



UNIVERSITÉ DE NANTES

**Plantes invasives et télédétection par
démélangeage spectral : Cartographie des jussies
(*Ludwigia peploides* et *Ludwigia grandiflora*) sur
le bassin versant de la Loire à l'aide d'images
Sentinel-2 et de drone multispectral.**

Master 2 : cartographie et gestion de l'environnement

Tom Lorée

Tuteurs de stage : Hervé Nicolas, Jacques Haury

Référent universitaire : Véronique Carrère

Remerciement :

Je remercie Hervé Nicolas et Jacques Haury pour leurs encadrements et confiances.

L'équipe Jussie pour les bons moments passés sur le terrain.

Toute l'équipe de PSN pour sa convivialité et ses conseils.

Table des matières

Introduction :	1
Etat de l'art :	1
1. Matériel et méthode :	2
1.1 Jussie :	2
1.2 Sites :	3
1.3 Les données utilisées :	6
1.3.1 Campagne de terrain :	7
1.3.1.1 Prélèvement de spectres.....	7
1.3.1.2 Campagne drone :	7
1.3.2 Sentinel-2 :	7
1.3.3 Données IGN :	7
1.4 Préparation des données pour le démixage spectral.....	8
1.5 Traitements utilisés :	8
1.5.1 Démixage spectral.....	8
1.5.2 L'arbre de décision (Breiman et al., 1984) :	9
1.5.3 Random Forest (Breiman, 2001) :	9
1.6 Traitement des données Sentinel-2 :	10
1.6.1 Par site :	10
1.6.2 Large échelle, autour de la Loire :	11
1.7 Traitements des données drone :	11
1.7.1 Prétraitements des données drone.....	11
1.7.2 Classification des images drone :	13
1.8 Validation du démixage issu de Sentinel-2 par drone :	13
1.9 Application à large échelle :	14
1.9.1 Atlas.....	14
1.9.2 Validation terrain :	16
2. Résultats	17
2.1 Spectres obtenus :	17
2.1.1 Spectres ASD terrain :	17
2.1.2 Spectres issus de Sentinel-2 :	20
2.2 Résultats des démixages spectrales et classifications :	25
2.3 Résultats drone :	27
2.3.1 Validation des corrections radiométriques :	27
2.3.2 Cartes des classifications drone :	28

2.4 Comparaison entre les résultats drone et les démélangeages issus de Sentinel-2	34
.....	35
2.5 Validation terrain de l’atlas	38
3. Discussion :	40
3.1 Choix des spectres pour le démélangeage :	40
3.2 Variations spatiales et temporelles de l’abondance de jussie issue du démélangeage :	40
3.3 Avantage du multi temporel :	41
3.4 Classification de la jussie issue de l’image drone	43
3.5 Comparaison drone et Sentinel-2 :	43
3.6 Validation à grande échelle	45
3.7 Gestion	45
Conclusion	46
Annexes :	48
ATLAS des principales zones de jussies en Loire Atlantique :	51

Liste des figures :

Figure 1 : Jussie terrestre sous forme rampante. Dans la photo de droite, la jussie est indiquée par une flèche.....	2
Figure 2 : Jussie terrestre sous forme buissonnante. Dans la photo de droite, la forme buissonnante est indiquée par une flèche.....	3
Figure 3 : Sites étudiés, 1 Brière, 2 Grand-Lieu, 3 Goulaine.....	4
Figure 4 : Photo prise en Brière (Saint Joachim), prairie au premier plan, jussie au second plan en vert clair.	4
Figure 5 : A : Marais de Brière, la jussie ressort en vert clair au sud. B : Grand-Lieu, la jussie apparaît en vert clair. C : Marais de Goulaine. Les zones étudiées sont entourées en rouge. Les flèches bleues indiquent l'emplacement de zones fortement colonisées par la jussie.....	5
Figure 6 : Zone de prospection de la jussie pour le programme FEDER dans le cadre de ce rapport. ...	6
Figure 7 : Formule du démixage spectral (SNAP, ESA 2019).....	8
Figure 8 : Traitements effectués à partir des images Sentinel-2	10
Figure 9 : Résumé des démixages appliqués aux sites de Grand-Lieu et de Goulaine	11
Figure 10 : Traitements des images drone	12
Figure 11 : Comparaison de l'abondance de jussie issue de Sentinel-2 et du drone.....	14
Figure 12 : Traitements réalisés pour la prospection de la jussie à large échelle.....	15
Figure 13 : Sites ayant servi à la validation terrain	16
Figure 14 Spectres ASD terrain de Grand-Lieu (A) et de Goulaine (B), début juillet 2018)	17
Figure 15 : Spectres ASD terrain en réflectance de jussies et de graminées de zone inondable, campagne 2019.	18
Figure 16 : Spectres ASD terrain en réflectance de jussies et de potentiels faux positifs, campagne 2019.....	19
Figure 17 : Spectre ASD terrain de jussie Grandiflora et Peplodes, campagne 2019.....	19
Figure 18 : Impact des fleurs de jussie sur le spectre.....	20
Figure 19 : Spectres issus de Sentinel-2 (méthode SMACC, le 15/07/18).....	21
Figure 20 : Spectres de jussie et de faux positifs de Grand-Lieu le 15/07/18.....	21
Figure 21 : Variation du spectre de la jussie le 15/07/18 selon différents sites géographiques.	22
Figure 22 : Spectres utilisés pour le démixage spectral, issus du marais de Brière.....	23
Figure 23 : Spectres de jussie et d'autres végétaux de zones inondables le 18/11/2018	23
Figure 24 : Comparaison du spectre de la jussie aquatique à celui de la terrestre 22/08/2018, Apigné	24
Figure 25 : Comparaison entre des démixages de Grand-Lieu (spectres issus de Brière en A et B, spectres ASD terrains en C) à différentes dates et une classification par Random Forest (D)	25
Figure 26 : Comparaison entre des démixages de Goulaine (spectres issus de Brière) à différentes dates	25
Figure 27 : Comparaison entre des démixages de Brière (spectres issus de Brière) à différentes dates	26
Figure 28 : Comparaison des réflectances issues du drone à celle des mesures ASD terrain, en rouge la première bissectrice	27
Figure 29: Classification par Random Forest de l'image drone de Grand-Lieu à basse résolution.....	28
Figure 30 : Classification par Random Forest de l'image drone de Grand-Lieu à haute résolution	29
Figure 31 : Classification par Random Forest de l'image drone de Goulaine à basse résolution	31
Figure 32 : Classification par Random Forest de l'image drone de Goulaine à haute résolution.....	32
Figure 33 : Comparaison de la classification issue du drone (à gauche) au démixage à partir des spectres issus de Brière (à droite), Grand-Lieu en haut, Goulaine en bas.	34

Figure 34: Comparaison entre l'abondance issue de Sentinel-2 (16/07/18) et du drone pour le site de Grand-Lieu, selon différentes résolutions de l'image drone et stade morphologique de la jussie. En rouge la première bissectrice. Spectres utilisés pour le démélangeage : issus de Brière.....	35
Figure 35 : Comparaison entre l'abondance issue de Sentinel-2 (01/07/18) et du drone pour le site de Goulaine, selon différentes résolutions de l'image drone et stade morphologique de la jussie. En rouge la première bissectrice. Spectres utilisés pour le démélangeage : issus de l'ASD terrain 2018.	36
Figure 36 : Comparaison entre l'abondance issue de Sentinel-2 (01/07/18) et du drone pour le site de Goulaine, selon différentes résolutions de l'image drone et stade morphologique de la jussie. En rouge la première bissectrice. Spectres utilisés pour le démélangeage : issus de Brière.....	37
Figure 37 : Arbre de décision ayant servi à produire le masque issu de la bande 2 de Sentinel-2 (réflectance*1000)	38
Figure 38 : Variation de l'abondance de la jussie dans un marais entre deux dates	40
Figure 39: Processus de traitement pour avoir l'étendue maximale de la jussie pour une année.....	42
Figure 40 : Comparaison de l'abondance issue de Sentinel-2 et du drone à Goulaine (01/07/18) d'une zone composée strictement de fleur.	44

Tableau 1: Récapitulatif des données utilisées dans le rapport.....	6
Tableau 2 : Caractéristique de l'ASD	7
Tableau 3: Classes utilisées pour le Random Forest à Grand-Lieu et en Goulaine	13
Tableau 4 : Matrice de confusion des classifications de l'image drone de Grand-Lieu	30
Tableau 5 : Matrice de confusion des classifications de l'image drone de Goulaine.....	33
Tableau 6 : sites visités et présence-absence de jussie.....	39

Liste des annexes :

Annexe 1 : Scripts réalisés dans le cadre de ce rapport.....	48
Annexe 2 : Liste des spectres prélevés pendant la campagne terrain 2019.	48
Annexe 3 : Zone survolée par le drone équipé du capteur AIRPHEN. A gauche le marais de Goulaine, à droite les prairies inondables de Saint Lumine de Coutais.	49
Annexe 4 : Résolution spectrale de la caméra AIRPHEN.....	49
Annexe 5 : Résolution spectrale du capteur embarqué dans les satellites Sentinel-2	49
Annexe 6 : Liste des images Sentinel-2 téléchargées.....	50
Annexe 7 : Groupe de culture présent dans le RPG.....	50

Glossaire :

BR : Basse Résolution
 BV : Bassin Versant
 FEDER : Fonds Européen de Développement Régional
 FLSU : Fully Constrained LSU
 HR : Haute Résolution
 LSU : Linear Spectral Unmixing (démélangeage spectral)
 PIR : Proche infrarouge
 RPG : Registre Parcellaire Agricole

Introduction :

Les espèces exotiques envahissantes sont des organismes introduits dans un milieu de façon volontaire ou fortuite qui vont porter préjudice à l'environnement. Elles font l'objet d'un règlement européen depuis 2014 car elles « constituent l'une des principales menaces qui pèsent sur la biodiversité et les services écosystémiques associés » (RÈGLEMENT (UE) No 1143/2014). A l'échelle mondiale selon le rapport de la plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES, 2019) les espèces exotiques envahissantes sont l'un des cinq facteurs directs de changements des milieux, en entrant en concurrence directe avec les espèces autochtones.

Les jussies, originaires d'Amérique du Sud, sont des espèces exotiques envahissantes qui font l'objet d'un règlement européen en raison de la perte de biodiversité qu'elles entraînent, après avoir été réglementées en France dès mai 2007. Plus localement les jussies sont des espèces envahissantes qui figurent comme les plus problématiques en Pays de la Loire et sur le bassin Loire-Bretagne (Haury et al., 2015). L'appellation jussie regroupe deux espèces : *Ludwigia peploides* (Jussie rampante) et *Ludwigia grandiflora* (Grande Jussie). Ces plantes sont de la famille des Onagracées. Elles ont été introduites en France, dans un but ornemental (durant tout l'été elles vont produire de très nombreuses fleurs jaunes), au début du dix-neuvième siècle. Originellement ce sont des plantes aquatiques à amphibies, mais des observations de terrain ont montré deux formes distinctes : une aquatique et une terrestre (Haury and Damien, 2014). La terrestre va se développer dans des zones inondables au printemps à partir du moment où l'eau se retire (si les conditions climatiques le permettent). Cette forme va envahir des prairies inondables et en plus de provoquer une perte de biodiversité, elle va poser de nombreux problèmes aux gestionnaires et agriculteurs. En effet en recouvrant une prairie la jussie va diminuer la surface (et valeur) fourragère mais également provoquer une diminution des primes de la Politique Agricole Communes (PAC) et des Mesures Agro-Environnementales (MAEC). L'étude de cette forme de jussie s'est donc vu doter d'un programme du Fonds Européen de Développement Régional (FEDER), pour permettre d'étudier la jussie terrestre dans le bassin versant de la Loire, notamment en prairies inondables. L'une des actions du programme FEDER est de cartographier la distribution de la jussie, par l'intermédiaire de travaux déjà existants, d'enquêtes de terrain et par la télédétection. Ce rapport va se concentrer sur la partie télédétection avec deux objectifs : la prospection de nouveaux sites envahis aux abords de la Loire et le suivi des sites connus. La télédétection est dans ce cas un allié de choix car elle permet de cartographier des zones difficiles d'accès et à grande échelle.

Etat de l'art :

En télédétection, il est possible d'identifier des plantes par des informations spectrales au niveau du pixel telles que : des pigments spécifiques, la couleur des fleurs ou des feuilles, des différences de stades phénologiques avec d'autres espèces, notamment des espèces natives, des séries temporelles. Si la plante est plus grosse que les pixels du capteur ou si l'invasion se fait sur un grand espace il est possible de se baser sur la forme des colonies et d'utiliser des méthodes orientées objet (Bradley, 2014).

Dans la première partie de ce rapport, des images Sentinel-2 seront utilisées avec une résolution de 10 à 20m. Pour ce faire, l'analyse orientée objet n'est pas pertinente car elle ne détecterait que les gros herbiers de jussie avec des surfaces supérieures à plusieurs pixels de Sentinel-2. Des méthodes basées sur l'information du pixel seront utilisées pour détecter la jussie. Dans des études précédentes des méthodes de classification binaire (présence-absence) ont été utilisées pour cartographier la jussie. A partir d'image SPOT à l'échelle d'un petit marais de moins de 100ha la jussie a été classée par maximum de vraisemblance (Sourisseau, 2008). Une autre méthode a été développée par la suite à plus large échelle sur le bassin versant de la Vilaine. Toujours à partir d'image SPOT dans un premier temps la végétation est détectée sur des cours d'eau ou des étangs puis des classifications par spectral angle mapper avec différents angles ont été faites pour créer des seuils d'alerte (Athané, 2012). Dans ce rapport les méthodes de classification binaire ne seront pas

les seules utilisées. En effet le programme FEDER cherche à cartographier la distribution de la jussie dans des prairies inondables, une méthode binaire ne permettrait de mettre en valeur que des pixels totalement ou très fortement envahis. Il est possible de créer des classes intermédiaires pour les zones en mélange, mais cela nécessite de nombreuses données de terrain normalisées pour chaque pourcentage de mélange choisi ainsi que pour la variation des espèces végétales composant le mélange. Un autre aspect à prendre à compte avec ce genre de méthode, par exemple pour Random Forest, est la sensibilité du jeu de données utilisées pour créer le modèle (Belgiu and Drăguț, 2016). L'objectif ici est une cartographie à très large échelle, mais créer un jeu de données qui soit représentatif, en quantité et qualité, du bassin versant de la Loire par photo-interprétation est très difficile.

Dans un objectif de prospection, pour pallier ce manque de données, il va être question dans ce rapport d'étudier la méthode du démélangeage spectral, se basant sur des spectres, afin d'obtenir de l'information à l'intérieur du pixel (sub-pixel) et ainsi réussir à classer des mélanges de jussie et de prairie. Cette méthode a déjà été utilisée dans le domaine de l'environnement (Quintano et al., 2012) et plus particulièrement pour la cartographie d'espèces envahissantes avec des données hyperspectrales (Somers et al., 2011).

Dans une seconde partie, des images produites par un capteur multispectral embarqué dans un drone ont été utilisées. Par la résolution de ces images (quelques centimètres) il est possible de produire des classifications fines de la jussie mélangée à d'autres plantes, par l'intermédiaire en plus des informations spectrales contenues dans l'image de sa texture (Kattenborn et al., 2019; Szantoi et al., 2013).

Les classifications produites ont été finalement comparées entre elles et avec des vérités terrains.

1. Matériel et méthode :

Les logiciels qui ont été utilisés dans le cadre de ce rapport sont : Qgis, ENVI, SNAP, Agisoft photostan, R studio et Spyder (Python). La liste des scripts réalisés est en annexe (Annexe 1).

1.1 Jussie :



Figure 1 : Jussie terrestre sous forme rampante. Dans la photo de droite, la jussie est indiquée par une flèche.

La jussie terrestre va avoir au cours de son cycle de développement différentes formes. A partir de rhizomes ou d'anciennes tiges, au printemps, au début de son cycle végétatif quand l'eau va baisser, elle va adopter une forme prostrée, dite rampante (rase). Ses feuilles seront petites (1-2cm de long) et de forme spatulée (Figure 1).



Figure 2 : Jussie terrestre sous forme buissonnante. Dans la photo de droite, la forme buissonnante est indiquée par une flèche.

Au cours du printemps la jussie va commencer à se dresser et ses feuilles vont s'allonger. Si la jussie est bien implantée durant l'été elle va adopter un port buissonnant, ses feuilles vont mesurer une dizaine de centimètres et seront de forme lancéolée. De plus elle va se couvrir de fleurs (Figure 2). En parallèle de ce port buissonnant (dressé) au centre des herbiers, il est possible d'avoir un front de colonisation où la jussie va présenter des formes traçantes (rase).

Toutefois si les conditions du milieu sont stressantes (stress hydrique, pâturage) la morphologie de la jussie peut être différente de ce qui est décrit ici. Par exemple la jussie peut rester sous une forme prostrée en été, avec des tiges courtes et de petites feuilles rondes.

A l'automne la jussie va sécher, prendre une teinte brune orangée, puis elle sera recouverte d'eau en hiver (Dutartre et al., 2007; Haury and Barloy, 2017; Haury and Damien, 2014; Ruau, 2008).

1.2 Sites :

Afin d'établir des méthodes de détection de la jussie, deux sites disposant de cartographie de terrain de la jussie ont été étudiés : le parc naturel régional de Brière et une partie de la zone humide autour du lac de Grand-Lieu (Figure 3).

La Brière est un marais situé en Loire-Atlantique au nord de Saint-Nazaire. Les prairies inondables au sud du marais ont été étudiées dans les communes de Trignac et Saint-Joachim (Figure 4, Figure 5). Le lac de Grand-Lieu est situé en Loire-Atlantique au sud-ouest de Nantes. Les zones étudiées sont les prairies inondables situées au sud de celui-ci à Saint Lumine de Coutais (Figure 5).

Par ailleurs, le marais de Goulaine situé en Loire-Atlantique à l'est de Nantes ne dispose pas de cartographie de la jussie, mais a été également étudié (Figure 5).

Ces trois sites présentent des caractéristiques communes : les prairies de ces zones sont exondées une partie de l'année permettant ainsi à l'herbe de pousser, de faire pâturer des bêtes ou réaliser des fauches. Certaines de ces prairies sont totalement recouvertes par la jussie (Figure 4).

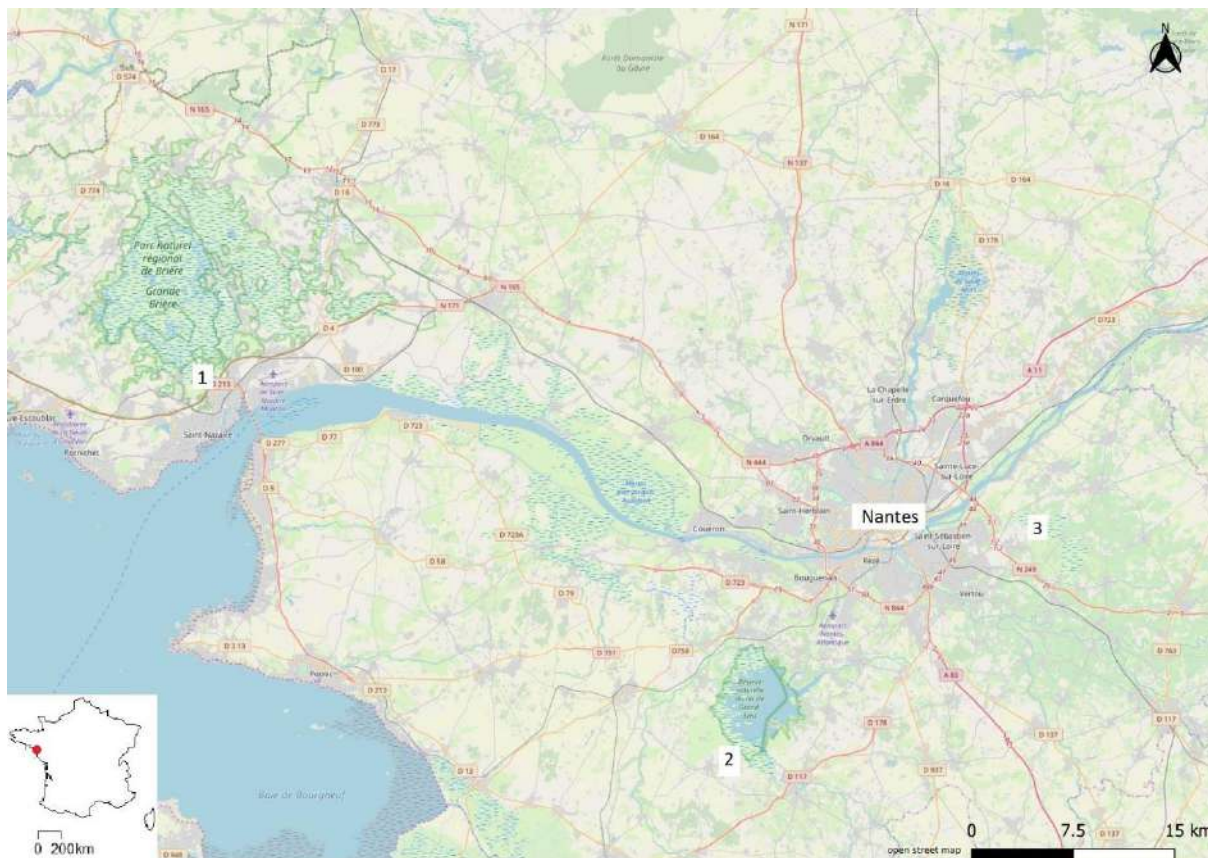


Figure 3 : Sites étudiés, 1 Brière, 2 Grand-Lieu, 3 Goulaine



Figure 4 : Photo prise en Brière (Saint Joachim), prairie au premier plan, jussie au second plan en vert clair.

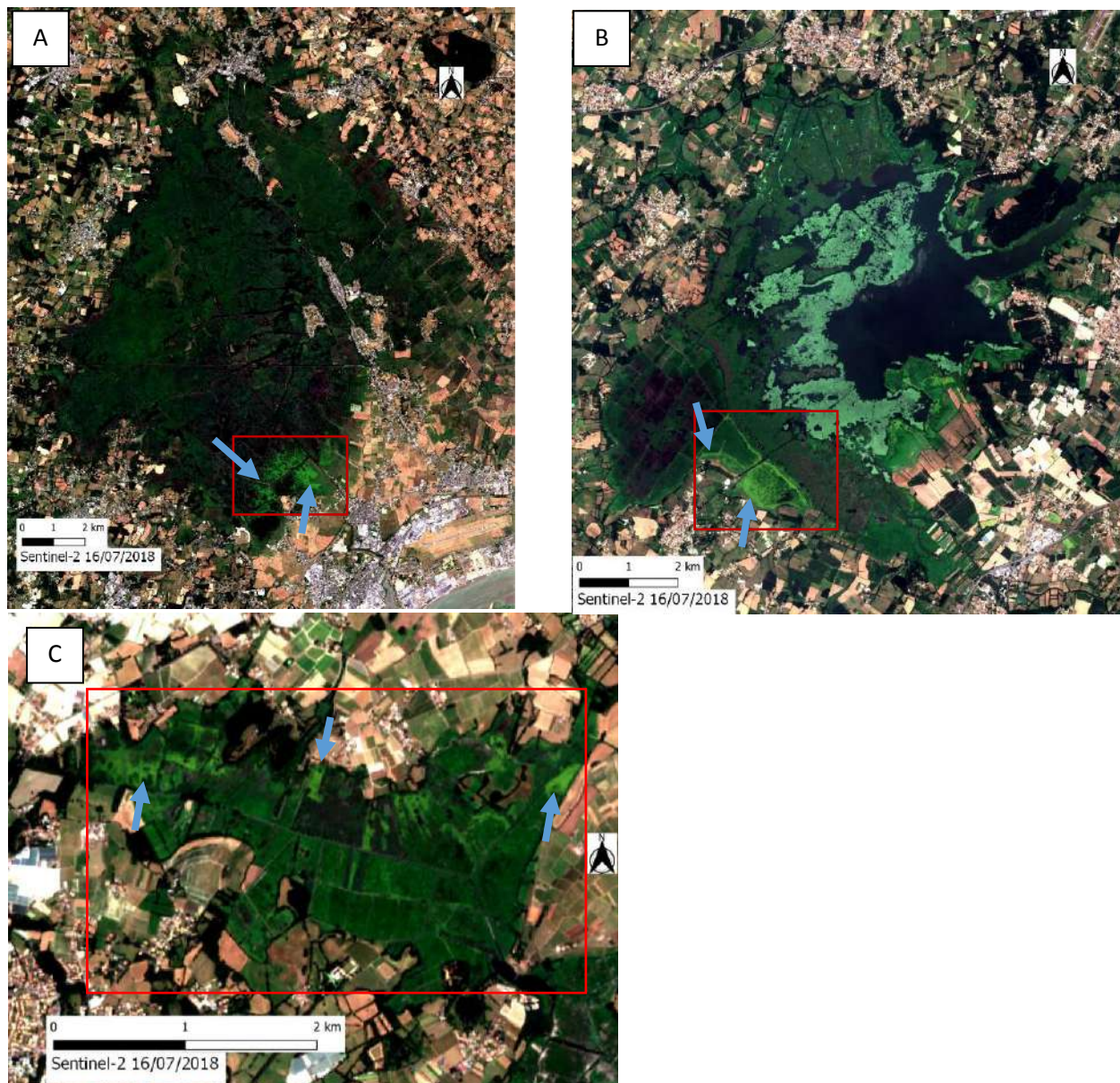


Figure 5 : A : Marais de Brière, la jussie ressort en vert clair au sud. B : Grand-Lieu, la jussie apparait en vert clair. C : Marais de Goulaine. Les zones étudiées sont entourées en rouge. Les flèches bleues indiquent l'emplacement de zones fortement colonisées par la jussie.

Les étangs d'Apigné sont des étangs au sud-est de Rennes qui possèdent des sites envahis par la jussie aquatique et la jussie terrestre. Cette zone n'est pas concernée par le programme FEDER mais au vu de sa proximité de Rennes, elle a servi de vérité terrain.

Une fois développée sur ces quatre sites, la méthode est appliquée le long de la Loire et ses affluents jusqu'à Clermont-Ferrand. Pour simplifier l'interprétation des résultats la zone cartographiée a été restreinte (Figure 6).

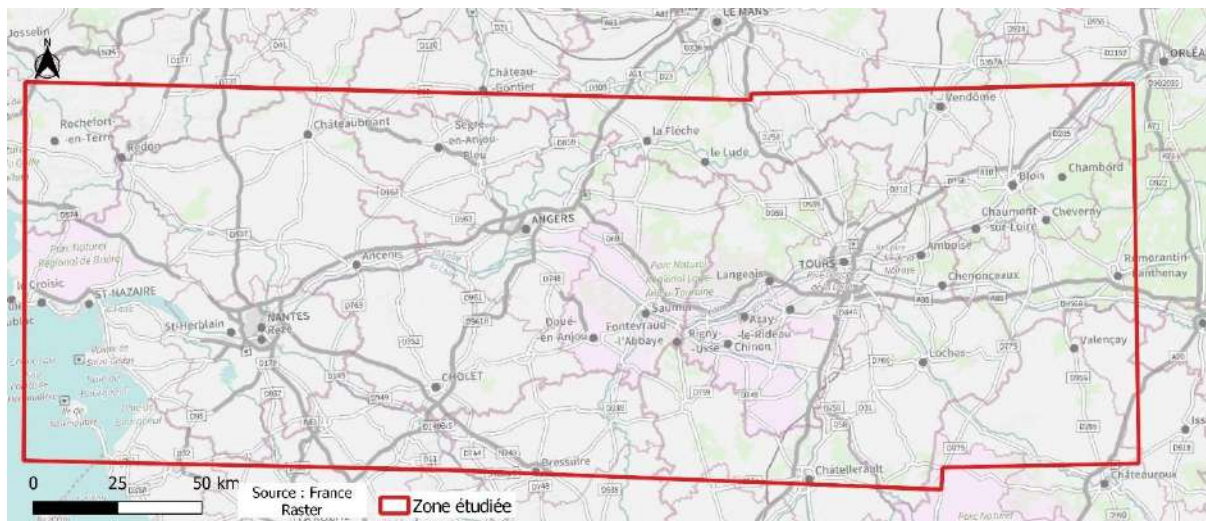


Figure 6 : Zone de prospection de la jussie pour le programme FEDER dans le cadre de ce rapport.

1.3 Les données utilisées :

Tableau 1: Récapitulatif des données utilisées dans le rapport

Type	Site	Année	Commentaire
Drone	Grand-Lieu	2018, (2016)	2018 : capteur Airphen, (2016 : couche vecteur fournie par le gestionnaire)
	Goulaine	2018	Capteur Airphen
ASD (spectromètre terrain)	Grand-Lieu	2018, 2019	Jussies (dressée en fleur, sans fleur et rase), herbe, jonc
	Goulaine	2018	Jussies (dressée en fleur et rase), mélange jussie herbe, roselière
	Brière	2019	Jussies + végétations humides (~100 spectres) Comparaison entre jussie fleurie et sans fleur (fleurs coupées)
	BV Loire	2019	Jussies + végétations humides (~100 spectres)
Sentinel-2	BV Loire	2016-18-19	Téléchargées automatiquement sur le site de Theia
IGN	BV Loire : BD Hydro, RPG, Scan 25		RPG 2017
Observations terrain	BV Loire (40 sites), Apigné	2019	Formation à grands hélophytes, prairie, étang, berge, bras mort, fossé

1.3.1 Campagne de terrain :

1.3.1.1 Prélèvement de spectres

Durant le début du mois de juillet 2018 des missions de terrain ont été menées sur les sites de Grand-Lieu et de Goulaine. Des spectres de jussie et de différentes végétations ont été acquis sur le terrain. Les spectres sont pris par un spectromètre de terrain ASD FieldSpec 3 (Tableau 2).

Tableau 2 : Caractéristique de l'ASD

	Résolution spectrale	Intervalle d'échantillonnage
350 nm – 1000 nm	3 nm	1,4 nm
1000 nm – 2500 nm	10 nm	2 nm

En juin et juillet 2019 de nouvelles missions de terrain sont réalisées pour acquérir de nouveaux spectres de jussie selon ses différents stades (rase, dressée et en fleur), de végétations mélangées avec de la jussie et de végétations pures en Brière, à Grand-Lieu, à Ancenis et Angers. La librairie spectrale produite comporte environs 200 spectres (Annexe 2). De plus afin de connaître l'influence des fleurs de jussie, des spectres sont pris sur un couvert de jussie fleurie et sur la même zone après avoir coupé les fleurs.

1.3.1.2 Campagne drone :

Une partie des sites à Grand-Lieu et à Goulaine ont été survolé par un drone équipé d'une caméra multispectrale AIRPHEN et d'un appareil photo Sony RX100 (Annexe 3). La caméra multispectrale AIRPHEN possède 6 bandes : Bleu, Vert 1, Vert 2, Rouge, Red edge et Proche infrarouge (Annexe 4). La taille des sites fait environ 6ha, cette taille est liée à l'autonomie du drone.

1.3.2 Sentinel-2 :

Les satellites Sentinel-2(A et B) font partie d'une constellation de satellites du programme Copernicus (données gratuites) de l'agence spatiale européenne utilisée pour le suivi de l'environnement. Ils sont équipés d'un capteur multispectral à 13 bandes dont 10 utilisables de 490 à 2190nm avec une résolution de 10m à 20m (Annexe 5). Ils prennent des clichés (290km*290km) d'une même zone tous les 5 jours avec un angle de prise de vue constant. Les images produites sont en luminance et nécessitent des corrections atmosphériques pour être en réflectance. Les images sont téléchargées en réflectance sur le site du pôle de données et de services surfaces continentales Theia ; ce téléchargement se fait automatiquement par un script python. Le script est prévu pour ne télécharger que les images avec une couverture nuageuse inférieure à 20% pour gagner en temps de téléchargement et d'analyse. Les images sont téléchargées tout au long de l'année pour suivre l'ensemble du cycle de végétation de la jussie, mais surtout l'été : période où il y a le moins de nuages et le plus de jussie (Annexe 6).

1.3.3 Données IGN :

Le thème Hydrographie de la BD TOPO de l'IGN est une base de données géographiques qui représente sous forme de vecteurs de précision métrique les cours d'eau, les surfaces d'eau, les réservoirs et les autres points d'eau.

Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est une base de données géographiques anonyme qui délimite les parcelles agricoles et leur culture principale. Le dernier RPG produit a été utilisé : année 2017 (Annexe 7).

1.4 Préparation des données pour le démelangeage spectral

Afin d'avoir des informations spectrales des végétations, trois approches sont abordées par la comparaison de données acquises au sol (spectre ASD), la photo-interprétation des images Sentinel-2 et une méthode non-supervisée. Ces trois approches sont interconnectées pour vérifier la cohérence des spectres acquis (Figure 8, partie 1 Grand-Lieu).

Dans un premier temps à Grand-Lieu par photo-interprétation et l'utilisation de cartographie existante, des zones à jussie ont été identifiées « grossièrement » dans les images Sentinel-2. Les spectres de jussie et de végétations avoisinantes sont prélevés à différents moments de l'année. Ensuite ces mêmes zones à jussie ont été découpées en sous parties afin d'extraire les spectres les plus purs des différentes surfaces par la méthode SMACC sous ENVI (méthode non supervisée). La méthode SMACC va chercher des pixels dans l'image qui seront les plus purs, pour former une librairie spectrale. Elle va dans un premier temps chercher le pixel le plus brillant de l'image. Ensuite le pixel le plus différent du plus brillant puis le pixel le plus différent des deux précédents et ainsi de suite. Le processus va s'arrêter quand un pixel trouvé a déjà été classé précédemment ou si un nombre limité de spectres a été défini. La méthode SMACC n'est pas limitée par le nombre de bandes de l'image (H. Gruninger et al., 2004).

Finalement les spectres obtenus ont été comparés entre eux (spectres issus des méthodes suivantes : ASD terrain, photo-interprétation, méthode SMACC). Préalablement les spectres issus de l'ASD sont rééchantillonnés pour les bandes spectrales de Sentinel-2. Ces spectres ont servi à faire une première classification de la zone de Grand-Lieu par démelangeage spectral et Spectral Angle Mapper, qui ont été confrontés à un questionnaire pour validation. La classification était globalement correcte, mais a montré des zones de faux positifs dont les spectres ont été utilisés pour les futures analyses, afin de différencier le spectre de la jussie de ceux des autres végétations.

En parallèle une fois les zones en jussie identifiées, des recherches de spectres ont été effectuées en été pour essayer de différencier la jussie aquatique de la terrestre, mais aussi à l'automne pour suivre le comportement spectral de la jussie.

1.5 Traitements utilisés :

1.5.1 Démélangeage spectral

Le démelangeage spectral linéaire (LSU Linear Spectral Unmixing) consiste à extraire d'un pixel (source) caractérisé par son spectre de réflectance, l'abondance de chacun des constituants de ce pixel (Quintano et al., 2012).

Chaque constituant (endmember) est également caractérisé par son spectre de réflectance ; un constituant étant un objet au sol représentatif du contenu de la scène à étudier. Ces objets peuvent être « purs » ou bien des mélanges caractéristiques.

$$R_k = \sum_i^n a_i \cdot E_{i,k} + \varepsilon_k \quad RMSE = \sqrt{\left(\sum_k^m \varepsilon_k^2 \right)^{-m}}$$

R_k	Reflectance of source at wavelength k
E_{ki}	Reflectance of endmember i at wavelength k
a_i	Abundance of endmember i
ε_k	Error at wavelength k
$RMSE$	Root mean square error of the ε_k
n	Number of endmembers
m	Number of wavelengths in the discrete spectrum

Figure 7 : Formule du démelangeage spectral (SNAP, ESA 2019)

La méthode de démixage est un ajustement linéaire de spectres de réflectance des objets (Figure 7). Le LSU permet de décomposer un spectre et d'obtenir une proportion (abondance) de différents spectres de référence qui composent le spectre étudié plus un résidu. La méthode sélectionne les abondances qui permettent d'avoir le résidu le plus faible toutes bandes confondues. Finalement, dans chaque pixel de l'images des proportions de spectres de référence sont calculées, qui permettent d'estimer le pourcentage de recouvrement de ces surfaces. Cette méthode a plusieurs prérequis : les spectres utilisés doivent être les plus purs possibles, le nombre maximum de spectres de référence doit être inférieur ou égal au nombre de bandes utilisées, toutes les surfaces de référence doivent être utilisées (pour diminuer les erreurs), les différentes surfaces étudiées sont une combinaison linéaire de spectres de référence (ne sont pas un mélange intime). La jussie ayant tendance à former des patchs de végétations denses, on peut supposer que le mélange n'est pas intime et donc que l'on peut utiliser la version linéaire du démixage spectral. Le seul frein à cette méthode est le nombre de bandes limité par le choix de Sentinel-2. Il existe différents algorithmes de LSU, ici seul le Fully Constrained LSU (FLSU ; SNAP, ESA 2019) sera utilisé car il permet d'obtenir une abondance comprise entre 0 et 1 et la somme de toutes les abondances pour un pixel est égale à 1. Il en résulte un pourcentage de jussie par pixel. Le démixage spectral a été réalisé avec SNAP et python.

1.5.2 L'arbre de décision (Breiman et al., 1984) :

Cette méthode de classification supervisée permet de produire des formules facilement interprétables et réutilisables. Elle crée un arbre en sous échantillonnant les échantillons à partir d'une racine par la création de nœuds de manière binaire afin que les individus d'une même classe soient les plus homogènes possible du point de vue de la variable d'intérêt (Cornillon et al., 2012). Les arbres de décision ont été réalisés avec R (package Rpart).

1.5.3 Random Forest (Breiman, 2001) :

C'est une méthode de classification supervisée basée sur les arbres de décision, elle est couramment utilisée en télédétection par ses performances et sa rapidité d'exécution (Belgiu and Drăguț, 2016). Un nombre défini, selon l'utilisateur, d'arbres de décision est créé par tirage aléatoire avec remise des échantillons. Le résultat de l'arbre est une moyenne des tirages réalisés sur l'ensemble des arbres produits. Cette classification a été réalisée avec SNAP.

1.6 Traitement des données Sentinel-2 :

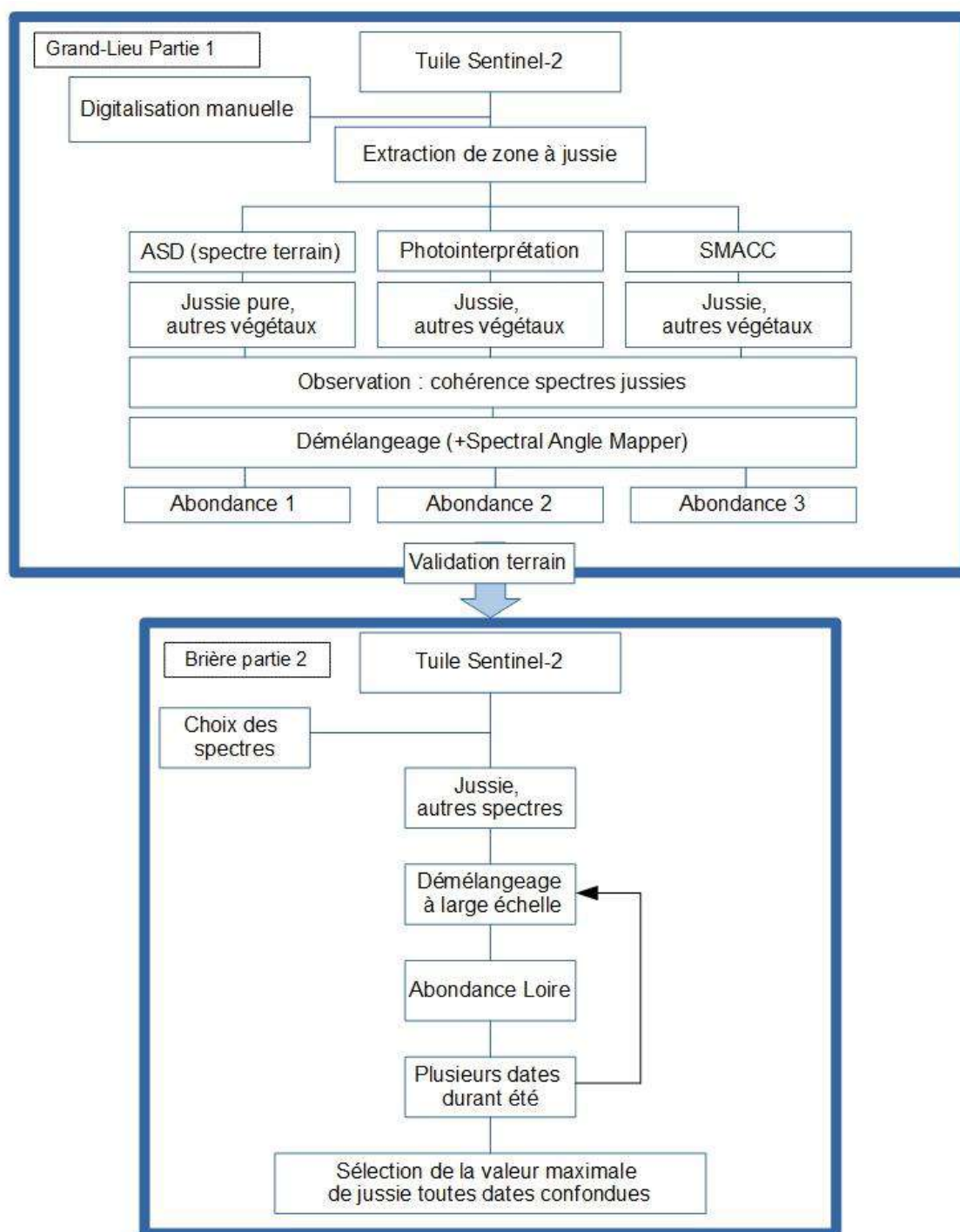


Figure 8 : Traitements effectués à partir des images Sentinel-2

1.6.1 Par site :

Afin de comparer les résultats entre Sentinel-2 et le drone, diverses FLSU ont été réalisées à Grand-Lieu avec quatre jeux de spectres différents (terrain, photo-interprété, SMACC et spectres issus de Brière) (Figure 8) à différentes dates en juillet 2018. La même chose est réalisée à Goulaine mais avec un jeu de spectres moins conséquent (spectres terrain et spectres issus de Brière). Seulement les meilleurs résultats sont présentés par la suite (Figure 9).

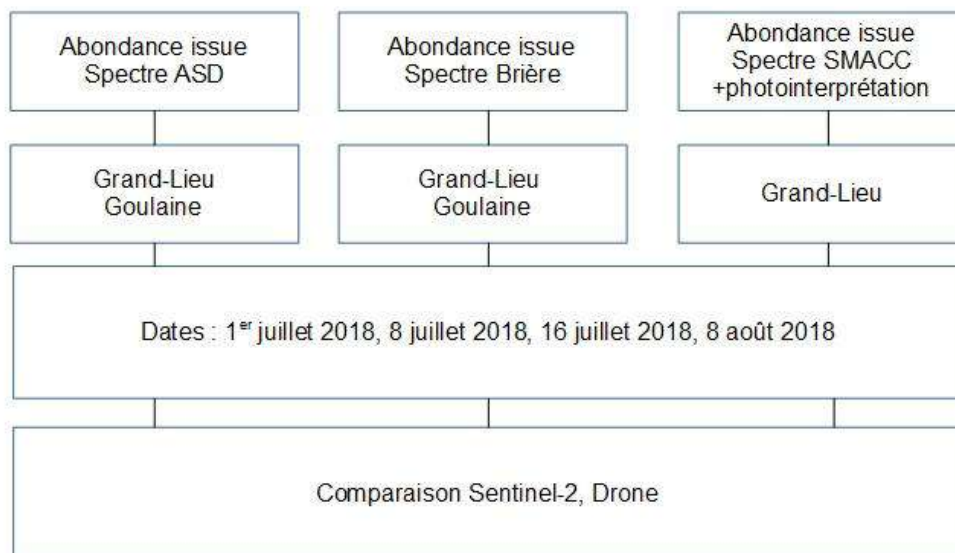


Figure 9 : Résumé des démélangeages appliqués aux sites de Grand-Lieu et de Goulaine

Des Classifications par Random Forest à Grand-Lieu ont été également produites pour savoir s’il est possible de cartographier la jussie dès le printemps.

1.6.2 Large échelle, autour de la Loire :

Les spectres, prélevés en Brière, obtenus suite aux conclusions du paragraphe 1.4 ont été utilisés pour le démélangeage à large échelle autour de la Loire. Deux dates ont été utilisées, une en juillet et une en août (la date diffère selon les sites à cause de l’ennuagement) pour produire une cartographie de la jussie durant l’été 2018.

1.7 Traitements des données drone :

1.7.1 Prétraitements des données drone

Le drone et la caméra AIRPHEN ont été détruits accidentellement à la fin de la campagne 2018, il n’a pas été possible de réitérer les prises d’images en 2019. De plus le capteur étant détruit il n’a pas été possible de procéder à des calibrations ultérieures.

Deux traitements ont été appliqués aux images produites par la caméra AIRPHEN avant les corrections géométrique et radiométrique (Figure 10) :

Pour la prise de vue la caméra AIRPHEN ne possède pas d’intervallomètre lié à la distance parcourue par le drone mais seulement un intervallo-mètre avec un temps fixe entre les photos. Ce petit détail technique entraîne un surplus de photos dans les virages (zone où le drone ralentit) ainsi qu’un très fort recouvrement des photos. Ce nombre très conséquent de photos va allonger les temps de calcul, c’est pourquoi il a été choisi de n’utiliser qu’une image sur deux pour passer de 8472 à 4236 images (toutes bandes comprises) pour le site de Grand-Lieu par exemple. Pour gagner du temps, cette sélection a été faite par un script python.

Les coordonnées GPS enregistrées par le capteur intégré à la caméra ont dû être supprimées. En effet les coordonnées enregistrées étaient fausses et bloquaient le processus de traitement. Le logiciel Exif Pilot a été utilisé pour supprimer de façon automatique les coordonnées GPS des Exifs (Exchangeable image file format) des milliers d’images issus du capteur.

Ensuite les images ont été traitées sous Agisoft Photoscan, pour ortho-rectifier et corriger les images afin de les avoir en réflectance. La correction radiométrique est réalisée grâce à une mire radiométrique, dont la réflectance est connue, prise en photo par la caméra. Sous Agisoft Photoscan

l'image contenant la mire est sélectionnée, la mire est identifiée manuellement et les valeurs en réflectance de la mire pour chaque bande sont ajoutées à Agisoft. Le logiciel va ensuite calculer la réflectance à partir des comptes numériques enregistrés par le capteur. Il va utiliser l'ouverture de l'objectif, le temps de prise de vue et la sensibilité du capteur. Finalement les images produites ont été géoréférencées sous Qgis. Pour chaque site deux images sont produites : une en basse résolution (BR) (6cm pour Goulaine et 7cm pour Grand-Lieu) et une en haute résolution (HR) (3cm pour le site de Goulaine et 4cm pour Grand-Lieu).

Les réflectances obtenues sont comparées aux mesures ASD obtenues sur le terrain à Grand-Lieu et Goulaine. Les spectres sur le terrain sont géoréférencés et ont été pris dans des zones homogènes d'environ 1m². Ces zones ont été digitalisées manuellement sous Qgis et les réflectances moyennes des différentes zones sont comparées aux spectres du terrain.

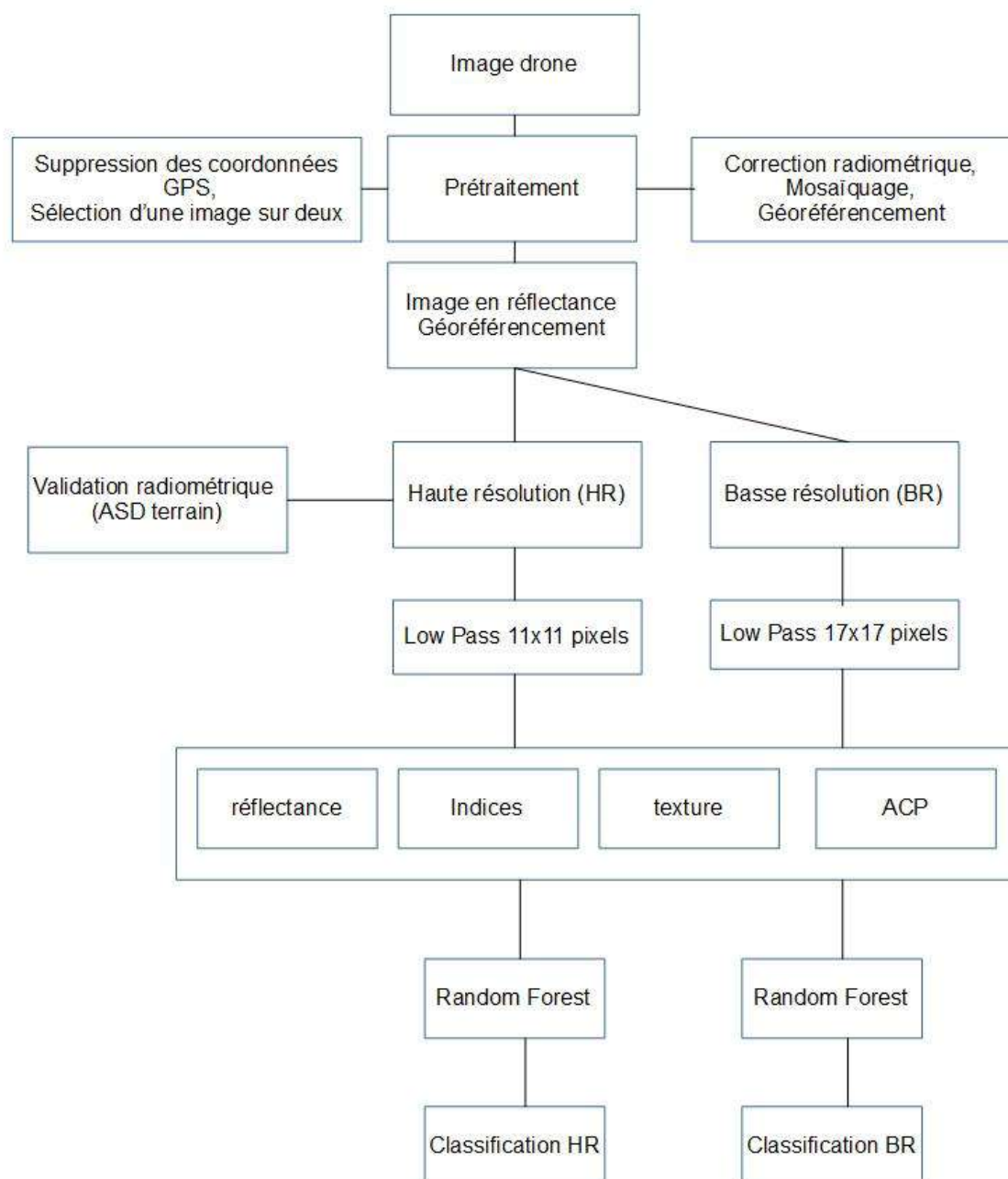


Figure 10 : Traitements des images drone

1.7.2 Classification des images drone :

Les images drone ont été classées par Random Forest, en utilisant 100 arbres (Figure 10). La même méthode est appliquée pour classer les images des deux sites mais pas avec les mêmes classes de jussie et de végétation à cause de la variabilité spatiale et temporelle des couverts de jussie (Tableau 3). Deux jeux de données sont produits : un d'entraînement pour créer le modèle et un de validation.

Tableau 3: Classes utilisées pour le Random Forest à Grand-Lieu et en Goulaine

Espèce végétale	Grand-Lieu	Goulaine
Jussie dressée en fleur	X	X
Jussie dressée	-	X
Jussie rase	X	X
Végétation humide	X	-
Herbe 1	X	X
Herbe 2	X	X
Sol	X	X
Eau	-	X

Préalablement avant de créer le modèle sous Random Forest, les données ont été prétraitées.

Tout d'abord, pour limiter les ombres liées aux couverts végétaux, un filtre passe-bas a été appliqué sur toutes les bandes (BR : 11*11 pixels et HR : 17*17 pixels) dans ENVI. Le filtre passe-bas diminue les hautes fréquences en ne laissant passer que les basses fréquences, il atténue donc les détails de l'image. Le résultat issu du filtre passe-bas a été utilisé pour les prétraitements suivant.

Des indices mettant en évidence la différence de spectre de la jussie dans le visible avec les autres végétations ont été calculés : $b4-b2/b4+b2$, $b4-b1$, $b3-b1$, $b2-b1$ avec $b1$: Vert 1, $b2$: Rouge, $b3$: Red Edge et $b4$: Proche infra-rouge.

Afin de maximiser les informations contenues dans la très haute résolution de l'image drone, une analyse de texture a été produite par une matrice de co-occurrence dans ENVI. Elle permet de prendre en compte pour un pixel donné, les valeurs des pixels voisins. Un voisinage, ou élément structurant, d'un nombre défini (par l'utilisateur) de pixel va se déplacer autour d'un pixel et calculer par exemple la moyenne des valeurs de tous les pixels rencontrés, ce processus est appliqué à tous les pixels de l'image (Haralick, 1979). Des tests ont été réalisés et un voisinage de 11x11 a été retenu sur les images drones à BR et de 17x17 sur les images à HR. Seules la variance et la moyenne des bandes rouge et verte 1 ont été retenues car elles sont les plus pertinentes visuellement.

Les composantes 1, 2 et 3 issues d'une transformation par analyse en composante principale des bandes ont été utilisées également car visuellement elles permettaient de différencier la jussie rase, la jussie dressée et les autres végétations.

Toutes les données prétraitées ci-dessus sont utilisées pour créer le modèle d'entraînement sous Random Forest.

Cette méthode est appliquée à l'identique pour les images HR et BR en gardant le même jeu d'entraînement et de validation (Figure 10).

1.8 Validation du démixage issu de Sentinel-2 par drone :

Les classifications obtenues par drone sont comparées aux résultats des démixages issus de Sentinel-2 pour valider le démixage (Figure 11). Le raster d'abondance de jussie provenant de Sentinel-2 est découpé selon le survol du drone et vectorisé sous Qgis pour les deux sites (Goulaine et Grand-Lieu), il en résulte une grille de polygone de 10m*10m contenant les valeurs d'abondance de jussie. Le résultat des classifications drone est transformé en résultat binaire (0 pas de jussie, 1 jussie). La moyenne de ce raster (drone) est calculée pour chaque cellule de la grille issue de Sentinel-2. La valeur moyenne des pixels issue du raster drone sera égale à la proportion de jussie dans un pixel de Sentinel-2. Un nuage de points est alors fait sous R pour comparer l'abondance de jussie issue du drone par rapport à celle de Sentinel-2. Cette manipulation est effectuée plusieurs fois

pour pouvoir comparer l'abondance de jussie selon ses différents aspects morphologiques (Tableau 3).

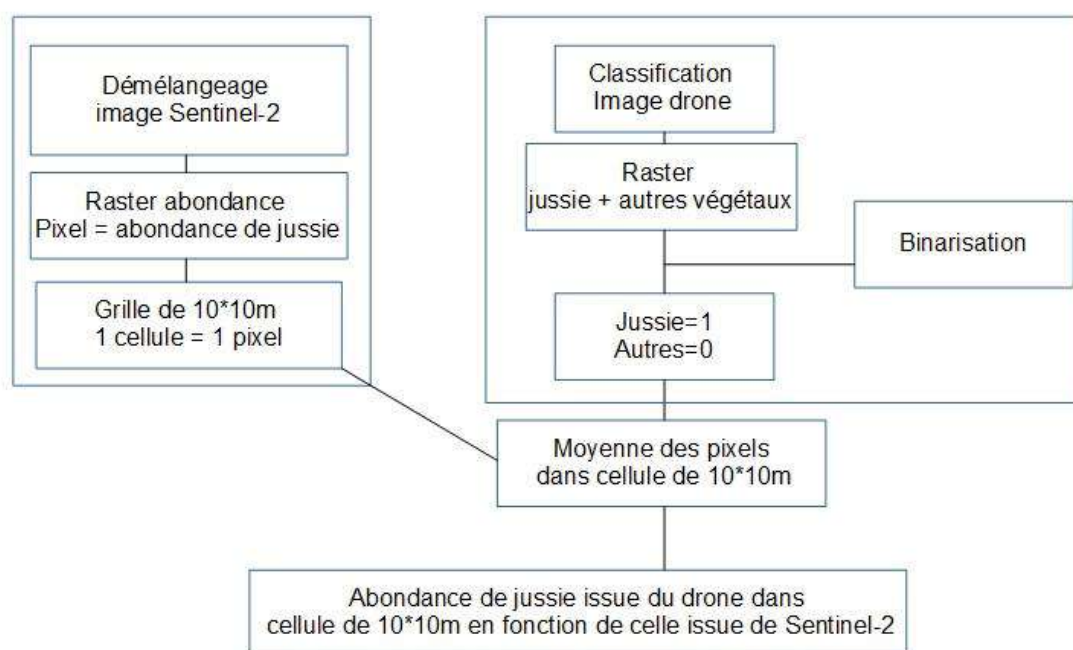


Figure 11 : Comparaison de l'abondance de jussie issue de Sentinel-2 et du drone

1.9 Application à large échelle :

1.9.1 Atlas

Les spectres utilisés pour réaliser la classification par démélangeage spectral du bassin versant de la Loire ont été sélectionnés manuellement le 18 juillet 2018 en Brière, site choisi pour sa grande hétérogénéité végétale qui permet de limiter les faux positifs. Ils ont été choisis d'après les conclusions du paragraphe 1.4 et en réalisant des démélangeages spectraux en Brière. Par itération, en examinant les spectres des pixels mal classés, sept spectres ont été sélectionnés afin d'avoir la carte la plus restrictive possible. Seulement les bandes : 2,3,4,5,6,11,12 de Sentinel-2 ont été utilisées pour le démélangeage. Le choix de ces bandes permet de limiter les variations de réflectance de la jussie dans le proche infra-rouge et produit moins de faux positifs et faux négatifs.

Les tuiles Sentinel-2 utilisées vont de l'estuaire de la Loire-Atlantique jusqu'au Loir-et-Cher (Figure 6), les analyses sont faites sur deux dates distinctes (mi-Juillet et début Août) (Figure 12).

Pour éviter les faux positifs et faciliter les recherches de sites, des masques ont été utilisés. Tout d'abord un masque pour définir la limite de la zone inondable. En hiver ou au printemps, des images Sentinel-2 avec les plus hautes eaux ont été sélectionnées.

La bande 8 est utilisée pour créer un masque des zones inondables. Cette bande a été choisie pour sa résolution spatiale de 10m et sa pertinence pour mettre en valeur l'eau et les zones très humides avec peu de végétation. Les valeurs supérieures à une réflectance de 0.08 sont masquées. La réflectance de 0.08 permet de mieux prendre en compte les zones marécageuses avec des végétaux qu'une valeur de réflectance plus basse. En parallèle une classification par arbre de décision a été faite pour masquer des faux positifs tels que des algues et ou des cyanobactéries dont le spectre n'a pas été utilisé dans le démélangeage du fait de la limitation liée aux nombres de bandes utilisées. De plus cette classification permet de mieux visualiser les données.

L'arbre de décision a été réalisé sous R avec la librairie Rpart. Il a nécessité 97 échantillons de jussie, 87 d'algues, 66 de sol nu, 21 d'eau et 65 de végétation humide pris sur l'image Sentinel-2 dans différents sites. Les variables qui ont été utilisées pour la classification sont les bandes : 2, 3, 4, 8 de Sentinel-2 pour avoir un masque avec une résolution de 10m.

Pour préparer la campagne de terrain les résultats du démelangeage spectral masqués précédemment ont été classés en trois classes de probabilité de présence de jussie : forte, moyenne et faible. Les classes sont établies selon différents critères : spectres, forme des pixels, image en haute résolution issue de Google Earth, Street View et les informations locales (journaux, fédération de pêche etc...). Les cours d'eau de la BD hydro de l'IGN ont été utilisés comme fil conducteur pour les recherches de sites. Le RPG a été utilisé pour délimiter les prairies en zone inondable. Un atlas a été finalement produit, il a permis de sélectionner des sites à prospecter sur le terrain.

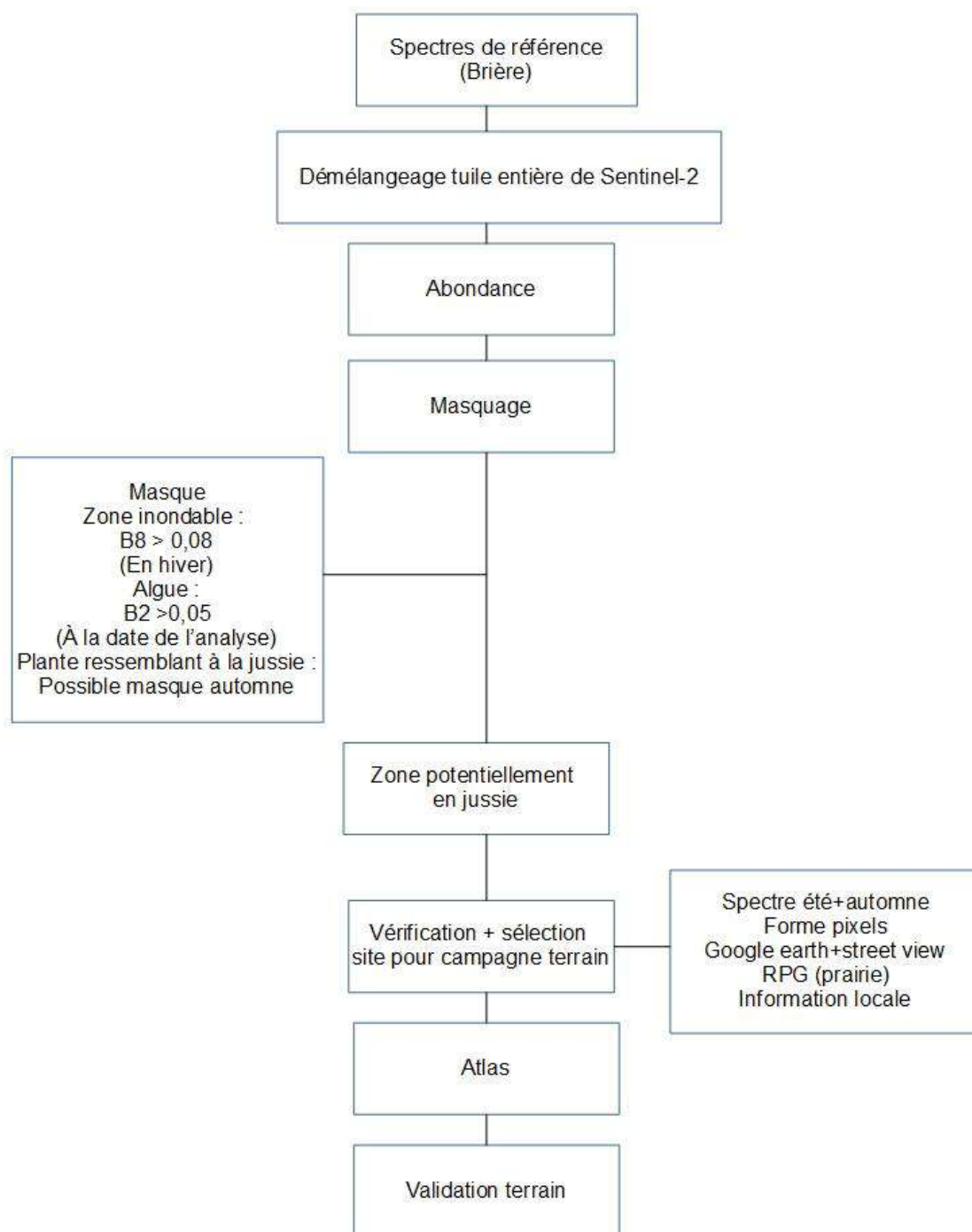


Figure 12 : Traitements réalisés pour la prospection de la jussie à large échelle

1.9.2 Validation terrain :

En se basant sur l’atlas précédemment généré, 38 sites ont été visités le long de la Loire et ses affluents jusqu’à Tours (Figure 13). Ils sont composés essentiellement de prairies inondables, mais pour chercher les limites de la méthode, des étangs, des bras morts, des fossés et des berges ont été également visités.

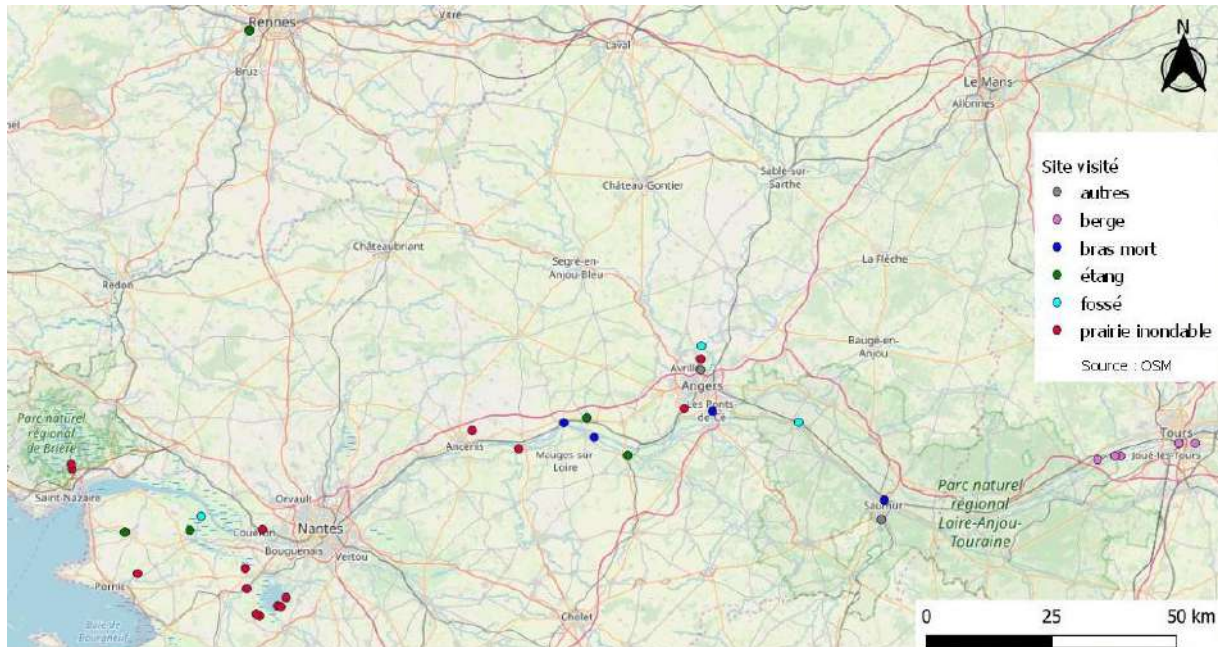


Figure 13 : Sites ayant servi à la validation terrain

2. Résultats

2.1 Spectres obtenus :

2.1.1 Spectres ASD terrain :

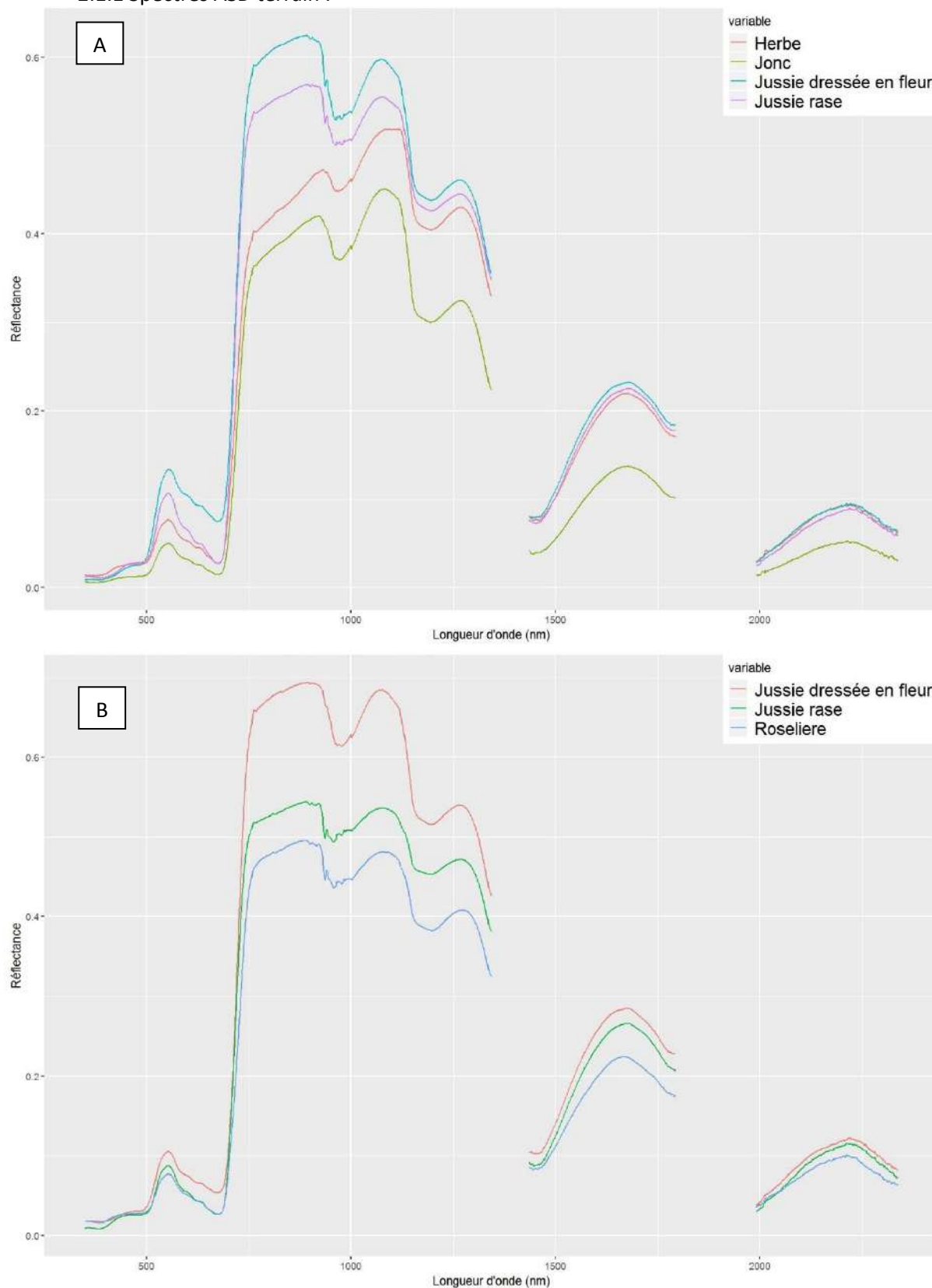


Figure 14 Spectres ASD terrain de Grand-Lieu (A) et de Goulaine (B), début juillet 2018)

Sur les deux sites (Figure 14), la jussie se différencie des autres végétaux à proximité, mais selon son stade de développement cette différence va varier. Dans le visible la jussie dressée va avoir une réflectance dans le vert et le rouge 2 à 3 fois supérieure aux autres végétaux. Dans le début du proche infrarouge (PIR), sa réflectance est également la plus forte. Dans la fin du proche infrarouge il peut y avoir des confusions avec d'autres végétaux. La jussie rase a un comportement similaire à la jussie dressée avec une amplitude plus faible, sauf dans le rouge où sa réflectance sera comme celle des autres végétaux.

Entre les deux sites, le spectre de jussie a la même forme mais pas la même amplitude. La différence la plus notable est située dans le visible, à Grand-Lieu le spectre de la jussie est plus élevé qu'à Goulaine pour le rouge de 40% et de 30% pour le vert.

Campagne 2019 :

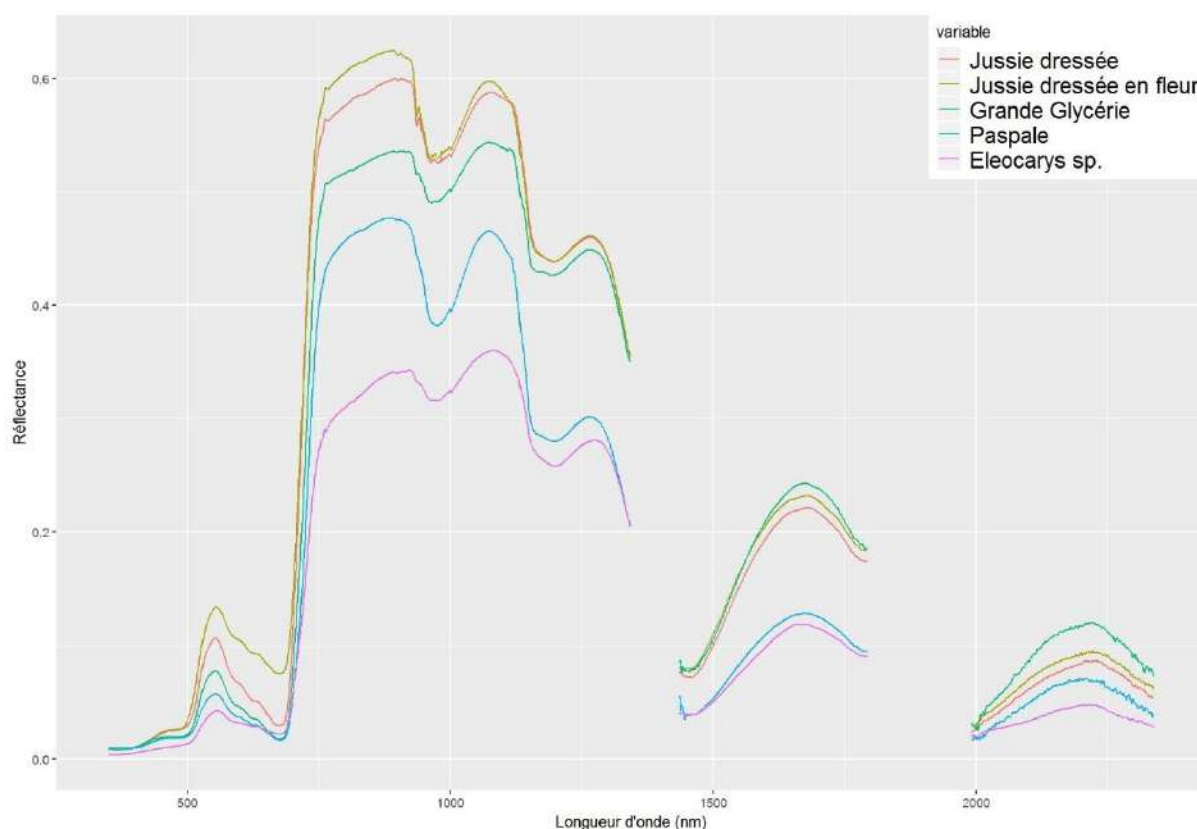


Figure 15 : Spectres ASD terrain en réflectance de jussies et de graminées de zone inondable, campagne 2019.

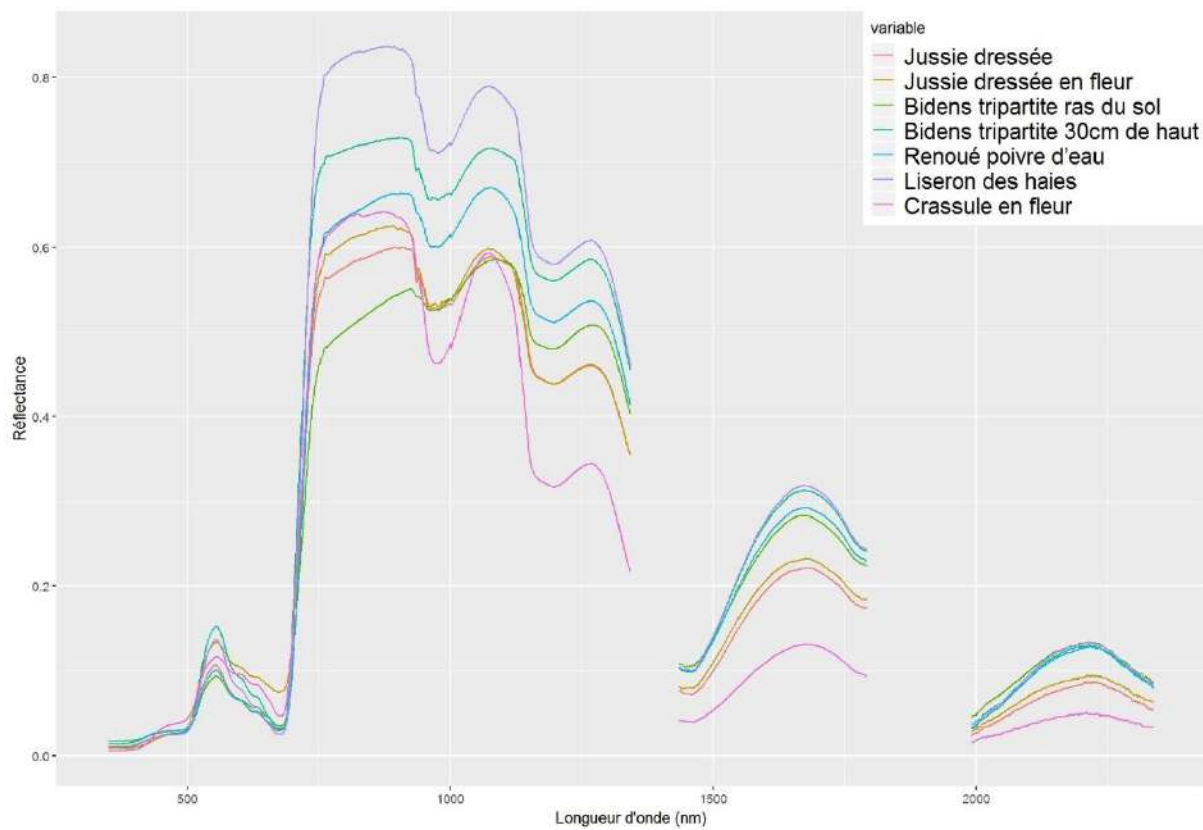


Figure 16 : Spectres ASD terrain en réflectance de jussies et de potentiels faux positifs, campagne 2019

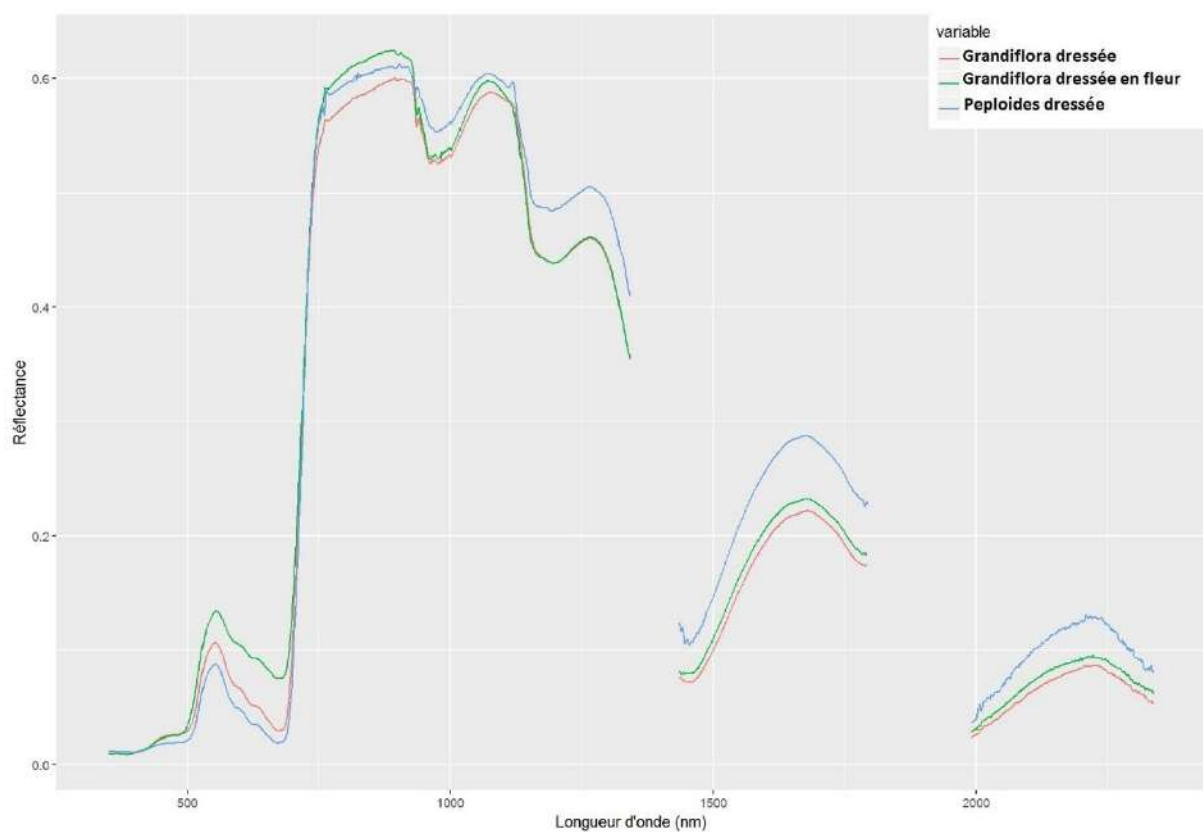


Figure 17 : Spectre ASD terrain de jussie Grandiflora et Peplodes, campagne 2019

Comme observé en 2018, la jussie se différencie nettement des graminées rencontrées en zone inondable (Figure 14, Figure 15). Cependant certains végétaux (dicotylédones) peuvent se confondre avec la jussie, selon son stade morphologique (Figure 16). Ces végétaux vont avoir des valeurs de réflectance proche de la jussie dans le vert, voir supérieure (liseron des haies). Dans le visible la jussie en fleur possède toujours de fortes valeurs de réflectance dans le rouge, deux fois supérieure aux autres végétaux. Dans la fin du proche infra-rouge les jussies forment un groupe à part.

Entre les jussies elles-mêmes, il y a peu de différences spectrales si elles sont comparées aux mêmes stades morphologiques, la peploïdes va avoir une réflectance dans le visible inférieure à environ 15% de la grandiflora. Cependant après 1200nm, la réflectance de la peploïdes va être supérieure à la grandiflora de 10 à 40% (Figure 17).

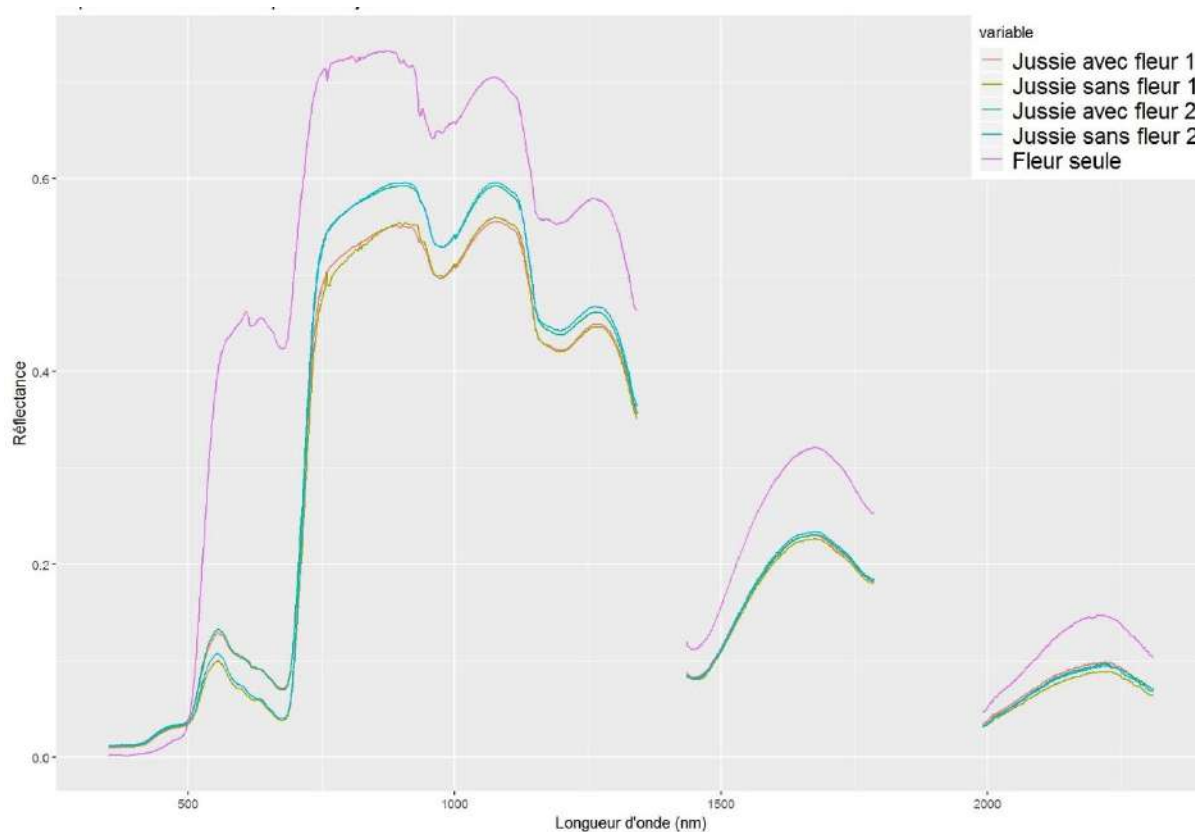


Figure 18 : Impact des fleurs de jussie sur le spectre

Les fleurs font varier le spectre de réflectance uniquement dans le visible (Figure 18), une jussie avec des fleurs va voir son spectre dans le vert et le rouge augmenter de 25% environ. Une fois les fleurs coupées, le spectre de la jussie va redescendre dans le vert et le rouge, il y a très peu d'influence dans le proche infra-rouge.

2.1.2 Spectres issus de Sentinel-2 :

Première étape : méthode non supervisée sous ENVI, SMACC : pour extraire des spectres purs de l'image.

-Les conclusions sont similaires aux spectres acquis sur le terrain. La jussie a un spectre dans le visible supérieur aux autres végétaux. Mais cette différence est plus faible que les spectres terrain dans le rouge et le vert selon les sites et la date (Figure 19).

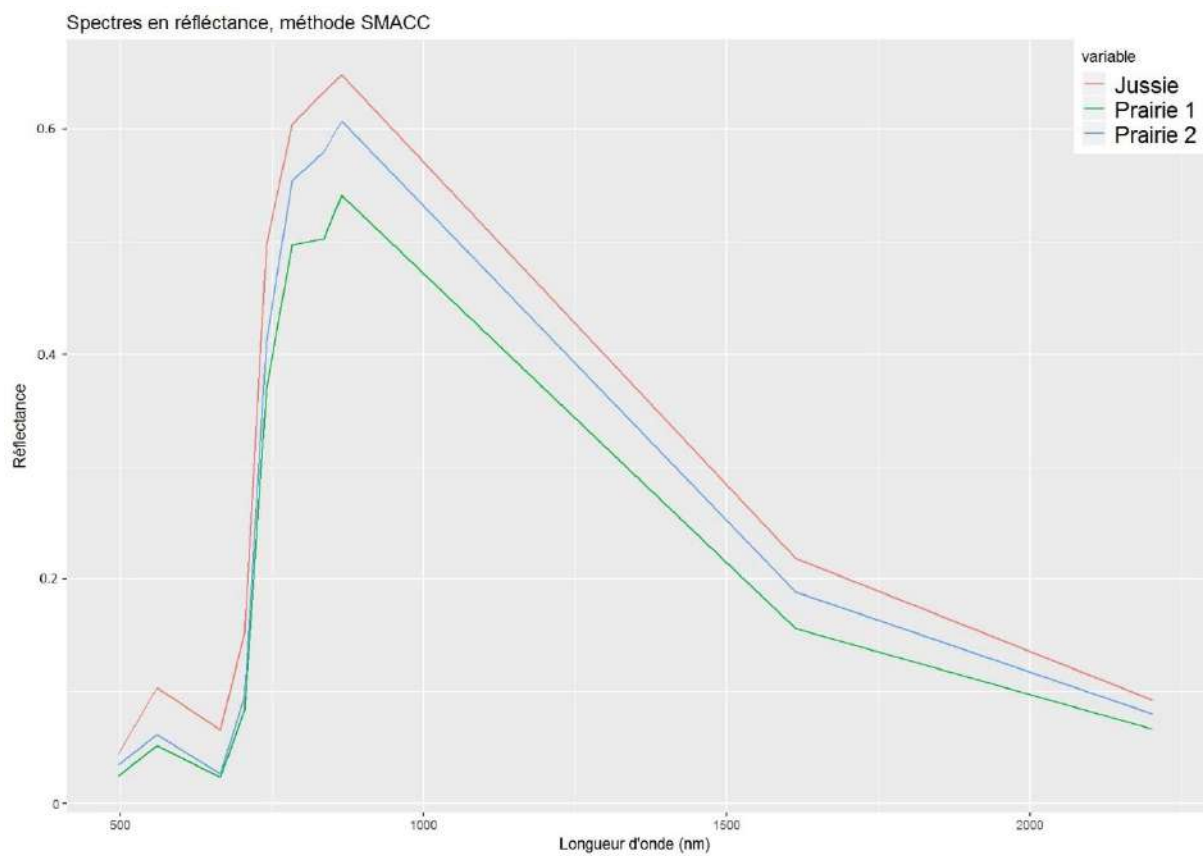


Figure 19 : Spectres issus de Sentinel-2 (méthode SMACC, le 15/07/18)

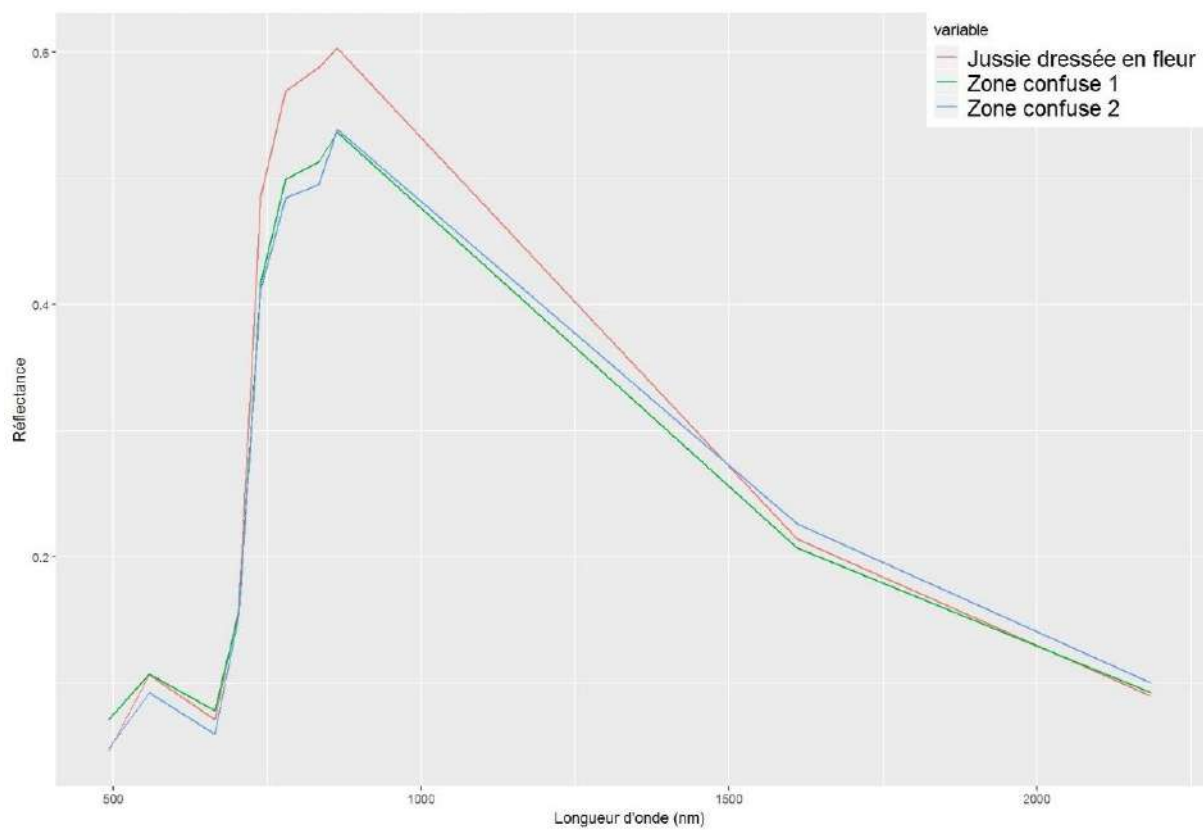


Figure 20 : Spectres de jussie et de faux positifs de Grand-Lieu le 15/07/18

Deuxième étape, à la suite de la vérité terrain :

-Des spectres de végétaux ont été choisis en plus d'après les observations des premiers résultats dans les lieux où il y a présence de faux positifs à la même date (Figure 20). Ces végétaux possèdent une signature spectrale qui se rapproche de la jussie dans le visible et la fin du PIR, mais qui possède une réflectance plus faible dans le PIR. Ces végétaux n'ont pas été identifiés, ils ont été nommés zone confuse 1 et 2. Dans le visible, selon la végétation, la réflectance dans le bleu sera supérieure ou environ égale à la jussie : la zone confuse 1 sera supérieure à la jussie dans le bleu et similaire dans le vert et le rouge. La zone confuse 2 quant à elle sera légèrement inférieure à la jussie dans le vert et le rouge, mais similaire dans le bleu

Troisième étape : choix de spectres adaptés pour une prospection à large échelle avec de nombreux végétaux et un spectre de jussie plus « plat ».

-En effet entre trois sites à une même date, les spectres de jussie sont différents (Figure 21). En Brière la réflectance dans le rouge est plus faible qu'à Grand-Lieu. Le spectre de jussie de Brière a été choisi pour le démélangeage spectral afin de discriminer le moins de jussie possible à cause des variations temporelles intra et inter sites.

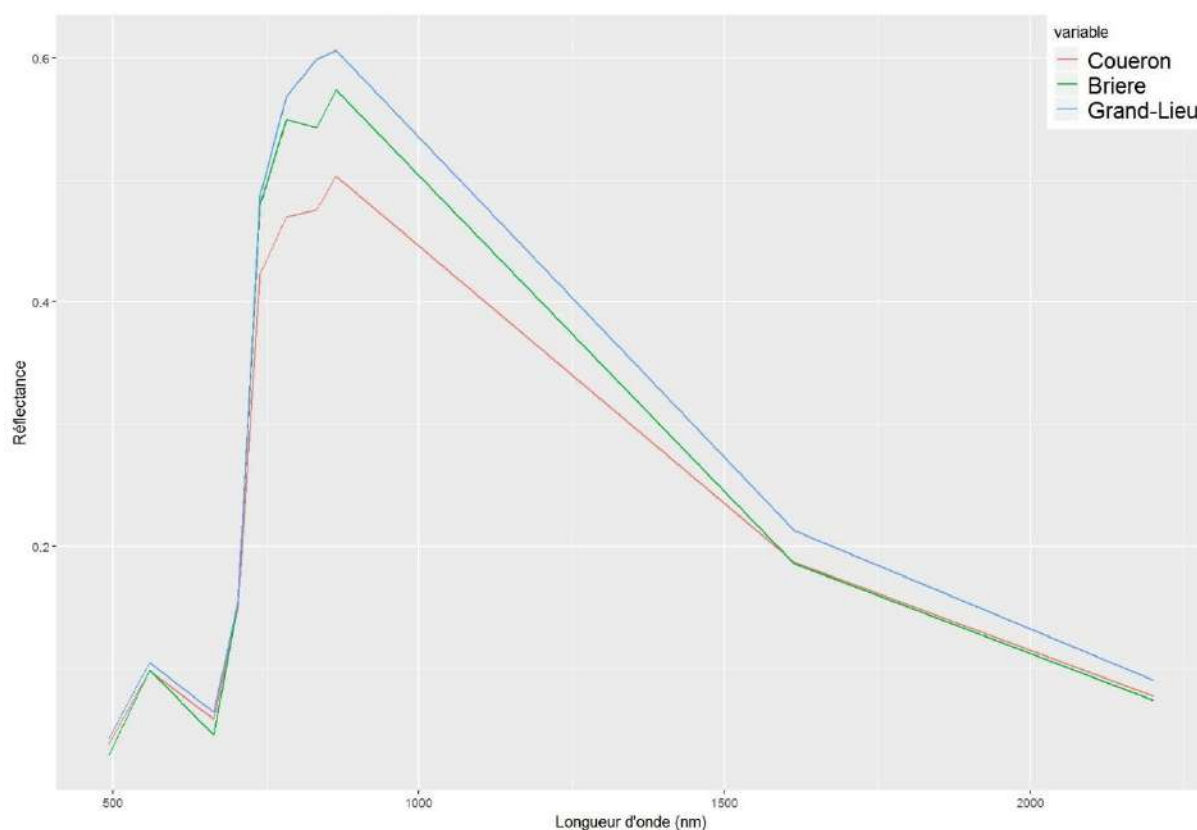


Figure 21 : Variation du spectre de la jussie le 15/07/18 selon différents sites géographiques.

Les spectres qui ont été utilisés pour le démelangeage spectral à large échelle (Figure 22) essayent d'être les plus représentatifs des zones étudiées.

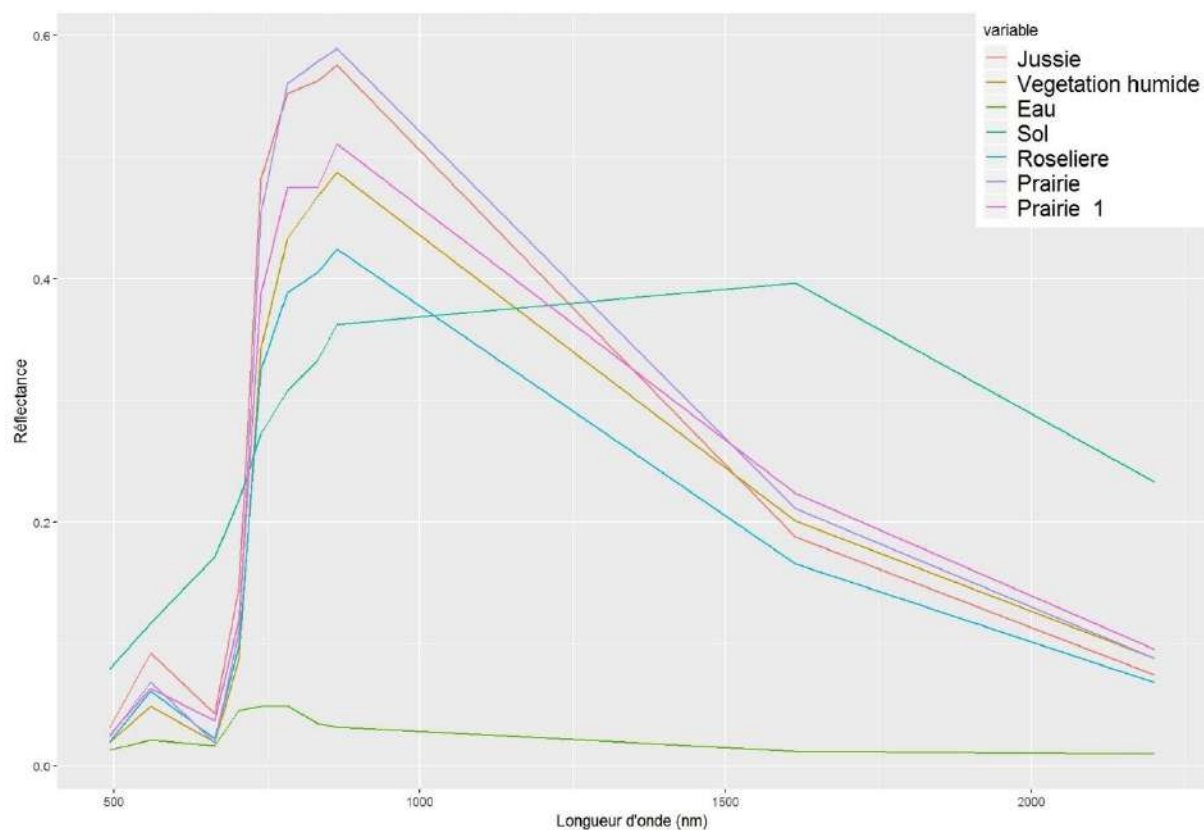


Figure 22 : Spectres utilisés pour le démelangeage spectral, issus du marais de Brière

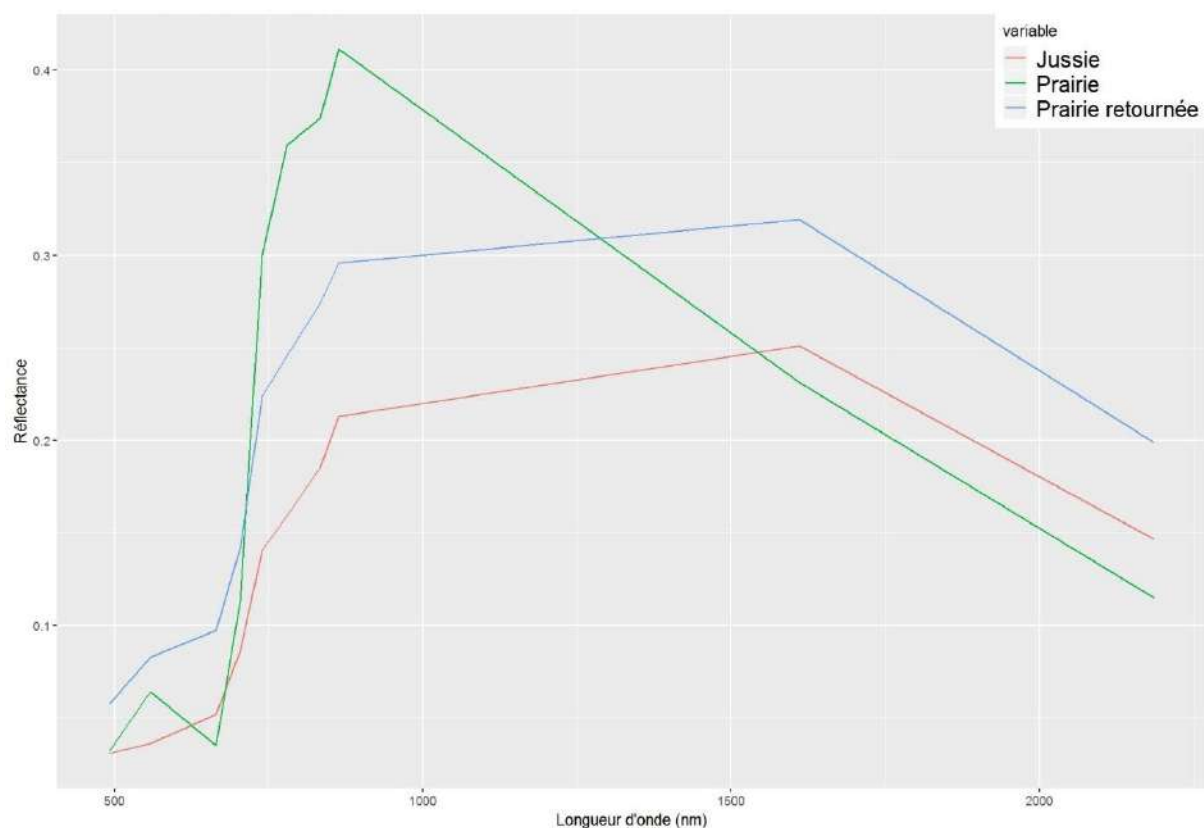


Figure 23 : Spectres de jussie et d'autres végétaux de zones inondables le 18/11/2018

A l'automne, la jussie a séché (Figure 23). Son spectre a été divisé par quatre dans le proche infrarouge par rapport à l'été, tandis que d'autres végétaux des zones inondables eux sont restés verts. Mais dans les zones agricoles, qui ont été fauchées ou dont le sol a été retourné, le spectre de ces zones va se rapprocher de celui de la jussie.

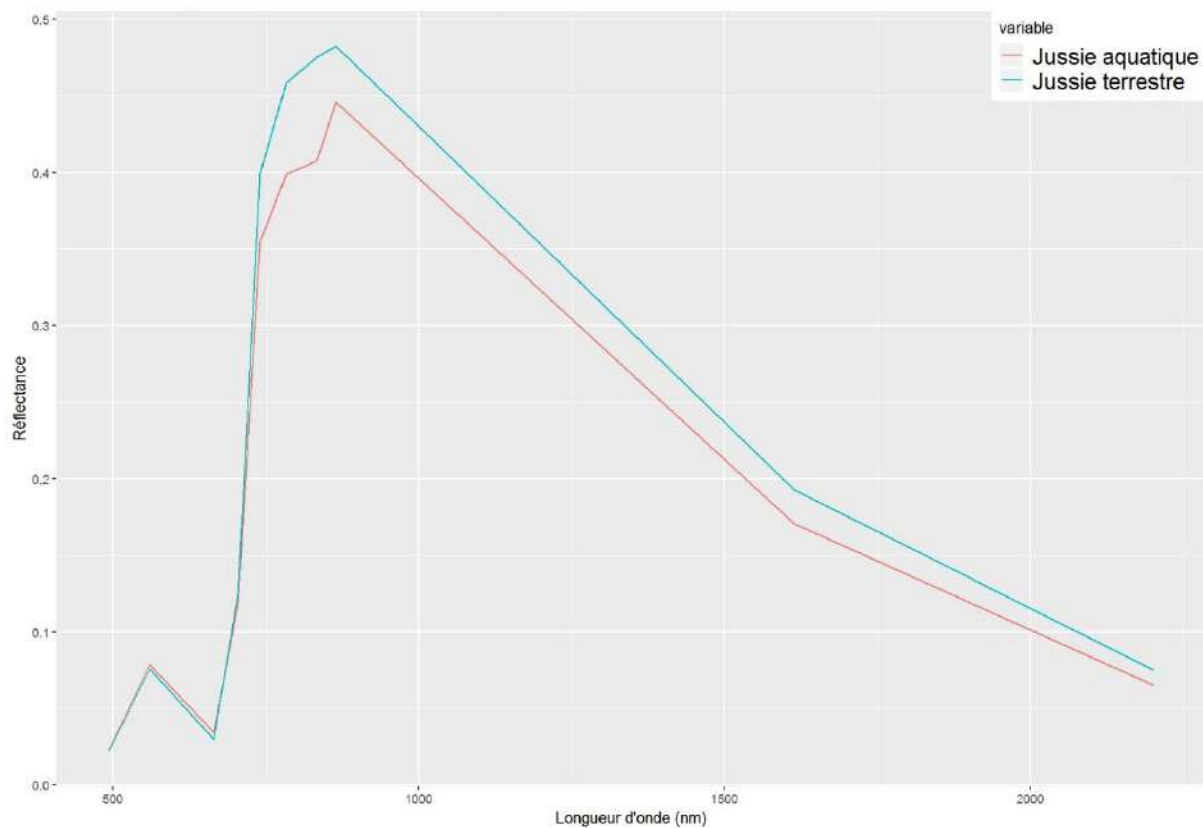


Figure 24 : Comparaison du spectre de la jussie aquatique à celui de la terrestre 22/08/2018, Apigné

Il n'y a pas de différence spectrale entre la jussie aquatique et la terrestre dans le visible (Figure 24). Dans le proche infrarouge la terrestre va être légèrement supérieure à l'aquatique, environ 8%.

2.2 Résultats des démêlangeages spectrales et classifications :

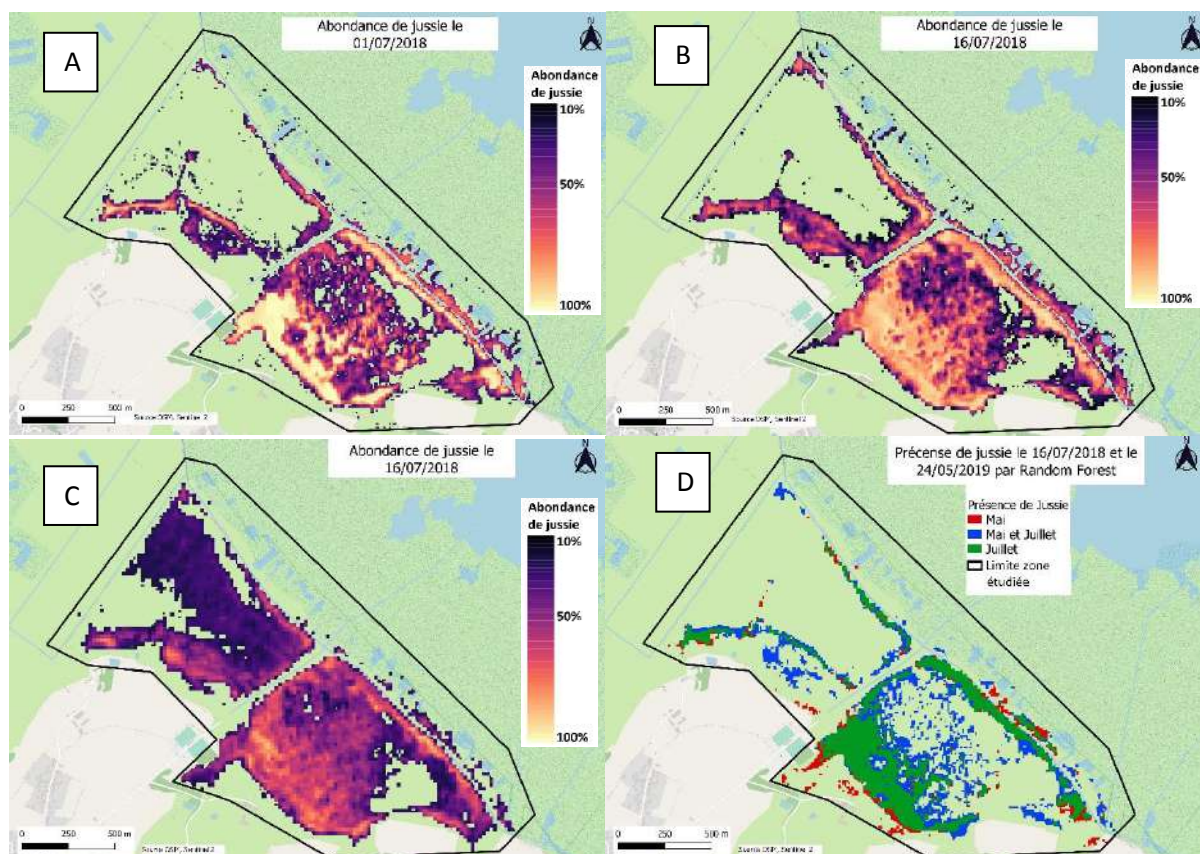


Figure 25 : Comparaison entre des démêlangeages de Grand-Lieu (spectres issus de Brière en A et B, spectres ASD terrains en C) à différentes dates et une classification par Random Forest (D)

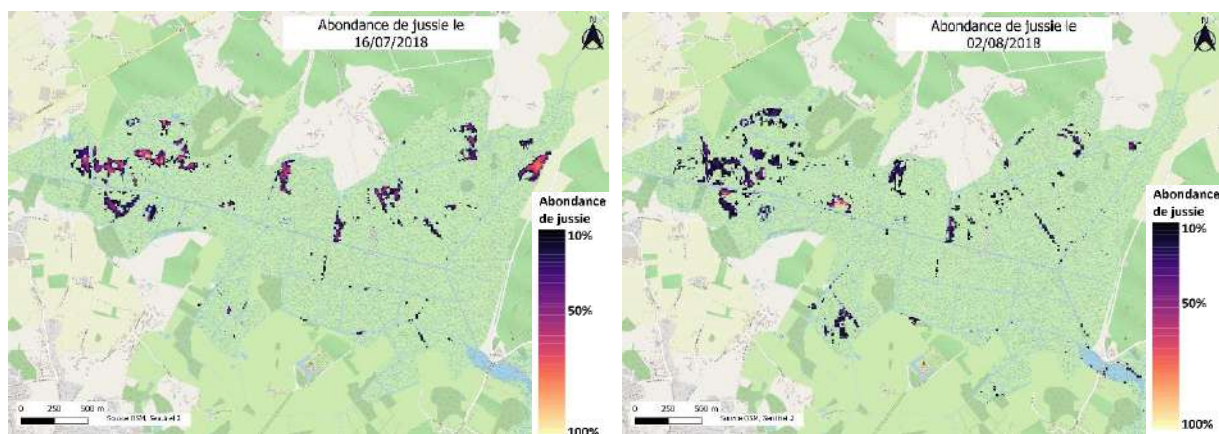


Figure 26 : Comparaison entre des démêlangeages de Goulaine (spectres issus de Brière) à différentes dates

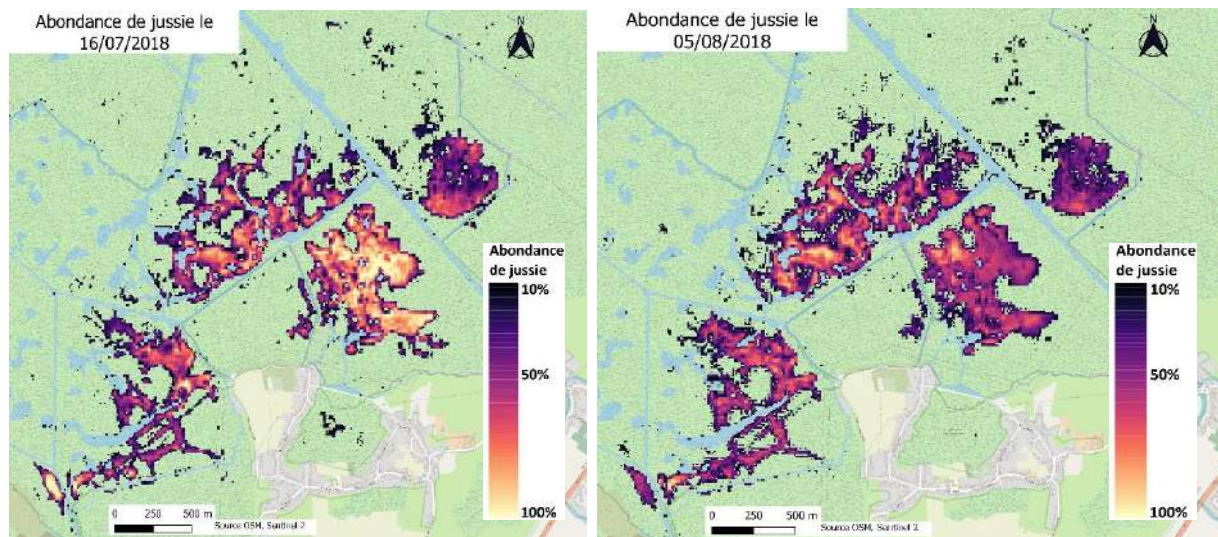


Figure 27 : Comparaison entre des démixturations de Brière (spectres issus de Brière) à différentes dates

Selon la date (Figure 25, Figure 26, Figure 27), l'abondance de la jussie varie, mais les zones en jussie sont globalement les mêmes.

En Brière l'abondance des zones les plus fortes en début d'été diminue avec le temps (entre mi-juillet et août). Tandis qu'elle augmente dans d'autres zones qui étaient plus basses ou qui n'avaient pas de jussie. Le même phénomène est observé sur les deux autres sites. A Goulaine, une zone en jussie au Nord-Est va disparaître de la classification au mois d'août.

Pour le site de Grand-Lieu, il y a de fortes variations d'abondance et de zones colonisées par la jussie entre les spectres ASD terrain et ceux issus de Brière (Figure 25). Toute la prairie au Nord Est a environ 30% d'abondance si les spectres terrains sont utilisés, or d'après des vérités de terrains il n'y a pas de jussie dans cette zone.

La comparaison entre les méthodes de démixturation et Random Forest montre que Random Forest va sous évaluer la jussie. Néanmoins, en s'appuyant sur le multi-temporel il est possible de se rapprocher des résultats du démixturation, mais les zones où l'abondance n'est pas élevée ne sont toujours pas cartographiées.

2.3 Résultats drone :

2.3.1 Validation des corrections radiométriques :

La correspondance entre les réflectances terrain et drone sont concordantes, avec une RMSE de 0.049 pour les deux sites survolés (Figure 28).

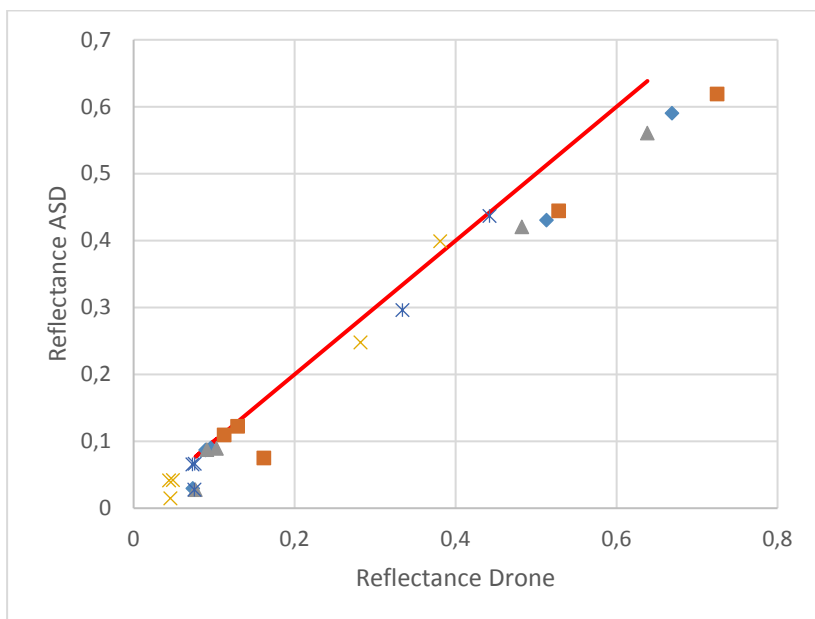


Figure 28 : Comparaison des réflectances issues du drone à celle des mesures ASD terrain, en rouge la première bissectrice

2.3.2 Cartes des classifications drone :

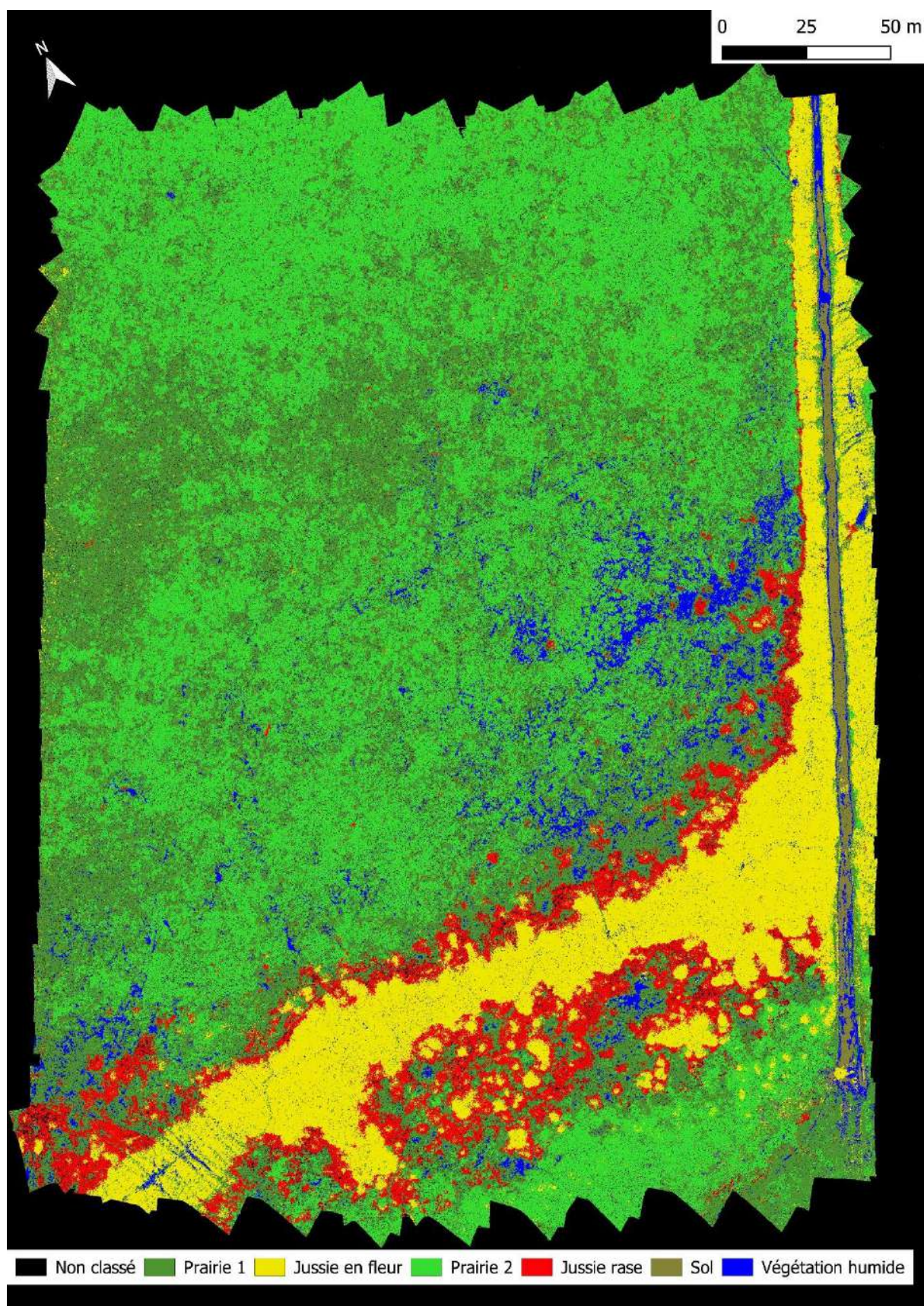


Figure 29: Classification par Random Forest de l'image drone de Grand-Lieu à basse résolution

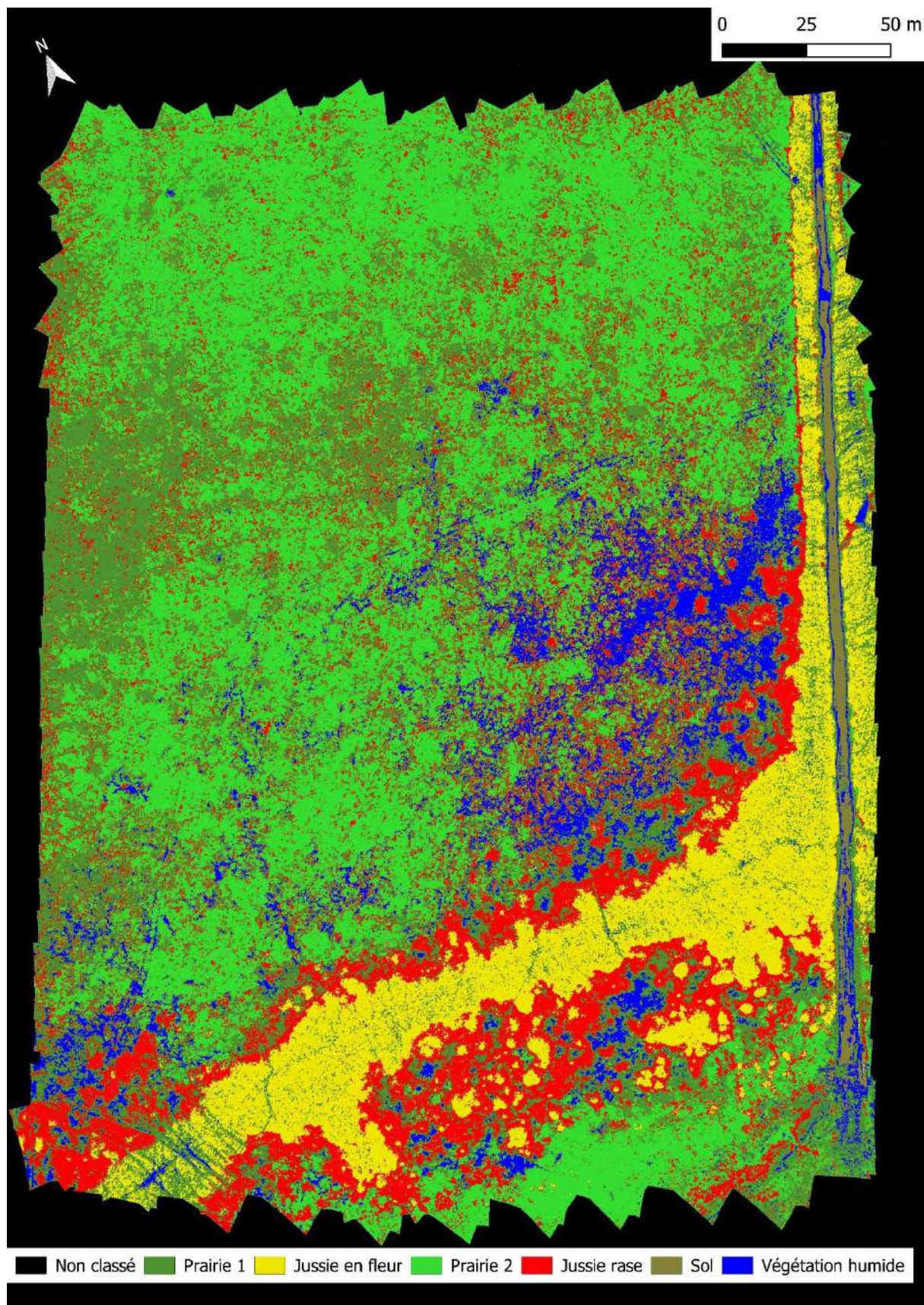


Figure 30 : Classification par Random Forest de l'image drone de Grand-Lieu à haute résolution

Tableau 4 : Matrice de confusion des classifications de l'image drone de Grand-Lieu

Grand-Lieu BR		Photo-interprétation						Précision utilisateur
		Jonc	Fleur de jussie	Prairie	Jussie Rase	Sol	Végétation humide	
Classification	Jonc	1605	43	0	0	0	14	96,57
	Fleur de jussie	0	1150	0	0	0	0	100
	Prairie	207	0	1501	0	0	0	87,88
	Jussie Rase	118	0	0	705	0	0	85,66
	Sol	65	0	0	0	1243	93	88,72
	Végétation humide	11	0	0	0	0	660	98,36
Précision réalisateur		80,01	96,40	100	100	100	86,05	Précision totale : 93

Grand-Lieu HR		Photo-interprétation						Précision utilisateur
		Fleur de jussie	Prairie	Jussie Rase	Sol	Jonc	Végétation humide	
Classification	Fleur de jussie	3458	0	0	0	0	0	100
	Prairie	0	5131	0	0	0	0	100
	Jussie Rase	0	0	2521	0	14	0	99,45
	Sol	0	0	0	3894	13	311	92,32
	Jonc	0	1	12	0	5154	0	99,75
	Végétation humide	0	0	0	0	0	2049	100,00
Précision réalisateur		100	99,98	99,53	100	99,48	86,82	Précision totale : 98

Visuellement les deux classifications de Grand-Lieu se ressemblent (Figure 29, Figure 30). La différence notable est que la classification HR va détecter plus de jussie isolée au milieu de la prairie. Les matrices de confusions montrent que les modèles sont très performants, avec des précisions totales supérieures à 90% (Tableau 4).

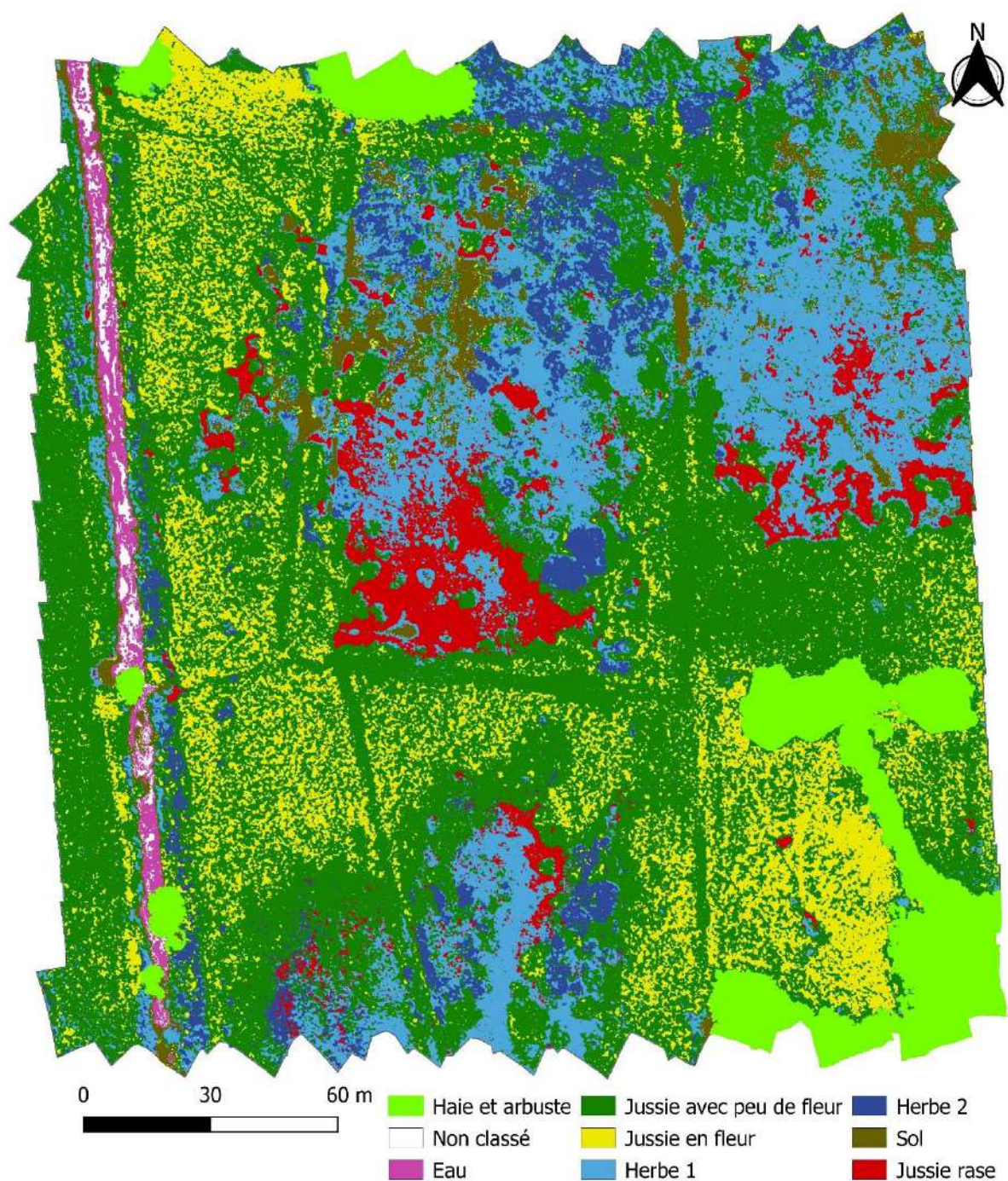


Figure 31 : Classification par Random Forest de l'image drone de Goulaine à basse résolution

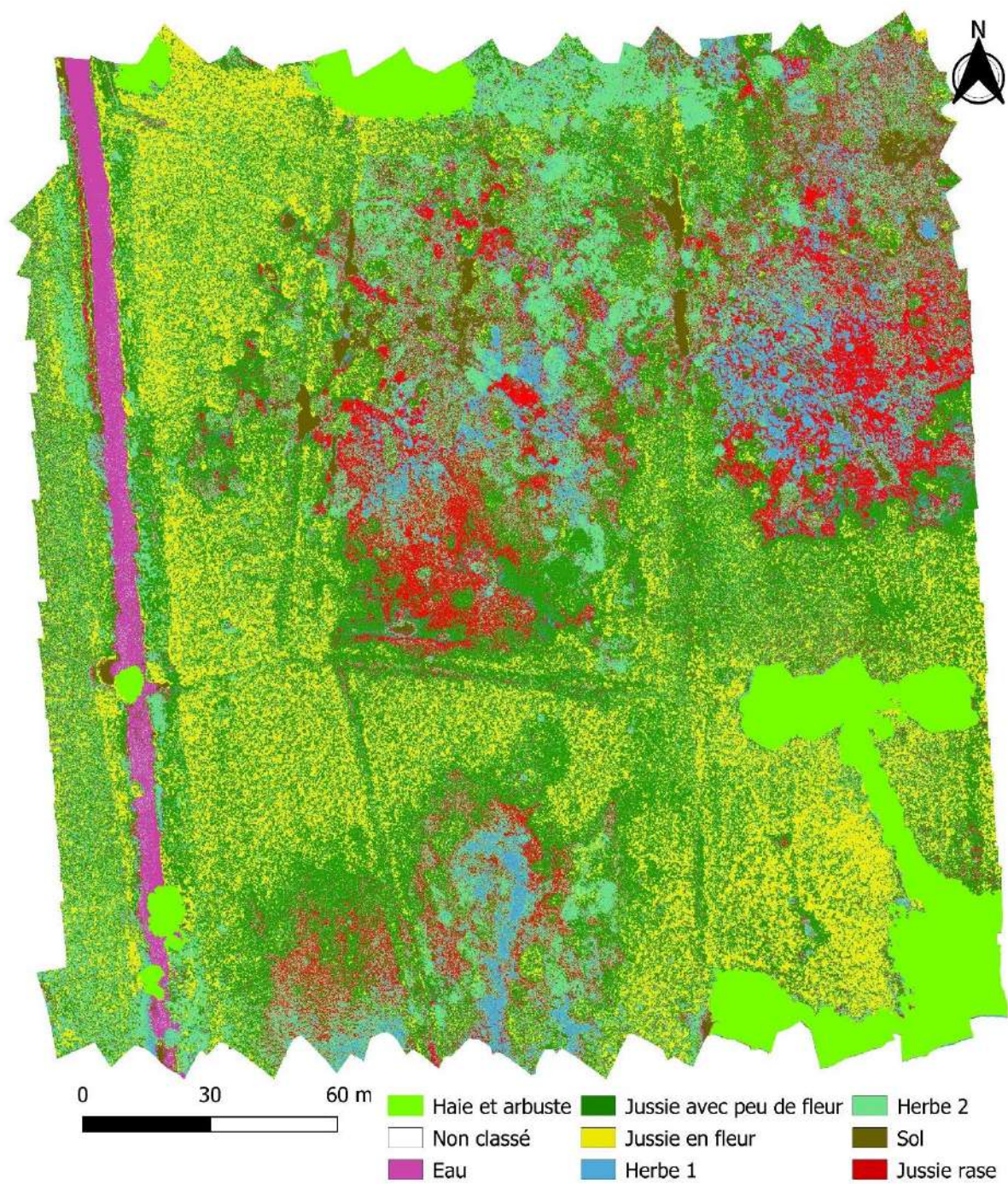


Figure 32 : Classification par Random Forest de l'image drone de Goulaine à haute résolution

Tableau 5 : Matrice de confusion des classifications de l'image drone de Goulaine

		Photo-interprétation							Précision utilisateur
Goulaine BR		Eau	Jussie dressée	Fleur de jussie	Herbe longue	Herbe rouge	Jussie Rase	Sol	
Classification	Eau	1250	0	0	0	0	0	0	100
	Jussie dressée	0	4838	0	31	16	0	0	99,04
	Fleur de jussie	0	23	2759	0	0	10	0	98,82
	Herbe longue	0	28	0	2058	7	0	11	97,81
	Herbe rouge	0	16	0	52	1803	0	0	96,37
	Jussie rase	0	0	0	0	0	3683	0	100
	Sol	0	0	0	0	0	0	1178	100
Précision réalisateur		100	98,63	100,00	96,12	98,74	99,73	99,07	Précision totale : 99

		Photo-interprétation							Précision utilisateur
Goulaine HR		Eau	Jussie dressée	Fleur de jussie	Herbe longue	Herbe rouge	Jussie rase	Sol	
Classification	Eau	5030	0	0	0	0	0	0	100
	Jussie dressée	19	17385	604	126	596	365	0	91,04
	Fleur de jussie	22	1386	9661	0	80	0	0	86,65
	Herbe longue	9	269	0	4400	1357	2344	0	52,51
	Herbe rouge	8	181	10	112	6302	232	0	92,07
	Jussie rase	0	5881	107	1067	169	7290	0	50,23
	Sol	110	0	0	0	0	0	4660	97,69
Précision réalisateur		96,77	69,26	93,06	77,13	74,11	71,25	100	Précision totale : 78,43

La matrice de confusion de l'image drone de Goulaine, souligne la différence visuelle qui apparaît entre les deux cartographies à résolutions différentes (Tableau 5, Figure 31, Figure 32). Des confusions entre les jussies sont présentes au sein de la classe jussie dressée. La jussie rase va également être confondue avec d'autres végétations. Au contraire la cartographie à BR va avoir d'excellents résultats.

Pour les deux sites la jussie dressée avec des fleurs est au centre des zones colonisées et aux abords un « front de colonisation » est composé de jussie rase (ou peu dressée).

Variation entre les sites : La densité de la jussie en fleur est plus importante et homogène à Grand-Lieu, tandis qu'à Goulaine dans certaines zones il n'y a presque pas de fleur. Presque la totalité de la surface de la zone en Goulaine est couverte de jussie, tandis qu'elle est minoritaire à Grand-Lieu.

2.4 Comparaison entre les résultats drone et les démixtages issus de Sentinel-2

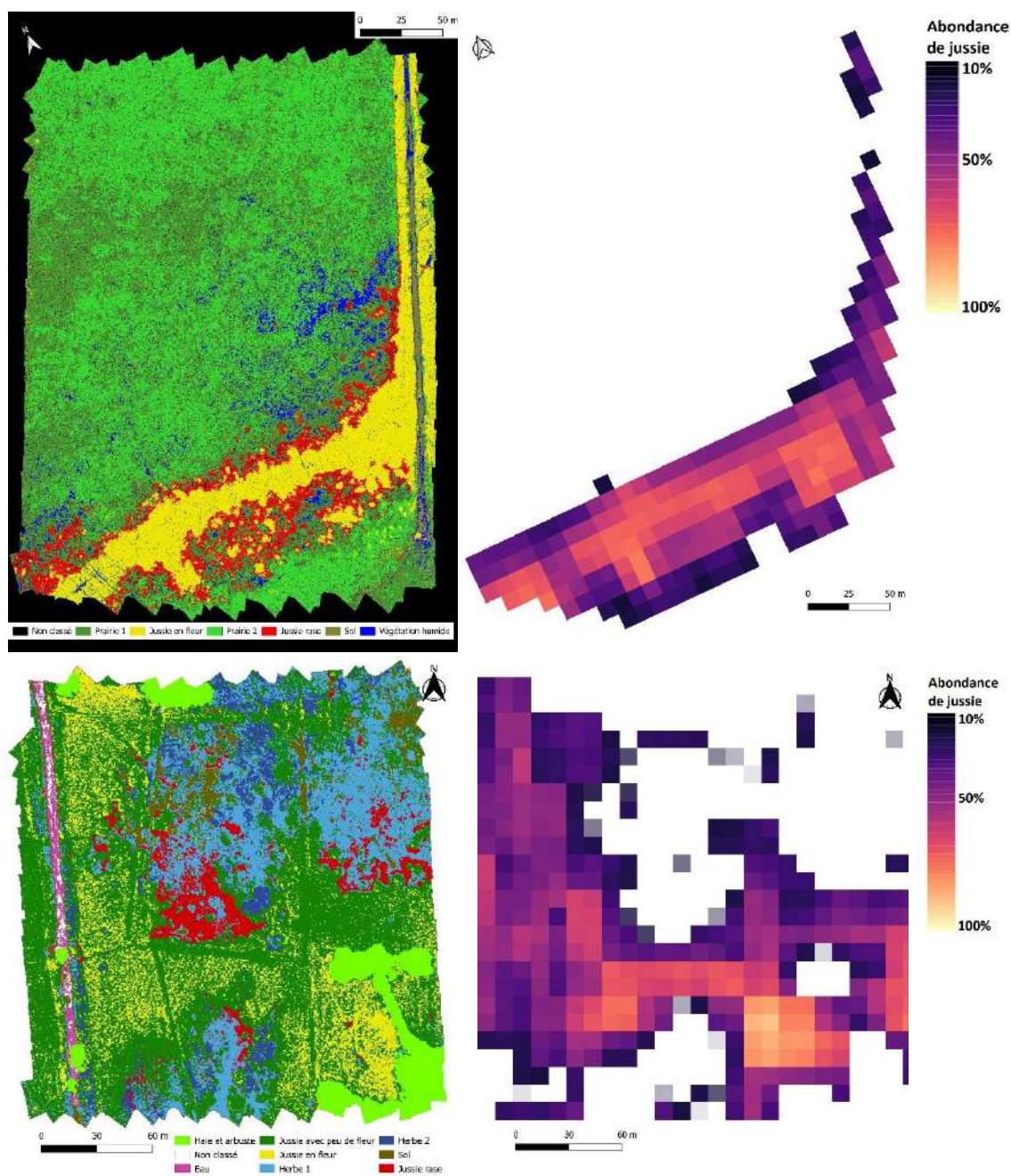


Figure 33 : Comparaison de la classification issue du drone (à gauche) au démixtage à partir des spectres issus de Brière (à droite), Grand-Lieu en haut, Goulaine en bas.

Visuellement il y a une ressemblance entre la cartographie issue de Sentinel-2 et le drone. Dans les deux sites, les zones avec une forte concentration de jussie en fleur vont avoir les abondances les plus fortes. Les zones de jussies rases ne sont pas détectées par Sentinel-2, en Goulaine la zone au centre qui comporte beaucoup de jussie rase n'apparaît pas dans la cartographie issue de Sentinel-2.

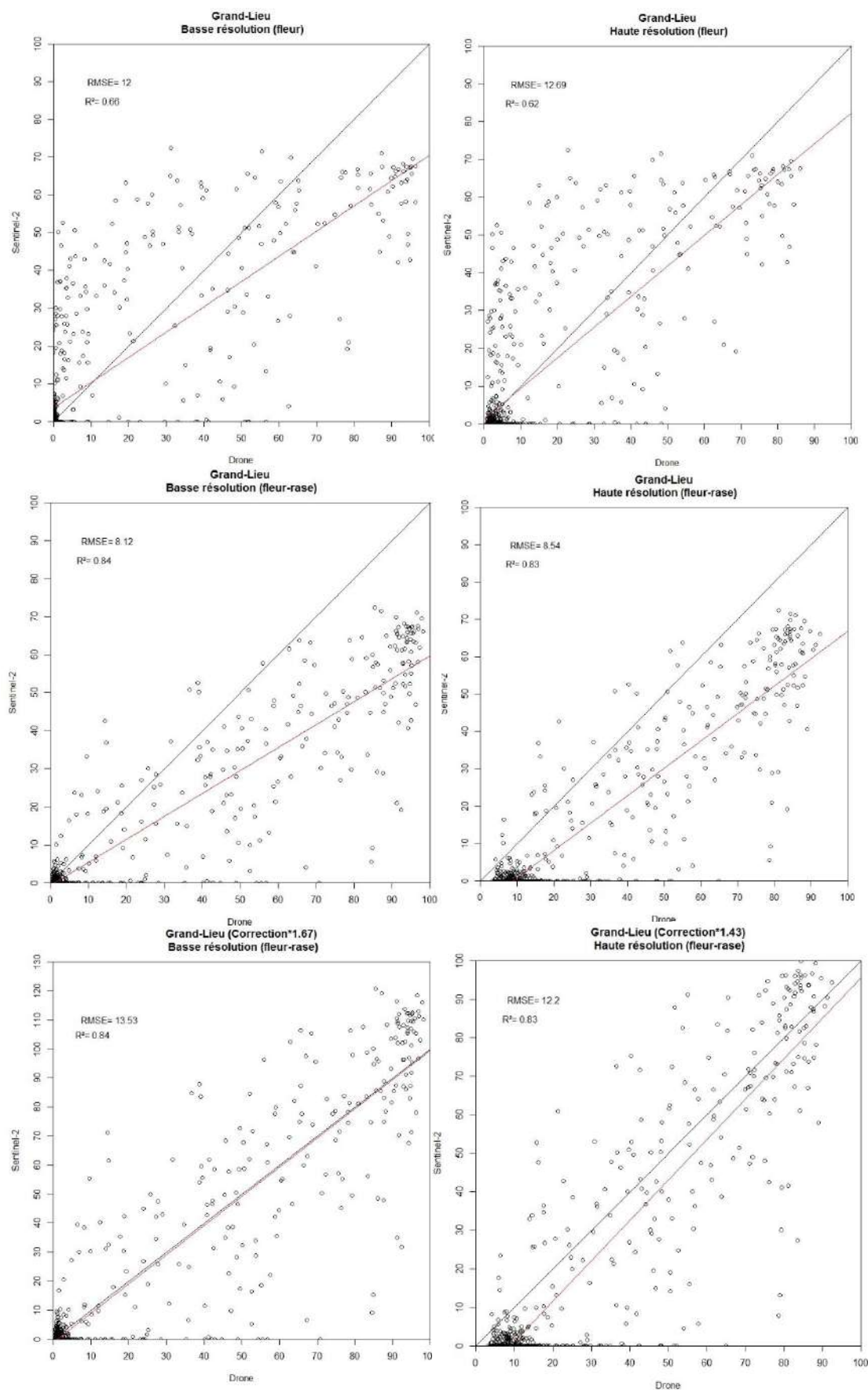


Figure 34: Comparaison entre l'abondance issue de Sentinel-2 (16/07/18) et du drone pour le site de Grand-Lieu, selon différentes résolutions de l'image drone et stade morphologique de la jussie. En rouge la première bissectrice. Spectres utilisés pour le démelangeage : issus de Brière

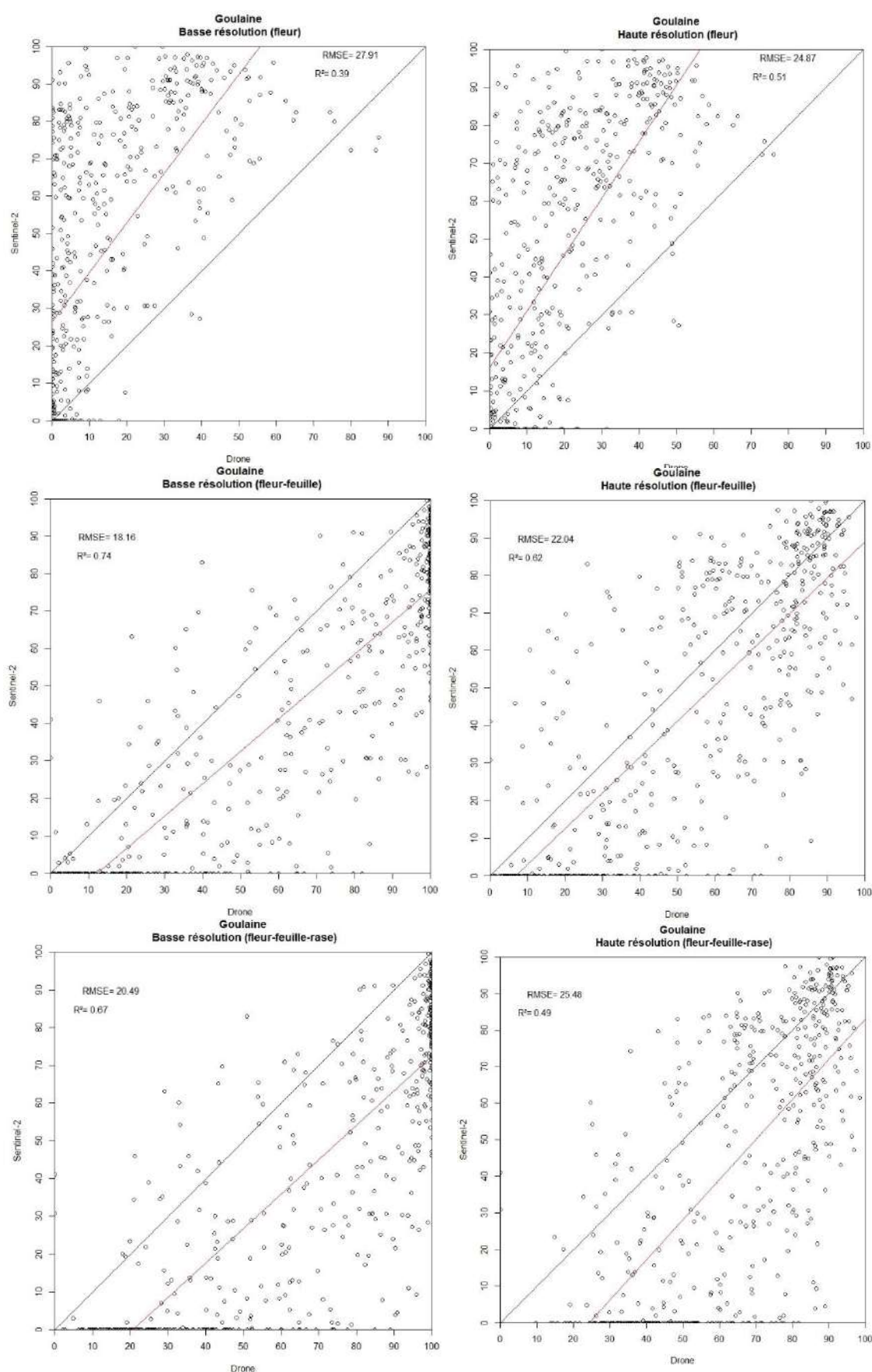


Figure 35 : Comparaison entre l'abondance issue de Sentinel-2 (01/07/18) et du drone pour le site de Goulaine, selon différentes résolutions de l'image drone et stade morphologique de la jussie. En rouge la première bissectrice. Spectres utilisés pour le démelangeage : issus de l'ASD terrain 2018

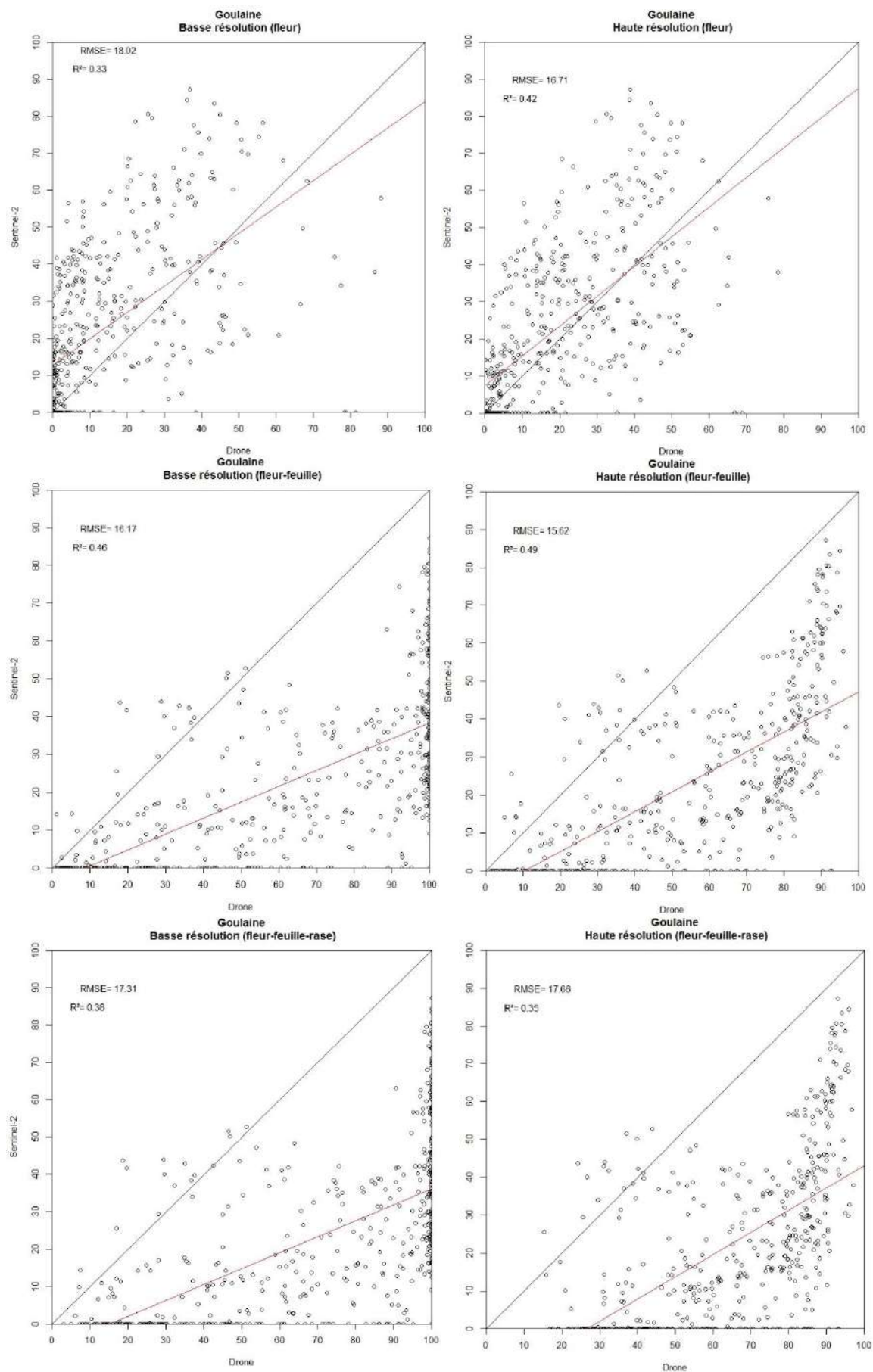


Figure 36 : Comparaison entre l'abondance issue de Sentinel-2 (01/07/18) et du drone pour le site de Goulaine, selon différentes résolutions de l'image drone et stade morphologique de la jussie. En rouge la première bissectrice. Spectres utilisés pour le démixage : issus de Brière

-Différence entre la BR et la HR :

A Goulaine les nuages de points issus du regroupement des classes de jussie en fleurs et feuille de jussie ou fleur-feuille-rase saturent à BR et cela quels que soient les spectres utilisés (Figure 35, Figure 36). Quand la classification drone donne une abondance de 100%, celle issue de Sentinel-2 est comprise entre 100 et 60% (spectre ASD) ou 100 et 20% (spectre Brière). Cet effet disparaît à HR. Un effet similaire se produit à Grand-Lieu mais avec une amplitude bien moins forte (Figure 34). Il n'y a pas de saturation, l'abondance drone diminue de 10% environ entre la BR et la HR.

-Différences liées aux spectres utilisés :

A Goulaine le nuage de points à une bien meilleure répartition autour de la première bissectrice quand les spectres issus du terrain sont utilisés.

-Différences liées à la morphologie de la jussie :

Dans les deux sites et quels que soient les spectres utilisés, la comparaison entre Sentinel-2 et le drone en n'utilisant que la classe fleur montre une forte surestimation de l'abondance de jussie par Sentinel-2. A Goulaine si les classes fleur et feuilles sont regroupées, le nuage de points descend au niveau de la première bissectrice. La combinaison des fleurs, des feuilles et de la jussie rase provoque un décalage du nuage de points vers la droite liée à une sous-estimation de l'abondance par Sentinel-2.

La classification du site de Grand-Lieu n'a pas nécessité le rajout d'une classe de jussie dressée sans fleur. La comparaison montre une sous-estimation par Sentinel-2 qui peut être corrigée de façon linéaire.

2.5 Validation terrain de l'atlas

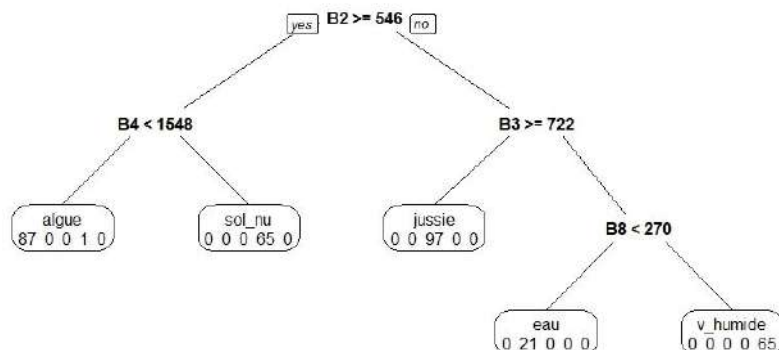


Figure 37 : Arbre de décision ayant servi à produire le masque issu de la bande 2 de Sentinel-2 (réflectance*1000)

D'après les résultats de l'arbre de décisions (Figure 37) et la validation par la visualisation d'histogramme de pixels de jussie, les valeurs de réflectance supérieures à 0.05 dans la bande 2 ont été masquées pour limiter les faux positifs avec des algues et des sols nus.

Un extrait de l'atlas produit est situé après les annexes (ATLAS des principales zones de jussies en Loire Atlantique :

Tableau 6 : sites visités et présence-absence de jussie

Localisation	Type	Présence de jussie dans l'atlas	Présence de jussie sur le terrain
Les Pont de Cé	Bras mort	X	X
Le Fourneau du Lyon	Bras mort	X	X
Ingrandes	Bras mort	X	X
Vue	Etang	X	X
Etang Apigné 1	Etang	X	X
Etang Apigné 2	Etang	X	X
La Rouaudière, Saint Père en Retz	Etang	X	X
Champtocé sur Loire	Etang	X	X
Chalonne sur Loire (le layon)	Etang	X	X
Saint Mathurin sur Loire	Fossé, "port"	0	X
Frossay	Fossé	0	X
Cantenay Epinard, ruisseau de l'ancienne rivière	Fossé	X	X
Domaine de Chatillon	Peupleraie labourée	X	0
Ancenis	Prairie	X	X
Saint Florent le Vieil	Prairie	X	X
Sud Angers Prairie de la Baumette	Prairie	X	X
Thouet	Prairie	0	0
L'aubier Port Saint Père	Prairie	X	0
La Rouaudière Saint Père en Retz	Prairie	X	0
Pornic la Basse Gautrais	Prairie	X	X
Coeuron, étier lac Beaulieu	Prairie	X	X
Passay	Prairie	X	X
Grand-Lieu, route grand bonhomme	Prairie	X	X
Grand-Lieu, grand bonhomme	Prairie	X	X
Port Saint Lumine de Coutais	Prairie	X	X
La tuilerie	Prairie	X	X
La Charie	Prairie	X	X
Saint Malo de Guersac	Prairie	X	0
Zone nord Trignac 1	Prairie	X	X
Zone nord Trignac 2	Prairie	X	X
Apigné	Prairie	X	X
Prairie sud domaine de Chatillon	Prairie	0	0
Tours (Chers)	Rive	X	X
Est pont de Savonnières	Rive	X	X
Nord grotte pétrifiante	Rive	X	X
Chers, maison de foncher	Rive	X	X
Confluence Cher Loire	Rive	X	X
Est pont saumur (D347)	Rive	X	X
Site non visité mais connu			
Glénac	Prairie	X	X
Gamedel	Prairie	X	X
Massérac	Prairie	X	X
Mazerolles	Prairie	X	X

La précision totale de la méthode est de 84% tous types d'environnement confondus (en ne prenant en compte que les sites visités). La précision totale augmente à 88% si les fossés (linéaires fins dont la largeur est inférieure à 4m) sont exclus.

3. Discussion :

3.1 Choix des spectres pour le démélangeage :

Le spectre de la jussie varie peu dans le visible tandis qu'il est soumis à de plus fortes variations dans le proche infra-rouge à une même date et dans le même site. Cette forte variation va entraîner des problèmes pour le démélangeage, car il cherche à avoir le résidu le plus petit possible. Or dans le visible entre végétaux les différences sont de faible amplitude (inférieure à 0.1) tandis que dans le proche infra-rouge elles sont très fortes (jusqu'à 0.4). Il en résulte que si une autre végétation a un spectre un peu différent de la jussie dans le visible mais très proche dans l'infrarouge elle peut être comptée en faux positif (Figure 16). Il est également possible que si la jussie choisie comme spectre de référence possède une forte valeur de réflectance dans le proche infra-rouge, une jussie avec une faible réflectance dans le PIR peut-être est un faux négatif.

Pour pallier ce problème les bandes 7, 8 et 8a (red-edge et proche infrarouge) n'ont pas été utilisées. Mais ce choix a eu pour conséquence de limiter le nombre de spectres qu'il est possible d'utiliser pour le démélangeage. Les spectres de végétations choisis, autre que la jussie, sont là pour essayer de représenter exhaustivement les végétations dans un milieu humide. Mais il est difficile d'être le plus représentatif possible à l'échelle de la Loire. Ces spectres de végétaux servent surtout pour définir des « limites » spectrales pour essayer d'optimiser le démélangeage.

Un spectre de sol a également été inclus, car les prairies inondables sont des milieux anthropisés, soumis à de fortes variations incluant la mise des sols à nu. Sans spectre de sol, un sol nu ou recouvert de paille a de forte chance d'avoir une forte abondance de jussie et entraîner un faux positif. Le spectre de jussie a les plus fortes valeurs de réflectances dans le visible, ce sera donc lui qui aura le plus petit résidu lors du démélangeage d'un sol comparé aux autres végétations.

Le spectre d'eau permet de cartographier des zones très humides où la jussie est présente, mais peut entraîner du bruit. Une partie de ce bruit est corrigée par des masques.

3.2 Variations spatiales et temporelles de l'abondance de jussie issue du démélangeage :

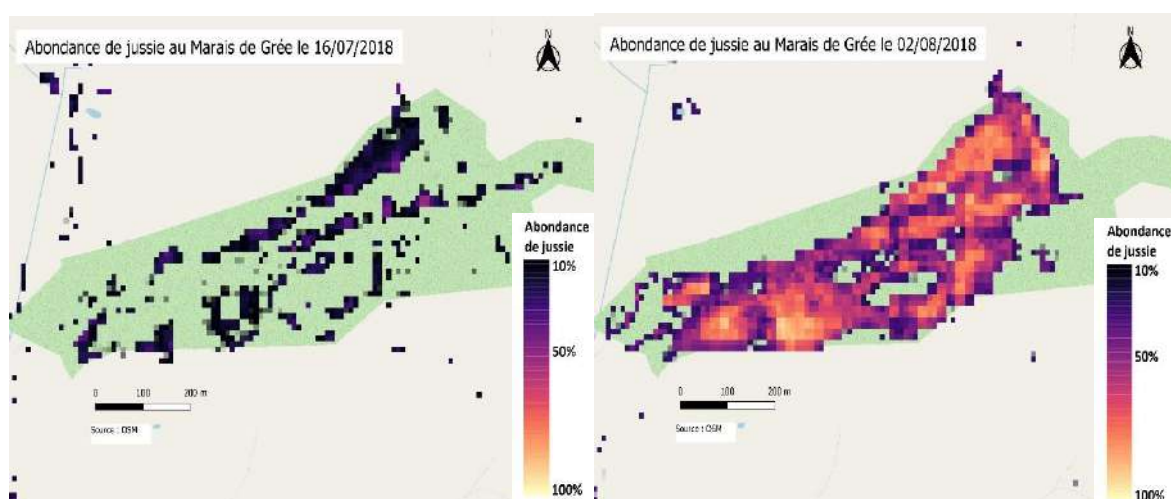


Figure 38 : Variation de l'abondance de la jussie dans un marais entre deux dates

La variation de l'abondance selon la date de traitement de l'image est sûrement liée au stade morphologique de la jussie, plus précisément l'apparition des fleurs :

Exemple du marais de Créé à Ancenis : l'abondance de jussie est quasi nulle à Ancenis le 15 juillet 2018 tandis que 15 jours plus tard elle est devenue très forte (Figure 38).

Aux étangs d'Apigné le même phénomène se produit, la jussie terrestre n'est pas cartographiée à la mi-juillet tandis que la jussie aquatique située 100 mètres plus loin est repérée avec une forte abondance. A la mi-août les deux sites possèdent une forte abondance. Pour étayer cette hypothèse en juillet 2019 l'abondance de jussie a de nouveau été calculée aux étangs d'Apigné et confrontée à une vérité terrain. Effectivement : la jussie aquatique couverte de fleurs possède une forte abondance et la jussie terrestre qui ne possède pas de fleur n'est pas cartographiée. De plus à Goulaine la jussie rase cartographiée par le drone n'est pas détectée par le démélangeage issu de Sentinel-2 (au contraire de Grand-Lieu où la jussie rase semble cartographiée, cette question est abordée en 3.4).

Une preuve expérimentale est apportée en comparant les spectres de jussie en fleurs qui correspondent aux spectres utilisés dans Sentinel-2 pour les différents démélangeages avec ceux de jussie dépourvue de fleur. Ainsi en coupant les fleurs de jussie, le spectre mesuré descend dans le vert et le rouge, les fleurs de jussie ont donc une très forte influence sur le signal mesuré quel que soit le capteur.

Il est possible de conclure que l'abondance de jussie produite par le démélangeage (avec les spectres utilisés dans ce rapport) va représenter la jussie dressée en fleur. Il est donc très sensible au stade de développement de la jussie : ce qui est à la fois une force, le spectre de la jussie avec des fleurs est très remarquable et une faiblesse liée aux variabilités temporelles et spatiales.

De ce fait il est difficile de valider sur le terrain, précisément les valeurs d'abondance de jussie. D'une part parce que le démélangeage a été fait pour l'année 2018 et les vérités terrains en 2019, au mois de juin avant que la jussie ne soit fleurie. C'est pourquoi seulement la présence ou l'absence de jussie a été utilisée comme validation. Mais les observations sur le terrain ont quand même montré que les zones avec une forte densité de jussie ont une forte abondance, tandis que quand les herbiers de jussie sont clairsemés, l'abondance est plus faible.

3.3 Avantage du multi temporel :

Avantage : la cartographie est possible tout l'été, donc il suffit de cartographier un site pendant tout l'été et de regarder les valeurs d'abondance maximales pour avoir la couverture de jussie totale. Le fait de cartographier la jussie fleurie devient ici un avantage car le spectre de jussie fleurie se discrimine très facilement, alors que si les données étaient payantes ou peu accessibles la cartographie serait incomplète.

Suite à cette conclusion un script python a été écrit pour réaliser des démélangeages pour toutes les dates possibles durant l'été et ne garder par pixel que les valeurs de jussie maximum (Figure 39).

Dans ce script un masque a été rajouté pour diminuer le bruit lié au spectre de l'eau. Il s'agit de la bande 8 de Sentinel, à la date traitée par le démélangeage, les valeurs avec une réflectance inférieure à 0.3 sont masquées. Ce masque sur une date précise (surtout au début de l'été) va enlever de nombreuses zones de jussie qui sont encore très humides, mais pendant l'été la jussie va se développer et avoir des valeurs supérieures à 0.3 et ne sera pas masquée.

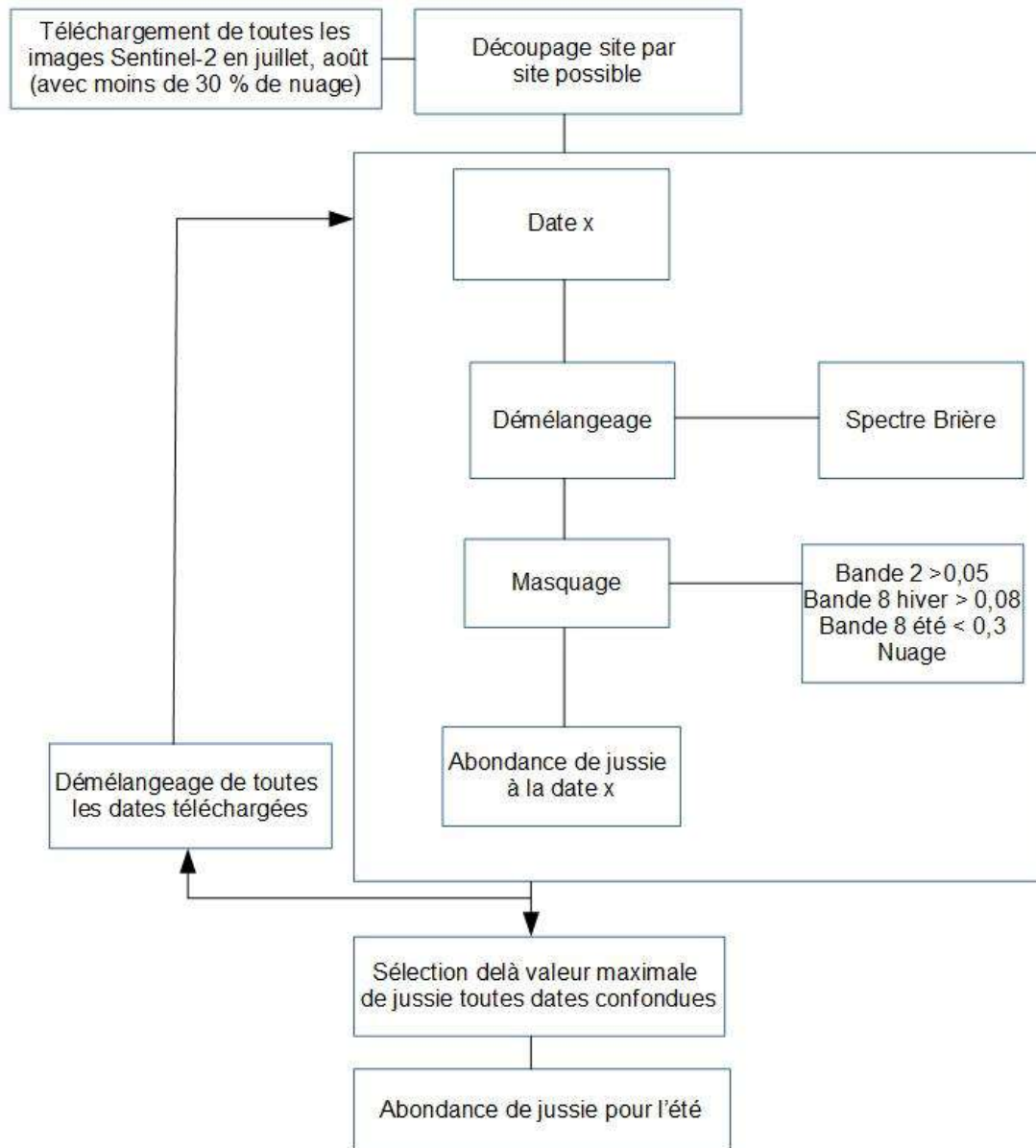


Figure 39: Processus de traitement pour avoir l'étendue maximale de la jussie pour une année

Un autre avantage du multi temporel est l'accès à des données toute l'année. Cela permet de créer facilement des masques des zones inondables en ayant accès à des images l'hiver. A l'automne il est également possible de masquer des végétations qui étaient des faux positifs car elles restent vertes alors que la jussie sèche a une signature spectrale très particulière. Cela permet également de suivre le développement de la jussie, en effet si l'enneigement le permet il est possible de cartographier la jussie par Random Forest dès le printemps.

Mais le multi temporel peut être un piège en effet les masques créés à l'automne ou les classifications basées sur des images en été et à l'automne peuvent être fausses à cause de l'action humaine. Les fauchages et désherbages peuvent créer du bruit dans le signal et faire perdre de l'information.

3.4 Classification de la jussie issue de l'image drone

Que ce soit à BR ou à HR la classification est très précise, surtout pour la jussie (en fleur, dressée ou rase) avec une précision proche de 100%, sauf pour la cartographie de Goulaine en HR. L'image à HR de Goulaine possède de très nombreuses ombres dans le couvert de jussie, qui n'ont pas été éliminées malgré les filtres passe bas et les matrices de co-occurrence. Elles sont l'une des causes des confusions produites par la classification. Pour les deux sites, que ce soit la classe d'entraînement ou celle de validation, elles ont toutes les deux été réalisées par photo-interprétation, ce qui peut entraîner un léger biais et expliquer les quelques confusions qui sont apparues entre les autres végétaux. Mais le plus important est que la jussie soit cartographiée précisément. Il est possible de découper l'image en deux grandes parties : la jussie et la prairie. Or à Grand-Lieu dans la prairie, des zones de jussies de quelques mètres apparaissent ainsi que de nombreuses petites taches de quelques pixels. Il est difficile de valider ces dernières qui peuvent s'apparenter à du bruit, car cela nécessite un GPS de précision et les vérités terrain ont été faites en 2019. Mais après inspection de la parcelle, il s'est avéré qu'effectivement la jussie est présente en de très nombreux points de la parcelle sous forme de pied isolé possédant une fleur ou deux. Dans une prochaine étude il serait intéressant de prendre des photos au sol avec une perche en très haute résolution et de les géoréférencer, à l'aide de mires posées avant le vol du drone, afin de créer des échantillons d'entraînement et de validation très précis.

3.5 Comparaison drone et Sentinel-2 :

Visuellement les zones en jussie détectées par Sentinel-2, en faisant abstraction de la taille des pixels correspondent à celles issues de l'image drone. Seuls les herbiers de moins de 3 mètres ne sont pas détectés ou les zones comportant des surfaces différentes côte à côte avec peu de jussie, par exemple les bordures d'un chemin. Ce qui explique sur les nuages de points, pourquoi certaines zones ont une abondance issue du drone comprise entre 10-60% tandis que l'abondance issue de Sentinel-2 est inférieure à 10. D'autres facteurs peuvent expliquer la variabilité des nuages de points. Tout d'abord il ne faut pas oublier la différence de résolution des images utilisées : l'image drone est centimétrique tandis que Sentinel-2 a une résolution de 10m. A cela ce rajoute des erreurs liées au géoréférencement de l'image Sentinel-2, la précision de géolocalisation sur le long terme des images Sentinel-2 est de 11m à 95% (ESA, 2019) et à celui des images drones.

Il faut également prendre en compte l'aspect biologique et temporel. La meilleure correspondance d'abondance mesurée à Grand-Lieu correspond à une image du 16 juillet en réunissant les classes de jussie rase et de jussie dressée en fleur, alors que l'image drone a été prise le 8 juillet et que la conclusion en 4.2 montre que le démélangeage cartographie la jussie dressée en fleur. Il est possible de conclure que la jussie rase du 8 juillet s'est dressée et couverte de fleur (il est possible qu'il y ait eu une erreur de photo-interprétation de l'image drone et que la jussie rase était dressée mais sans fleur). Dans tous les cas l'apparition de fleur là où il n'y en avait pas à l'origine explique que l'image de mi-juillet est mieux corrélée à l'image drone que celle de début juillet.

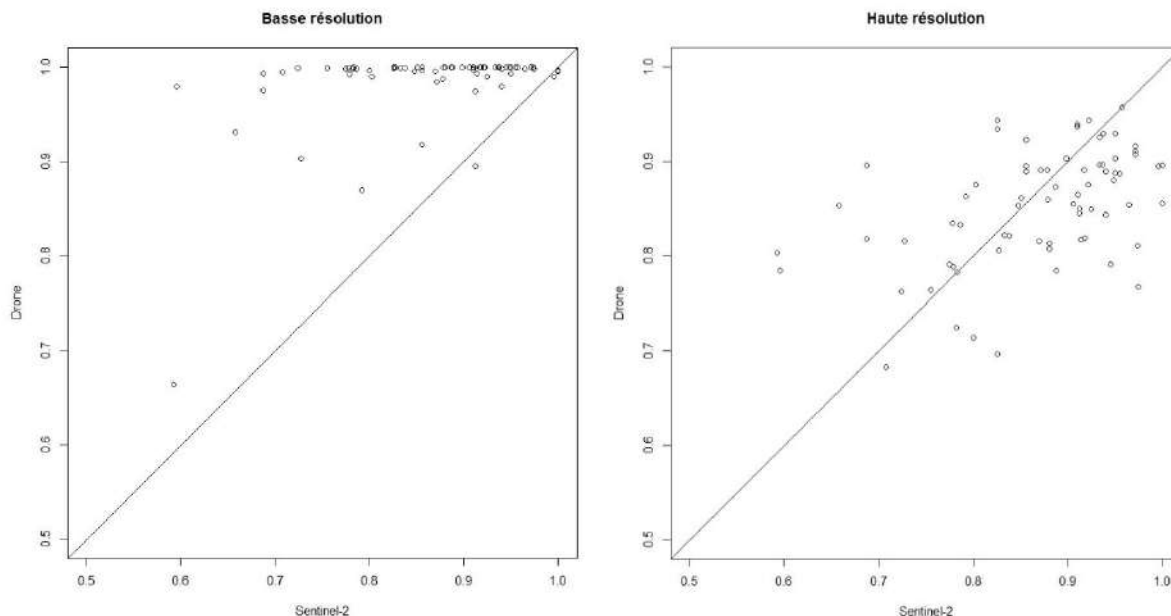


Figure 40 : Comparaison de l'abondance issue de Sentinel-2 et du drone à Goulaine (01/07/18) d'une zone composée strictement de fleur.

Différences liées aux deux résolutions d'images drone : la résolution fait varier le signal lié à la structure du couvert. Dans l'image en BR les ombres sont lissées et classées comme de la jussie, ce qui provoque une saturation alors que les ombres ne sont pas classées en jussie dans l'image HR. Elles sont classées dans une autre classe de végétaux avec une réflectance plus faible (Figure 35, Figure 40). Il est donc possible de faire une cartographie très précise de la jussie dressée en fleur et sans fleur en utilisant l'image à HR, mais les temps de calcul vont doubler. Il faut donc réfléchir à l'objectif de la classification, dans ce rapport afin de comparer au mieux les classifications entre Sentinel-2 et drone, il a été intéressant d'utiliser une image HR où il est possible de distinguer les différents signaux intégrés. Mais pour un gestionnaire, utiliser l'image en BR est plus intéressant. En effet le temps de calcul est plus rapide et le résultat plus proche de la réalité sur le terrain : l'ombre de jussie est classée en jussie et produit une classification plus homogène.

Différences liées aux jeux de spectres utilisés : à Goulaine pour une même date, un démixage avec un jeu de spectre différent montre des résultats qui ont globalement la même forme visuellement, mais avec de fortes variations d'abondance. Le jeu de spectre ASD terrain correspond bien mieux à la classification issue du drone. La différence dans ces bibliothèques spectrales, n'est pas la jussie mais surtout le nombre de spectres utilisés : 3 pour l'ASD terrain et 7 pour les spectres de Brière. La zone étudiée en Goulaine est majoritairement couverte de jussie, utiliser trop de spectres qui ne correspondent pas à la végétation sur place va créer de la confusion. A Grand-Lieu l'inverse se produit, les spectres ASD terrains vont produire des faux positifs sur toute la zone car ici il y a peu de jussie dans la zone étudiée, ce qui laisse place à d'autres végétations et donc à de l'hétérogénéité.

Suite à cette validation des résultats issus de Sentinel-2 par les classifications drone, il en résulte que l'utilisation de spectres qui ne sont pas obligatoirement prélevés dans les zones étudiées permet quand même de réaliser des cartographies prospectives de jussie. Une fois les sites identifiés, il est possible de réaliser de nouvelles cartographies en prenant en compte les spécificités locales.

La cartographie de la jussie à Grand-Lieu par Random Forest visuellement montre une sous-estimation de la jussie au niveau des fronts de colonisation. En effet il est difficile lors de la création des échantillons d'entraînement, de créer une classe de jussie de faible densité par photo-interprétation. Malgré tout, l'essentiel de la jussie est détectée.

3.6 Validation à grande échelle

Initialement la méthode de cartographie à grande échelle par démélangeage a été établie pour la prospection de jussie terrestre en prairie inondable. Mais au vu des premiers résultats il est tout de suite ressorti qu'il était également possible de cartographier la jussie qu'elle soit aquatique ou terrestre dans des étangs, des berges, des bras morts et des fossés. En effet la jussie aquatique si elle est suffisamment développée recouvre totalement l'eau et cache son signal (Figure 24). Cependant les fossés ne sont pas systématiquement détectés, il faut qu'ils soient suffisamment larges et bien situés au niveau des pixels dans l'image. Par exemple si un fossé de 5 mètres de large envahi de jussie, est à cheval entre deux pixels, il ne va représenter que 25% du signal dans un pixel. A cela peut se rajouter les arbres et leurs ombres et les différentes surfaces à proximité. Cet exemple est le cas de deux fossés rencontrés qui étaient plus ou moins envahis de jussie et n'ont pas été détectés. La même chose se produit pour la jussie au bord de berges. Ce problème est lié à la résolution des images Sentinel-2 et la taille des herbiers de jussie, si la jussie pousse en formant un fin herbier linéaire il ne sera pas possible de la détecter. Au contraire dans les prairies inondables, les étangs et les bras morts la jussie va pouvoir se développer sur de larges zones et être facilement détectable.

3.7 Gestion

Le fait de repérer avec beaucoup de précision les zones colonisées par la jussie, d'évaluer l'importance des populations et le stade phénologique permet d'affiner la gestion à la fois en termes de zones à confiner, d'importance des travaux d'arrachage (et donc de biomasse à récolter) nécessaires, et des périodes souhaitables d'intervention, par exemple si on veut éviter la floraison ou la fructification. Par ailleurs, les examens à différentes dates permettent de mettre en évidence l'assèchement, la gestion pratiquée (fauche, pâturage) sur chaque site. Des séries chronologiques interannuelles permettent également de visualiser l'extension spatiale (ou la régression) de la jussie. Pour gagner du temps, il est possible d'automatiser des tâches mais il faut toujours l'expertise humaine pour vérifier les résultats.

Conclusion

La méthode a été élaborée dans l'objectif de cartographier la jussie à large échelle. Les résultats obtenus et les campagnes de validation sur le terrain permettent de conclure à la pertinence de la méthode pour la prospection de site. A une échelle plus fine site par site, il existe des différences de structure de couvert de jussie et des variations temporelles importantes des stades végétatifs, ce qui génère des différences entre l'abondance obtenue par Sentinel-2 (en utilisant les spectres issus de Brière) et celle obtenue par le drone. Une approche en deux étapes serait alors judicieuse : tout d'abord cartographier à large échelle la jussie pour localiser des sites colonisés, et ensuite procéder à une analyse plus fine en effectuant des observations in-situ, comme l'acquisition de spectres de réflectance directement sur le site pour réaliser des démélangeages ou réaliser d'autres classifications par Random Forest par exemple.

La méthode de cartographie de la jussie étant maintenant opérationnelle, il serait possible d'aller plus loin en utilisant les informations issues de la télédétection pour contribuer au développement de modèles de croissance de la jussie, en compléments des paramètres descripteurs du milieu physique. Il serait également envisageable de prévoir les zones potentiellement colonisables par la jussie en s'appuyant sur l'emplacement actuel de la jussie, sur des paramètres hydrologiques, comme les zones inondables, sur la topographie et la bathymétrie fines (LIDAR) et sur les espèces végétales susceptibles de modifier l'extension de la jussie. La mise en place de validation de ces résultats pourrait se faire en faisant intervenir les gestionnaires de façon participative par le biais de cartes interactives sur internet.

Bibliographies :

- Athané, É., 2012. Utilisation de la télédétection pour la connaissance et la gestion d'une plante invasive : cas de la Jussie sur le bassin de la Vilaine. Rapport de stage. Agrocampus Ouest.
- Belgiu, M., Drăguț, L., 2016. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 114, 24–31.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Bradley, B., 2014. Remote detection of invasive plants: A review of spectral, textural and phenological approaches. *Biol. Invasions* 16. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0578-9>
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32.
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, C.J., Olshen, R.A., 1984. *Classification and Regression Trees*. Taylor & Francis.
- Cornillon, P.-A., Guyader, A., Husson, F., Jégou, N., Josse, J., Kloareg, M., Matzner-Løber, E., Rouviere, L., 2012. *Statistique avec R*. Presses Universitaires de Rennes.
- Dutartre, A., Haury, J., Dandelot, S., Coudreuse, J., Ruaux, B., Lambert, E., Le Goffe, P., Jo Menozzi, M., 2007. Les jussies : caractérisations des relations entre sites, populations et activités humaines. Implications pour la gestion. CEMAGREF.
- H. Gruninger, J., Ratkowski, A., L. Hoke, M., 2004. The sequential maximum angle convex cone (SMACC) endmember model. *Proc SPIE* 5425. <https://doi.org/10.1117/12.543794>
- Haralick, R., 1979. Haralick RM. Statistical and structural approaches to texture. *Proc IEEE* 67:786–804. *Proc. IEEE* 67, 786–804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>
- Haury, J., coll. R. Matrat, M. Bozec, E. Chesneau, J. Coudreuse, 2015. – Synthèse sur les formes terrestres de Jussie. Version 3. Agrocampus Ouest et INRA Rennes, DREAL Pays de la Loire, Comité Régional Plantes exotiques envahissantes. 54 p.
- Haury, J., Barloy, D., 2017. Jussies en forme terrestre : de la biologie et la génétique à la gestion. Rapport ONEMA.
- Haury, J.J., Damien, J.-P., 2014. De nouvelles mauvaises herbes en zones humides : les formes terrestres des Jussies invasives sur prairies. *Sci. Eaux Territ.* 15, 16–21.
- Kattenborn, T., Lopatin, J., Förster, M., Christian Braun, A., Ewald Fassnacht, F., 2019. UAV data as alternative to field sampling to map woody invasive species based on combined Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sens. Environ.* 227. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.025>
- Quintano, C., Fernandez-manso, A., Shimabukuro, Y., Pereira, G., 2012. Spectral unmixing. *Int. J. Remote Sens.* 33, 5307–5340. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.661095>
- Ruaux, B., 2008. Les plantes envahissantes des corridors fluviaux : traits biologiques, impacts de *Ludwigia peploides* et *L. grandiflora* en Loire moyenne et implications pour la gestion.
- Somers, B., Asner, G., Tits, L., Coppin, P., 2011. Endmember variability in Spectral Mixture Analysis: A review. *Remote Sens. Environ.* 115, 1603–1616. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.003>
- Sourisseau, A., 2008. Apport de la télédétection pour la cartographie des plantes aquatiques envahissantes. Application à la jussie dans le bassin versant de la Vilaine. Rapport de stage. Agrocampus Ouest.
- Szantoi, Z., Escobedo, F., Abd-Elrahman, A., Smith, S., Pearlstine, L., 2013. Analyzing fine-scale wetland composition using high resolution imagery and texture features. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 23, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.01.003>
- https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report, consulté en juillet 2019
- <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>, consulté en juillet 2019

Annexes :

Scripts réalisés

Python

Téléchargement automatique des images Sentinel-2 en fonction : dates, couverture nuageuse et site

Découpage et rangement selon les différents sites

Masque zone inondable

Convertisseur en 16 bits entier : gain de place et rapidité d'affichage des rasters

Fusion raster : fusionne les rasters le long de la Loire

Copie un jeu d'image multispectrale sur deux : trop d'image drones ont été prise (environ 1500*6 bandes), pour gagner en temps de prétraitement seul la moitié des fichiers est utilisé.

Inversion d'image raster : pour corriger problème lié au GPS embarqué dans le capteur du drone a enregistré des coordonnées fausses entraînant une effet miroir

Démélangeage spectral automatique multi site+ multi date (sélectionne les pixels où l'abondance de jussie est la plus forte)

Librairies utilisées : gdal, rasterio, numpy, pypstools, fiona

R

Arbre de décision

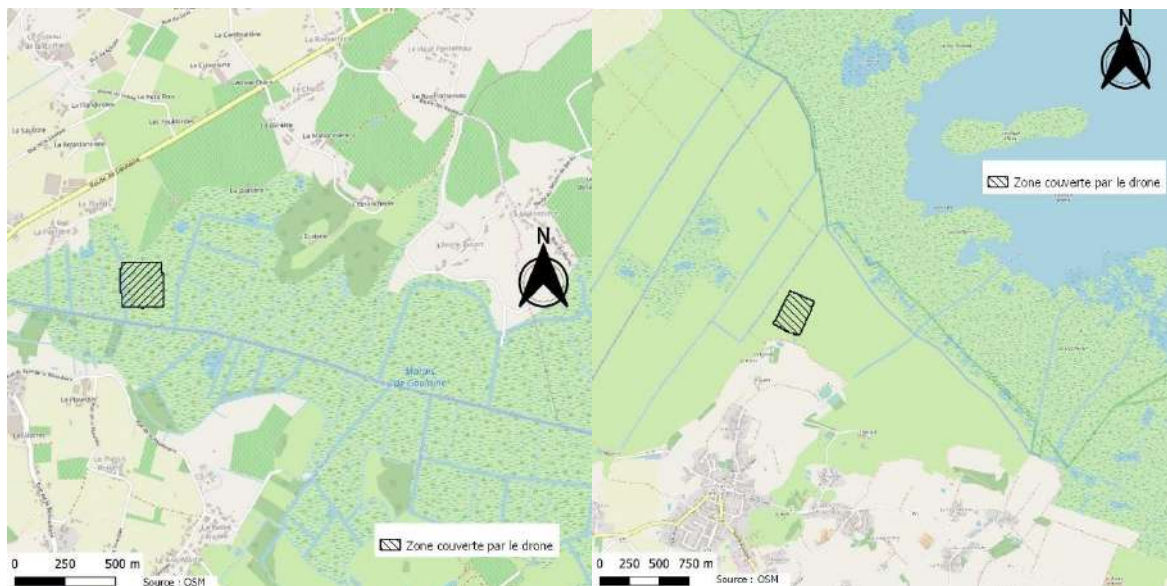
Analyse de données : comparaison drone et Sentinel-2

Librairies utilisées : ggplot, raster, Rstoolbox, rpart

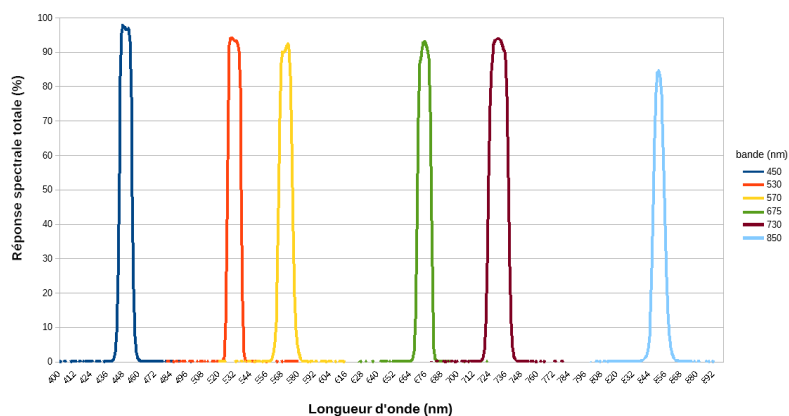
Annexe 1 : Scripts réalisés dans le cadre de ce rapport.

Jussie				
	Dressée (à différentes hauteurs)	En Fleur	Fleur isolée	Rase
Grandiflora				
Peploides	Dressée	Rase		
Mélanges				
Jussie + autres plantes dans différentes proportions				
Jussie + eau				
Plantes des zones inondables				
Bidens tripartite		Joncs		
Renoué poivre d'eau		Renoncule		
Liseron es haies		Potentille des oies		
Crassule		Myosotis		
Paspale		Menthe		
Grande Glycérie		Roseaux (vrai et faux)		
		Poacées		

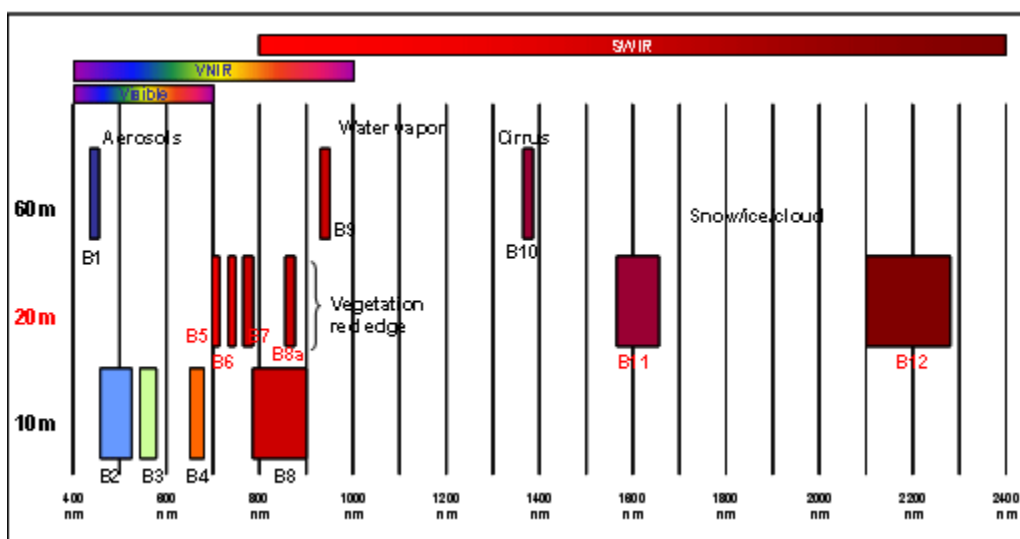
Annexe 2 : Liste des spectres prélevés pendant la campagne terrain 2019.



Annexe 3 : Zone survolée par le drone équipé du capteur AIRPHEN. A gauche le marais de Goulaine, à droite les prairies inondables de Saint Lumine de Coutais.



Annexe 4 : Résolution spectrale de la caméra AIRPHEN.



Annexe 5 : Résolution spectrale du capteur embarqué dans les satellites Sentinel-2

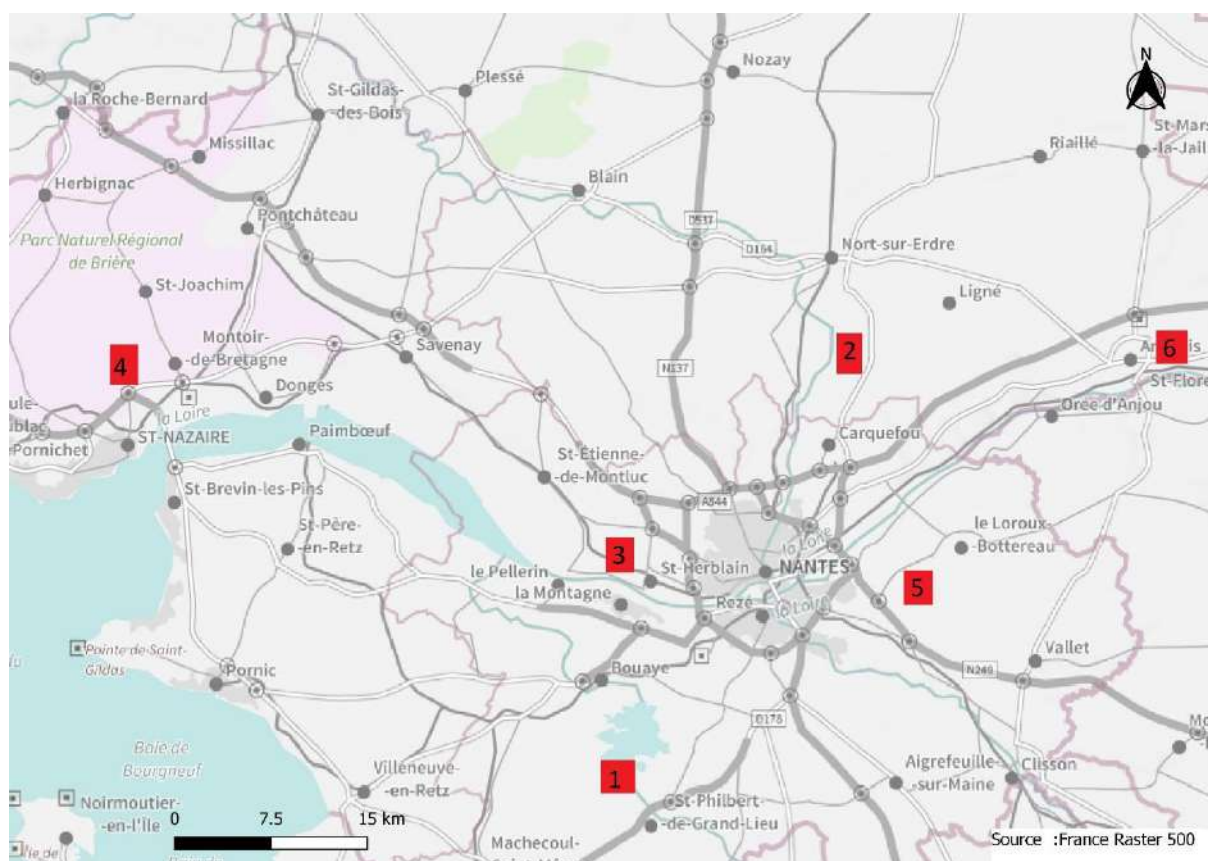
Tuile	2016	2017	2018	2019
T30TWT	11-mars	21-juin	26-févr	26-févr
	16-juil	16-juil	17-avr	12-avr
	13-nov	28-nov	21-juin	19-avr
			01-juil	24-avr
			16-juil	12-mai
			05-août	24-mai
			18-nov	01-juin
				18-juin
				06-juil
				16-juil
T30TXT	16-juil	21-juin	17-janv	26-févr
	30-nov	13-nov	13-févr	19-avr
			23-juin	01-juin
			01-juil	26-juin
			08-juil	
			16-juil	
			02-août	
			18-nov	
T30TYT			25-févr	13-févr
			23-juin	23-févr
			14-juil	25-juin
			15-juil	28-juin
			02-août	
			15-nov	
T31TCN			25-févr	25-juin
			25-juil	28-juin
			04-août	
			15-nov	

Annexe 6 : Liste des images Sentinel-2 téléchargées

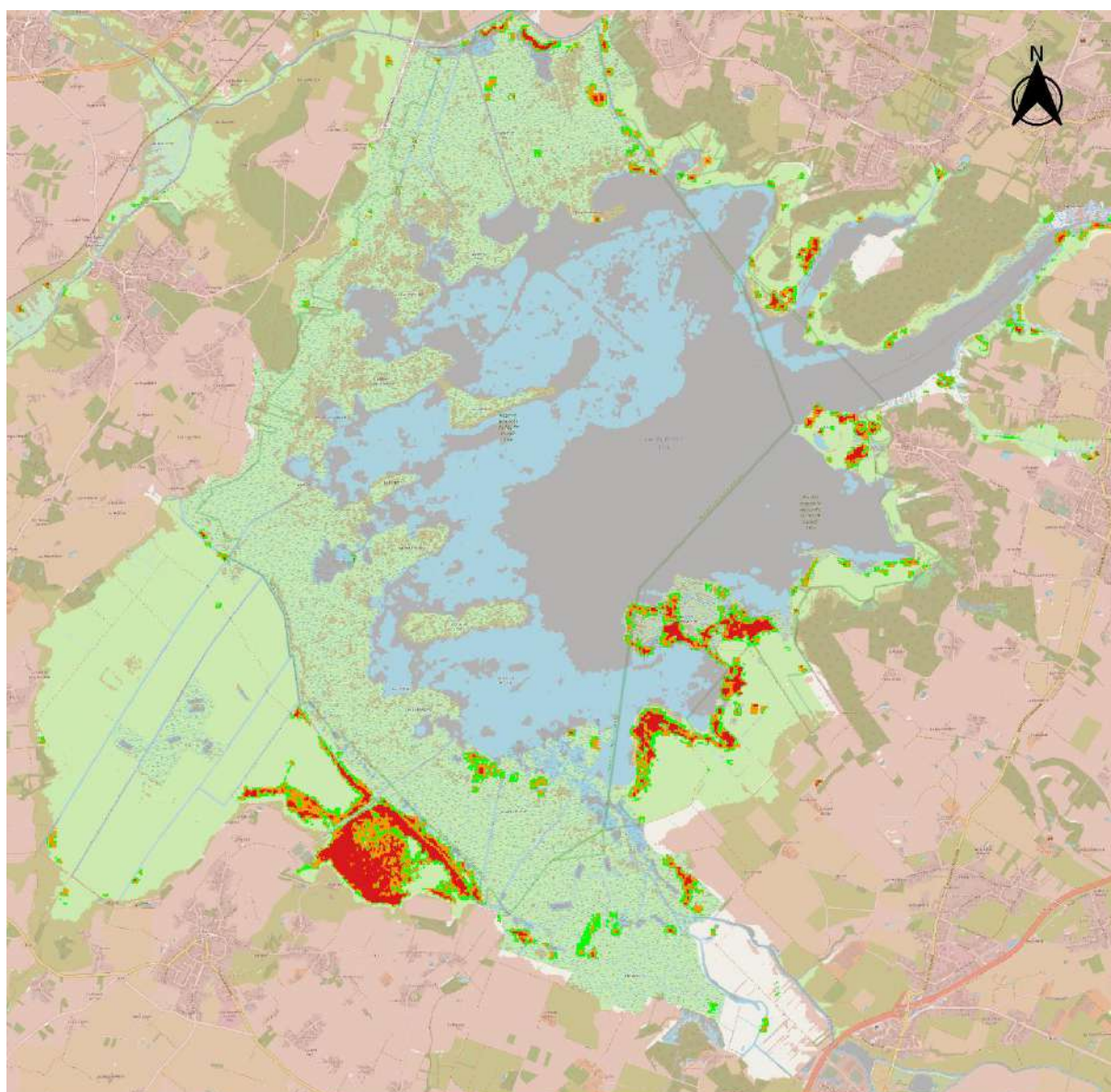
Blé tendre	Fourrage	Tournesol	Vignes	Vergers
Maïs grain et ensilage	Estives et landes	Autres oléagineux	Fruits à coque	Colza
Orge	Prairies permanentes	Protéagineux	Oliviers	Gel
Prairies temporaires	Riz	Canne à sucre	Autres céréales	Divers
Légumes ou fleurs	Légumineuses à grains	Autres cultures industrielles	Plantes à fibres	

Annexe 7 : Groupe de culture présent dans le RPG

ATLAS des principales zones de jussies en Loire Atlantique :



- 1 : Lac de Grand-Lieu
- 2 : Marais de Mazerolles
- 3 : Sud Lac de Beaulieu, Couëron
- 4 : Marais de Brière
- 5 : Marais de Goulaine
- 6 : Marais de Grée, Ancenis



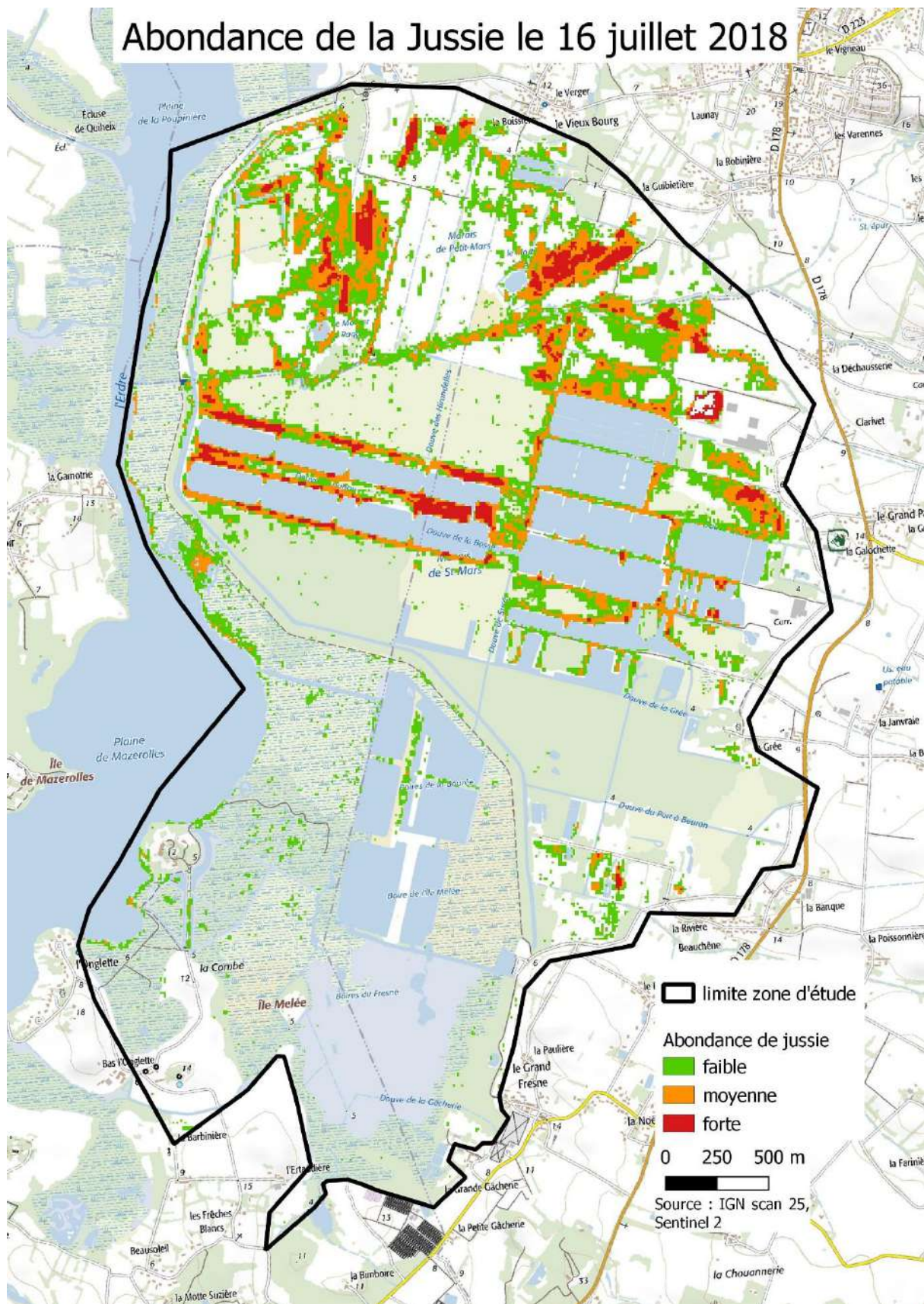
Abondance de jussie le 16 Juillet 2018

Abondance
 faible
 moyenne
 forte

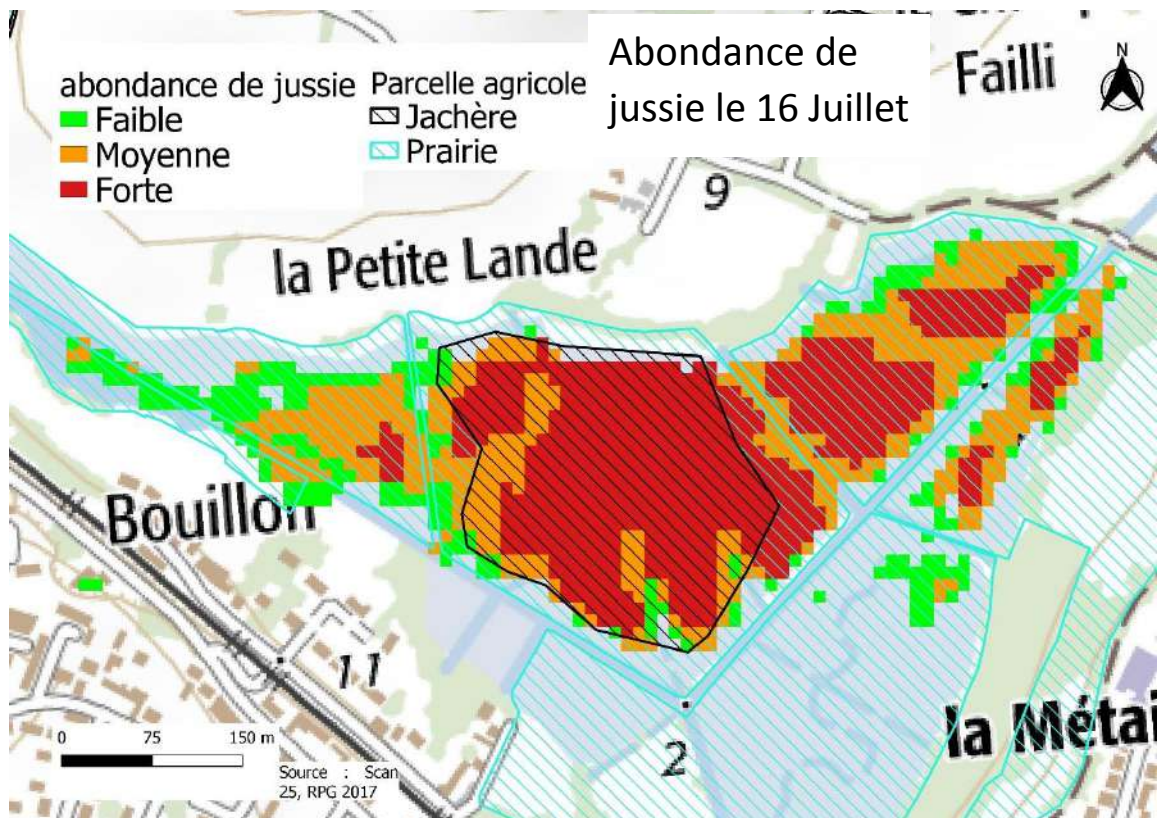
Zone non amphibie

Source : Sentinel 2, OSM

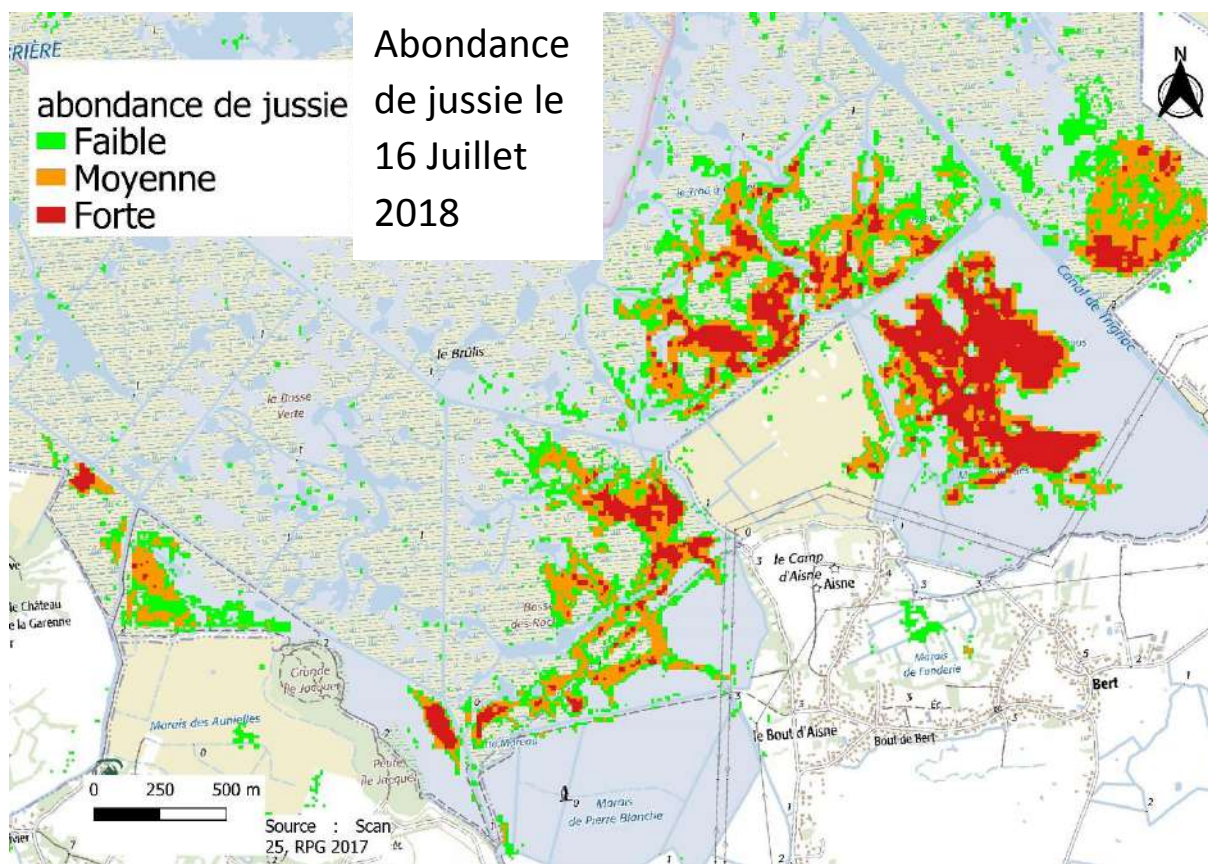
1 Lac de Grand-Lieu



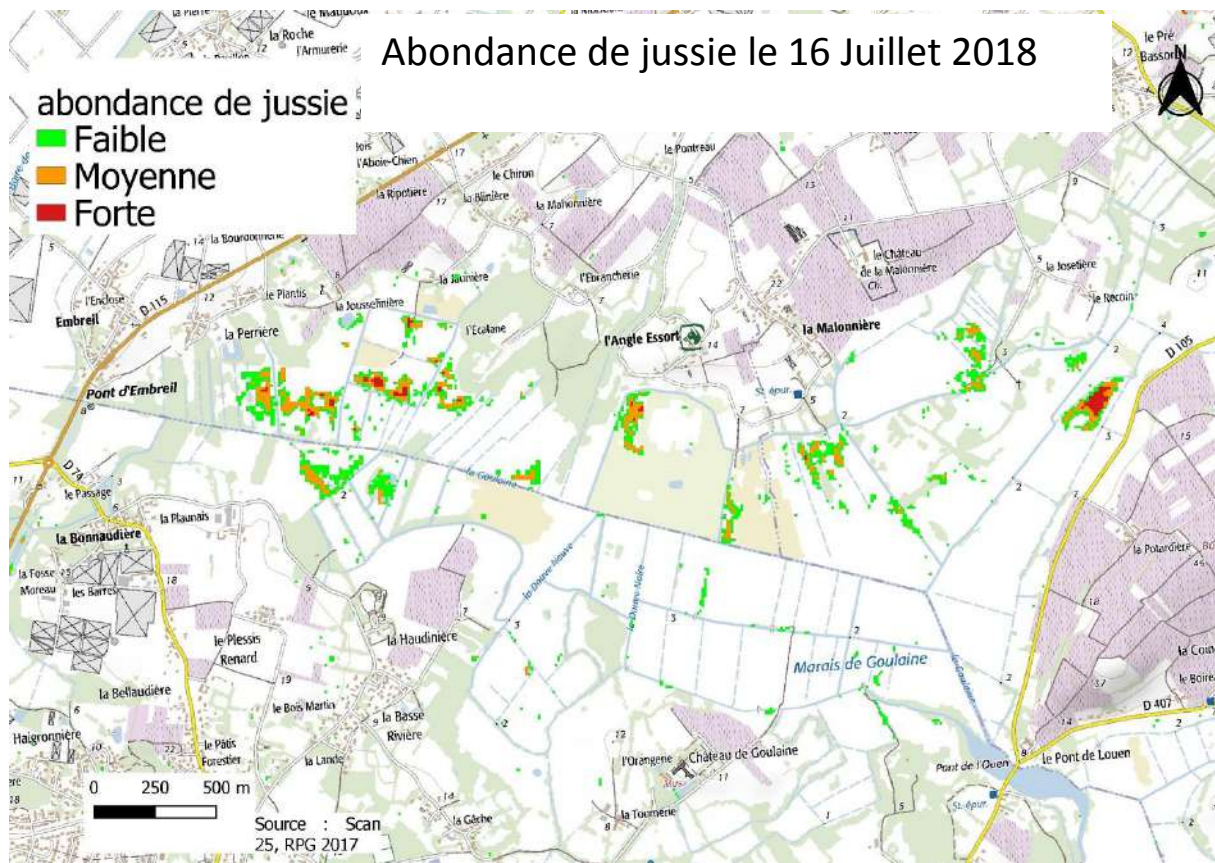
2 Marais de Mazerolles



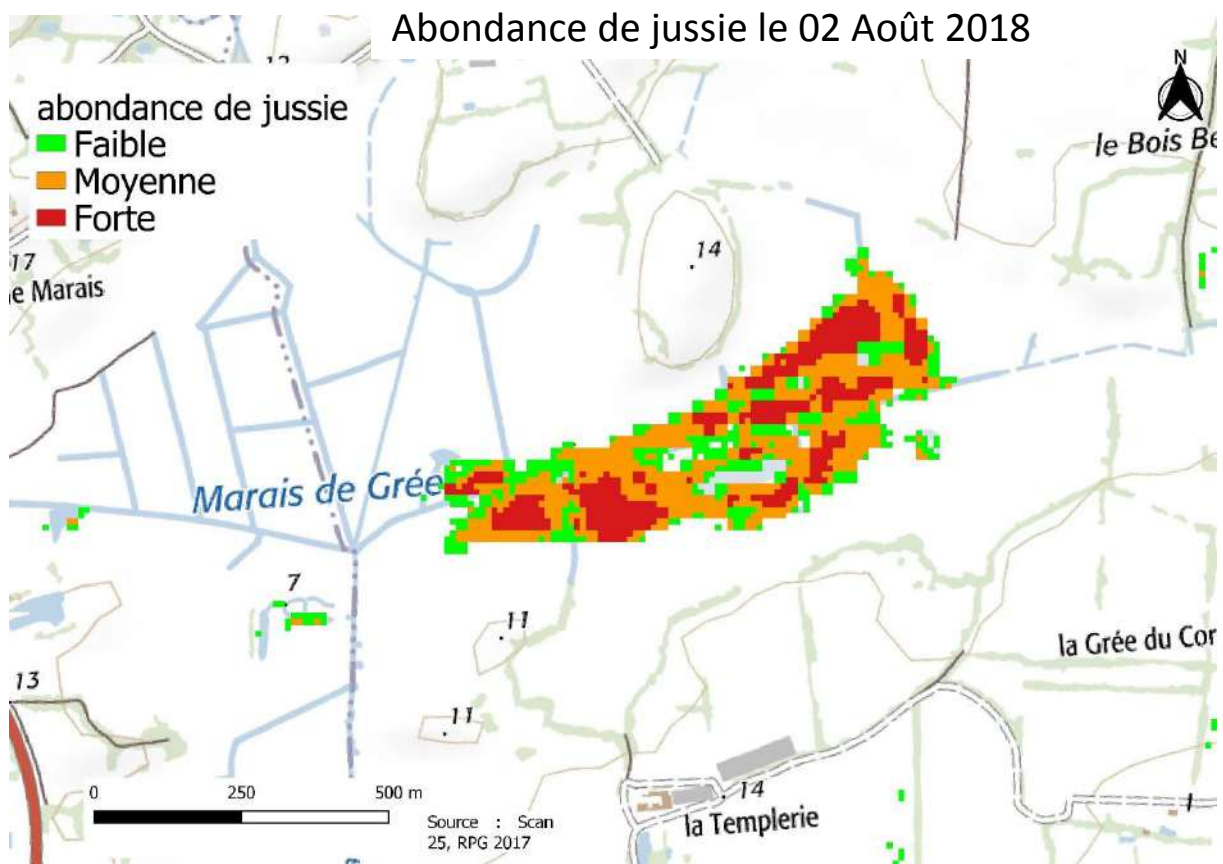
3 : Sud Lac de Beaulieu, Couëron



4 : Marais de Brière



5 : Marais de Goulaine



6 : Marais de Grée, Ancenis

Résumé :

Jussie, télédétection, Sentinel-2, démélangeage spectral, drone

A l'échelle mondiale les espèces exotiques envahissantes sont une menace pour la biodiversité. Dans le bassin versant de la Loire, les jussies (*Ludwigia grandiflora* et *Ludwigia peploides*) font partie des espèces exotiques envahissantes les plus problématiques. Dans le cadre d'un programme européen FEDER, visant à étudier les formes terrestres de jussie en prairie inondable, une méthode de cartographie par télédétection a été développée pour améliorer la connaissance de la distribution de la jussie. L'objectif est ici de réussir à cartographier la jussie en mélange avec d'autres végétaux dans des prairies inondables par démélangeage spectral à partir d'images Sentinel-2. La méthode a été validée par des observations au sol dans le bassin versant de la Loire et l'utilisation d'un capteur multispectral embarqué dans un drone. Les images drone de par leurs résolutions centimétriques ont permis de produire une cartographie de la jussie très fine à l'échelle locale. A plus large échelle, il est ressorti que les résultats du démélangeage sont corrects et corrélés au stade de développement de la jussie.

Water primrose, remote sensing, Sentinel-2, spectral unmixing, UAV

Globally, invasive alien species are a threat to biodiversity. In the Loire drainage basin, water primrose (*Ludwigia grandiflora* and *Ludwigia peploides*) is one of the most problematic invasive alien species. As part of a European FEDER programme to study the terrestrial forms of water primrose in floodplains, a remote sensing mapping method has been developed to improve knowledge of the distribution of water primrose. The objective here is to successfully map the water primrose with other plants in floodplains by spectral unmixing of Sentinel-2 images. The method was validated by ground observations in the Loire drainage basin area and the use of a multispectral sensor embedded in a drone. The drone images, with their centimetric resolution, have made it possible to produce a very fine map of the water primrose at the local scale. On a larger scale, it was found that the results of the spectral unmixing are correct and correlated with the stage of development of the water primrose.