février. Néanmoins, il faut prendre en considération le fait que les extractions des 16 et 25 février ont été faites selon deux capteurs différents. De plus, par observation des images, il est possible de voir que certains artefacts persistent. C'est notamment le cas au niveau de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine. Le nuage de condensation sortant de la cheminée au moment des prises de vue, ainsi que son ombre portée au sol, ont tendance à être confondus en partie avec de l'eau libre. Ces deux artefacts peuvent surestimer les surfaces en eau de 0.5 km².

De plus, la différence entre ces deux superficies en eau s'explique aussi par une détection de l'eau légèrement supérieure au niveau des bordures de chaque polygone d'eau de Sentinel-2 (Fig. 4).

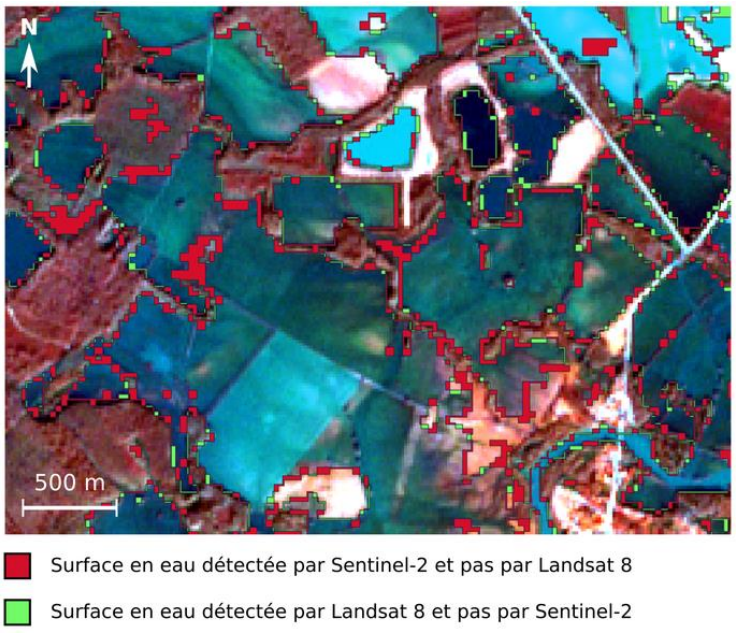

Figure 4. Différence des surfaces en eau détectées par Landsat et Sentinel-2 en février 2018. En fond, composition colorée fausses couleurs infrarouge Landsat 8 du 16 février 2018.

En plus de cette analyse quantitative, il est également possible de spatialiser l'épisode de crue. Nous pouvons commencer par comparer une extraction des surfaces en eau pour mai 2018, représentative d'une situation 'normale', avec une extraction de février 2018 à peu près au moment du pic de crue. Il est intéressant de noter que les inondations n'ont touché que la moitié la plus amont de la Bassée. La moitié aval n'a pas été

touchée par ces inondations (Fig. 5).

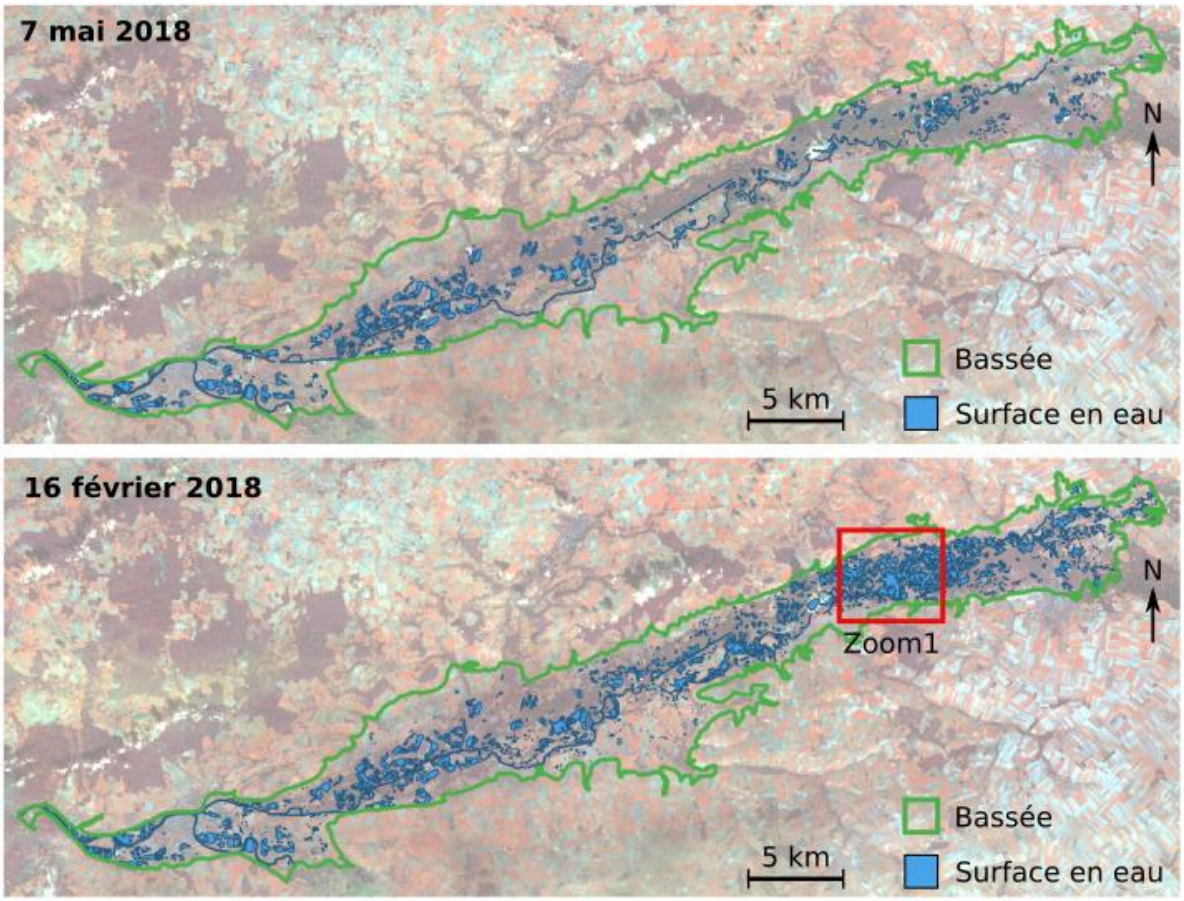

Figure 5. Surface en eau au moment du pic de février 2018 comparé à une situation de basses eaux de mai 2018.

Il est également intéressant de regarder la forme que prennent les inondations. Par exemple, en regardant de plus près le *Zoom 1* de la figure précédente (Fig. 5), nous nous rendons compte que l'inondation présente une forme en mitage. Si certains secteurs semblent être inondés du fait du débordement de la Seine, ils ne forment pas la majorité. D'autres secteurs semblent inondés par débordement des gravières, et d'autres encore ne sont connectés à aucune surface en eau pérenne (Fig. 6). Il est possible que ces derniers secteurs aient été inondés par submersion pluviale ou par remontée de nappes, mais il est difficile de le confirmer sur la base d'une simple observation d'images satellites.

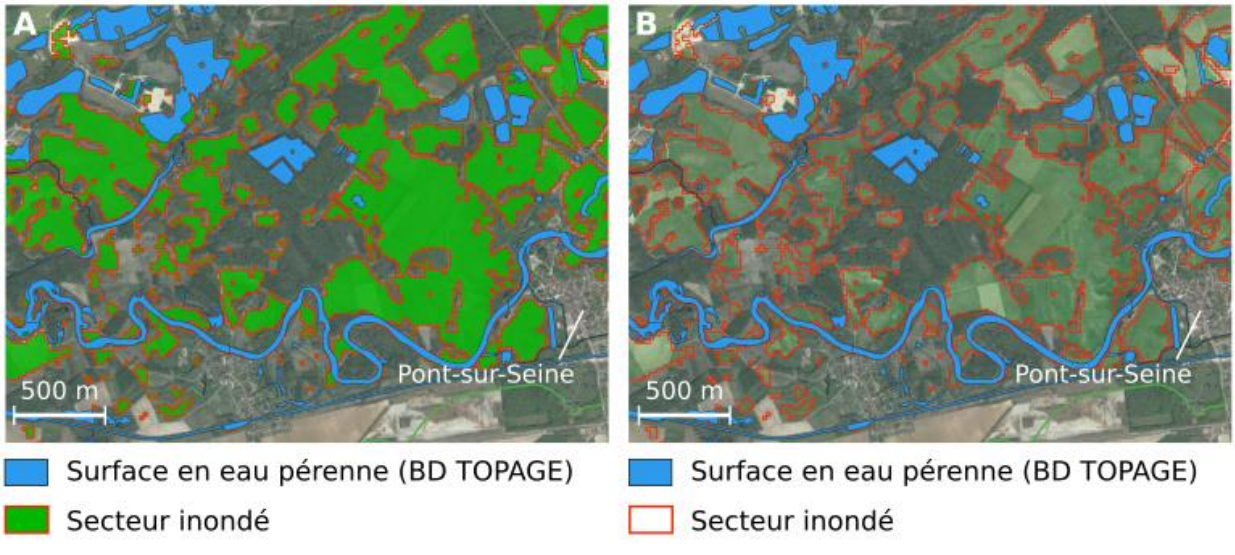

Figure 6. Zoom sur un espace inondé en février 2018 (extraction Landsat). Secteurs inondés représentés en aplat de vert (A) et simplement selon leurs contours (B).

Selon notre analyse et comme montré sur la figure précédente (Fig. 6), seuls des secteurs agricoles, terres arables ou prairies, sont inondés. Les limites des inondations s'arrêtent aux espaces boisés. La question suivante se pose alors : les espaces boisés sont-ils réellement épargnés par les inondations ou est-ce notre méthode qui ne nous permet pas de détecter les inondations sous couvert forestier ? Trancher cette question n'est pas possible en l'état actuel de notre analyse.

5.5 Spatialisation des moments de la crue de 2018

Comme nous disposons de quatre dates exploitables pour la crue de 2018, nous pouvons spatialiser le pic de crue et la décrue qui s'ensuit. Nous regarderons plus spécifiquement le territoire correspondant au *Zoom 1* présenté sur la figure 5. Sur la figure suivante (Fig. 6), en teintes de bleus, nous avons représenté les surfaces en eau aux différentes dates, telles qu'extraites sur les images Sentinel-2. Le 25 février, l'étendue des inondations est maximale sur cette zone près de Pont-sur-Seine. Un mois et demi plus tard, le 6 avril, les inondations ont baissé, mais restent très élevées. Par contre, deux semaines plus tard, au 21 avril, le niveau des eaux est quasiment redevenu normal. L'eau a beaucoup plus baissé pendant ces deux semaines d'avril que pendant le mois et demi précédent. Enfin, le 6 mai, le niveau des eaux a retrouvé son niveau normal sur la zone.

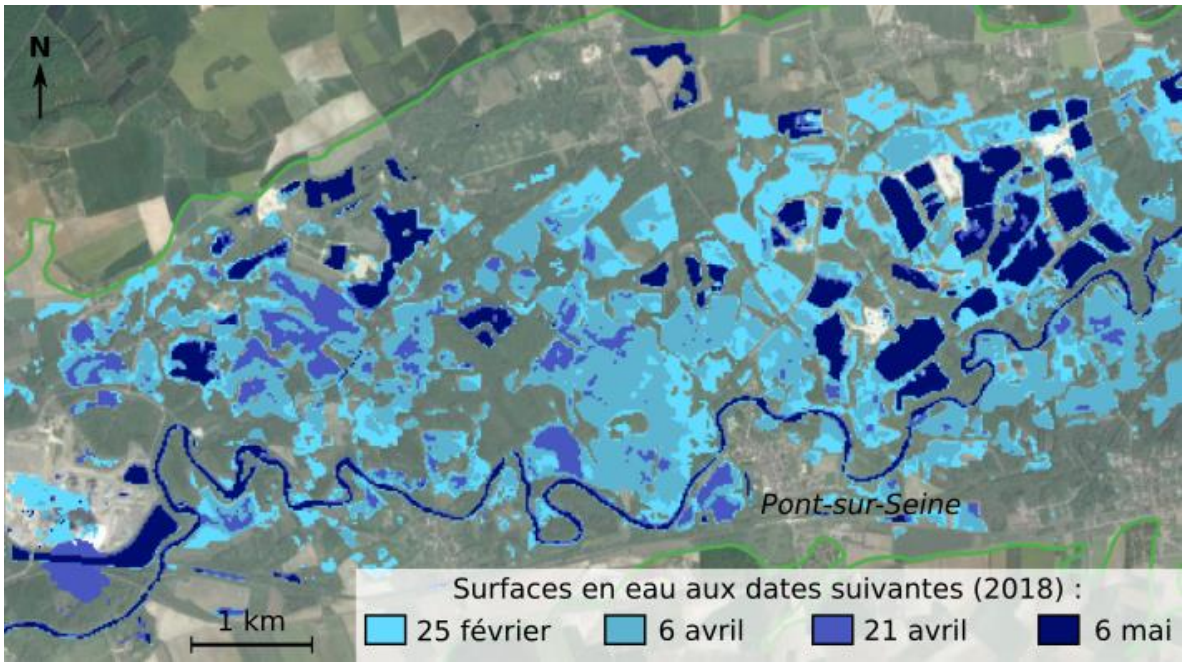

Figure 6. Rythme de la décrue sur le secteur de Pont-sur-Seine. Les surfaces en eau sont le résultat des extractions effectuées sur les images Sentinel-2 de la crue de 2018.

6. Discussion

6.1. Intérêt de la méthode

Au travers de ce travail, nous avons évalué l'apport de la télédétection optique pour le suivi des crues de 2016 et 2018 sur la zone de la Bassée. Suivre les inondations par télédétection n'est certes pas novateur, mais ces travaux constituent une des premières fois que la méthode a été appliquée sur la zone de la Bassée dans son entièreté. Comme indiqué plus haut, il s'avère que la télédétection optique n'est pas l'outil approprié pour la crue de 2016 du fait de la persistance de la couverture nuageuse sur la zone durant toute la période. Par contre, la crue de 2018 a pu être suivie à plusieurs dates et notamment pendant le pic de crue et la décrue sur plus de 90 % de la zone.

Un point méthodologique a été posé au préalable concernant la disponibilité spatio-temporelle des données. D'un point de vue spatial, une seule tuile Landsat, à savoir la 198 – 026 permet d'embrasser toute la

zone à une date donnée. Les images Sentinel-2 ne recouvrent jamais toute la Bassée à une même date, mais la tuile 31UEP permet tout de même une couverture à 91 %. D'un point de vue temporel, même si en théorie les images Landsat sont disponibles tous les 16 jours et les Sentinel-2 tous les 5 jours, la couverture nuageuse est un obstacle très important. Même pour l'épisode de 2018, où nous sommes satisfaits des résultats, seules trois dates pendant la crue sont exploitables sur toute la zone.

Ce travail a également été l'occasion de quantifier les incertitudes de la méthode vis-à-vis de l'extraction des surfaces en eau sur cette zone caractérisée par de nombreux plans d'eau de dimensions modestes. Deux niveaux d'incertitude ont été évalués. Le premier concerne l'incertitude entre les résultats utilisant les données Landsat et les données Sentinel-2. La différence en fonction de ces deux données d'entrée s'avère être acceptable puisqu'elle est de 6 % en période de basses eaux et de 11 % en hautes eaux. Nous avons mis en évidence qu'une large part de cette différence peut s'expliquer par les légères différences dans la forme des surfaces en eau repérées par Sentinel-2 comparées à celles repérées par Landsat 8.

Le second niveau d'incertitude est celui existant entre la superficie en eau selon la BD TOPAGE et la superficie en eau en période moyenne telle qu'extraite sur les données de télédétection. Cette différence est élevée aussi bien pour Landsat que pour Sentinel-2. Elle s'avère même être plus élevée pour Sentinel-2 que pour Landsat, malgré la meilleure résolution spatiale du premier.

Lors de la crue de 2018, il est intéressant de voir qu'elle n'a frappé que la moitié amont de la Bassée. Au moment du pic en février, les surfaces en eau ont atteint près de 50 km², soit près de 29 km² d'inondation. La décrue fut plus ou moins progressive selon les secteurs et les surfaces inondées s'établissaient à 11 km² le 6 avril et plus qu'à 2 km² le 21 avril. Le 6 mai, l'épisode était terminé. Dans certains secteurs, comme celui de Pont-sur-Seine, les surfaces inondées sont restées importantes de février à avril avant de baisser rapidement dans les trois dernières semaines du mois. Spatialement, ce sont surtout des zones agricoles comme les terres arables ou les prairies qui ont été submergées. Étonnamment, les forêts apparaissent épargnées par la crue. D'une manière générale, le fait frappant est la forme de l'inondation, qui se fait par mitage. Il n'y a pas une grande zone de débordement autour de la Seine, mais de nombreuses taches d'inondation. Certaines semblent clairement liées à un débordement du fleuve ou des gravières, mais d'autres sont totalement déconnectées des surfaces en eau pérennes. Cela peut traduire soit une inondation par remontée de nappes, soit une inondation par submersion pluviale. Il n'est pas possible de trancher entre ces deux aspects après cette étude.

6.2. Limites

Les limites de la méthode présentée dans ce travail sont de plusieurs natures. Premièrement, la couverture nuageuse est bien sûr l'obstacle principal, même insurmontable dans le cas de la crue de 2016. La présence de nuages nous empêche en effet de suivre le rythme de la montée de crue et de la décrue, alors que l'analyse de ces rythmes dans le temps et l'espace est cruciale dans une logique de prévention du risque. L'autre limite est la difficulté à réellement observer ce qu'il se passe sous le couvert forestier. Dans notre analyse, les forêts semblent totalement épargnées et les surfaces inondées contournent les espaces boisés. Or, nous ne pouvons pas assurer que cela soit conforme à la réalité, et s'il s'avère que les espaces boisés sont en réalité submergés, les impacts sur le milieu peuvent être importants. La quantification des espaces inondés serait également totalement différente si les forêts s'avèrent touchées par les crues. Seule une prospective de terrain à un moment d'inondation permettrait de vérifier.

Concernant la limite des nuages, elle pourrait désormais être en partie surmontée grâce à la mise sur orbite de Landsat 9 en septembre 2021. Dorénavant, Landsat 8 et 9 volent de façon à capturer toute portion de territoire tous les 8 jours. Cette fréquence, ajoutée à la revisite tous les 5 jours de la constellation Sentinel-2 multiplie grandement les prises de vue. Dans ce sens, un nouveau produit de type constellation virtuelle, fusionnant automatiquement les images Landsat et Sentinel-2, est en train d'être mis au point. Ce produit a pour nom *Harmonized Landsat Sentinel* (HLS) et les images issues des premiers tests sont librement disponibles. Quelques études ont déjà exploré leur apport avec succès pour le suivi des inondations (Tulbure et al., 2022).

Toutefois, afin de s'affranchir totalement des nuages, il est nécessaire de procéder à l'analyse des crues de la zone par la télédétection radar (Bioresita et al., 2018 ; Twele et al., 2016). La mission Sentinel-1 serait alors d'un intérêt manifeste. L'utilisation de ces données permettrait un suivi tous les 10 jours de la zone en ignorant la couverture nuageuse. En revanche, l'interprétation de ces données est plus délicate que dans le cas des données de télédétection optique. Une exploration détaillée sera une prochaine étape.

6.3. Résultats fortuits

Tout à fait en marge de cette étude, un résultat fortuit est apparu lors de l'analyse des images Sentinel-2 prises au moment du pic de crue de février 2018. En effet, sur le secteur immédiatement au nord de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine, il est intéressant d'étudier de près la forme de certaines zones inondées (Fig. 7).

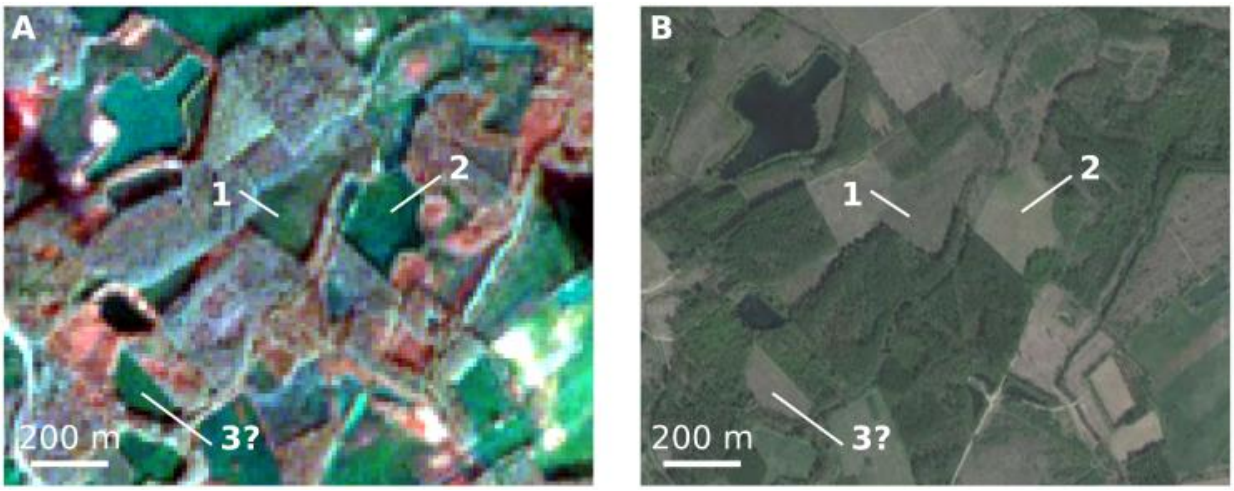

Figure 7. Composition colorée fausses couleurs infrarouge Sentinel-2 au pic de crue en février 2018 (A) et même territoire en vue aérienne (B). Les formes d'inondation 1, 2 et peut-être 3 rappellent des étangs historiques.

Sur la figure précédente (Fig. 7), les zones inondées 1 et 2 reprennent à peu près certainement l'emplacement d'anciens étangs comblés depuis longtemps. La forme en triangle fermé par un côté rectiligne est en effet caractéristique des étangs construits le long des cours d'eau au Moyen-Âge jusqu'au début du XIX^{ème} siècle (Passy, 2012). Ce genre d'étangs se retrouve ainsi par milliers sur la carte de Cassini de la fin du XVIII^{ème} siècle (Passy et al., 2012). Il ne serait pas étonnant que ces zones soient facilement inondables et aient été inondées lors de la crue de 2018. D'un point de vue archéologique et historique, il pourrait être intéressant d'aller prospecter à ces endroits précis (Eschbach & Lestel, 2018). En effet, les étangs étaient beaucoup utilisés pour la pisciculture, et il est possible que des ossements de poissons anciens s'y trouvent encore. Ces derniers, s'ils existent, nous renseigneraient par exemple sur les espèces présentes dans le secteur dans le passé. Ces étangs se devinent dans le parcellaire actuel, mais sans la détection sur l'image Sentinel-2, il aurait été très difficile de les remarquer.

Conclusion

Cette étude a montré que l'utilisation des images de télédétection optique Landsat et Sentinel-2 peut être utile au suivi des épisodes de crue. Cependant, toutes les crues ne sont pas analysables via cet outil du fait de la couverture nuageuse qui est par définition importante au moment des crues. Une part de chance (ou de malchance) non négligeable est à prendre en compte. Néanmoins, les fréquences de revisite élevées en combinant ces deux capteurs nous permettent, lorsque la chance nous sourit, de quantifier le pic de crue et de cartographier l'étendue maximale des inondations sur toute la zone. Il est également possible de suivre la décrue et de mettre en évidence les zones qui s'assèchent plus ou moins vite. Néanmoins, dans une optique opérationnelle et de caractérisation des risques naturels, cette méthode n'est pas suffisante sur cette zone. L'utilisation des images radar serait sans doute plus efficace malgré la difficulté d'analyse de ce type d'images.

Bibliographie

Bioresita, F., Puissant, A., Stumpf, A., & Malet, J.-P. (2018). A Method for Automatic and Rapid Mapping of Water Surfaces from Sentinel-1 Imagery. *Remote Sensing*, *10*(2), 217. https://doi.org/10.3390/rs10020217

Cordeiro, M. C. R., Martinez, J.-M., & Peña-Luque, S. (2021). Automatic water detection from multidimensional hierarchical clustering for Sentinel-2 images and a comparison with Level 2A processors. *Remote Sensing of Environment*, *253*, 112209. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112209

Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, *8*(4), Art. 4. https://doi.org/10.3390/rs8040354

Eschbach, D., & Lestel, L. (2018). *Dynamique hydro-morphologique historique de la Seine dans le secteur de la Bassée aval*. 19.

Flipo, N., Mouchel, J.-M., & Fisson, C. (2018). *La qualité de l'eau suite à la crue de juin 2016 dans le bassin de la Seine, Fascicule #17* (p. 72). PIREN-Seine. https://www.piren-seine.fr/sites/default/files/piren_documents/fascicules/fascicule_qualite_crue_piren_seine.pdf

Guillon, S., Eschbach, D., Groleau, A., Baratelli, F., Parlanti, E., Sourzac, M., Garnier, J., Mercier, B., Nespoulet, R., & Lestel, L. (2021). *Fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières de la Bassée*. 20.

Jost, A., Wang, S., Labarthe, B., & Flipo, N. (2017). *Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée*. 14.

Labarthe, B., Flipo, N., Abasq, L., Deleplancque, B., Jost, A., & Mouhri, A. (2013). *Première caractérisation hydrodynamique des échanges dans la plaine alluviale de la Bassée.* 40.

Passy, P. (2012). *Passé, présent et devenir de la cascade de nutriments dans les bassins de la Seine, de la Somme et de l'Escaut* [Université Pierre et Marie Curie]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00789546

Passy, P., Garnier, J., Billen, G., Fesneau, C., & Tournebize, J. (2012). Restoration of ponds in rural landscapes : Modelling the effect on nitrate contamination of surface water (the Seine River Basin,

France). *Science of The Total Environment*, *430*, 280-290. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.035

Tulbure, M. G., Broich, M., Perin, V., Gaines, M., Ju, J., Stehman, S. V., Pavelsky, T., Masek, J. G., Yin, S., Mai, J., & Betbeder-Matibet, L. (2022). Can we detect more ephemeral floods with higher density harmonized Landsat Sentinel 2 data compared to Landsat 8 alone? *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *185*, 232-246. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.01.021

Twele, A., Cao, W., Plank, S., & Martinis, S. (2016). Sentinel-1-based flood mapping : A fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing*, *37*(13), 2990-3004. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304

Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Xiao, T., Yang, Z., Zhao, G., Zou, Z., & Qin, Y. (2017). Open Surface Water Mapping Algorithms : A Comparison of Water-Related Spectral Indices and Sensors. *Water*, *9*(4), Art. 4. https://doi.org/10.3390/w9040256