
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

**Caractériser l'évolution des communautés
végétales au sein du lit de la Loire depuis 1995
sur la base de données de télédétection LiDAR
topobathymétrique**

UMR 7324 CITERES, équipe DATE

35 All. Ferdinand de Lesseps, 37200 Tours



Tuteur entreprise :

Alex ANDREAULT, doctorant

Pierrick LOUET,

Étudiant IMA

Tuteur académique :

Stéphane RODRIGUES, enseignant-chercheur

2021-202

Remerciements

Dans un premier temps, je tiens à remercier vivement mon tuteur de stage, Alex Andréault. Tes conseils, ta disponibilité, ton écoute et ta patience m'ont énormément aidé et fait progresser à toutes les échéances de ce stage. Un grand merci à mon tuteur pédagogique, Stéphane Rodrigues, pour ses précieux conseils à l'occasion des différents points organisés.

Je remercie également l'intelligence des patrimoines (IPAT) pour son financement relatif à la production de données LiDAR topo-bathymétrique, disponibles depuis 2019.

Je n'oublie pas mes collègues doctorants Corentin, Igor, Olivier et une nouvelle fois Alex dont le regard extérieur à mon travail et les discussions, en rapport ou non avec mon stage, m'ont été grandement bénéfique. Petite dédicace à Naruto jouant au ping en écoutant Hoch Tirol tout en buvant du lait de coco !

Enfin, je tiens à remercier mon entourage pour leur soutien et de m'avoir remotivé lorsque j'en avais besoin.

*„Mit Konis Hupen ist Stimmung garantiert
Weil bei uns Show und Spaß
Ganz groß geschrieben wird,,*

Table des matières

1. Présentation de l'organisme	5
2. Introduction	6
3. Matériel et méthodes	8
3.1 La Loire et sites d'études	10
3.1.1 Le fleuve Loire	10
3.1.2 Site d'études	11
3.2 Pré-traitement de l'information	14
3.2.1 Filtrage des points artefacts	14
3.2.2 Normalisation des hauteurs	15
3.3 Traitement de l'information	16
3.3.1 Métriques basées sur la détection de maxima locaux : hauteur et superficie de couronnes	16
3.3.2 Métrique basée sur l'intensité du signal : le GNDVI	17
3.3.3 Métrique basée sur la classification des points de sol et de végétation : le LPI	18
3.3.4 Représentation statistique des métriques	19
4. Résultats	20
4.1 Morphologie de végétation : hauteurs et couronnes	20
4.1.1 Intra site	20
4.2 Taux de chlorophylle : le GNDVI	23
4.2.1 Intra site	23
4.2.2 Inter site	24
4.3 Densité de canopée : le LPI	25
4.3.1 Intra site	25
4.3.2 Inter site	26
4.4 Corrélation des métriques	27
5. Discussion	28
5.1 Caractérisation de la végétation ligneuse alluviale	28
5.1.1 Morphologie de la végétation ligneuse alluviale	28
5.1.2 Vigueur de la végétation ligneuse alluviale	29
5.2 Comprendre la structuration des communautés végétales à l'aide du contexte morphodynamique d'une île	32
5.2.1 Configuration topographique des sites	32
5.2.2 Processus hydrauliques	34

5.3	Potentielle influence de l'incision sur les communautés végétales ligériennes	35
6.	Conclusion et perspectives :	37
7.	Bibliographie :	38

1. Présentation de l'organisme

L'unité mixte de recherche CITERES (Cités, TERRitoires, Environnement et Sociétés) a été créée en 2004 par le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et l'université de Tours. Les thématiques de recherches explorent des enjeux patrimoniaux, territoriaux, sociaux et environnementaux. Cette dernière thématique est abordée par l'une des équipes de l'unité mixte de recherche, à savoir l'équipe DATE (Dynamique et Action Territoriales et Environnementales). Trois axes de recherches structurent cette équipe, le premier abordant les risques vulnérabilités et résilience des territoires, le deuxième les actions intentionnelles territorialisantes, et le dernier les dynamiques environnementales, enjeux et paysages. Au sein de ce dernier, l'écologie et la restauration de la Loire et des zones humides sont étudiées, et c'est dans cette thématique générale que s'inscrit ce stage.

2. Introduction

Depuis près d'une soixantaine d'années, il est possible d'observer et de déterminer des caractéristiques d'objets à partir des rayonnements qu'ils émettent ou réfléchissent. Ces techniques, rassemblées sous le terme commun de « télédétection », ont considérablement modifié les échelles d'observation, et y trouvent de nombreuses applications : analyse des cultures (en agriculture), cartographie des ressources naturelles, gestion des catastrophes naturelles, ou encore planification du trafic routier (Wang *et al.*, 2022).

Dans le champ de l'écologie et de la biodiversité, plusieurs type de détecteurs peuvent être utilisés, à savoir des capteurs à haute résolution spatiale (produisant de manière indirecte des pixels comportant un côté inférieur à 10 m), hyperspectraux, thermiques, et enfin le LiDAR (Light Detection and Ranging) (Wang *et al.*, 2010). Cette dernière technologie, employée dans un premier temps dans le domaine spatial (Flood, 2001) et étendue ensuite au domaine de la cartographie dans les années 1980 (Wozencraft *et* Millar, 2005), fonctionne sur un principe d'émission et de réception d'un signal lumineux. Le signal est renvoyé par un point d'impact, contenant de multiples d'informations (coordonnées, intensité renvoyée...), et le produit final consiste en un nuage de point en trois dimensions contenant l'ensemble de ces points d'impacts (Mallet *et* Bretar, 2009).

La détection de la végétation, et plus spécifiquement la végétation rivulaire (ensemble de la végétation interagissant avec les systèmes fluviaux) est rendue possible par cette technologie. Comme évoqué en définition, cette végétation va constituer l'une des variables de contrôle influençant le débit liquide et solide à l'échelle du bassin versant (Wintenberger, 2015). En effet, selon les conditions de température et de précipitation, elle peut retenir ou à l'inverse favoriser l'apport de sédiment (Baartman *et al.*, 2012), ainsi que protéger du ruissellement (si une couverture végétale est présente). A l'échelle du lit mineur et de la plaine alluviale, certaines espèces de végétation ligneuse peuvent agir sur la protection des berges, notamment le saule (Hupp, 1992), ainsi que sur la régulation des inondations. Enfin, la végétation rivulaire a un impact sur le plan physico-chimique, notamment en filtrant les intrants agricoles, et en stockant les nutriments provenant du lit mineur en période de crues (pour les relarguer) (Tabacchi *et al.*, 2000).

Cependant, un certain nombre de contraintes sont exercées sur la végétation rivulaire, pour la plupart anthropiques. A l'échelle de la plaine alluviale, la modification des usages du sol (urbanisation, déforestation) et la régulation des débits a entraîné la disparition et/ou la dégradation de 90% des ces zones rivulaires, conduisant à une modification drastique du couvert végétal (Laslier *et al.*, 2019). A l'échelle du lit mineur, l'incision du cours d'eau (phénomène d'enfoncement du fond du lit) est provoquée majoritairement par l'extraction de granulats en grande quantité entre 1910 et 1980 (Gasowski, 1994) et par la construction d'épis de navigation pour l'auto-entretien du chenal principal (Latapie, 2011). Ces pratiques ont provoqué un abaissement de la ligne d'eau qui s'est traduit par plusieurs phénomènes dont une déconnexion croissante des annexes hydrauliques qui en réponse se végétalisent. Cette végétalisation s'accompagne d'une diminution de la capacité d'écoulement du cours d'eau et donc à une surélévation des lignes d'eau de crue, ainsi que d'une banalisation écologique par l'émergence d'espèces collinéennes et/ou allochtones, ou bien par le fait de la disparition de certaines espèces affectées par le stress hydrique (Cornier, 2002).

Ainsi, l'étude de la végétation rivulaire comporte de nombreux enjeux. La technologie LiDAR, permettant de relever une grande quantité d'information en trois dimensions avec une grande précision (<0.1m) (Mallet *et* Bretar, 2009 ; Kada *et* McKinley, 2009), peut conduire à l'identification et

la caractérisation simplifiée de ces zones à enjeux. L'étude *in situ* de ces sites nécessite des ressources humaines et temporelles importantes et n'est pas en capacité d'explorer de secteurs à superficie élevée (Parrish *et al.*, 2016), et la technologie LiDAR est en capacité de combler cette contrainte. Cependant, l'étendue des métriques de végétation qui peuvent être extraites des données LiDAR est vaste. C'est pourquoi il convient de mettre en place une démarche méthodologique permettant d'identifier des métriques cibles, qui *in fine* permettront d'établir un lien avec d'autres caractéristiques du milieu étudié (dynamique hydraulique, géomorphologie...). Une des perspectives de ce travail consiste en l'évaluation de l'impact du phénomène d'incision à l'échelle des sites choisis. Ainsi, ce stage s'attachera à répondre à la question suivante : comment caractériser une évolution des communautés de végétation ligneuse alluviale à l'aide d'un LiDAR topo-bathymétrique dans un contexte d'incision ? La possibilité de caractériser de la végétation ligneuse alluviale sous plusieurs angles (morphologie ou encore état sanitaire) à partir d'un seul levé LiDAR topo-bathymétrique constituera l'hypothèse de travail.

3. Matériel et méthodes

La technologie LiDAR aéroportée repose sur la dualité émission-réception de signaux lumineux. L'acquisition des données va consister en la mesure du temps mis par le laser pour atteindre une surface, et revenir à l'émetteur. Les LiDAR actuels sont dans la capacité de capter plusieurs retours pour une seule émission lumineuse. Dans le cadre d'une détection topobathymétrique, le premier écho correspond souvent au sommet de l'objet (toit d'un bâtiment, cime d'un arbre...), et le dernier au sol, bien qu'une analyse des données doive être effectuée pour le savoir (Lague et Feldmann, 2020). Ainsi, la différence de temps entre ces deux échos renseigne directement la distance séparant les deux échos, et donc la taille des objets présents (connaissant la célérité de la lumière). De plus, des informations bathymétriques (mesure de profondeurs de masses d'eau) peuvent être acquises. Cela est rendu possible par l'utilisation simultanée de deux sources lumineuses, l'une verte (532 nm) et l'autre infrarouge (1064 nm) (figure 1). La première possède la propriété de pénétrer et de se propager au travers d'une masse d'eau, tandis que la seconde en est réfléchiée à la surface. Ainsi, la différence entre les deux échos de ces deux sources lumineuses renseigne la profondeur de la masse d'eau étudiée (Mallet et Bretar, 2009). Le principal avantage de la technologie LiDAR par rapport aux autres capteurs réside dans le fait qu'elle est active, c'est-à-dire qu'elle est indépendante d'une source lumineuse, comme le soleil l'est pour des technologies comme la télédétection par satellite par exemple (Parrish *et al.*, 2016).

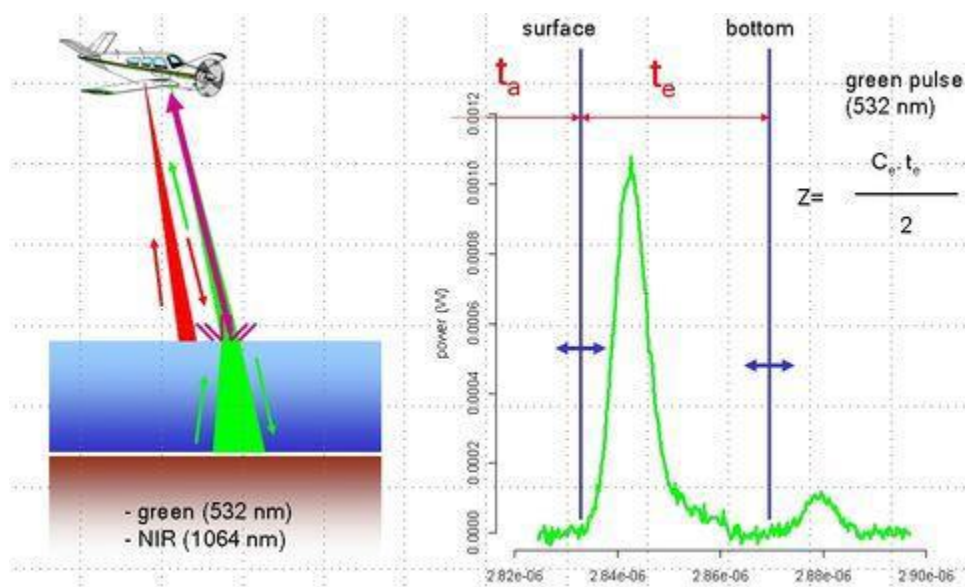


Figure 1: principe de fonctionnement d'un LiDAR à double faisceau

Ainsi, chaque élément provoquant un retour du signal LiDAR est matérialisé sous forme de point dont la position (coordonnées X, Y, Z) est déterminée grâce aux équations initialement utilisées pour les radars (Mallet et Bretar, 2009) (Eq.1) :

$$d = \frac{c \times t}{2}$$

Eq. 1 : position d'un point d'acquisition LiDAR

Où d représente la distance entre le dispositif émetteur et le sol, c la célérité de la lumière (299 792 458 m/s) et t le temps de vol aller-retour du signal lumineux.

Chaque point associé à une position permet une visualisation d'un site d'intérêt au travers d'un nuage de points en trois dimensions. Chaque point contient plusieurs informations, comme sa position, l'intensité réfléchie, son niveau de retour, l'angle de captation, et sont ainsi sujets à de nombreuses manipulations en termes de traitement.

Dans le cadre d'une caractérisation de la végétation sur la base de données LiDAR topobathymétrique, de très nombreuses méthodes existent, dû à la variété des objectifs d'étude et de contexte (forestier, rivulaire...). Néanmoins, parmi les références étudiées, une homogénéité des étapes de travail est conservée (figure 2). Cette étude a mobilisé les deux premières étapes, à savoir le pré-traitement des données et le traitement de ces dernières. La phase de validation, consistant à établir le degré de liaison entre les résultats obtenus grâce aux traitements et des données de terrain, n'a pas été effectuée par manque de temps. Néanmoins, la littérature indique une certaine efficacité du dispositif LiDAR topobathymétrique lorsqu'il s'agit de décrire des systèmes, parfois complexes (Lague et Feldmann, 2020 ; Tonina *et al.*, 2019 ; Corti Meneses *et al.* 2017). Toutefois, de nombreuses campagnes de terrain ont pu être menées, produisant des données pouvant être mobilisée par la suite (projet Biomareau).

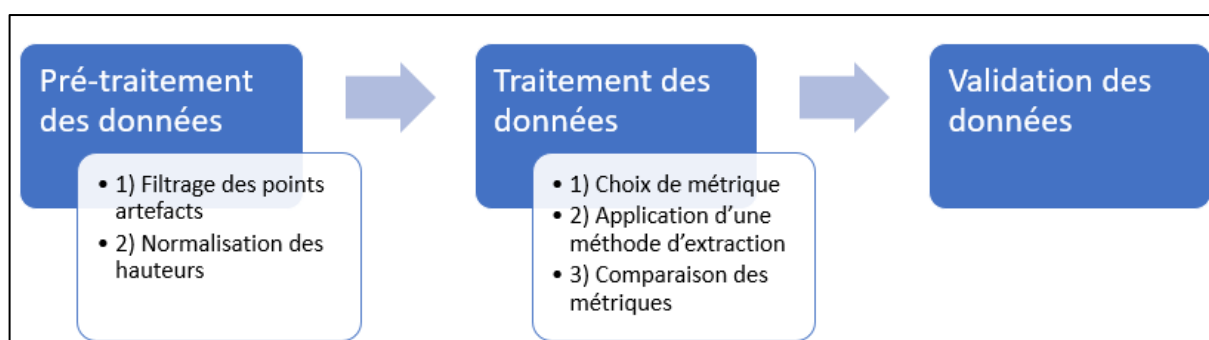


Figure 2: workflow relatif au processus du traitement de l'information LiDAR

L'ensemble des analyses de cette étude se feront sur la base de données LiDAR topobathymétrique acquises entre 2019 et 2021 sur le lit de la Loire compris entre Nevers (58) et Nantes (44). Le LiDAR topobathymétrique étant qualifié de bispectral, deux jeux de données sont issus de l'acquisition : le premier correspond au canal infrarouge C2 (1064 nm), et le deuxième au canal vert C3 (532 nm).

3.1 La Loire et sites d'études

3.1.1 Le fleuve Loire

3.1.1.1 Contexte général

La Loire, plus long fleuve français, prend sa source au Mont Gerbier de Jonc (département 07), parcourt 1012 km puis se jette dans l'Océan Atlantique à St Nazaire (département 44) en drainant un bassin versant de 117 000 km². Le régime hydrologique de la Loire est pluvial-océanique. Les précipitations proviennent soit de l'Océan Atlantique (principalement en hiver) soit par le biais épisodes pluvieux violents se produisant en amont dans les régions montagneuses (principalement au printemps) (Moatar-Bertrand *et* Dupont, 2016).

La Loire peut être sectorisée de plusieurs manières, dépendant de l'objectif de l'étude : selon des spécificités lithologiques, morphologiques ou encore hydrauliques (Babonaux, 1971). Dans le cadre de cette étude, la Loire va être découpée selon la manière suivante: la Loire amont (de la source au Bec d'Allier, département 18), la Loire moyenne (du bec d'Allier au bec de Maine, département 49), et enfin la Loire aval (du bec de Maine à St Nazaire) (Latapie, 2011). Le cadre de cette étude se limitera à la Loire moyenne, ce secteur étant caractérisé par l'apparition de digues et par une combinaison de plusieurs styles fluviaux (figure 3), à savoir : anabranchement après la confluence avec l'Allier, rectiligne à l'aval de Briare (45), méandrique en aval d'Orléans (45), à « chenal unique » jusqu'à Tours (37), puis à nouveau de type anabranchement à partir de la confluence avec le Cher (Rodrigues, 2004) (figure 3). Les sédiments en Loire moyenne sont principalement composés de sables grossiers et de graviers, avec un d₅₀ (médiane des particules du lit) variant de 4,6 mm à 0,63 mm entre le bec d'Allier et Montjean-sur-Loire (Latapie, 2011).



Figure 3: exemples de styles fluviaux

a) rivière rectiligne (Isère, France), b) rivière à méandre (Allier, France), c) rivière en tresses (Tagliamento, Italie), d) rivière à chenaux multiples (Bella Coola, Canada).

3.1.1.2 Historique de l'aménagement de la Loire et problématiques associées

La Loire a été sujette à des activités anthropiques, comme la construction de digues permettant la protection des valls des crues, les épis visant à améliorer la navigabilité des cours d'eau lors des périodes d'étiage, ou encore les extractions massives de granulats désormais interdite (Latapie, 2011). Une des conséquences de ces activités est l'incision de son chenal principal, engendrant plusieurs effets secondaires : déstabilisation d'ouvrages (e.q. Pont Wilson à Tours, 1978), abaissement de la ligne d'eau et de la nappe alluviale permettant une végétalisation plus prononcée du milieu, ou encore la déconnexion des annexes hydrauliques (Claude, 2012).

3.1.1.3 Végétation ligneuse de la Loire

La végétation ligneuse en Loire moyenne constituant le cœur de l'étude, il convient de définir quelques termes associés à ce sujet et employés dans ce rapport. Tout d'abord, les forêts de bois tendres sont des communautés soumises aux régimes de perturbations par les crues qui les renouvellent fréquemment. Elles sont représentées principalement par la famille des Salicacées (saules et peupliers) (Wintenberger, 2015), et localisées dans le lit mineur de la Loire (partie du fleuve qui ne s'assèche jamais (Bacchi, 2000)). Les forêts de bois durs quant à elles se trouvent dans des secteurs topographiquement plus élevés, et sont constituées de Frênaies-ormes et de Chênaies (Rodrigues, 2004).

3.1.2 Site d'études

3.1.2.1 Site de Mareau-aux-Prés

Le site de Mareau-aux-Prés est un complexe d'îles situé sur la Loire, se trouvant à une dizaine de kilomètres en aval d'Orléans (département 45) et à environ un kilomètre en aval de la confluence entre la Loire et le Loiret. Plusieurs îles composent ce complexe, issues d'une contraction, d'un élargissement et à nouveau d'une contraction du chenal principal, réduisant la capacité de transport sédimentaire et favorisant l'apparition d'îles (Wintenberger, 2011). Seulement l'une d'entre elles va être étudiée au cours de ce stage, subdivisée en trois îlots distincts (A, B et C) dont les principales caractéristiques morphologiques apparaissent dans le tableau ci-dessous. L'île est bordée par le chenal principal au nord, puis par un chenal secondaire au sud, et les îlots sont séparés entre eux par des chenaux de recoupement (figure 5). Voici les principales caractéristiques du site de Mareau-aux-Prés, la superficie et le périmètre ayant été obtenue avec Google Earth, et l'altitude par SIG (Système d'Information Géographique) (tableau 1) :

Tableau 1: Principales caractéristiques du site de Mareau-aux-Prés : superficie, périmètre, altitude

	Superficie (m ²)	Périmètre (m)	Altitude moyenne (mNGF)
Ile	34 814	767	85,49
Ilot A	7454,6	363,5	86,53
Ilot B	6967	358	85,05
Ilot C	11 964	480,5	85,72

Concernant les caractéristiques de végétation de ce site, elles sont homogènes, à savoir que sur l'ensemble des îlots l'unique communauté de végétation représentée est une communauté de type

saulaies à *Salix alba* (autrement dit des communautés à bois tendre (Service Loire Bassin Loire Bretagne – DREAL Centre Val de Loire). A noter une présence ponctuelle d'érable negundo (*Acer Negundo*) (Martin *et al.*, 2020).

3.1.2.2 Site de Bréhémont

Le site de Bréhémont est un complexe d'îles se situant dans le département d'Indre-et-Loire (37) à 11 km à l'aval de la confluence entre la Loire et le Cher. De la même manière que pour le site de Mareau-aux-Prés, une subdivision en îlot a été opérée (D, E et F) selon un critère de séparation basée sur les chenaux secondaires, qui sont au nombre de trois, le premier se situant le long de l'îlot F, le second entre ce dernier et l'îlot E, et le troisième commun aux trois entités morphologiques (Rodrigues, 2004) (figure 5).

Le complexe d'îles de Bréhémont se situant à proximité immédiate de la rive gauche, le chenal principal s'écoule entre la rive droite. Les principales caractéristiques morphologiques (superficie, périmètre et altitude) des entités constituant le site d'étude de Bréhémont sont recensées dans le tableau 2 :

Tableau 2: principales caractéristiques du site de Bréhémont : superficie, périmètre, altitude

	Superficie (m ²)	Périmètre (m)	Altitude (mNGF)
Ile	578 687	3690	36,78
Ilot D	37 593,5	1087	36,87
Ilot E	60 769	1353	36,85
Ilot F	378 099	3712	36,62

Les peuplements de végétation se montrent beaucoup plus diversifiés que sur le site de Mareau-aux-Prés. En effet, des boisements denses occupés par les genres *Quercus*, *Acer*, *Ulmus*, *Salix*, *Fraxinus* et *Populus* sont présents (Rodrigues, 2004), ce qui montrent une mixité entre des forêt de bois tendre et de bois durs (figure 4), dont voici le recouvrement surfacique :

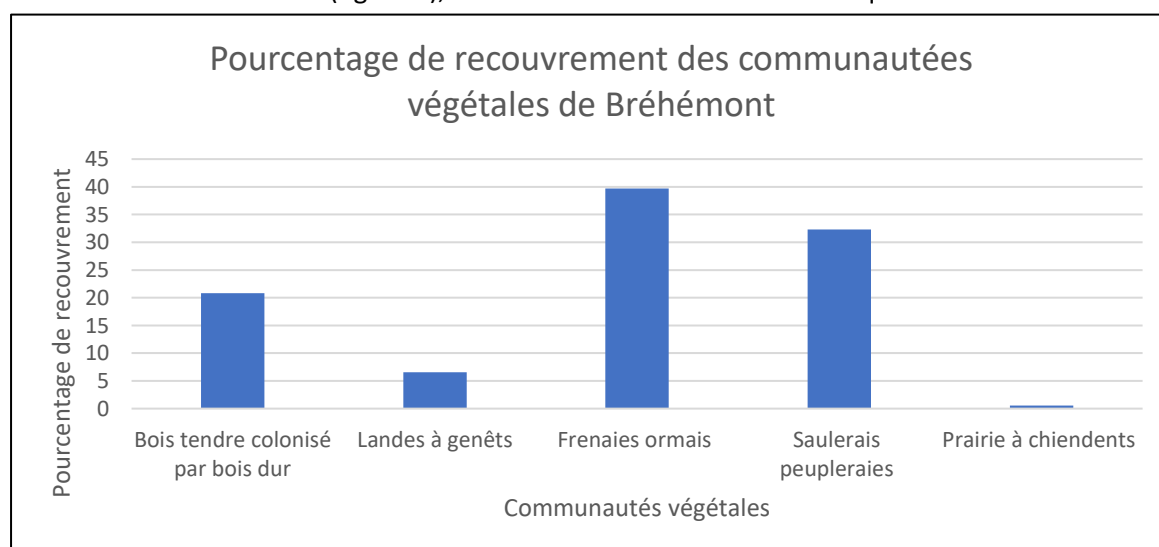
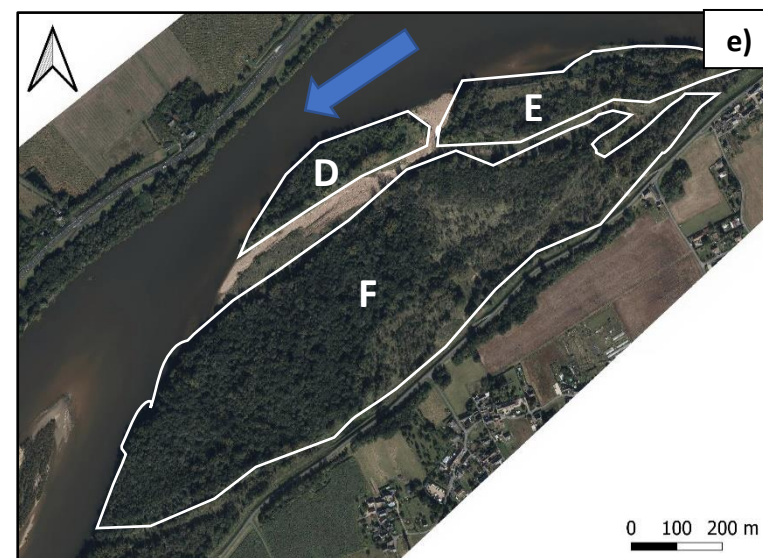
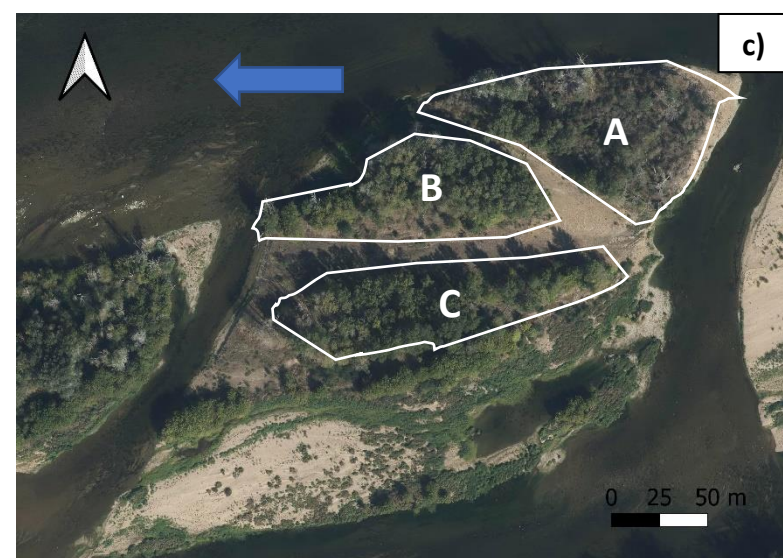
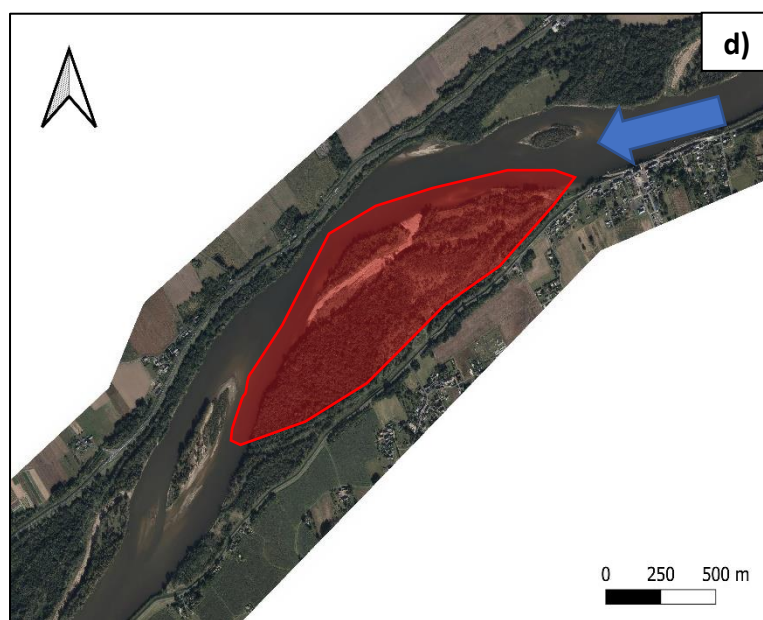
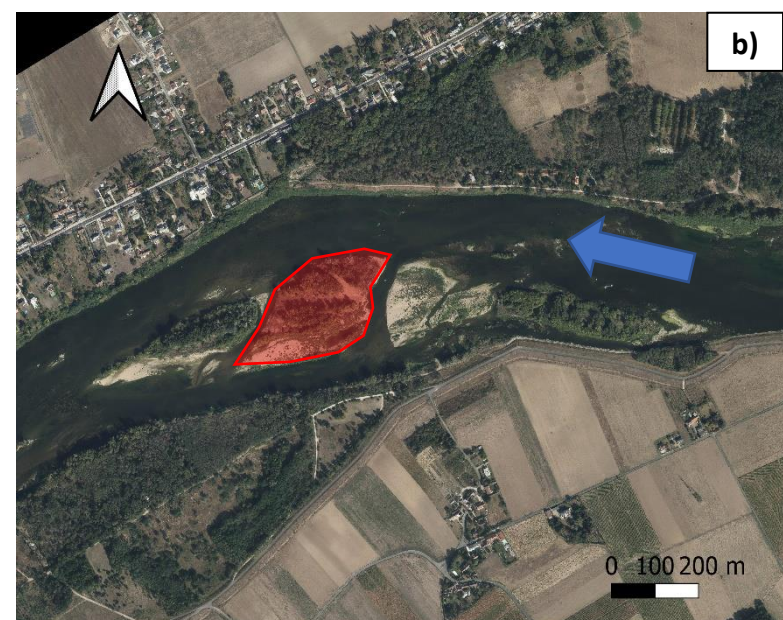
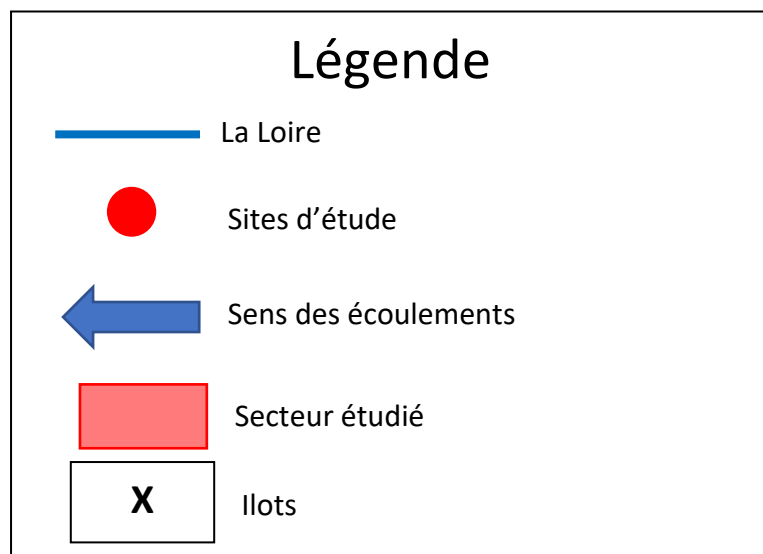
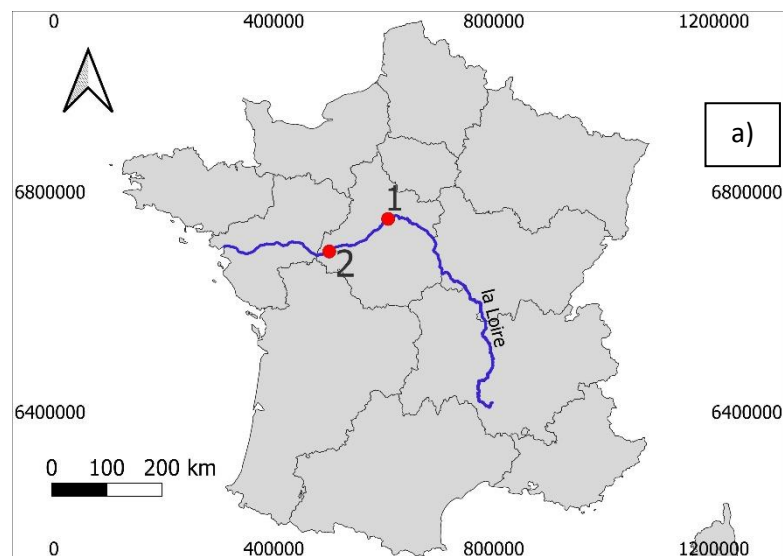


Figure 4 : pourcentage de recouvrement des communautés végétales de Bréhémont



a) La Loire et la localisation des deux sites d'études ; b) et c) site de Mareau-aux-Prés (608716,48 ; 6752294.01) ; d) et e) site de Bréhémont (499139,94 ; 6691277,29)

Figure 5: Localisation et configuration morphologique des sites d'études

3.2 Pré-traitement de l'information

3.2.1 Filtrage des points artefacts

Lors d'une acquisition LiDAR, des points « artefacts » peuvent perturber le traitement des données. L'origine de ces derniers est multiple (bruit, détection d'animaux...), et peuvent contribuer à une mauvaise interprétation des données. En effet, d'après la figure 6, des points artefacts (en blanc) sont observés sur la partie supérieure de cette dernière. Ces derniers pouvant entraver le calcul d'indicateurs, il convient de les supprimer à l'aide d'une approche manuelle ou automatisée.

L'approche dite « manuelle » consiste à découper les points artefacts via le logiciel CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2021) (outil *Segment*). Cependant, cette tâche peut se révéler chronophage si le nombre de site (et de sous-sites) étudié est conséquent. Ainsi, automatiser ce processus peut s'avérer être intéressant, d'autant plus que cette possibilité est proposée par un package du langage de programmation R, (R Core Team, 2021), « *lidR* » (Roussel *et al.*, 2018). En effet, la fonction *filter_poi (points of interest)* permet d'isoler des points situés entre deux seuils. Ces derniers peuvent être définis selon une hauteur, ou bien selon des quantiles. Seulement, la détermination de ces derniers dans le cadre du filtrage des points artefacts s'est révélée être plus complexe que de fixer des seuils de hauteurs. En effet, ces derniers sont plus intuitifs à fixer et font beaucoup moins varier les résultats. Ainsi, dans un contexte de végétation rivulaire de Loire moyenne, tous les points en dessous de 0 m et au-dessus de 50 m ont été éliminés. Après une inspection approfondie des nuages de points, il a été constaté une absence de points parasite entre 0 et 50 m, justifiant le fait que ces seuils aient été les plus intéressants à utiliser.

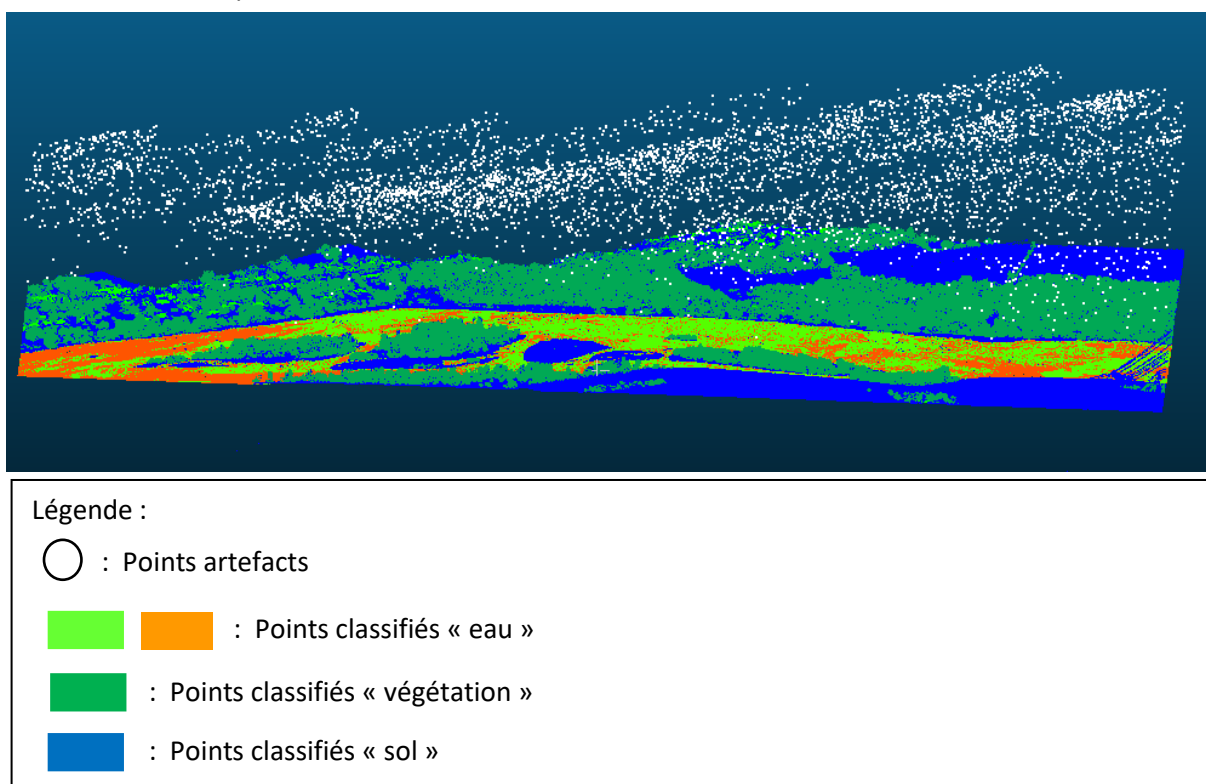


Figure 6: Représentation du nuage de points non filtré (CloudCompare) correspondant au secteur de Mareau Aux-Prés (45)

3.2.2 Normalisation des hauteurs

La normalisation des hauteurs consiste à transformer des altitudes en hauteur (Kumar *et al.*, 2015). En effet, le nuage fourni est constitué de points comportant des coordonnées, dont la composante z est exprimée en fonction d'un niveau au-dessus de la mer. Ainsi, la normalisation des hauteurs permettrait d'obtenir, pour chaque point, une hauteur h correspondant à non pas une altitude au-dessus de la mer mais à une hauteur au-dessus du sol. De plus, la normalisation des hauteurs permettra de supprimer les effets de pente. En effet, deux entités de végétation de même hauteur mais placées dans un contexte topographique différent ne seront pas forcément perçus comme comportant la même altitude par le LiDAR.

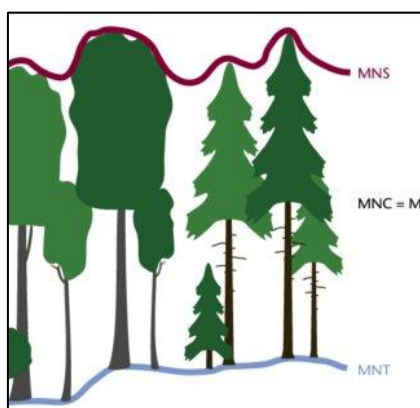


Figure 7: Représentation simplifiée des différents modèles numériques employés (Bonnet, 2009)

De la même manière que pour le filtrage des points artefacts, une approche manuelle ou automatisée peut être mise en place. Cependant, quelle que soit la méthode choisie, il existe un principe de base mobilisant un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et un Modèle Numérique de Surface (MNS). Comme illustré en figure 7, le MNT ne considère que la topographie, tandis que le MNS prend compte à la fois la topographie et les entités de végétation, sans les différencier, et ces deux modèles font ressortir des altitudes. Les hauteurs de végétation peuvent donc être extraites en effectuant une différence entre le MNS et le MNT, résultant un Modèle Numérique de Canopée (MNC).

La première approche, dite manuelle, nécessite d'importer deux nuages de points sous CloudCompare : le nuage de points « sol » de l'ensemble du site d'étude, puis l'import des nuages de points correspondant au site d'étude contenant l'ensemble des classifications, selon des dalles d'1 km². Puis, une découpe sur ce logiciel doit s'opérer, afin d'extraire à la fois le site d'étude, puis le nuage de points correspondant à ce dernier. Ces deux nuages de points doivent ensuite être importés sous R, le nuage de points « sol » est rasterisé en MNT (annexes 1 à 8), puis une différence est effectuée entre le nuage de point du site et ce MNT. Le résultat de cette opération est un MNC de résolution 0,5 m, donnant des hauteurs de végétation.

De manière semblable au découpage des points artefacts, une fonction du package « lidR » permet d'automatiser le processus de normalisation des hauteurs. Cette dernière permet de contourner trois étapes : le fait de mobiliser un nuage de points, le rasteriser en MNT, et d'effectuer la différence nuage de points – MNT. En effet, la fonction *normalize_height* mobilise directement les points classés « sol » de nuage de points global pour les ramener à une altitude de 0m. Ainsi, cette fonction prend comme argument le nuage de points souhaité être étudié, puis un algorithme d'interpolation. En effet, l'information étant dense mais finie, une prédiction va devoir s'effectuer sur les valeurs d'altitudes inconnues. De nombreux algorithmes permettent cette interpolation, trois d'entre eux ont été testés pour cette étude : le TIN (Triangular Irregular Network), le IDW (Invert Distance Weighting), et enfin la méthode Kriging. Cette dernière approche a été testée et laissée de côté, pour des raisons liées au temps de traitement, ce dernier étant 5 à 6 fois supérieur par rapport aux deux autres méthodes. Un choix a dû s'opérer entre ces dernières, bien qu'elles soient

équivalentes en termes de temps de traitement. Finalement, générant un modèle plus réaliste que l'approche IDW (Roussel *et al.*, 2018), c'est la méthode TIN qui a été retenue (Heritage *et al.*, 2014).

3.3 Traitement de l'information

3.3.1 Métriques basées sur la détection de maxima locaux : hauteur et superficie de couronnes

3.3.1.1 Hauteur de végétation

Les hauteurs de végétation peuvent être qualifiées comme la distance entre le premier point qualifié de sol et le point le plus haut de végétation, exprimée en mètres. Cet indicateur peut permettre d'identifier une ou plusieurs strates de végétation dominante (arborée, arbustive ou herbacée) sur le site d'étude en question. Des paramètres statistiques comme la hauteur moyenne, maximum, minimum, l'écart-type, la médiane et l'intervalle interquartile en sont extraits.

La normalisation des hauteurs ayant replacé l'ensemble des points de sol à 0m, les hauteurs de végétation peuvent être extraites seulement en trouvant le point le plus haut. Cette opération peut être effectuée grâce à la détection des maximums locaux, plus précisément grâce à la fonction *locate_trees* du package R « *lidR* ». Cette dernière nécessite deux arguments : le nuage de points filtré et normalisé (cf 2.2.), puis une fenêtre d'observation exprimée selon un diamètre (en m). La fonction va opérer selon le principe suivant : pour un point donné, la hauteur de ses points voisins va être étudiée dans la limite de la fenêtre d'observation fixée pour vérifier si le point initial est le plus haut. Si c'est le cas, le point initial est considéré comme maximum local au regard de la fenêtre d'observation choisie, sinon c'est son voisin le plus haut qui sera désigné comme maximum local. En sortie, il est obtenu un fichier de données à deux dimensions où figurent l'identifiant, la taille et la localisation de chaque maximum local. Des opérations peuvent être menées sur ce fichier, à savoir des calculs de paramètres statistiques au travers de l'extraction de courbes de densité et de boîtes à moustaches : hauteur moyenne, maximum, minimum, écart-type, médiane et intervalle interquartile.

Seulement, la fenêtre d'observation est un paramètre qui nécessite d'être fixé. De ce fait, la supposition suivante a été émise : si la fenêtre d'observation est fixée de manière correcte sur un site, c'est-à-dire dénombrant le bon nombre d'entité de végétation, alors ce paramètre sera aussi valide sur un autre site, et donc détectera aussi le bon nombre d'entité de végétation pour ce dernier. Ainsi, l'ensemble du protocole de détection des maximums locaux a été mis en place sur un site présentant des entités de végétation facilement dénombrable à la main (plantations à proximité du bec de Maine, département 49), et la fenêtre d'observation a été modifiée jusqu'à obtenir le même nombre de maximums locaux dénombrés précédemment. Cependant, lorsque la taille optimale de fenêtre d'observation a été appliquée à un autre site, il s'est avéré que le nombre de maximums locaux dénombrés n'était pas correct, ce qui invalide la supposition de départ. Ainsi, il a été décidé de conserver une fenêtre d'observation de diamètre 5 m, comme préconisé dans la description du package *lidR* (Roussel *et al.*, 2018).

3.3.1.2 Superficie de couronnes

La couronne d'une entité de végétation (ou houppier) est l'ensemble de la partie de l'entité constituée de branches, s'étendant du sommet du tronc au sommet de l'entité de végétation et jouant un rôle clé en termes d'habitat, de stockage hydraulique et d'ombrage (Nasiri *et al.*, 2022). Ainsi, de nombreux paramètres permettent de décrire la couronne d'une entité de végétation, et il a été choisi dans cette étude de calculer les surfaces de couronnes (exprimée en m²), et plus précisément la surface

convexe, qui représente l'enveloppe du houppier (Ndamiyehe Ncutirakiza *et al.*, 2020) comme illustré ci-dessous.

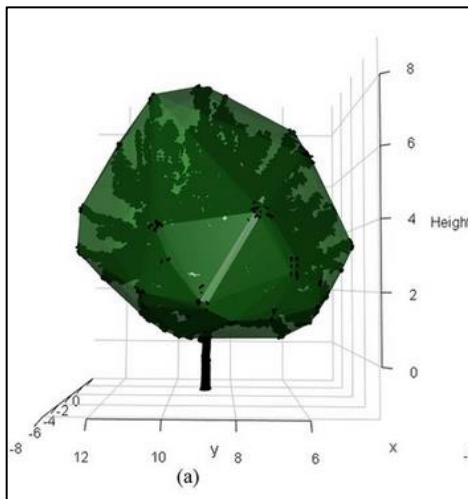


Figure 8: Enveloppe de canopée permettant le calcul de la superficie de couronne (Zhu *et al.*, 2021)

Cette métrique peut servir à de multiples objectifs de recherche, comme l'identification d'essences végétales (en croisant la surface convexe de l'entité de végétation et son empreinte au sol). Cependant, l'identification d'essence faisant appel à du traitement informatique complexe (Fehérvary *et* Kiss, 2020 ; Martin *et al.*, 2020), cette thématique ne sera pas abordée au cours de ce stage. Ainsi, cet indicateur sera à coupler avec les hauteurs de végétation, et appuiera davantage la caractérisation d'une végétation bien établie ou non. Ce sont les mêmes maximums locaux détectés précédemment qui seront utilisés pour extraire les couronnes des entités de végétation. En effet, le package « lidR » propose une fonction, *segment_trees*, à laquelle un MNC, les données concernant les maximums locaux et la spécification d'un algorithme de segmentation doivent être joints. Dans le cadre de cette étude, c'est l'algorithme « dalponte2016 » (Dalponte *et* Coomes, 2016) qui a été utilisé. Il fonctionne sur le principe itératif de grossissement de région à partir de points de base, que sont les maximums locaux. Cette procédure va prendre en compte les quatre pixels voisins du maximum local, et vérifier s'ils possèdent une hauteur inférieure à ce dernier. Si cette condition est remplie, les pixels sont inclus dans une région, et cette opération est répétée jusqu'à ce que plus aucuns pixels ne soient ajoutés à la région. Ainsi, un ensemble de régions distinctes est obtenu, représentant chacune une couronne d'entité de végétation et possédant chacune cinq attributs : un identifiant, une hauteur, un nombre de points, une surface convexe, et des coordonnées. Un deuxième algorithme de segmentation existe, nommé « watershed » (Beucher *et* Lantuéjoul, 1979), fonctionnant seulement sur la base d'un MNC. Cependant, cette approche a été laissée de côté, générant des valeurs de hauteur et de superficie convexe inexacte et incohérente.

3.3.2 Métrique basée sur l'intensité du signal : le GNDVI

Le GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) est un indicateur permettant d'apprécier le taux de chlorophylle de la végétation du site étudié à l'aide des propriétés spectrales de cette dernière (Laslier *et al.*, 2019), et se définit selon l'équation suivante (Eq.2) :

$$GNDVI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$$

Eq. 2 : expression du GNDVI

Où NIR est l'intensité située dans le proche infra-rouge (750-1300 nm) et Green est l'intensité située dans le vert (490-580 nm). Le LiDAR utilisé possédant deux canaux émettant et recevant dans ces classes de longueur d'onde (C2 est le canal émettant et recevant dans le proche infrarouge, et C3 est le canal émettant et recevant dans le vert) (figure 1), il est possible de calculer cet indicateur. Ce paramètre permet d'apprécier les zones où le taux de chlorophylle est élevé (végétation en bonne

santé), et au contraire, les secteurs le taux de chlorophylle est faible (végétation dépérissante voire morte).

Pour calculer cet indicateur, les nuages de points issus des canaux C2 et C3 ont été mobilisés, et en ne gardant uniquement que les points classifiés comme points de végétation (travail effectué en amont par le fournisseur de données). Puis, sur ces deux nuages de points de végétation, les points ont été classifiés selon l'intensité qu'ils revoient (fonction *filter_poi* du package R « lidR »), puis rastérisés. Le raster C2 contient ainsi dans chacun de ses pixels une valeur d'intensité émise dans le proche infrarouge (NIR), même chose pour le canal C3 mais dans le vert (Green). Une opération de type calculatrice raster permet, selon la formule située ci-dessus, d'obtenir un raster contenant dans chacun de ses pixels une valeur de GNDVI. Puis, les couronnes segmentées précédemment (voir partie 2.1.3.2) sont appliquées à ce raster, et selon une extraction par masque, prennent la valeur moyenne de GNDVI donnée par les pixels situés dans leur emprise. La résolution a été fixée à 2,25 m, car il s'est avéré que certaines couronnes étaient supprimées du fait de pixels non renseignés due à une résolution trop élevée. Ainsi, la résolution fixée a fait office de bon compromis entre une résolution suffisamment précise, et un nombre minimum de couronne supprimées (figure 9).

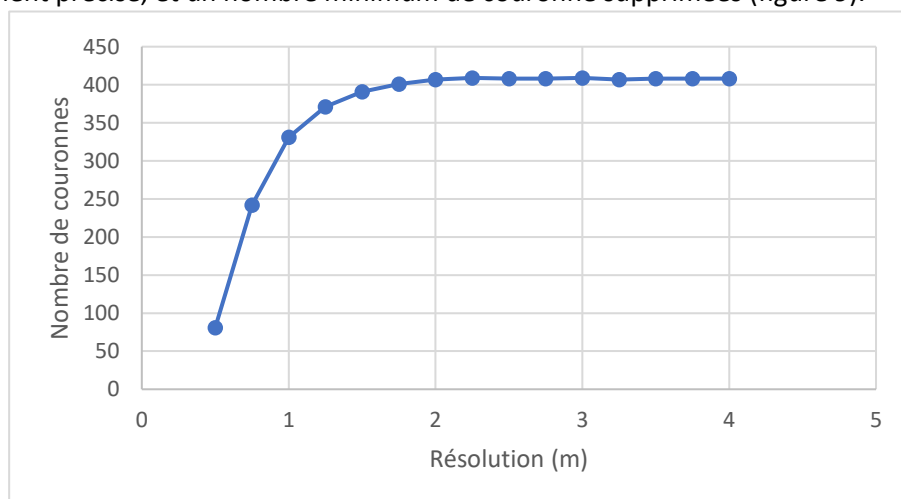


Figure 9: Test de sensibilité du nombre de couronnes en fonction de la résolution

Enfin, cet indicateur étant fortement dépendant de la saison (une densité de feuillage moindre en hiver entraînant un taux de chlorophylle plus faible qu'en été), il convient de porter une attention particulière vis-à-vis de la période d'acquisition des données. Ces dernières ayant été collectées entre début et fin septembre 2020, cette période peut être encore considérée comme propice à l'activité végétale, et donc les résultats de GNDVI sujets à une interprétation non biaisée.

3.3.3 Métrique basée sur la classification des points de sol et de végétation : le LPI

Le LPI (Laser Penetration Index) est un indicateur quantifiant et qualifiant la capacité de pénétration du signal LiDAR. Il se calcule selon un rapport entre le nombre de point de sol et le nombre de point total. Son échelle de variation s'étend de 0 à 1 : plus le LPI tend vers 0, moins le laser détecte de points de sol, et plus le LPI tend vers 1, plus le laser détecte des points de sol.

$$LPI = \frac{\text{Number of ground points}}{\text{Total number of points}}$$

Equation 3 : expression du LPI

Si le laser ne détecte pas ou peu de points de sol, c'est qu'il est stoppé par des éléments freinant sa progression. Ainsi, dans le cadre où le laser ne peut être freiné que par de la végétation (contexte d'îles fluviales), l'hypothèse posée est que moins le laser détecte de points de sol, plus il est freiné par de la végétation, et plus cette dernière est dense (Laslier *et al.*, 2019). Ainsi, cet indicateur communique une information sur la densité de feuillage.

Le nuage de points global (C2 et C3 fusionnés) étant classifié, il est possible d'obtenir le nombre de points correspondant à du sol, ainsi que le nombre total de points. Ces derniers sont dénombrés à l'échelle de pixels (fonction *pixel_metrics* du package « *lidR* »), et inclus dans la formule ci-dessus. Puis, les valeurs de LPI moyennes sont extraites pour chaque arbre identifié précédemment à l'aide d'une extraction par masque. Enfin, la résolution a été fixée à 2,25 m, dans un souci de comparaison avec le GNDVI.

3.3.4 Représentation statistique des métriques

3.3.4.1 Echelle intra site

Chaque couronne étant caractérisable par les quatre métriques, il a été possible de confronter ces dernières afin d'observer d'éventuelles corrélations sur un même site. Il a été créé, pour chaque site et sous-site, un jeu de données comportant les identifiants de couronnes ainsi que les métriques associées à chaque identifiant. Ainsi, une analyse bidimensionnelle a été menée avec l'ensemble des indicateurs à l'aide du package R « *ggplot2* » (Wickham, 2016), résultant pour chaque site et sous-site en six *scatterplot* : les superficies de couronnes en fonction du GNDVI, le GNDVI en fonction des hauteurs, les hauteurs en fonction des superficies de couronnes, le LPI en fonction des superficies de couronnes, le LPI en fonction du GNDVI, et enfin le LPI en fonction des hauteurs. Pour des raisons liées au nombre d'annexes, seulement un de ces *scatterplot* figure dans ce rapport (figure 17).

Puis, toujours avec ce même package, une courbe de régression a été obtenue pour l'ensemble des nuages de points graphiques. Cette dernière, linéaire, permet de résumer au mieux la forme du nuage de points, et le coefficient R^2 qualifie la proportion de variance expliquée par le modèle. En effet, la dispersion d'une série est expliquée par une variance expliquée par le modèle et une variance inexpliquée. Ainsi, étant compris entre 0 et 1, plus cet indice tend vers 1, plus la variance expliquée par le modèle tend vers 100%, et donc plus la corrélation entre les deux variables étudiées est forte. A l'inverse, si le R^2 tend vers 0, cela signifie que la variance inexpliquée par le modèle est supérieure à la variance expliquée par le modèle, et donc que les deux variables sont faiblement corrélées (Nakagawa *et al.*, 2017).

3.3.4.2 Echelle inter site

Les métriques étant communes aux deux sites, il a donc été possible d'effectuer une comparaison entre les trois sous sites de Mareau et les trois sous-sites de Bréhémont en fonction des quatre métriques étudiées. Pour cela, l'utilisation de boîtes à moustache (Tukey, 1977) s'est révélée être une solution envisageable, tant sur le plan analyse de données que sur le plan visuel, l'objectif étant de faire apparaître les six sous-site sur un même graphique.

Pour se faire, les jeux de données de l'ensemble des entités de végétation des six sous-sites ont dû être uniformisés dans l'objectif d'être fusionnés en un seul, avec une colonne supplémentaire mentionnant l'appartenance à un des six sous-site. Ainsi, il a été possible à partir de ce jeu de données global d'obtenir quatre séries (une par métrique) de six boîtes à moustache (une par site), avec en abscisse le nom des six sous-sites, et en ordonnées la métrique étudiée.

4. Résultats

4.1 Morphologie de végétation : hauteurs et couronnes

4.1.1 Intra site

4.1.1.1 Site de Mareau

La hauteur moyenne de végétation sur l'ensemble du site de Mareau (tout entité de végétation confondues) s'élève à environ 16,2 m, avec 13 m sur l'îlot A, 20,6 m sur l'îlot B, et 16,2 m sur l'îlot C (tableau 3). Sur chacun des sous-sites, la hauteur maximum est de 30 m pour l'îlot A, 31 m pour l'îlot B, et de 27 m en ce qui concerne l'îlot C. Enfin, la hauteur minimale détectée est de 3 m sur le l'îlot A et B, et de 2,5 m au sein de l'îlot C. Les écarts-types s'élèvent respectivement à 7,3, 7,6 et 7,7 m.

Tableau 3: Résultats de hauteurs de végétation sur le site de Mareau-aux-Prés

	Général	Ilot A	Ilot B	Ilot C
Nombre d'individus	379	135	97	148
Hauteur moyenne (m)	16,2	13,029	20,566	16,234
Hauteur min (m)	2,5	2,733	3,054	2,542
Hauteur max (m)	30,8	29,839	30,839	27,155
Ecart type (m)	8,1	7,37	7,63	7,65

Les courbes de densité des hauteurs des maxima locaux détectés (annexes 9 à 12) montrent une distribution bimodale sur l'ensemble des îlots constituant le site d'étude de Mareau-aux-Prés. Un lien peut être établi entre ces courbes et la caractérisation des strates de végétation, à savoir que sur l'ensemble des îlots, deux strates sont présentes : une atteignant 6 m maximum, donc arbustive (Cornier, 2002), et une arborée (23 m). Ces deux strates se retrouvent sur les trois îlots, mais dominent de manière différente : sur l'îlot B et C, la strate arborée domine, tandis que la strate arbustive est la plus présente au sein de l'îlot A. Comme l'ensemble des courbes de densité de hauteurs ont été produites à partir des maximums locaux, ces dernières reflètent un point de vue surfacique et non volumétrique. Autrement dit, ces courbes ne prennent pas en compte les strates situées en dessous des maximums locaux détectés.

L'îlot B est l'entité où la moyenne des aires de couronnes est la plus élevée, avec 45,4 m² (tableau 4). A l'inverse, la plus faible est enregistrée au niveau de l'îlot A (38,7 m²), tandis que la moyenne intermédiaire de couronne est sur l'îlot C avec 43 m². Les aires maximales locales varient de 77 m² (îlot B) à 82,5 m² (îlot A) en passant par une valeur de 78 m² au sein de l'îlot C. A l'inverse, les aires de couronnes minimales sont de 0,1 m² pour l'îlot A et C, et de 2 m² pour l'îlot B. Ces grands écarts de valeurs justifient des écarts types élevés, s'élevant à 20 m² pour l'îlot A, 19 m² concernant le C, et 18 m² pour l'îlot B.

Tableau 4: Résultats de superficies de couronnes sur le site de Mareau-aux-Prés

	Général	Ilot A	Ilot B	Ilot C
Nombre d'individus	378	135	96	148
Aire moyenne (m ²)	42,2	38,728	45,448	43,117
Aire min (m ²)	0,1	0,099	1,988	0,095
Aire max (m ²)	83	82,542	76,765	78,085
Ecart type (m ²)	19,2	20,02	18,25	19,14

Les courbes de densité relatives aux aires de couronnes (annexes 19 à 22) montrent une distribution bimodale similaire entre les îlots B et C, à savoir 2 strates majoritaires : une comprise entre 0 et 17 m² et une autre comprise entre 17 m² et 82,5 m². L'unité du nord quant à elle tend vers l'unimodalité, avec un mode situé à 29 m².

4.1.1.2 Site de Bréhémont

La hauteur moyenne de végétation de l'ensemble du site de Bréhémont s'élève à 17,4 m (tableau 5), avec une hauteur maximale atteignant 39 m sur l'îlot F et une hauteur minimale de 2,1 m détectée sur cette même entité. Les îlots D et E abritent une végétation dont la hauteur moyenne s'élève respectivement à 14,5 et 14,7 m, tandis que la hauteur moyenne de végétation de l'îlot F atteint 18,3 m (tableau 5).

Tableau 5: Résultats de hauteurs sur le site de Bréhémont

	Général	Ilot D	Ilot E	Ilot F
Nombre d'individus	7434	444	852	5883
Hauteur moyenne (m)	17,439	14,539	14,696	18,28
Hauteur min (m)	2,077	2,367	2,304	2,094
Hauteur max (m)	39,016	30,505	30,967	39,016
Ecart type	6,83	6	6,5	6,65

Les courbes de densité obtenues (annexes 14 à 17) montrent que les îlots E et F possèdent une distribution de hauteurs relativement homogène centrée sur leur moyenne de hauteur de végétation. L'îlot D quant à lui observe deux groupes distincts de hauteurs de végétation, le premier s'étendant de 0 à 25 m, puis le second de 25 à 31 m. Néanmoins, le premier domine par rapport au second, avec respectivement une densité maximale de 0,075 contre une densité maximale de 0,013.

Concernant les aires de couronnes des entités de végétation se trouvant sur l'ensemble du site de Bréhémont, elles comportent une moyenne de 48,5 m², avec un maximum de 90 m² atteint sur l'îlot F (tableau 6). La moyenne des superficies de couronnes sur cette même entité atteint 50 m², 46,5 m² pour l'îlot D, et 46 m² pour l'îlot E.

Tableau 6: Résultats de superficies de couronnes sur le site de Bréhémont

	Général	Ilot D	Ilot E	Ilot F
Nombre d'entité	7410	443	849	5870
Aire moyenne	48,527	46,519	45,979	49,87
Aire min	0,004	0,074	0,043	0,002
Aire max	89,985	89,222	89,711	89,98
Ecart type	19,55	19,84	20,21	18

Une nouvelle fois, les densités de superficie de couronnes ont été extraites (annexe 24, 25, 26 et 28)). Les courbes obtenues montrent une orientation vers une loi normale.

4.1.1.3 Inter site

D'un point de vue global, le site de Bréhémont possède une distribution de hauteurs plus étendue par rapport au site de Mareau-aux-Prés, bien que possédant tous deux une médiane similaire s'élevant à 17,5 m (annexe 58) : les hauteurs de végétation du site de Mareau-aux-Prés varient de 2,5 m à 30,8 m, tandis que la distribution de hauteurs du site de Bréhémont s'étend de 2 m à 39 m. Néanmoins, le site de Mareau-aux-Prés possède une distribution interquartile (distance entre le premier et troisième quartiles) plus importante que le site de Bréhémont, respectivement de 18 m et de 9,5 m (annexe 54).

Puis, à l'échelle des sous-sites, celui possédant la distribution de hauteur la plus étendue est le sous-site F, et à l'inverse celui comportant la distribution de hauteurs la moins étendue est le sous site C (figure 11). Il peut être remarqué que les intervalles interquartiles de l'ensemble des sous-sites de Mareau-aux-Prés sont supérieurs à ceux de l'ensemble des sous-site de Bréhémont, signe d'une plus grande variabilité de hauteurs au voisinage de la médiane, c'est-à-dire la valeur pour laquelle 50 % des individus lui sont supérieur et 50% des individus lui sont inférieur (annexe 54).

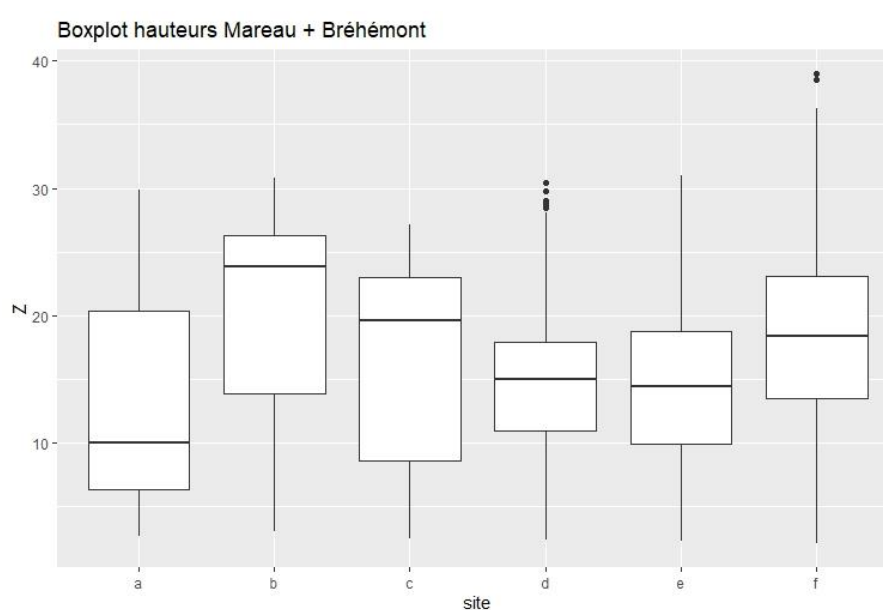


Figure 10: Boîtes à moustaches des hauteurs de végétation des six îlots

Les boîtes à moustache concernant les superficies de couronnes sur l'ensemble des sous-sites montrent une certaine similitude quant à la distribution de ce paramètre (figure 12 et 13). Néanmoins, comme pour les hauteurs d'entités de végétation, l'étendue de la distribution est plus élevée sur le site de Bréhémont, et l'intervalle interquartile plus élevé sur le site de Mareau-aux-Prés. Ce dernier s'élève à 28,25 m² sur le site de Mareau-aux-Prés, et à 25 m² sur le site de Bréhémont (annexe 55 et 59).

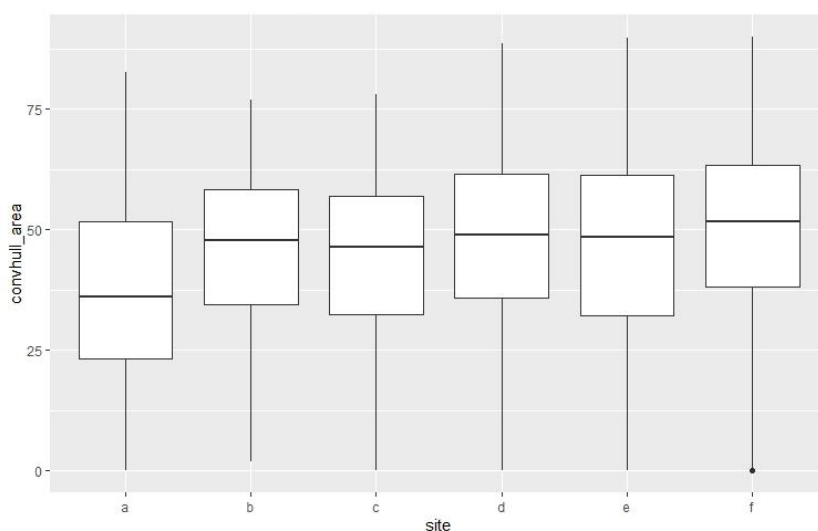


Figure 11: Boîtes à moustaches des superficies de couronnes de végétation des six îlots

4.2 Taux de chlorophylle : le GNDVI

4.2.1 Intra site

4.2.1.1 Site de Mareau-aux-Prés

Sur l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés, le GNDVI moyen est de 0,19 (tableau 7). Pris de manière individuelle, les îlots constituant le site de Mareau-aux-Prés présentent peu de différence avec une valeur de 0,18 concernant l'îlot A et B, ainsi que 0,20 pour l'îlot C. La valeur maximum de cet indicateur est de 0,46 sur l'îlot C, 0,41 au sein de l'îlot B, et 0,39 sur l'îlot A, tandis que la valeur minimum est de -0,16 sur l'îlot A, 0,077 concernant l'îlot B, et -0,09 pour l'îlot C. Les écarts types s'élèvent à 0,1 pour l'ensemble des sous-sites.

Tableau 7: Résultats de GNDVI du site de Mareau-aux-Prés

	Général	Ilot A	Ilot B	Ilot C
Nombre d'entité	374	135	94	146
GNDVI moyen	0,19	0,18	0,18	0,2
GNDVI min	-0,16	-0,16	-0,077	-0,09

GNDVI max	0,46	0,39	0,41	0,46
Ecart type	0,1	0,11	0,09	0,09

Les courbes de densité de GNDVI montrent une distribution unimodale pour les îlots A et C (mode s'élevant respectivement à 0,22 pour le premier et 0,19 pour le deuxième), et bimodale pour l'îlot B (annexes 29 à 32). En effet, une première gaussienne allant de -0,125 à une valeur d'environ 0,04 est visible, et comporte un mode de -0,06 et atteint une valeur de densité de 0,8. La deuxième, beaucoup plus étendue, débute à une valeur de GNDVI de 0,04 jusqu'à un GNDVI de 0,5, possède un mode de 0,15 associé à une valeur de densité de 5,5 (annexes 29 à 32).

4.2.1.2 Site de Bréhémont

Les données acquises relatives à l'indicateur GNDVI dégagent une moyenne de 0,18 sur l'ensemble du site, 0,22 sur l'îlot D, 0,15 en ce qui concerne l'îlot E, et une moyenne de 0,19 sur l'îlot F (tableau 8). La valeur minimum de GNDVI détectée se situe sur ce même complexe, tandis que la valeur maximum a été enregistrée sur l'îlot D.

Tableau 8: Résultats du GNDVI du site de Bréhémont

	Général	Ilot D	Ilot E	Ilot F
Nombre d'entité	7330	423	838	5838
GNDVI moyen	0,1848	0,22	0,153	0,19
GNDVI min	-0,7431	0,223	-0,18	-0,74
GNDVI max	0,75	0,62	0,45	0,55
Ecart type	0,1	0,094	0,08	0,098

Deux courbes de densité de l'indicateur GNDVI des îlots D et F se rapprochent dans le sens où une majorité d'individus possèdent une valeur de GNDVI élevée, et quelques individus possèdent des valeurs de GNDVI faibles (34,35,36 et 38). La seule différence notable entre ces deux courbes réside dans l'étendue. En effet, la courbe de densité correspondant à l'îlot F possède une plage de valeur de GNDVI allant de -0,25 à 0,5, tandis que celle correspondant à l'îlot D débute à -0,125 pour finir comme la courbe précédente, à une valeur de 0,5. Concernant l'îlot F, la courbe de densité du GNDVI se rapprochent plus d'une loi normale, centrée sur une valeur de 0,15 avec un écart type de 0,08.

4.2.2 Inter site

Les boîtes à moustaches relatives au GNDVI de chaque site et sous-site montrent des étendues de distribution très variables, causée par la présence de valeurs extrêmes (annexe 60). Ainsi, le calcul des intervalles interquartiles permet d'étudier les distributions de valeurs en ne prenant pas en compte ces valeurs extrêmes. C'est sur le site de Mareau-aux-Prés que l'on trouve à la fois l'intervalle interquartile minimum (0,07, sous-site B) et maximum (0,14, sous-site A). L'étendue de la distribution interquartile est beaucoup plus constante sur l'ensemble du site de Bréhémont, avec des valeurs fluctuant aux alentours de 0,1 (annexe 56).

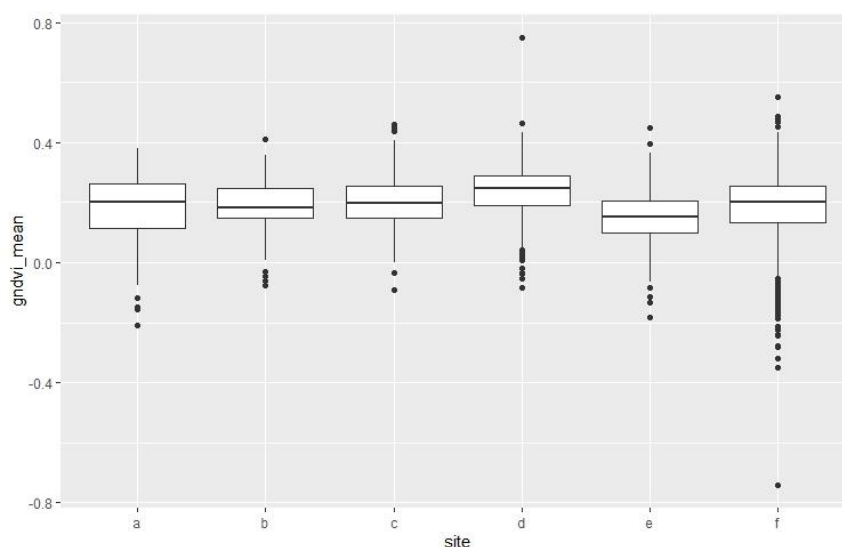


Figure 12: Boîtes à moustaches du GNDVI de la végétation des six îlots

4.3 Densité de canopée : le LPI

4.3.1 Intra site

4.3.1.1 Site de Mareau

Le LPI moyen sur l'ensemble du site s'élève à 0,24 (tableau 9). La moyenne de cet indicateur est maximum sur l'îlot A, et c'est aussi sur ce dernier où la valeur la plus faible de LPI a été détectée (0,008). La valeur maximum du LPI avoisine 0,82 et se trouve sur l'îlot C. Les écarts-types s'étendent de 0,11 à 0,16 en passant par 0,15, le maximum concernant l'îlot C, le minimum l'îlot A, et la valeur intermédiaire l'îlot B.

Tableau 9: Résultats de LPI du site de Mareau-aux-Prés

	Général	Ilot A	Ilot B	Ilot C
Nombre d'individus	384	165	54	134
LPI moyen	0,24	0,27	0,2	0,23
LPI min	0,008	0,008	0,03	0,03
LPI max	0,82	0,53	0,68	0,82
Ecart type	0,13	0,11	0,15	0,16

Les courbes de densité des îlots B et C sont comparables, dans le sens où elles sont toutes deux unimodales, avec une étendue similaire, un mode de 0,10 pour la première et de 0,14 pour la deuxième, et une densité atteignant respectivement 7,1 et 4,4 (annexe 39 à 42). La courbe de densité de LPI relative à l'îlot A peut être qualifiée de bimodale, avec un premier pic comportant un mode de 0,15 et un deuxième s'élevant à 0,28.

4.3.1.2 Site de Bréhémont

Le LPI moyen de l'ensemble du site de Bréhémont est de 0,2. La moyenne de cet indicateur site par site est de 0,14 sur l'îlot D, 0,19 sur l'îlot F, et 0,22 sur l'îlot E (tableau 10).

Tableau 10: résultats du LPI du site de Bréhémont

	Général	Ilot D	Ilot E	Ilot F
Nombre d'entité	6629	350	812	5634
LPI moyen	0,2	0,144	0,22	0,19
LPI min	0,004	0,008	0,01	0,004
LPI max	0,97	0,79	0,78	0,89
Ecart type	0,13	0,11	0,12	0,13

L'ensemble des courbes de densité obtenue à partir du LPI du site de Bréhémont montrent une forte concentration d'individus possédant des valeurs de LPI pouvant être qualifiées de basses (de 0,10 à 0,14 sur une échelle allant de 0 à 1), puis plus la valeur de LPI augmente, plus la concentration en individus est faible (annexes 44, 45, 46 et 48).

4.3.2 Inter site

A l'instar des distributions relatives au GNDVI, celles concernant le LPI comportent de nombreuses valeurs extrêmes (figure 17). Ainsi, l'analyse des intervalles interquartiles s'avère une nouvelle fois pertinente. L'îlot A, comme pour le GNDVI, comporte le plus grand intervalle interquartile et donc la plus grande variabilité de LPI, tandis que les îlots B et D comportent le plus faible intervalle interquartile de LPI (figures 16 et 17).

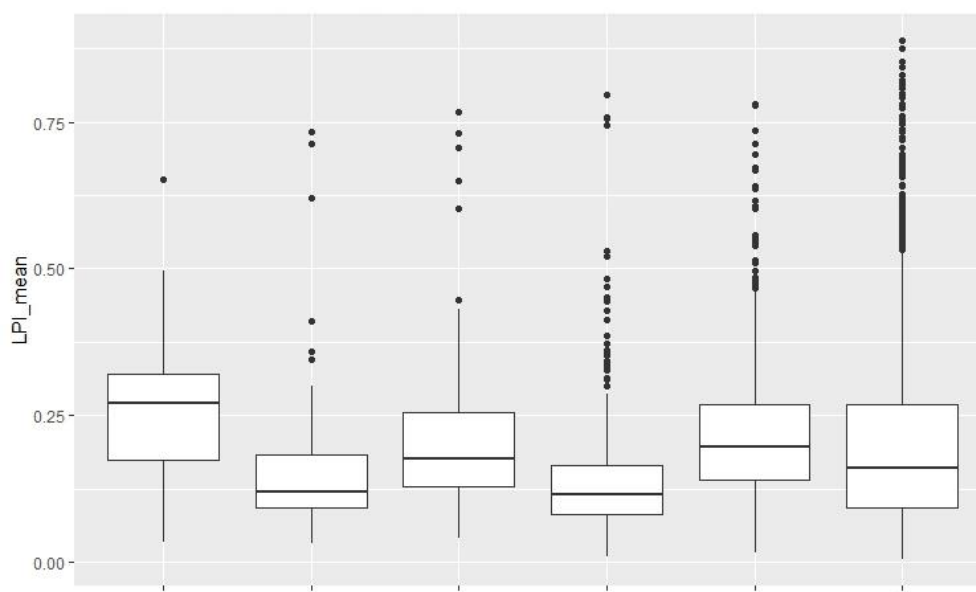


Figure 13: Boîtes à moustaches du LPI de la végétation des six îlots

4.4 Corrélation des métriques

Pour chacun des sites et sous-sites, les métriques ont été confrontées entre elles afin de tester leur corrélation. Les deux tableaux ci-dessous représentent les R^2 de chacun des couples de métriques en fonction des sites de Mareau-aux-Prés et de Bréhémont (tableaux 11 et 12). Les tableaux présentant les R^2 obtenus en fonction des sous sites sont consultables des annexes 47 à 53.

Tableau 11: R^2 de l'ensemble du site de Bréhémont

	Hauteur	Superficie de Couronnes	GNDVI	LPI
Hauteur		0,24	-0,00015	-0,00014
Superficie couronnes			0,00037	0,00074
GNDVI				0,23
LPI				

Tableau 12: R^2 de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés

	Hauteur	Superficie de Couronnes	GNDVI	LPI
Hauteur		0,19	0,0022	0,014
Superficie couronnes			-0,003	0,0059
GNDVI				0,019
LPI				

D'après les résultats de corrélation obtenus, le couple de métrique observant une plus grande corrélation sur le site de Mareau-aux-Prés est le couple superficies de couronnes ; hauteur, avec un R^2 s'élevant à 0,19, ce qui signifie que 19% de la variation observée dans le modèle peut être expliquée par les points obtenus. Ce même couple de métrique observe le plus grand R^2 sur le site de Bréhémont (0,24), et un autre groupe d'indicateur observe un R^2 important par rapport aux autres couples de métriques, et il s'agit du groupe GNDVI ; LPI ($R^2 = 0,23$) (tableau 11). A noter que sur le site de Mareau-aux-Prés, ce dernier est plus faible d'un facteur 10.

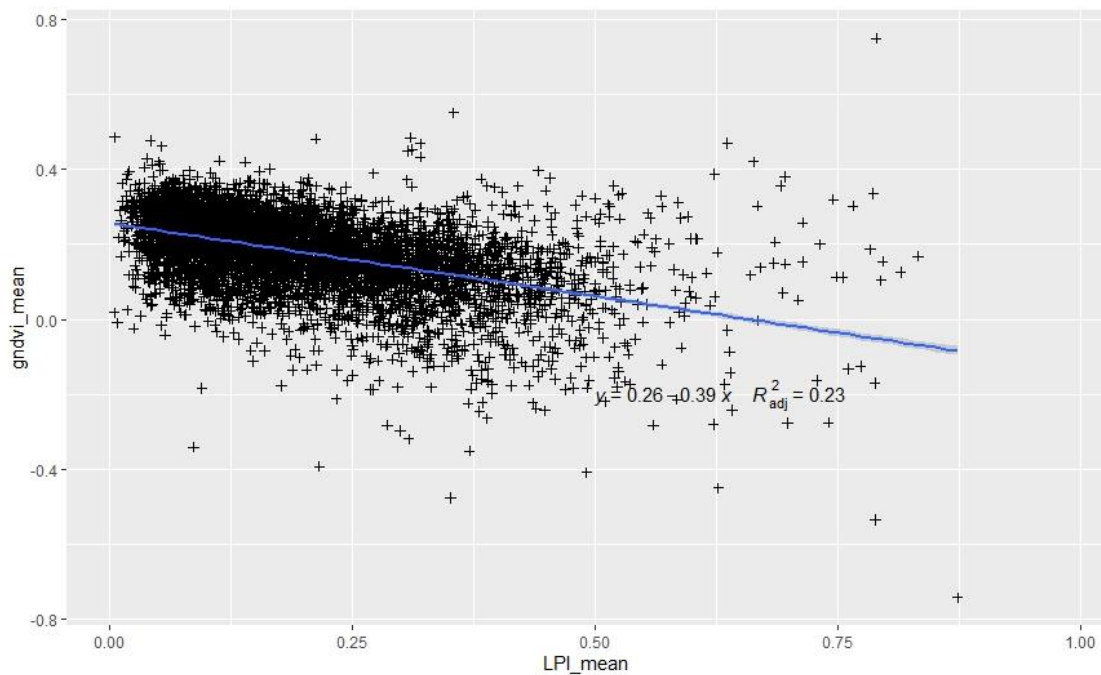


Figure 14: Courbe de régression linéaire du GNDVI et du LPI du site de Bréhémont

5. Discussion

5.1 Caractérisation de la végétation ligneuse alluviale

Quatre métriques permettant de caractériser la végétation ligneuse alluviale ont pu être mobilisées. Les hauteurs de végétation permettent d'obtenir des renseignements vis-à-vis des strates dominantes (d'un point de vue surfacique), les surfaces de couronnes une idée des étendues de canopées, le GNDVI permet d'approcher le taux de chlorophylle de la végétation étudiée, et enfin le LPI rend possible l'estimation de la densité de canopée.

Les résultats des régressions linéaires ont permis de montrer que deux couples de métriques observaient une potentielle corrélation, à savoir le couple hauteurs et superficies de couronnes ainsi que le couple LPI et GNDVI. De plus, ces couples rejoignent des thématiques communes. En effet, les métriques hauteurs de végétation et superficie de couronnes font référence à la morphologie des végétaux. Puis, le LPI pouvant qualifier la densité de canopée et donc la densité de feuillage, il peut être utilisé comme une variable proxy de la vigueur de végétation avec le GNDVI. Ainsi, il s'avère judicieux d'analyser les résultats selon ces deux groupes et en fonction des thématiques que chacun aborde.

5.1.1 Morphologie de la végétation ligneuse alluviale

5.1.1.1 Site de Mareau-aux-Prés

Les résultats décrits précédemment ont montré des différences morphologiques entre les entités de végétation ligneuse du site de Mareau-aux-Prés. L'îlot A est l'unité morphologique où la végétation y est la plus basse, l'îlot B la plus haute, et enfin l'îlot C présente des caractéristiques de hauteurs de végétation intermédiaires. Les différences de hauteurs moyennes sont importantes. En effet, à titre d'exemple, l'îlot A est caractérisé par une végétation ligneuse pouvant être qualifiée de basse au regard des résultats obtenus sur les autres îlots, à savoir 7,5 m de moins en moyenne par rapport à l'îlot B, et 3,2 m de moins en moyenne vis-à-vis de l'îlot C. Les résultats de superficie de

couronnes suivent cette même logique, avec l'îlot A comportant 6,7 m² de superficie de couronne moyenne en moins que l'îlot B, et 4,4 m² de surface de couronne moyenne en moins que l'îlot C.

Des communautés végétales similaires sont observées sur l'ensemble des sous sites de Mareau-aux-Prés (Service Loire Bassin Loire Bretagne – DREAL Centre Val de Loire). La variabilité des communautés n'est donc pas à l'origine des variations de morphologie de végétation observées. Ainsi, des facteurs extérieurs pouvant être responsable de ces variations tel que la topographie des îlots, la dynamique hydraulique du cours d'eau, l'érosion, ou encore la disposition des unités morphologiques peuvent être cités, et seront à l'étude dans la suite de cette discussion.

5.1.1.2 Site de Bréhémont

Les résultats de morphologie de végétation du site de Bréhémont présentent eux aussi des disparités. Les îlots D et E présentent des caractéristiques de morphologie de végétation ligneuse similaires, à savoir respectivement 14,5 m et 14,7 m de hauteur moyenne, puis 46,5 m² et 46 m² de superficie de couronnes. Ces résultats assez proches peuvent être expliqués par l'histoire de ces deux îlots, qui ont été sujets à du pâturage et qui sont en cours de reboisement (Rodrigues, 2004). L'îlot F quant à lui présente des caractéristiques de morphologie de végétation ligneuse supérieures aux deux autres îlots, avec une hauteur moyenne atteignant 18,3 m et une surface de couronne de 50 m. Cela peut être expliqué par plusieurs facteurs, à savoir : 1) une végétation déjà établie dû à une absence de pâtures, et 2) une surface beaucoup plus grande que les îlots D et E, allouant donc plus de place à la végétation pour se développer.

Les communautés végétales du site de Bréhémont sont beaucoup plus hétérogènes que sur le site de Mareau-aux-Prés, avec une mixité entre forêt de bois tendre et forêt de bois durs. Ainsi, les différences morphologiques entre les îlots constituants d'anciennes pâtures et l'îlot F peuvent provenir de cette différence de communauté. A titre d'exemple, la moitié est de l'îlot F est caractérisée par du bois dur qui colonise le bois tendre, tandis que la moitié ouest consiste en des associations de bois durs telles que des frênaies-ormaies et des chênaies-ormaies qui dominent. Le MNC du site (annexe 13) permet d'affirmer que la moitié est de l'îlot F comporte des hauteurs globalement moins élevées que sa moitié ouest. Ainsi, cette différence de hauteur et de surface de couronnes peut être expliquée par ce changement de communauté. Cependant, les processus tels que l'érosion, le contexte morphodynamique, la dynamique hydraulique ainsi que le contexte topographique du site doivent être pris en compte afin de comprendre la structuration de ces communautés, ce qui sera abordé dans la suite de cette discussion.

5.1.2 Vigueur de la végétation ligneuse alluviale

5.1.2.1 Site de Mareau-aux-Prés

Le GNDVI moyen sur le site de Mareau-aux-Prés est relativement similaire sur l'ensemble des îlots, avec une valeur de 0,18 sur l'îlot A et B, puis de 0,2 sur l'îlot C. Cependant, en étudiant de manière plus précise le GNDVI de chaque îlot, il peut être relevé des zones de fluctuation du GNDVI. Par exemple, l'îlot A présente des secteurs où le GNDVI peut être qualifié d'important (plus de 0,5 sur la partie centrale). Sur les franges de l'îlot, cet indicateur varie de 0 à -0,3, démontrant un taux de chlorophylle plus bas que sur la partie centrale (figure 20). L'intervalle interquartile de cet îlot est par ailleurs le plus élevé de tous les sous-sites étudiés dans cette étude (figure 15). L'îlot B suit cette même logique, avec globalement une évolution selon un gradient est-ouest où le GNDVI est de plus en plus faible (annexe 27).

Le LPI moyen de l'ensemble des îlots montre des disparités. Il s'élève à 0,25 sur l'îlot A, 0,16 sur l'îlot B, et enfin à 0,21 sur l'îlot C. Cela signifie qu'en moyenne la canopée est la plus dense sur l'îlot

B, de densité intermédiaire sur l'îlot C, et la moins dense sur l'îlot A. Sur ce dernier, une évolution selon un gradient nord-est / sud-ouest peut être constaté concernant le LPI, à savoir un LPI élevé sur la première moitié nord-est de l'îlot (de 0,5 à 1), et un LPI faible sur sa seconde moitié (0 à 0,2) (figure 20).

Le LPI sur l'îlot A semble suivre la tendance indiquée par le GNDVI pour certaines zones, bien que certains secteurs comportent un taux de chlorophylle moyen à bas mais pourtant une canopée dense. Cela est probablement lié au fait que sur le site de Mareau-aux-Prés, la corrélation entre le GNDVI et le LPI ne soit pas aussi forte que sur le site de Bréhémont. En analysant les orthophotographies du site, il peut être remarqué des secteurs laissant apparaître de la végétation ligneuse morte, correspondant aux zones de GNDVI faible.

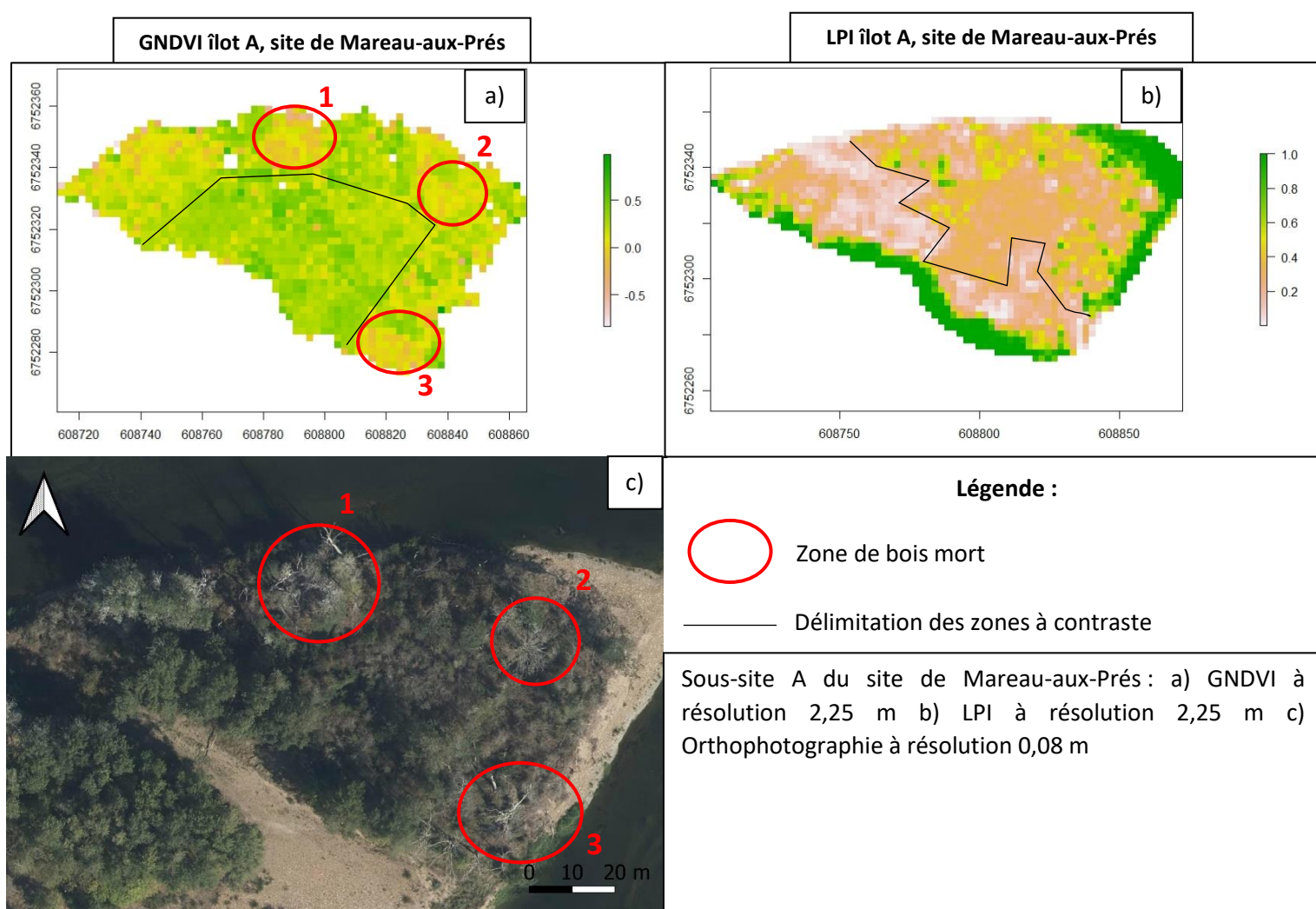


Figure 15: Confrontation GNDVI ; LPI et orthophotographies de l'îlot A, site de Mareau-aux-Prés

Chaque espèce végétale possède ses spécificités en termes de taux de chlorophylle détecté et de densité de canopée. La végétation du site de Mareau-aux-Prés organisée de manière relativement homogène, avec une association de Saulaies-Peupleraies à *Salix alba*, avec une présence ponctuelle d'érable negundo (*Acer Negundo*) (Martin *et al.*, 2020). Ainsi, il est peu probable que les évolutions constatées de GNDVI et de LPI soit provoquée par un changement de communautés végétales. Comme évoqué au cours de la partie évoquant la morphologie de la végétation ligneuse sur le site de Mareau-

aux-Prés, les facteurs évoqués précédemment (dynamique hydraulique, érosion...) pourraient être à l'origine des variations observées.

5.1.2.2 Site de Bréhémont

Le GNDVI moyen des îlots de Bréhémont s'élève à 0,22 pour l'îlot D, 0,15 pour l'îlot E, et enfin 0,19 en ce qui concerne l'îlot F. Ainsi, le taux de chlorophylle est le plus élevé sur l'îlot D, situé à l'ouest du site, et l'îlot E, situé à l'est du site, comporte le taux de chlorophylle le plus faible. L'îlot F peut être découpé en deux parties : la moitié ouest, pauvre en GNDVI (de 0 à 0,25), et la moitié est, caractérisée par un GNDVI fluctuant entre des valeurs de 0,3 et 0,5 (annexe 33). Ainsi, en associant les valeurs moyennes de GNDVI des îlots D et E et des deux moitiés de l'îlot F, il est constaté que le GNDVI du site évolue selon un gradient est-ouest, avec de faibles valeurs de GNDVI à l'ouest (taux de chlorophylle faible) et de fortes valeurs de GNDVI à l'est (taux de chlorophylle élevé).

Le LPI moyen des îlots de Bréhémont s'élève à 0,14 pour l'îlot D, 0,22 pour l'îlot E, et enfin 0,19 en ce qui concerne l'îlot F. Ainsi, la canopée la plus dense du site se situe sur l'îlot D, la moins dense sur l'îlot E, et enfin l'îlot F possède une canopée de densité intermédiaire. L'îlot F peut être découpée en deux parties : la moitié est où le LPI est élevé (0,4), et la moitié ouest comportant des valeurs de LPI faibles, fluctuant entre 0 et 0,2. En étudiant le LPI à l'échelle de l'ensemble du site, il est constaté que la moitié est de ce dernier comporte des valeurs de LPI fortes, donc des canopées peu denses, et que la moitié ouest comporte des valeurs de LPI faibles, donc des canopées denses. Ainsi, sur le site de Bréhémont, le LPI évolue de manière décroissante selon un gradient est-ouest, autrement dit les canopées sont plus denses à l'ouest du site qu'à l'est.

Il a été montré que le LPI comme le GNDVI sur le site de Bréhémont évoluent selon un gradient est-ouest. La moitié est du site est caractérisée par un taux de chlorophylle bas et des canopées peu denses, tandis que la moitié ouest est caractérisée par un taux de chlorophylle élevé et des canopées denses. Ce constat est renforcé par une corrélation entre ces deux métriques (tableau 11), certes de 23%, mais qui demeure une des corrélations les plus élevées parmi celles qui ont été testées (cf 3.4.). Ainsi, il peut être affirmé que la végétation est plus vigoureuse à l'ouest qu'à l'est du site

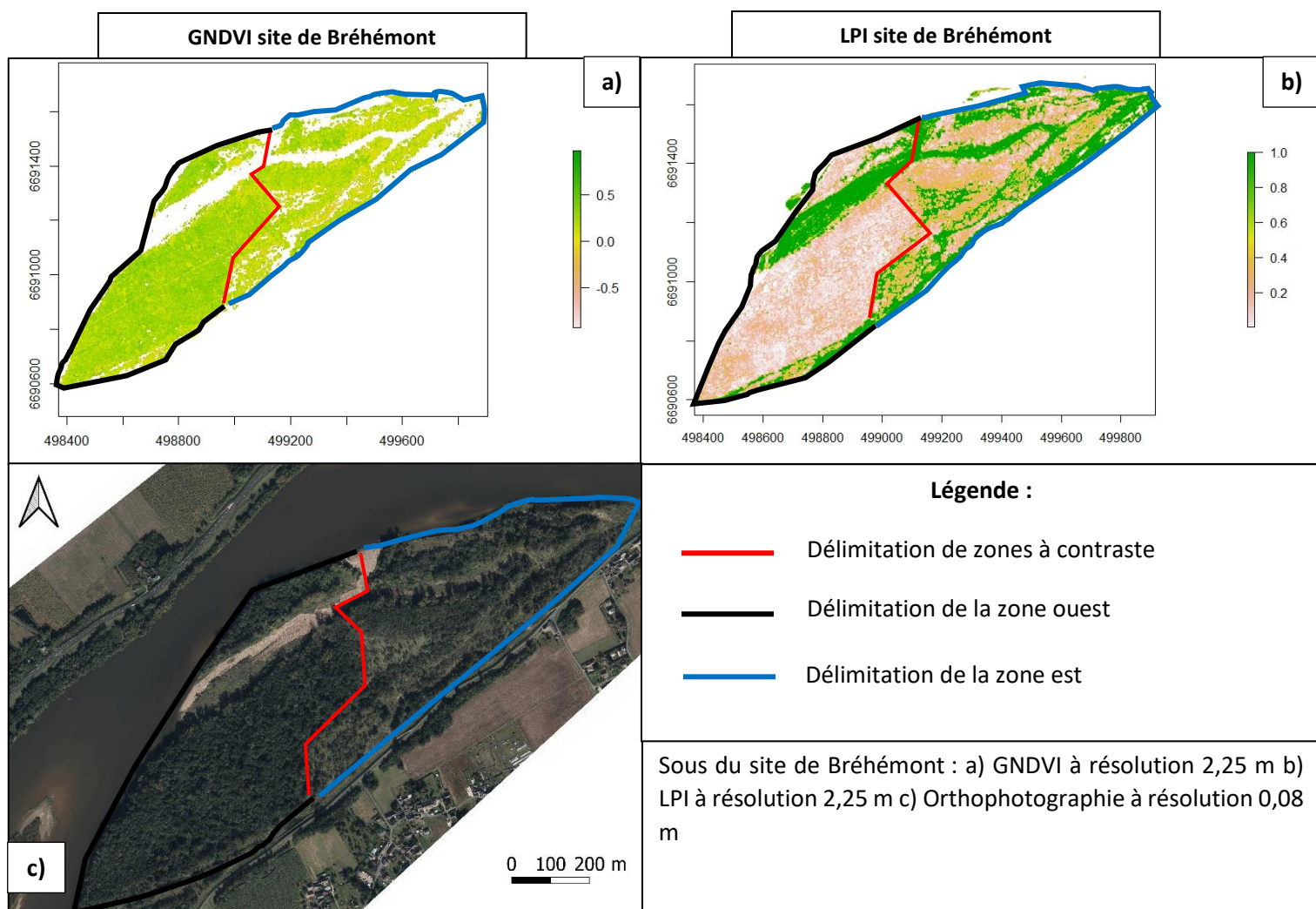


Figure 16: Confrontation GNDVI ; LPI et orthophotographies du site de Bréhémont

5.2 Comprendre la structuration des communautés végétales à l'aide du contexte morphodynamique d'une île

Il a été constaté que les sites étudiés présentent des disparités sur le plan de la morphologie de végétation ligneuse, mais aussi concernant la vigueur de cette végétation. Ces disparités doivent être mises en lien avec le contexte du site en question. Une des constituantes de ce contexte sont l'ensemble des paramètres morphodynamique d'un site, à savoir sa topographie, ainsi que la dynamique fluviale s'appliquant à ce dernier. Cette partie s'attachera à expliquer les métriques étudiées précédemment par le contexte morphodynamique des sites.

5.2.1 Configuration topographique des sites

5.2.1.1 Site de Mareau-aux-Prés

Le site de Mareau-aux-Prés observe des disparités de hauteurs sur l'ensemble de ses îlots, avec l'îlot B comportant les plus grandes hauteurs de végétation, l'îlot C présentant des hauteurs de végétation intermédiaires, et l'îlot A comportant les plus faibles hauteurs de végétation (tableau 3). En replaçant le contexte topographique de cet îlot au premier plan, ces résultats peuvent sembler

contradictoires. En effet, en prenant en compte l'altitude moyenne des différentes unités constituant le site, l'îlot A (86,53 mNGF) est surélevé d'1,2 m par rapport à l'entité B (85,05 mNGF), et d'1,3 m par rapport à l'unité C (85,72 mNGF). Ainsi, les caractéristiques topographiques de l'îlot A pourraient assurer une protection de la végétation présente sur ce même îlot, vis-à-vis des crues par exemple, qui d'après le Flood Pulse Concept renouvellent les sédiments et la végétation situés à proximité du chenal principal (Junk *et al.*, 1989). Pourtant, les caractéristiques de végétation extraites de l'îlot A sont en deçà comparativement aux autres composantes du site de Mareau-aux-Prés : hauteurs plus faibles, canopées moins denses, couronnes moins étendues... Pour expliquer cette situation, il est nécessaire d'amorcer la réflexion par des faits, à savoir que sur l'îlot A, les essences de végétation dominantes sont des saules blancs (*Salix Alba*) et des peupliers noirs (*Populus Nigra*), autrement dit des communautés à bois tendre (Service Loire Bassin Loire Bretagne – DREAL Centre Val de Loire). Considérant le fait que ces communautés sont régulièrement renouvelées à l'occasion de crues (Cornier, 2002) et au vu des caractéristiques liées à la végétation de l'îlot A, deux hypothèses émergent : soit une perturbation récente et majeure a entraîné le renouvellement de végétation de l'entité A (expliquant les hauteurs faibles, canopées moins denses et couronnes moins étendues) ou bien la végétation de cet îlot est tout simplement vieillissante et en moins bonne santé que celle située sur les autres îlots, expliquée par la présence de bois mort (figure 20) (Piégay, 2000). La première semble plausible, à la vue des données fournies par HydroPortail. En effet, le 17/06/2020, soit environ deux mois avant l'acquisition LiDAR sur le site de Mareau-aux-Prés, il a été enregistré un débit de 808 m³/s à Orléans (45, situé à environ une dizaine de kilomètres en amont du site étudié) alors que le débit d'étiage de période retour 5 ans est de 49 m³/s et le débit moyen du mois de juin est de 261 m³/s. Ainsi, les caractéristiques de végétation de l'îlot A peuvent être expliquées par ce renouvellement récent. La deuxième supposition formulée, à savoir que la végétation de cet îlot est vieillissante, est aussi possible au vu de la longévité de cet îlot. En effet, en considérant le fait qu'il apparaît comme végétalisé depuis les années 1950 (Wintenberger, 2015) et les contraintes hydrauliques s'appliquant au site (cf 4.1.2.), il apparaît sensé que la végétation de cet îlot se trouve de moins en moins bien établie.

En se référant aux orthophotographies (figure 5) renvoyant au site de Mareau-aux-Prés, il peut être observé que l'îlot B se situe directement derrière l'îlot A (prenant comme référentiel le sens du courant). De plus, en se référant aux valeurs des métriques extraites, il peut être remarqué que le sous-site B possède une moyenne de hauteurs de végétation bien supérieure à celle de l'îlot A (20,5m contre 13 m), une aire de couronnes plus élevée, ainsi qu'un LPI plus faible, témoignant d'une végétation mieux établie que sur l'îlot A. Ainsi, il peut être supposé que l'îlot A, de par sa topographie supérieure aux autres entités morphologique, fait bénéficier l'îlot B d'une protection vis-à-vis des contraintes hydrauliques. L'îlot C quant à lui présente des caractéristiques de végétation pouvant être qualifiées d'intermédiaire par rapport aux deux autres unités morphologiques du site de Mareau-aux-Prés. En effet, une strate arborée y est présente et même dominante. La valeur moyenne de LPI est intermédiaire par rapport aux deux autres îlots, tandis que le GNDVI moyen est supérieur à la moyenne des deux autres entités, ce qui traduit une canopée de densité intermédiaire et un taux de chlorophylle plus élevé que sur les deux autres unités. Une supposition expliquant ces résultats serait que l'îlot étudié comporte la distance la plus élevée au chenal principal (110 m), limitant ainsi le renouvellement de végétation par les crues.

5.2.1.2 Site de Bréhémont

Les hauteurs des îlots du site de Bréhémont sont quant à elles beaucoup plus homogènes que sur le site de Mareau. En effet, l'îlot D et E sont de hauteur comparable, tandis que l'îlot F possède une hauteur située 20 cm en dessous des deux autres îlots. Ceci peut être expliqué par le fait que ce dernier est découpé par plusieurs paléochenaux (Rodrigues, 2004), réduisant ainsi la moyenne topographique.

Les communautés végétales sont quant à elles beaucoup plus hétérogènes que sur le site de Mareau-aux-Prés. En effet, des communautés à bois durs, à savoir des associations frênaies-ormes et chênaies-ormes accompagnent des associations de bois tendre telles que des saulaies-peupleraies (Rodrigues, 2004) (Service Loire Bassin Loire Bretagne – DREAL Centre Val de Loire). Ainsi se pose la question de l'influence de la topographie des îles sur la structuration des communautés végétales. En comparant le MNT du site de Bréhémont et la carte des communautés végétales de ce même site, il peut être observé que la zone d'occupation de la communauté « landes à genêts » correspond à l'emplacement du paléochenal PC1. Un second paléochenal (PC2) peut être observé sur l'ouest de l'îlot F, sans pour autant provoquer un changement de communauté. Mais dans les deux cas, la présence de ces paléochenaux traduit des hauteurs de végétation moins importantes (annexe 6). Cela peut s'expliquer par le fait que les entités de végétation se trouvant dans ces secteurs se trouvent plus proches de la ligne d'eau et de la nappe alluviale, et donc sont sujets à des renouvellements plus réguliers.

5.2.2 Processus hydrauliques

La précédente sous-partie de cette discussion s'attachait à établir un lien entre la disposition des îlots au sein d'un complexe insulaire dans un contexte rivulaire et l'organisation des communautés végétales. Dans le cas du premier site (Mareau-aux-Prés), ce lien a pu être en partie démontré, mais cela n'a pas pu être le cas pour le deuxième site d'étude, à savoir celui de Bréhémont. Ainsi, un autre facteur morphodynamique peut permettre d'expliquer l'organisation des communautés végétales, en l'occurrence les processus hydrauliques.

5.2.2.1 Site de Mareau-aux-Prés

Sur le site de Mareau, c'est l'îlot A qui demeure le plus exposé au chenal principal (tableau 13). Ce dernier exerçant des contraintes érosives sur cet îlot (Wintenberger, 2015), il s'agit ici d'essayer de mettre en relation ces contraintes érosives avec les métriques de végétation extraites du traitement de données issues du LiDAR. Il a déjà été mentionné auparavant que l'îlot A comportait des hauteurs de végétation relativement faibles, de même concernant les superficies de couronnes et un LPI élevé. Le GNDVI moyen de cet îlot quant à lui n'est pas le plus faible du site de Mareau. Cependant, en allant au-delà de l'information donnée par la moyenne de cet indicateur, il peut être remarqué que la partie centrale de l'îlot A comporte un GNDVI aux alentours de 0,5 (taux de chlorophylle élevé), tandis que l'ensemble du pourtour de l'îlot A comporte des valeurs de GNDVI nettement plus basses, variant de 0 à -0,5, mettant en évidence un taux de chlorophylle faible. L'étude du LPI de cet îlot montre une tendance similaire, avec des valeurs faibles sur la partie centrale de l'îlot A (suggérant une végétation dense), puis élevées sur les franges, signifiant une végétation moins dense (figure 20).

Tableau 13: Périmètre de contact avec le chenal principal du site de Mareau-aux-Prés

	Ilot A	Ilot B	Ilot C	Total
Périmètre de contact avec le chenal principal (m)	162	81,85	0	243,85

5.2.2.2 Site de Bréhémont

Dans le secteur du site de Bréhémont, il peut être observé que le chenal se rétrécit (passant d'une largeur de 260 m à 145 m), puis s'élargit à nouveau pour atteindre une largeur de 280 m (figure 22). Ce phénomène de contraction du chenal va contribuer à une augmentation des vitesses de courant, et donc du pouvoir érosif, et le phénomène d'élargissement du chenal une diminution des vitesses de courant, et donc du pouvoir érosif (Claude, 2012). Ainsi, des contraintes hydrauliques

érosives vont s'exercer sur la partie amont du site de Bréhémont, et le phénomène inverse, à savoir du dépôt, va se mettre en place sur la partie aval. L'évolution des caractéristiques végétales selon un gradient amont-aval évoqué lors de la partie précédente correspond à cette évolution du pouvoir érosif, à savoir : l'implantation d'une végétation peu établie (hauteurs relativement faibles, GNDVI faible, LPI élevé) correspondant à une zone à potentiel érosif élevé sur la partie amont, puis l'implantation d'une végétation pouvant être qualifiée de mieux établie sur la partie aval correspondant à une zone à potentiel érosif plus faible. Ce constat reste à nuancer sur les îlots D et E. En effet, ces derniers étant d'anciennes pâtures (Rodrigues, 2004) et en cours de re végétalisation, les caractéristiques de végétation de ces îlots traduisent naturellement une végétation moins établie.

Tableau 14: Périmètre de contact avec le chenal principal du site de Bréhémont

	Ilot D	Ilot E	Ilot F	Total
Périmètre de contact avec le chenal principal (m)	660	519,5	668	1847,5

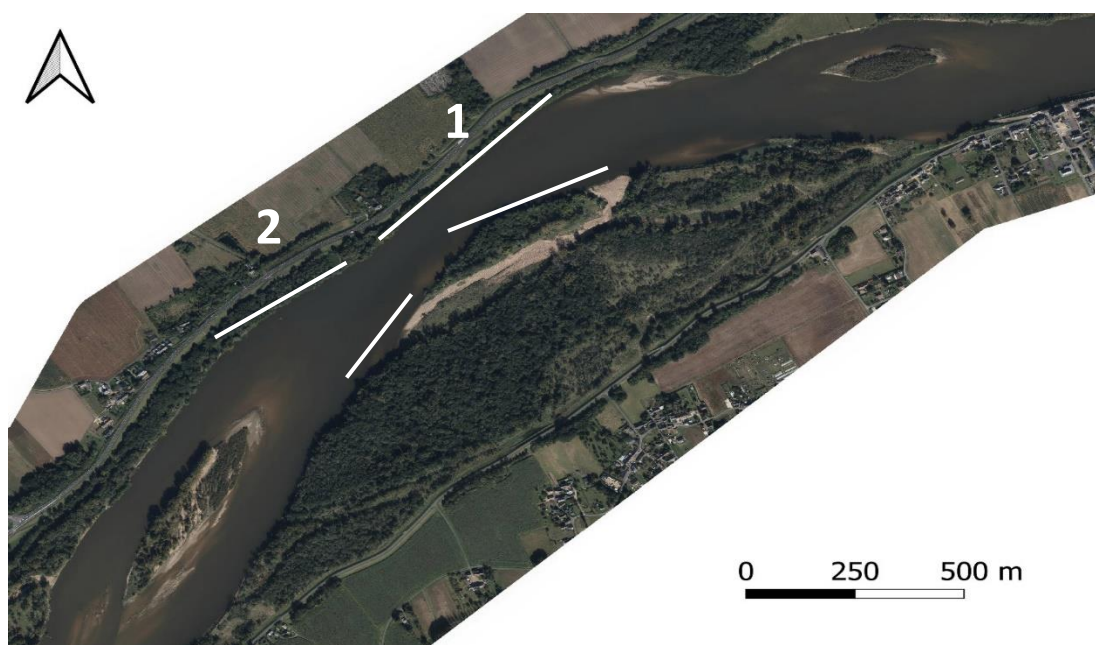


Figure 17: 1) Rétrécissement du chenal principal, 2) Elargissement du chenal principal, site de Bréhémont

5.3 Potentielle influence de l'incision sur les communautés végétales ligériennes

L'incision d'un cours d'eau est un phénomène d'enfoncement du fond du lit, et dans le cadre de la Loire, a été aggravé majoritairement par l'extraction de granulats en grande quantité de 1910 à 1980 (Gasowski, 1994) ou encore par la construction d'épis concentrant les écoulement au sein du chenal principal (Latapie, 2011). Comme évoquée en introduction de ce rapport, les principales conséquences sont 1) une déconnexion progressive des chenaux secondaires (et donc à un développement plus prononcé de la végétation au sein de ces chenaux) et 2) une diminution de la capacité d'écoulement des crues, conduisant à un rehaussement de leur niveau.

Le site de Mareau-aux-Prés a connu une incision de 150 cm jusqu'à l'arrêt des extractions de granulats (Gasowski, 1994), et depuis connaît un exhaussement de la ligne d'eau (Wintenberger, 2015). Comme l'une des conséquences de l'incision est d'abaisser les lignes d'eau, ce site ne sera pas étudié dans cette partie.

Le site de Bréhémont s'inscrit dans un contexte d'incision, localisée dans le chenal principal et dans le chenal secondaire 1 (ch1) (annexe 62). Une boucle à rétroaction positive s'est mise en place : l'incision a provoqué la végétalisation de ce chenal, et la déviation des écoulements provoquée par cette présence végétale a amplifié l'incision (Rodrigues *et al.*, 2006). De ce fait, des travaux de dévégétalisation ont été effectués sur ce chenal secondaire (visibles sur les orthophotographies du site, annexe 62). Ces mêmes orthophotographies montrent que le chenal secondaire 2 (ch2) est végétalisé, mettant en lumière le phénomène d'incision du chenal principal qui déconnecte le chenal secondaire en question et donc qui se végétalise. Ce chenal borde la moitié est supérieure de l'îlot F, qui est caractérisée par des hauteurs de végétation relativement faibles, excepté sur la frange (figure 19) où des individus observent une hauteur atteignant 30 m. Ceci est en parti dû à une topographie plus élevée sur le bord de cette partie de l'îlot F, mais peut être aussi causé par un dépôt de sédiment provoqué par la végétalisation du chenal secondaire 2.

Comme le montre la figure 22, le site de Bréhémont se situe au niveau d'une inflexion du chenal. Les processus liés à cette configuration de cours d'eau sont d'une part une aggradation de la rive gauche (intérieur du méandre) ainsi qu'une érosion de la rive droite (extérieur du méandre). L'îlot D se trouve justement à l'intérieur du méandre avec le chenal principal passant au nord, et le chenal secondaire ch1 passant au sud. En prenant en compte le phénomène d'aggradation se produisant sur la rive nord de l'îlot D en plus du chenal secondaire 1 qui se végétalise par le biais de l'incision, il serait intéressant d'étudier les caractéristiques végétales de l'îlot D. En effet, il est supposé que de par l'aggradation et le ralentissement des écoulements du chenal secondaire 1 causé par une végétation plus présente, l'îlot A soit soumis à moins de contraintes hydrauliques, et donc que les hauteurs de végétation, les superficies de couronnes, le taux de chlorophylle ainsi que la densité de canopée augmentent. Cependant, ce travail dépasse l'échelle de temps de l'étude menée ici.

6. Conclusion et perspectives :

La méthodologie employée dans cette étude a permis de montrer qu'une caractérisation de la végétation ligneuse alluviale à partir de donnée LiDAR topo-bathymétrique était possible. Pour ce faire, quatre indicateurs ont été utilisés : les hauteurs de végétation, leur superficie de couronne, le GNDVI (estimant le taux de chlorophylle sur la base de propriétés spectrales) et le LPI, variable proxy de la densité de canopée. Les deux premières métriques ont permis de caractériser la morphologie de la végétation ligneuse alluviale, et les deux dernières la vigueur de la végétation ligneuse alluviale. Des disparités à travers ces métriques sur les sites d'étude de Mareau-aux-Prés et de Bréhémont ont été mises en évidence, et des hypothèses permettant d'expliquer ces disparités ont pu être développées, notamment grâce au contexte morphodynamique des deux sites d'études.

L'incision n'a pu être que partiellement mise en évidence au travers des quatre indicateurs évoqués, les effets de ce phénomène dépassant l'échelle de temps de cette étude. En effet, des comparaisons diachroniques sont nécessaires pour qualifier et quantifier l'incision, ce que ne permettaient pas les données de cette étude, bien que les données d'un relevé LiDAR de 2003 étaient disponibles mais non exploitables principalement à cause d'une densité de points trop faible. Ainsi, une des principales perspectives à ce travail réside dans la caractérisation de l'incision à l'aide du LiDAR topo-bathymétrique.

Enfin, cette étude s'est tenue à caractériser la végétation ligneuse alluviale sans tenir compte des essences. Une deuxième perspective à ce travail serait de parvenir à caractériser les essences de végétation ligneuse alluviale à l'aide du LiDAR topo-bathymétrique, notamment grâce à la mise en place d'une méthodologie de type machine learning.

7. Bibliographie :

- Baartman, J. E., Jetten, V. G., Ritsema, C. J., et de Vente, J. (2012). Exploring effects of rainfall intensity and duration on soil erosion at the catchment scale using openLISEM: Prado catchment, SE Spain. *Hydrological processes*, 26(7), 1034-1049.
- Babonaux, Y. (1971). Chronique Ligérienne (Région Centre, 1970). *Noréis*, 71(1), 553-572.
- Bacchi, M. (2000). *Structure et dynamique des peuplements macrobenthiques en Loire: impact des facteurs hydrologiques et sédimentaires* (Doctoral dissertation, Tours).
- Beucher, S., et Lantuejoul, C. (1979, September). Use of watersheds in contour detection. Int. In *Workshop on Image Processing, CCETT/IRISA, Rennes, France*.
- Bonnet, S. (2009). Un Modèle Numérique de Canopée pour l'estimation de la hauteur dominante des peuplements résineux en Région wallonne. *Forêt Wallonne*, 98, 53-59.
- Claude, N. (2012). *Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablo-graveleuse: influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France)* (Doctoral dissertation, Tours).
- Cornier, T. (2002). *La végétation alluviale de la Loire entre le Charolais et l'Anjou: essai de modélisation de l'hydrosystème* (Doctoral dissertation, Université François Rabelais-Tours).
- Corti Meneses, N., Baier, S., Geist, J., et Schneider, T. (2017). Evaluation of green-LiDAR data for mapping extent, density and height of aquatic reed beds at Lake Chiemsee, Bavaria—Germany. *Remote Sensing*, 9(12), 1308.
- Dalponte, M., et Coomes, D. A. (2016). Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in ecology and evolution*, 7(10), 1236-1245.
- Dupont, N., et Moatar, F. (2016). *La Loire fluviale et estuarienne: Un milieu en évolution*. Quae.
- Flood, M. (2001). LiDAR activities and research priorities in the commercial sector. *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, 34(3/W4), 3-8.
- Fehérváry, I., et Kiss, T. (2020). Identification of riparian vegetation types with machine learning based on LiDAR point-cloud made along the lower Tisza's floodplain. *Journal of Environmental Geography*, 13(1-2), 53-61.
- Gautier, E., Grivel, S., (2006). Multi-scale analysis of island formation and development in the Middle Loire River, France. *IAHS PUBLICATION*, 306, 179.
- Gasowski, Z. (1994). L'enfoncement du lit de la Loire/the entrenchment of the Loire's river bed. *Géocarrefour*, 69(1), 41-45.
- Girardeau-Montaut, D. (2021). CloudCompare—3d Point Cloud and Mesh Processing Software (version 2.10. 1). Windows
- Heritage, G.L., Milan, D.J., Large, A.R.G, Fuller, I.C., 2009. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology* 112, 334-344.
- Hupp, C. R. (1992). Riparian vegetation recovery patterns following stream channelization: a geomorphic perspective. *Ecology*, 73(4), 1209-1226.
- Kada, M., et McKinley, L. (2009). 3D building reconstruction from LiDAR based on a cell decomposition approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 3), W4.

- Kumar, J., Weiner, J., Hargrove, W. W., Norman, S. P., Hoffman, F. M., et Newcomb, D. (2015, November). Characterization and classification of vegetation canopy structure and distribution within the Great Smoky Mountains National Park using LiDAR. In *2015 IEEE International Conference on Data Mining Workshop (ICDMW)* (pp. 1478-1485). IEEE.
- Lague, D., et Feldmann, B. (2020). Topo-bathymetric airborne LiDAR for fluvial-geomorphology analysis. In *Developments in earth surface processes* (Vol. 23, pp. 25-54). Elsevier.
- Laslier, M., Hubert-Moy, L., et Dufour, S. (2019). Mapping riparian vegetation functions using 3D bispectral LiDAR data. *Water*, 11(3), 483.
- Latapie, A. (2011). *Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial: application à la Loire moyenne* (Doctoral dissertation, Doctorat en Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de Tours).
- Martin, H., Monnet, J. M., De Boisvilliers, M., Chevalier, R., et Villar, M. (2020). Remote sensing of american maple in alluvial forests: a case study in an island complex of the Loire valley (France). *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 13(5), 409.
- Mallet, C., et Bretar, F. (2009). Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 64(1), 1-16.
- Nakagawa, S., Johnson, P. C., et Schielzeth, H. (2017). The coefficient of determination R^2 and intra-class correlation coefficient from generalized linear mixed-effects models revisited and expanded. *Journal of the Royal Society Interface*, 14(134), 20170213.
- Nasiri, V., Darvishsefat, A. A., Arefi, H., Griess, V. C., Sadeghi, S. M. M., et Borz, S. A. (2022). Modeling forest canopy cover: A synergistic use of Sentinel-2, aerial photogrammetry data, and machine learning. *Remote Sensing*, 14(6), 1453.
- Ndamiyehe Ncutirakiza, J. B., Lejeune, P., Gourlet-Fleury, S., Fayolle, A., Ndjele Mianda-Bungi, L., et Ligot, G. (2020). Quantifier les dimensions des houppiers à l'aide d'images aériennes à haute résolution pour estimer l'accroissement diamétrique des arbres dans les forêts d'Afrique centrale. *Bois et Forêts des Tropiques*, 343.
- Parrish, C. E., Dijkstra, J. A., O'Neil-Dunne, J. P., McKenna, L., et Pe'eri, S. (2016). Post-Sandy benthic habitat mapping using new topobathymetric lidar technology and object-based image classification. *Journal of Coastal Research*, (76 (10076)), 200-208.
- Piégay, H. (2000). Le bois mort en rivière: faut-il toujours l'enlever?. *Comptes-rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 86, 97-107.
- Rodrigues, S. (2004). *Dynamique sédimentaire et végétation: évolution de chenaux fluviaux en Loire moyenne (France)* (Doctoral dissertation, Tours).
- Rodrigues, S., Bréhéret, J. G., Macaire, J. J., Moatar, F., Nistoran, D., et Jugé, P. (2006). Flow and sediment dynamics in the vegetated secondary channels of an anabranching river: the Loire River (France). *Sedimentary Geology*, 186(1-2), 89-109.
- Roussel, J. R., Auty, D., De Boissieu, F., Meador, A. S., et Bourdon, J. F. (2018). lidR: Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. *R package version*, 1(1).
- Tabacchi, E., Lambs, L., Guilloy, H., Planty-Tabacchi, A. M., Muller, E., et Decamps, H. (2000). Impacts of riparian vegetation on hydrological processes. *Hydrological processes*, 14(16-17), 2959-2976.
- Team, R. C. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2012.

- Tonina, D., McKean, J. A., Benjankar, R. M., Wright, C. W., Goode, J. R., Chen, Q., ... et Edmondson, M. R. (2019). Mapping river bathymetries: Evaluating topobathymetric LiDAR survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(2), 507-520.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis* (Vol. 2, pp. 131-160).
- Wang, Y., Bashir, S. M. A., Khan, M., Ullah, Q., Wang, R., Song, Y., ... et Niu, Y. (2022). Remote sensing image super-resolution and object detection: Benchmark and state of the art. *Expert Systems with Applications*, 116793.
- Wang, K., Franklin, S. E., Guo, X., et Cattet, M. (2010). Remote sensing of ecology, biodiversity and conservation: a review from the perspective of remote sensing specialists. *Sensors*, 10(11), 9647-9667.
- Wickham, H. (2016). Data analysis. In *ggplot2* (pp. 189-201). Springer, Cham.
- Wintenberger, C. (2015). *Dynamique fluviale et végétation pionnière à la Salicaceae en rivière sablo-graveleuse: études in et ex situ de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire Moyenne* (Doctoral dissertation, Tours).
- Wozencraft, J., et Millar, D. (2005). Airborne lidar and integrated technologies for coastal mapping and nautical charting. *Marine Technology Society Journal*, 39(3).
- Zhu, Z., Kleinn, C., et Nölke, N. (2021). Assessing tree crown volume—A review. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(1), 18-35.

Table des figures

Figure 1: principe de fonctionnement d'un LiDAR à double faisceau	8
Figure 2: workflow relatif au processus du traitement de l'information LiDAR	9
Figure 3: exemples de styles fluviaux	10
Figure 4 : pourcentage de recouvrement des communautés végétales de Bréhémont	12
Figure 5: Localisation et configuration morphologique des sites d'études	13
Figure 6: Représentation du nuage de points non filtré (CloudCompare) correspondant au secteur de Mareau Aux-Prés (45).....	14
Figure 7: Représentation simplifiée des différents modèles numériques employés (Bonnet, 2009)...	15
Figure 8: Enveloppe de canopée permettant le calcul de la superficie de couronne (Zhu et al., 2021)	17
Figure 9: Test de sensibilité du nombre de couronnes en fonction de la résolution.....	18
Figure 10: Boîtes à moustaches des hauteurs de végétation des six îlots	22
Figure 11: Boîtes à moustaches des superficies de couronnes de végétation des six îlots	23
Figure 12: Boîtes à moustaches du GNDVI de la végétation des six îlots	25
Figure 13: Boîtes à moustaches du LPI de la végétation des six îlots.....	26
Figure 14: Courbe de régression linéaire du GNDVI et du LPI du site de Bréhémont.....	28
Figure 15: Confrontation GNDVI ; LPI et orthophotographies de l'îlot A, site de Mareau-aux-Prés	30
Figure 16: Confrontation GNDVI ; LPI et orthophotographies du site de Bréhémont	32
Figure 17: 1) Rétrécissement du chenal principal, 2) Elargissement du chenal principal , site de Bréhémont.....	35

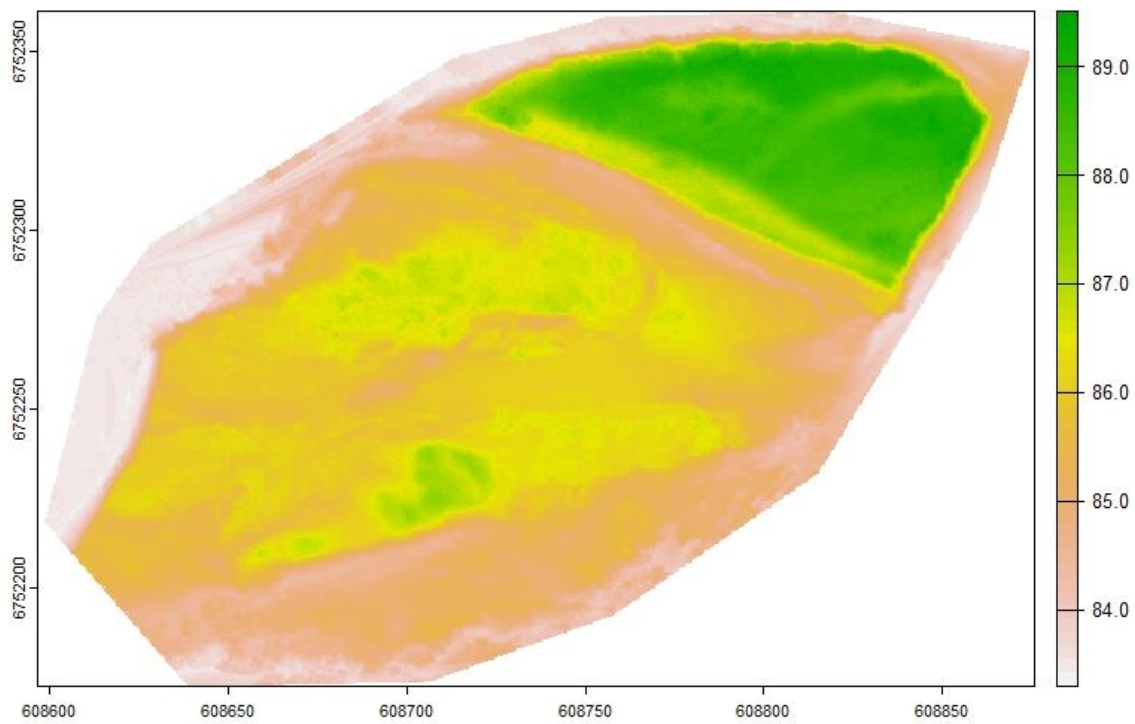
Liste des tableaux

Tableau 1: Principales caractéristiques du site de Mareau-aux-Prés : superficie, périmètre, altitude .	11
Tableau 2: principales caractéristiques du site de Bréhémont : superficie, périmètre, altitude.....	12
Tableau 3: Résultats de hauteurs de végétation sur le site de Mareau-aux-Prés.....	20
Tableau 4: Résultats de superficies de couronnes sur le site de Mareau-aux-Prés.....	21
Tableau 5: Résultats de hauteurs sur le site de Bréhémont	21
Tableau 6: Résultats de superficies de couronnes sur le site de Bréhémont	22
Tableau 7: Résultats de GNDVI du site de Mareau-aux-Prés	23
Tableau 8: Résultats du GNDVI du site de Bréhémont.....	24
Tableau 9: Résultats de LPI du site de Mareau-aux-Prés	25
Tableau 10: résultats du LPI du site de Bréhémont	26
Tableau 11: R ² de l'ensemble du site de Bréhémont	27
Tableau 12: R ² de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés.....	27
Tableau 13: Périmètre de contact avec le chenal principal du site de Mareau-aux-Prés.....	34
Tableau 14: Périmètre de contact avec le chenal principal du site de Bréhémont	35

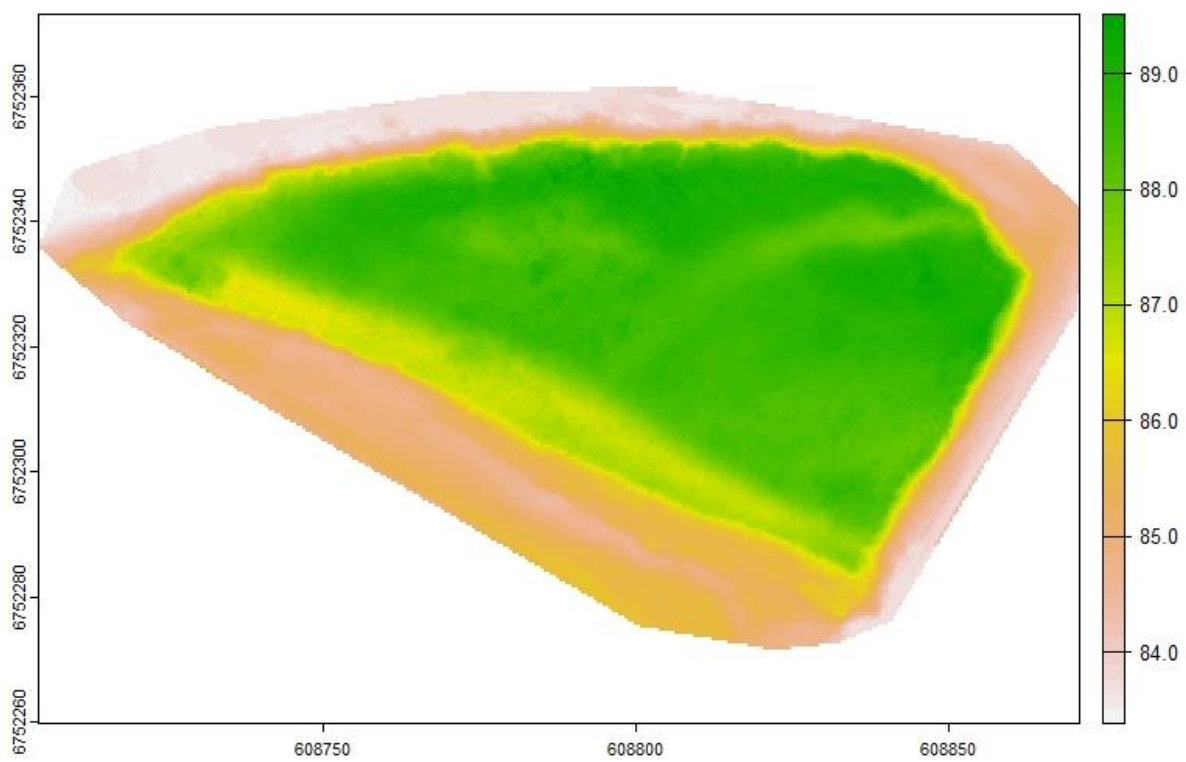
Liste des annexes

Annexe 1: MNT global du site de Mareau-aux-Prés (mNGF)	45
Annexe 2: MNT îlot A (mNGF)	46
Annexe 3: MNT îlot B (mNGF)	47
Annexe 4: MNT îlot C (mNGF)	47
Annexe 5: MNT îlot D (mNGF)	48
Annexe 6: MNT global site de Bréhémont (mNGF)	48
Annexe 7: MNC global site de Mareau-aux-Prés avec maximums locaux (m)	49
Annexe 8: MNT îlot E (mNGF)	49
Annexe 9: courbe de densité des hauteurs, site global Mareau-aux-Prés (m)	50
Annexe 10: courbe de densité des hauteurs de l'îlot A (m)	50
Annexe 11: courbe de densité de hauteurs de l'îlot B (m)	51
Annexe 12: courbe de densité de hauteurs de l'îlot C (m)	51
Annexe 13: MNC de l'ensemble du site de Bréhémont (m)	52
Annexe 14: courbe de densité de hauteurs du site de Bréhémont (m)	52
Annexe 15: courbe de densité de hauteurs de l'îlot E	53
Annexe 16: courbe de densité de hauteurs de l'îlot D	53
Annexe 17: courbe de densité de hauteurs de l'îlot F	54
Annexe 18: superficies des couronnes de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés (m ²)	54
Annexe 19: courbe de densité de superficies de couronnes de l'îlot A (m ²)	55
Annexe 20: courbe de densité de superficies de couronnes de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés (m ²)	55
Annexe 21: courbe de densité de superficies de couronnes de l'îlot C (m ²)	56
Annexe 22: courbe de densité de superficies de couronnes de l'îlot B (m ²)	56
Annexe 23: superficies de couronnes de l'ensemble du site de Bréhémont (m ²)	57
Annexe 24: courbe de densité de superficies de couronnes de l'ensemble du site de Bréhémont (m ²)	57
Annexe 25: courbe de densité des superficies de couronnes de l'îlot D (m ²)	58
Annexe 26: courbe de densité des superficies de couronnes de l'îlot E (m ²)	58
Annexe 27: GNDVI de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés	59
Annexe 28: courbe de densité de superficies de couronnes de l'îlot F (m ²)	59
Annexe 29: courbe de densité du GNDVI de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés	60
Annexe 30: courbe de densité du GNDVI de l'îlot A	60
Annexe 31: courbe de densité du GNDVI de l'îlot B	61
Annexe 32: courbe de densité du GNDVI de l'îlot C	61
Annexe 33: GNDVI du site de Bréhémont	62
Annexe 34: courbe de densité du GNDVI de l'ensemble du site de Bréhémont	62
Annexe 35: courbe de densité du GNDVI de l'îlot D	63
Annexe 36: courbe de densité du GDNVI de l'îlot E	63
Annexe 37: LPI de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés	64
Annexe 38: courbe de densité du GNDVI de l'îlot F	64
Annexe 39: courbe de densité du LPI de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés	65
Annexe 40: courbe de densité du LPI de l'îlot A	65
Annexe 41: Courbe de densité du LPI de l'îlot B	66
Annexe 42: courbe de densité du LPI de l'îlot C	66
Annexe 43: LPI du site de Bréhémont	67

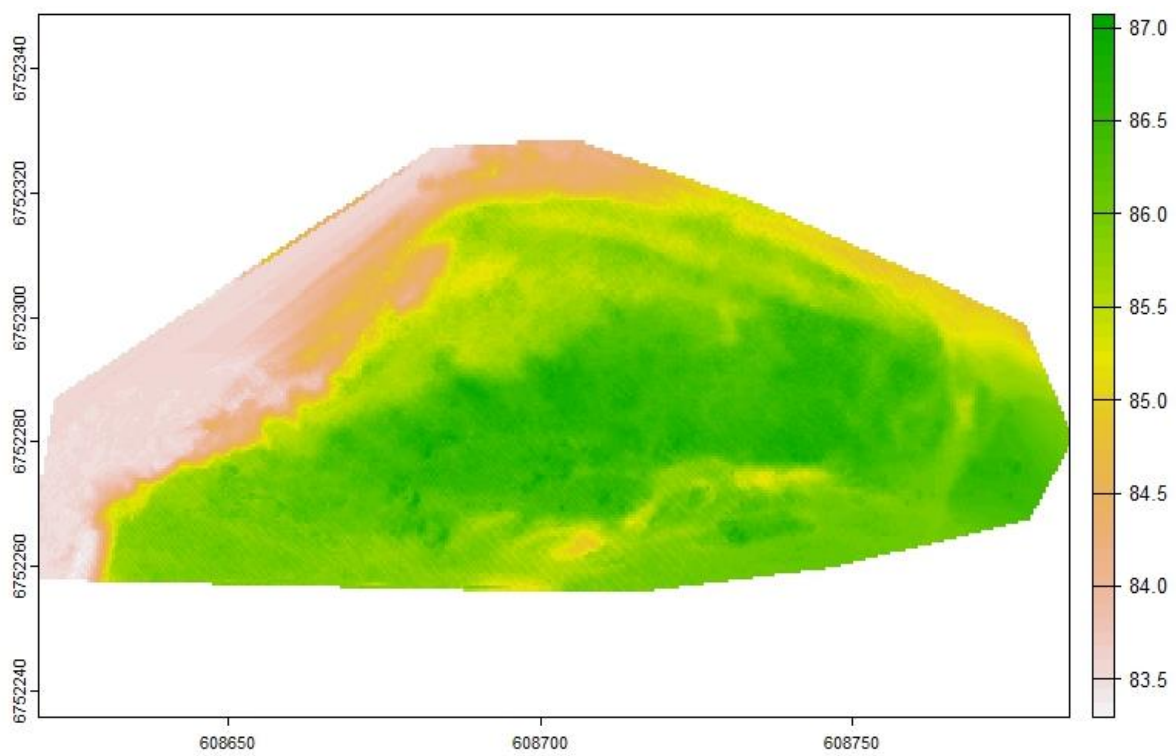
Annexe 44: Courbe de densité du LPI du site de Bréhémont	67
Annexe 45: Courbe de densité du LPI de l'îlot E.....	68
Annexe 46: Courbe de densité du LPI de l'îlot D	68
Annexe 47: R ² de l'ensemble du sous-site D	69
Annexe 48: Courbe de densité du LPI de l'îlot F.....	69
Annexe 49: R ² de l'ensemble du sous-site F.....	69
Annexe 50: R ² de l'ensemble du sous-site E.....	69
Annexe 51: R ² de l'ensemble du sous-site C	70
Annexe 52: R ² de l'ensemble du sous-site B	70
Annexe 53: R ² de l'ensemble du sous site A.....	70
Annexe 54: Paramètres statistiques des hauteurs à l'échelle inter sous-sites	70
Annexe 55: Paramètres statistiques des superficies de couronnes à l'échelle inter sous-sites	71
Annexe 56: Paramètres statistiques du GNDVI à l'échelle inter sous-sites	71
Annexe 57: Paramètres statistiques du LPI à l'échelle inter sous-sites	71
Annexe 58: Boîte à moustache de la distribution des hauteurs des deux sites d'études.....	72
Annexe 59: Boîte à moustache de la distribution des superficies de couronnes des deux sites d'études	72
Annexe 60: Boîte à moustache de la distribution du GNDVI des deux sites d'études.....	72
Annexe 61: Boîte à moustache de la distribution du LPI des deux sites d'études	72
Annexe 62: chenaux secondaires du site de Bréhémont	72



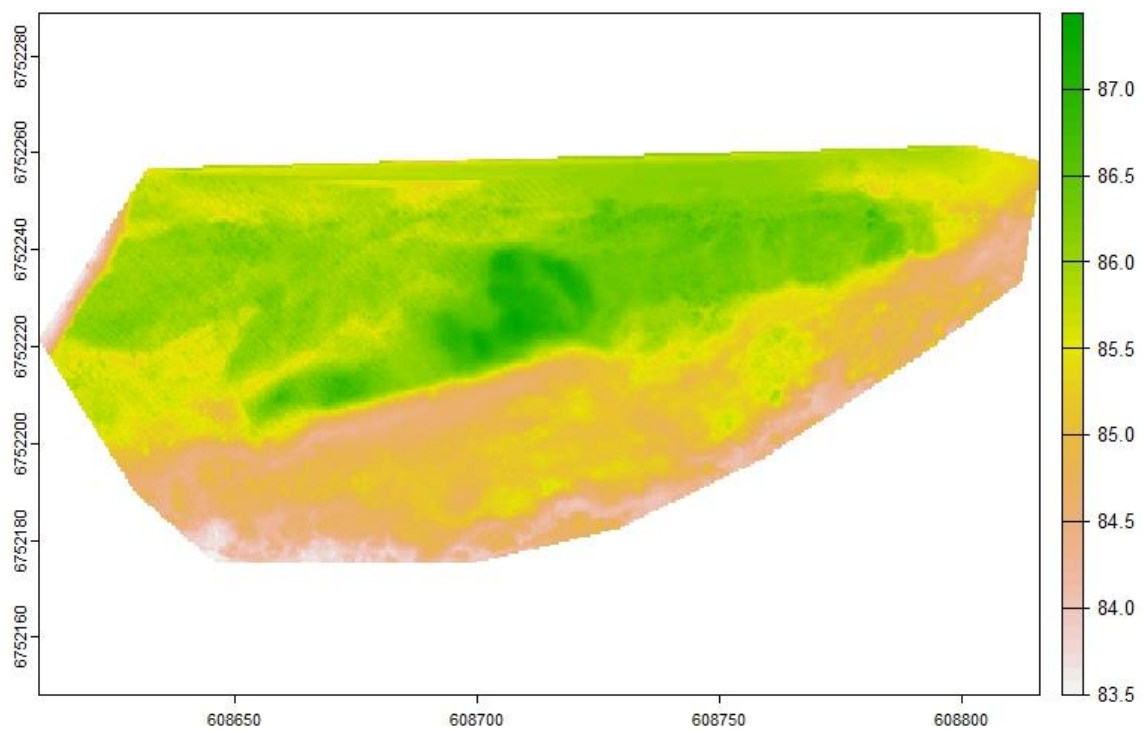
Annexe 1: MNT global du site de Mareau-aux-Prés (mNGF)



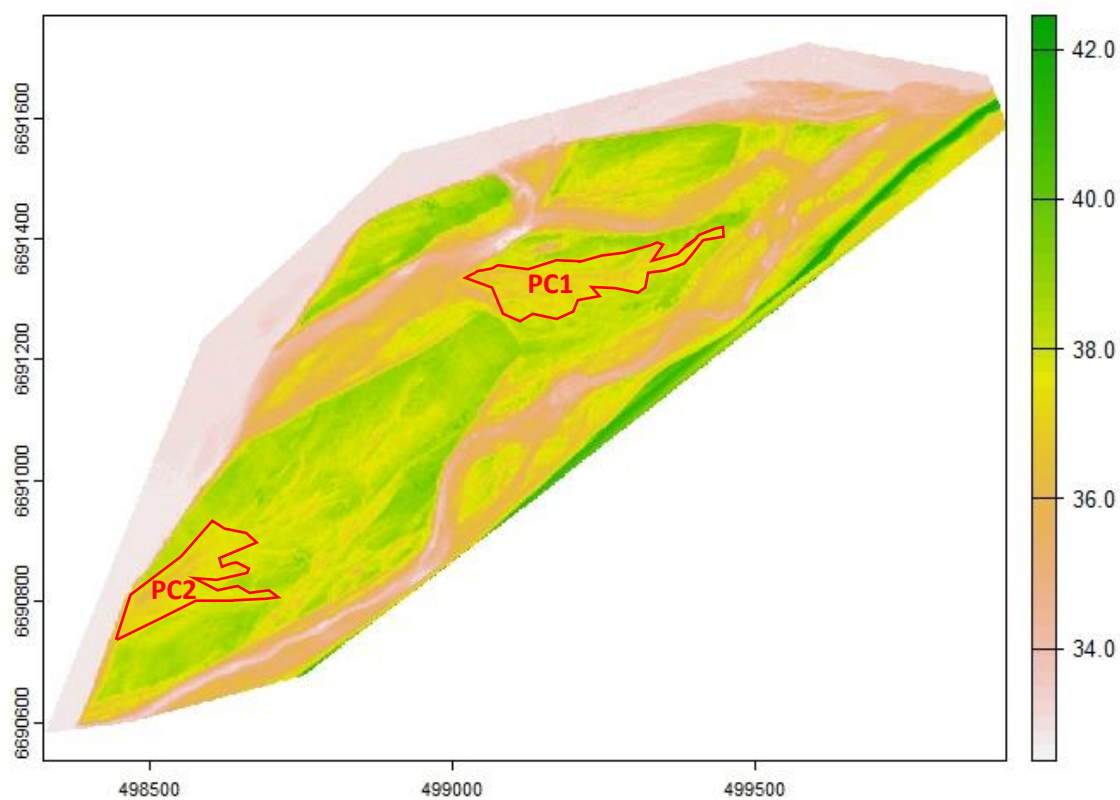
Annexe 2: MNT îlot A (mNGF)



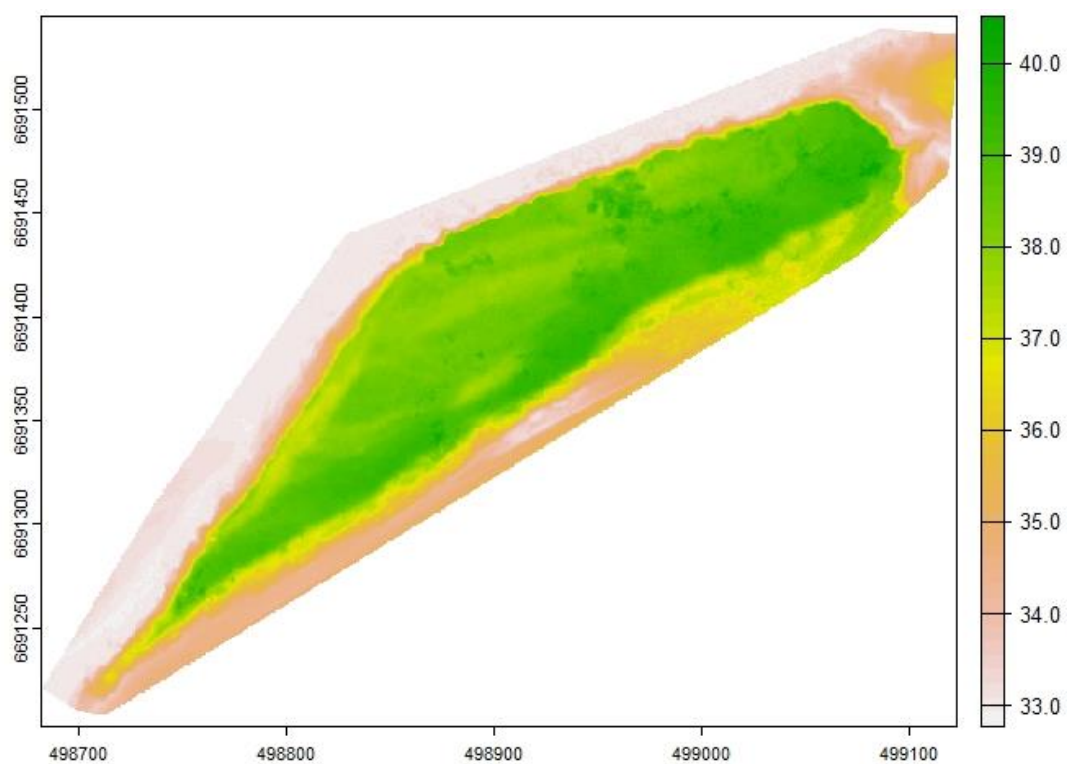
Annexe 3: MNT îlot B (mNGF)



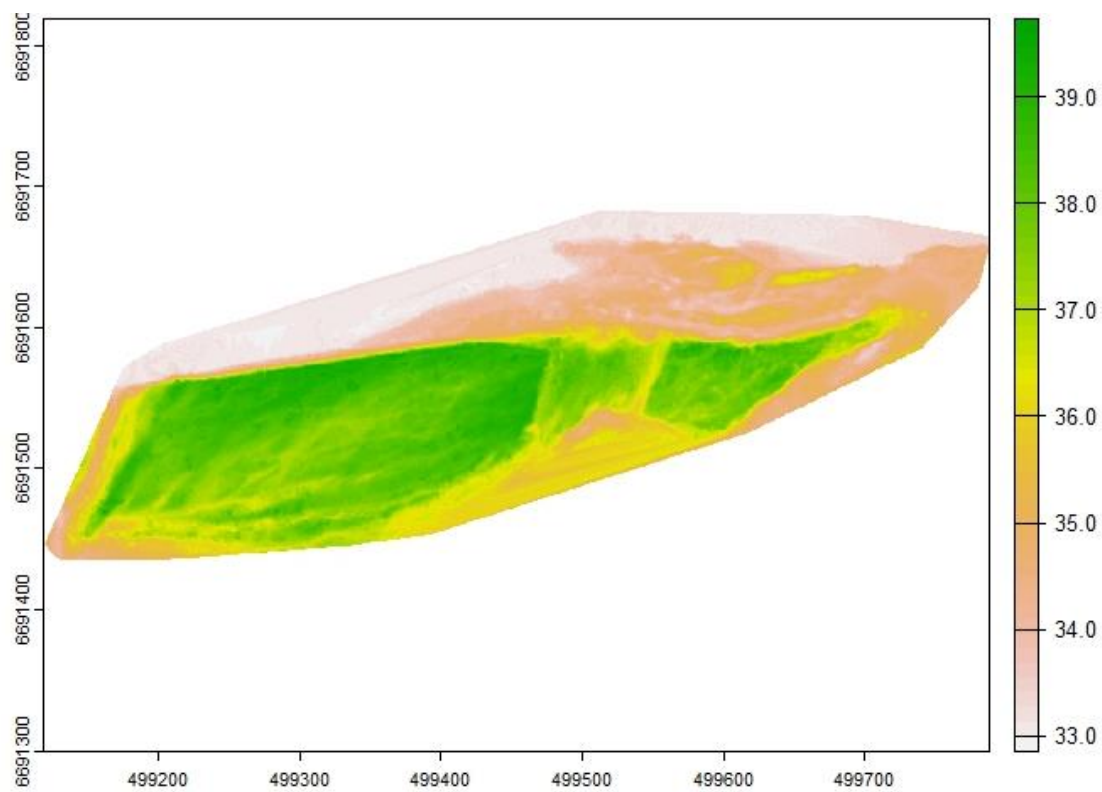
Annexe 4: MNT îlot C (mNGF)



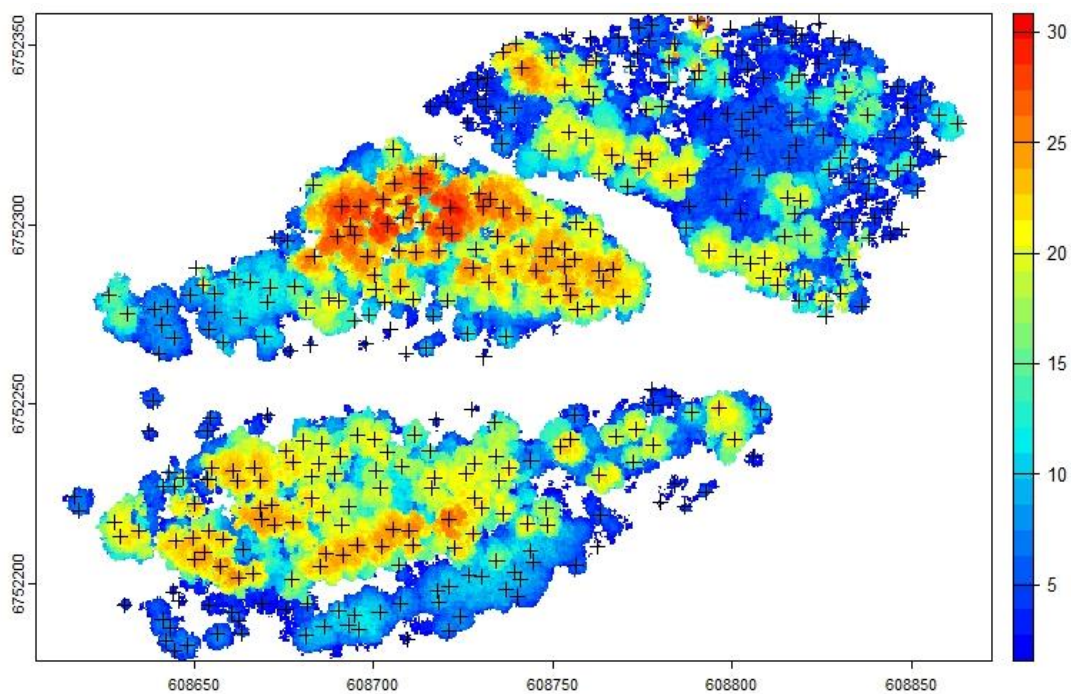
Annexe 6: MNT global site de Bréhémont (mNGF)



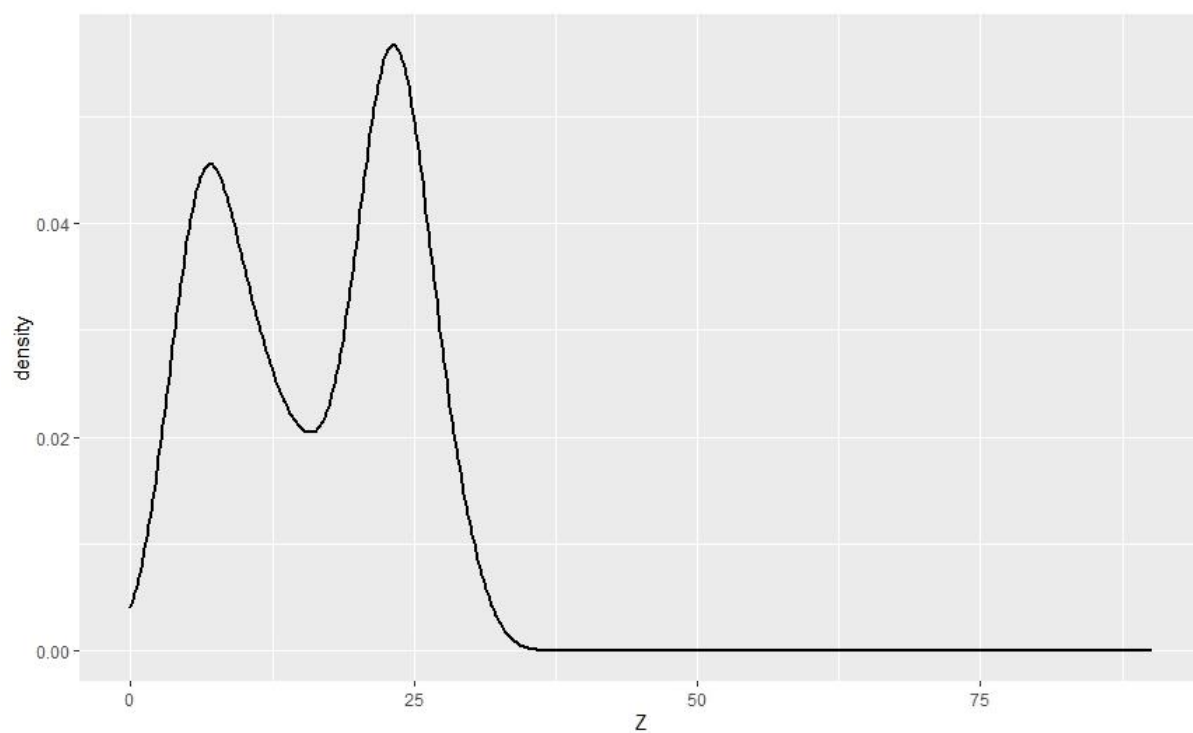
Annexe 5: MNT îlot D (mNGF)



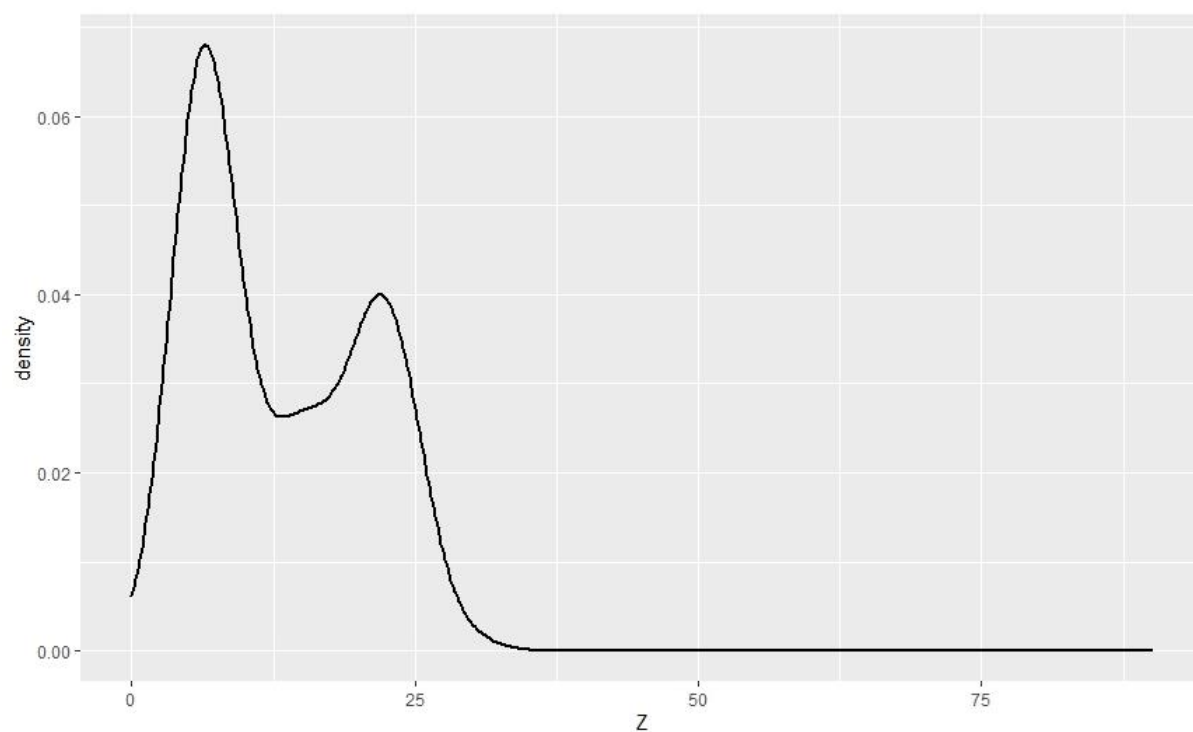
Annexe 8: MNT îlot E (mNGF)



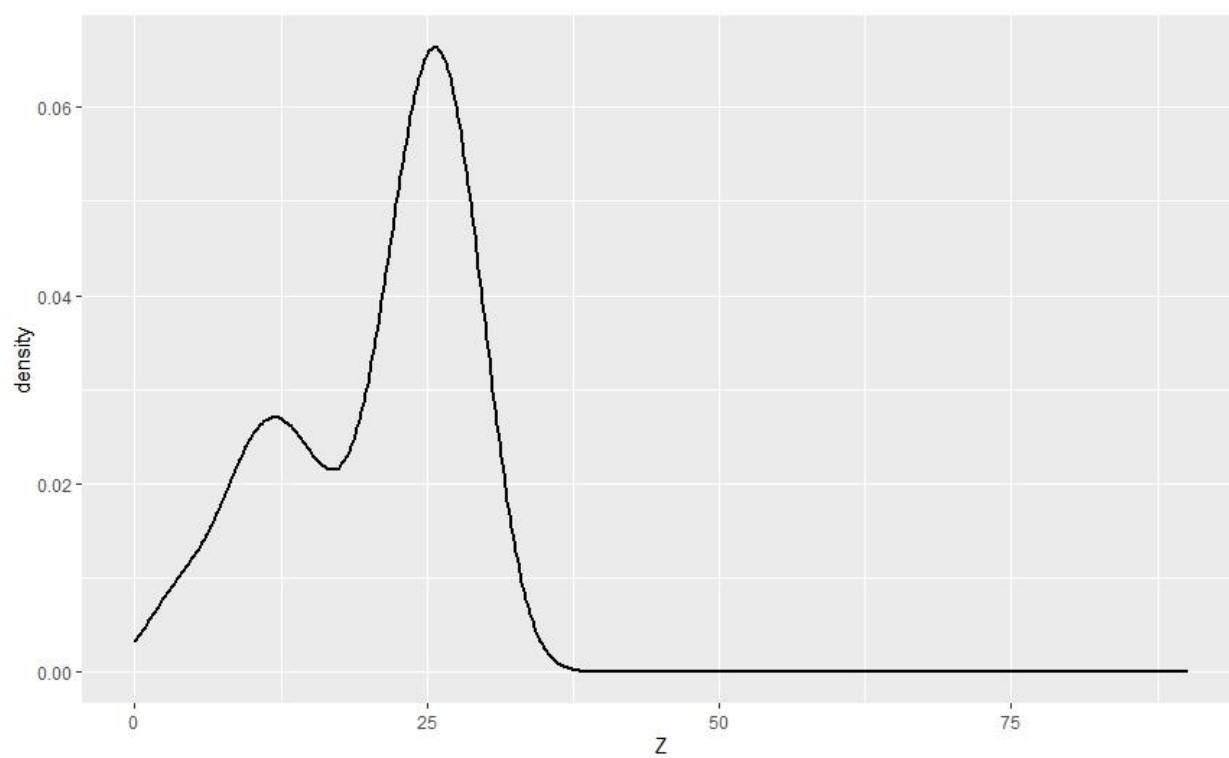
Annexe 7: MNC global site de Mareau-aux-Prés avec maximums locaux (m)



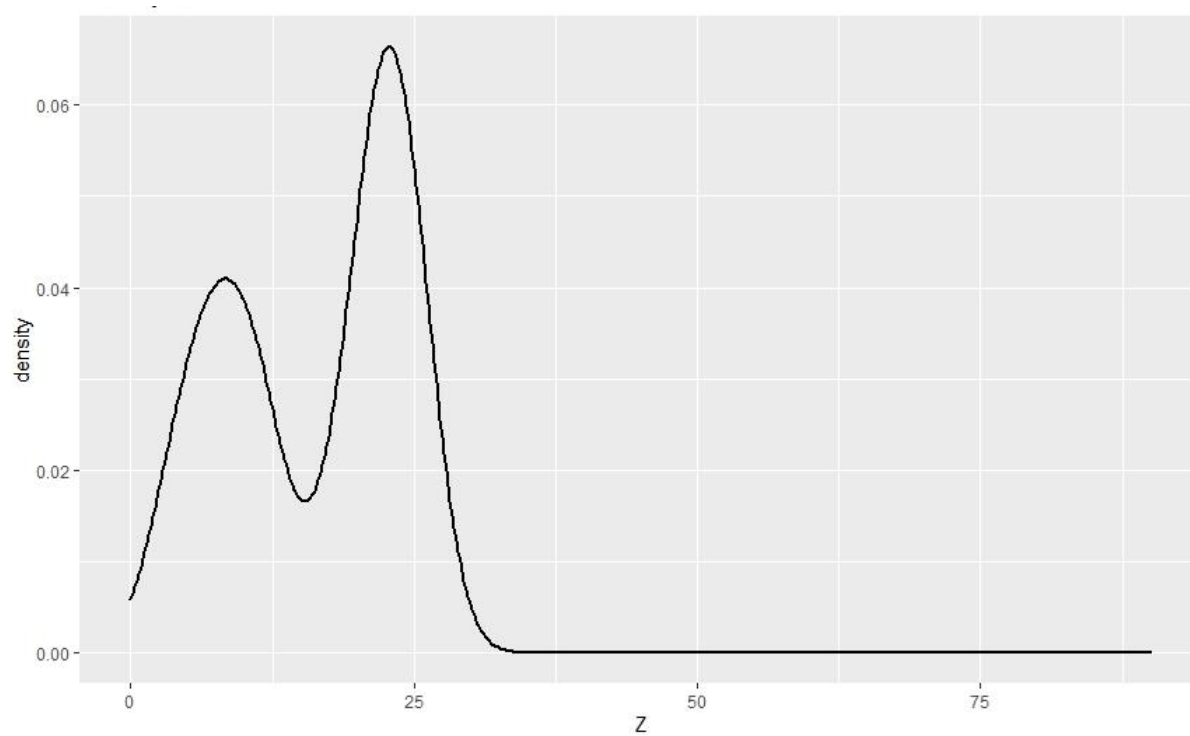
Annexe 9: courbe de densité des hauteurs, site global Mareau-aux-Prés (m)



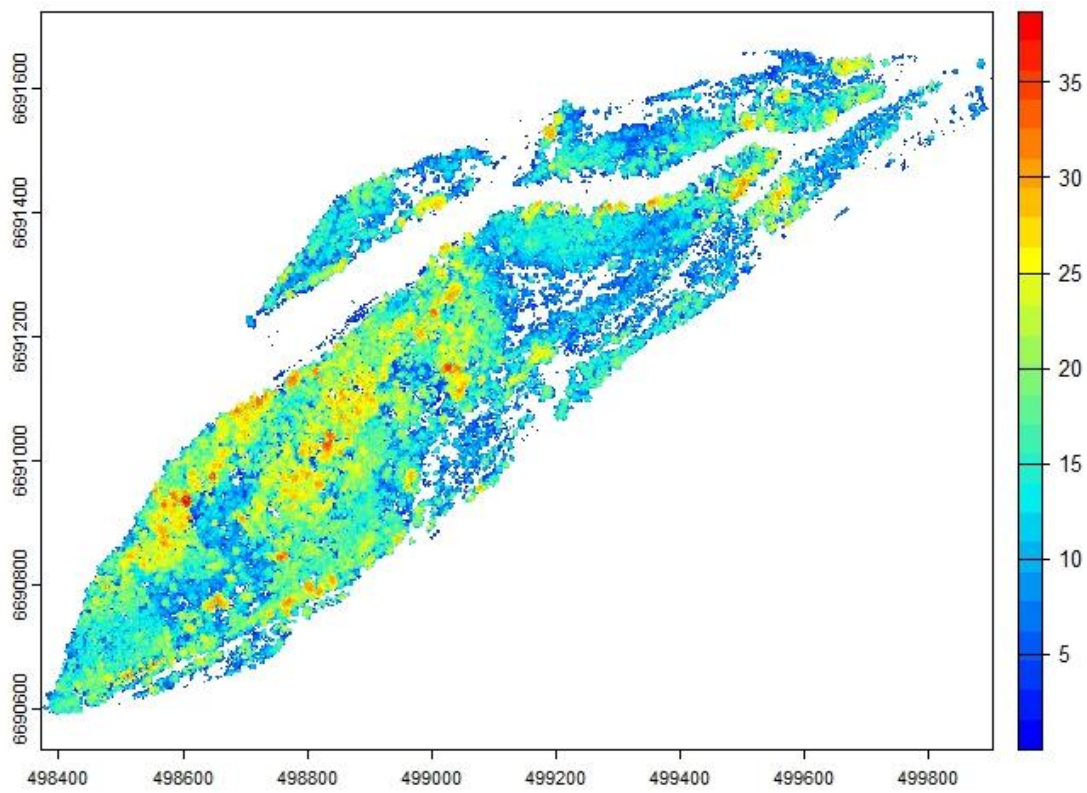
Annexe 10: courbe de densité des hauteurs de l'îlot A (m)



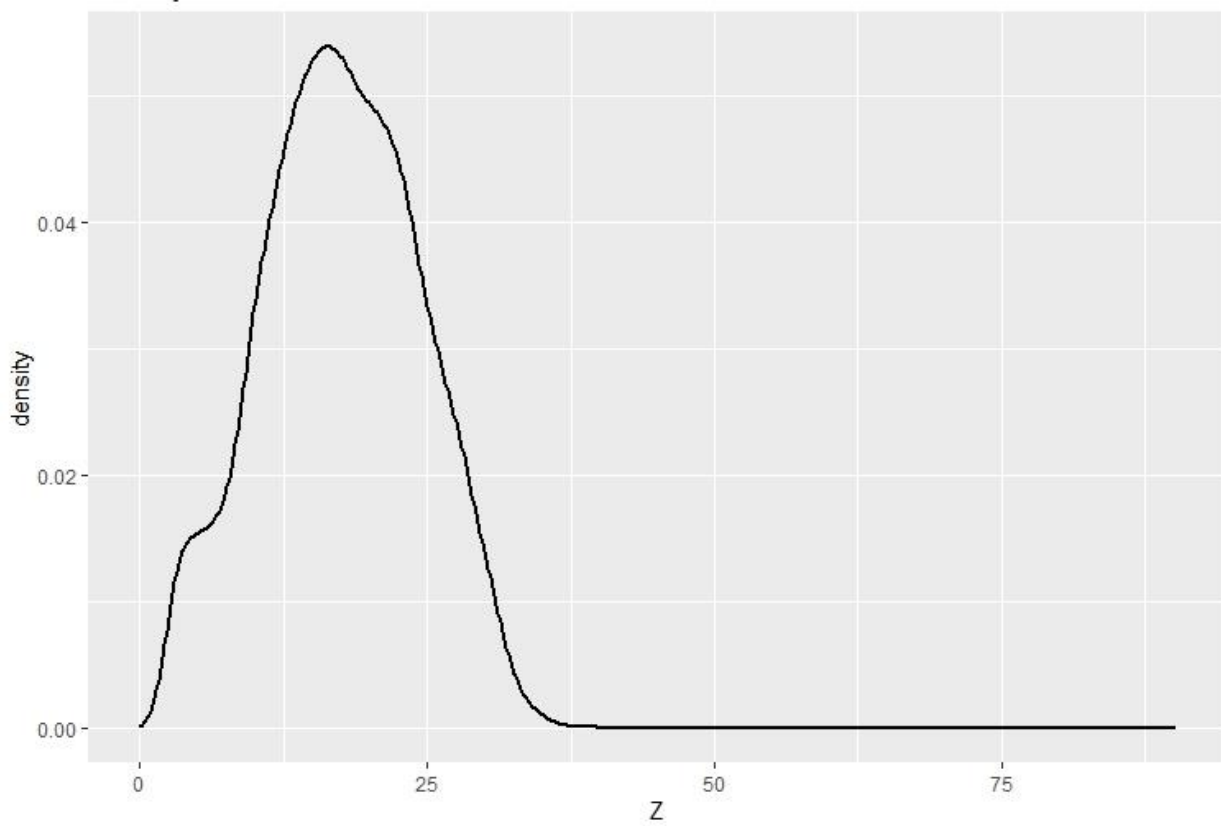
Annexe 11: courbe de densité de hauteurs de l'îlot B (m)



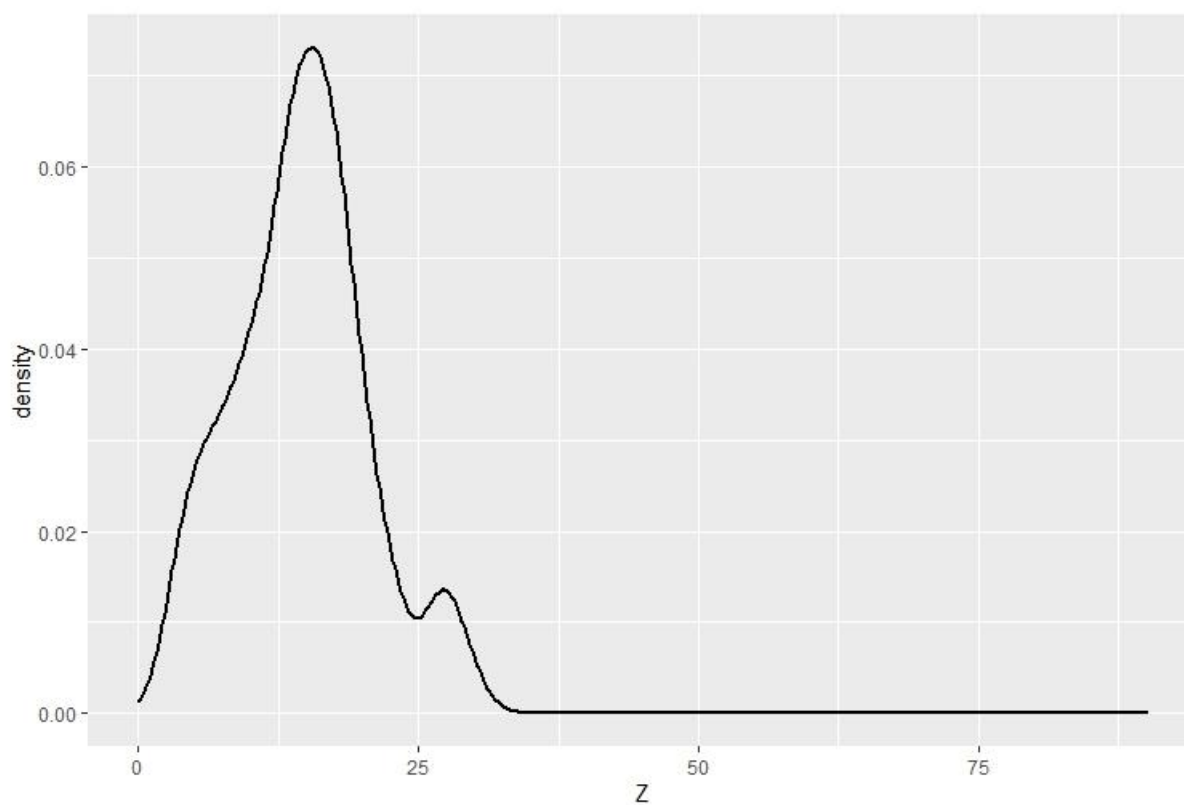
Annexe 12: courbe de densité de hauteurs de l'îlot C (m)



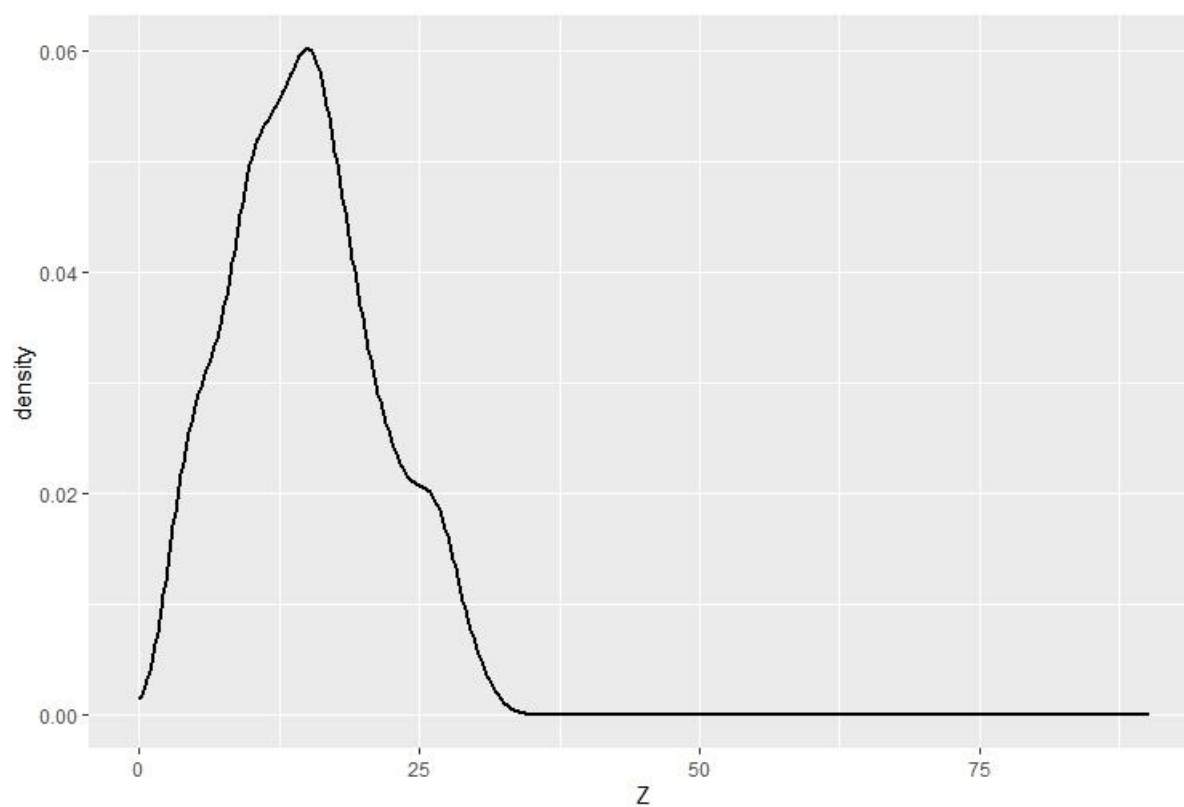
Annexe 13: MNC de l'ensemble du site de Bréhémont (m)



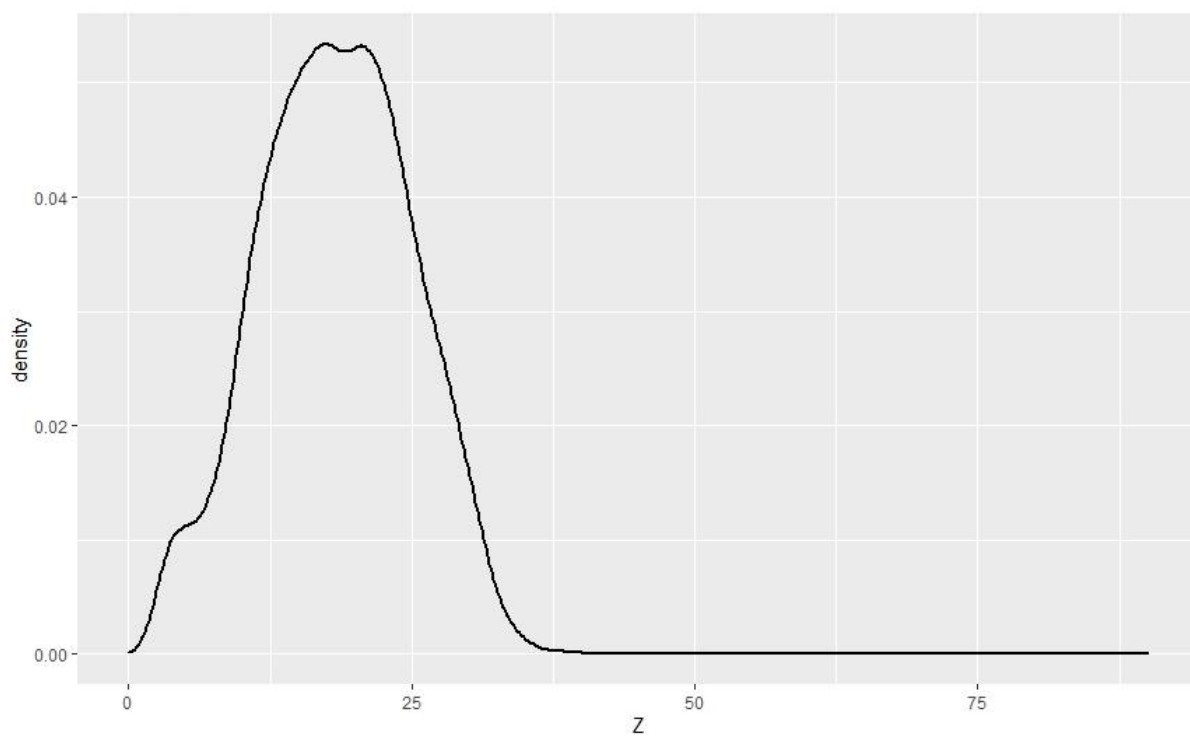
Annexe 14: courbe de densité de hauteurs du site de Bréhémont (m)



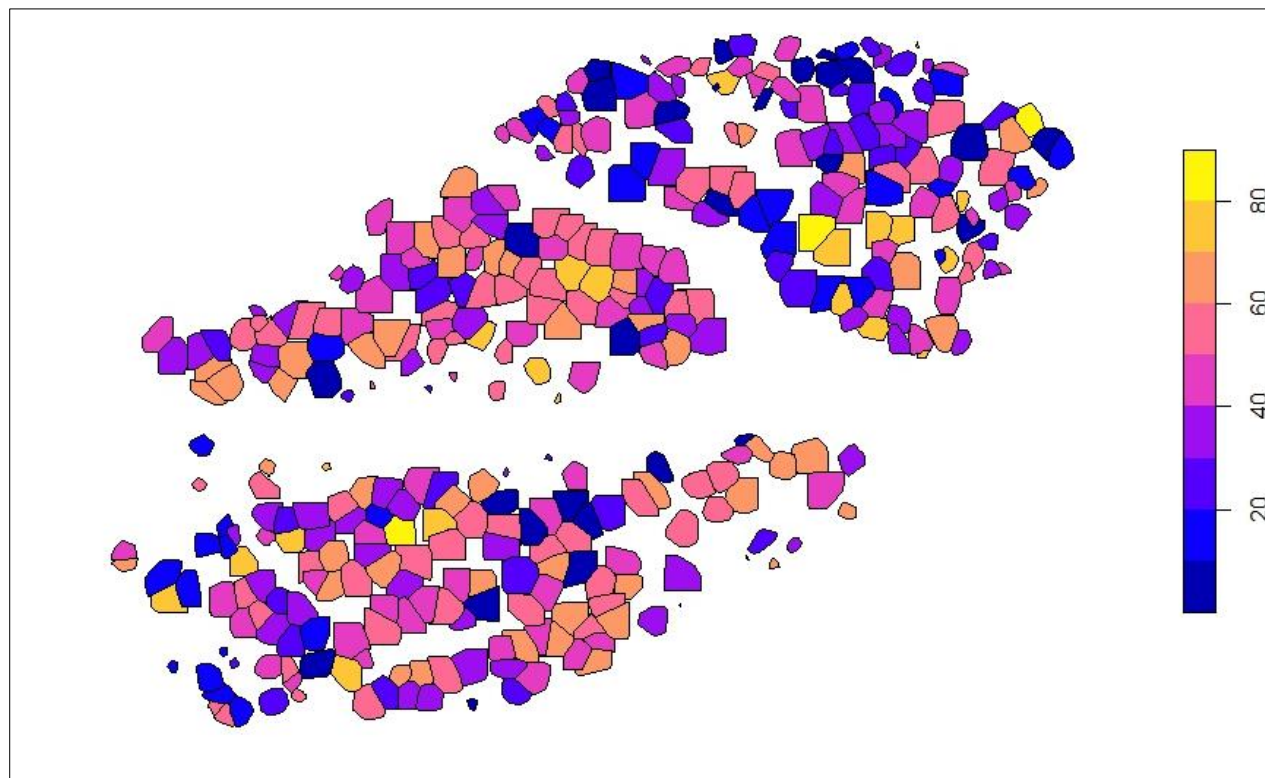
Annexe 16: courbe de densité de hauteurs de l'îlot D



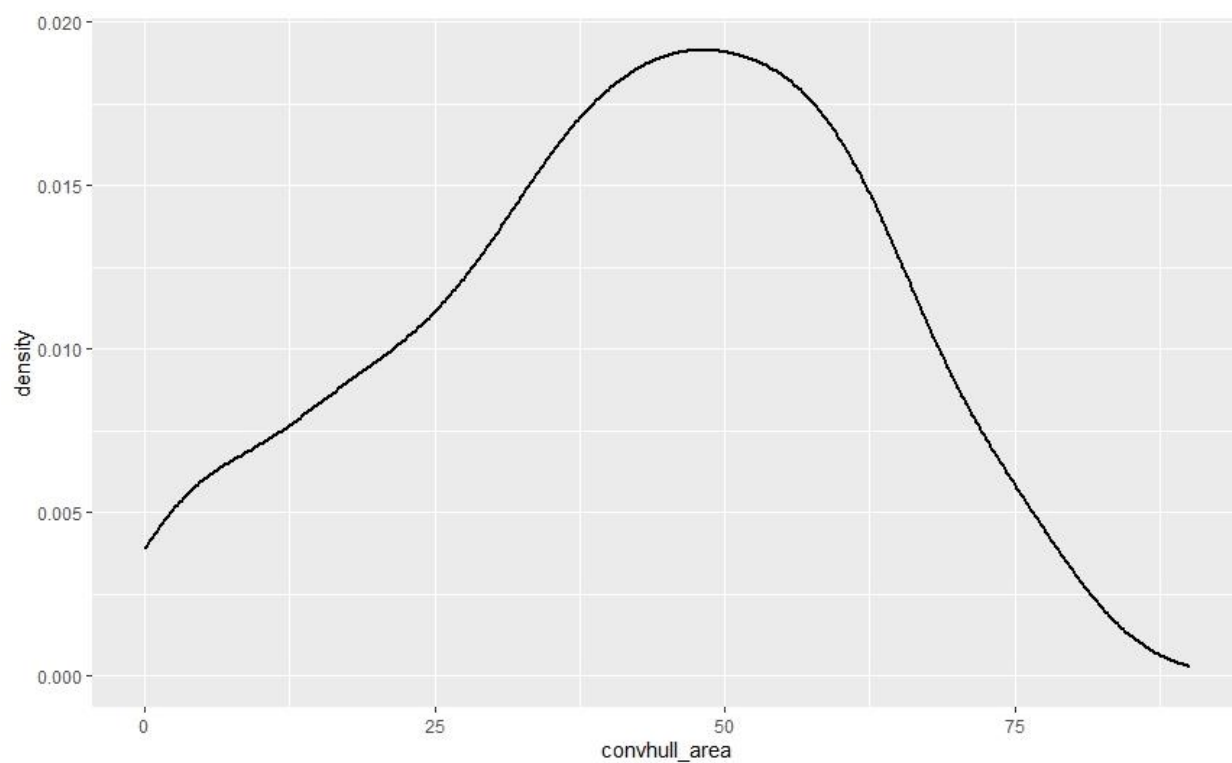
Annexe 15: courbe de densité de hauteurs de l'îlot E



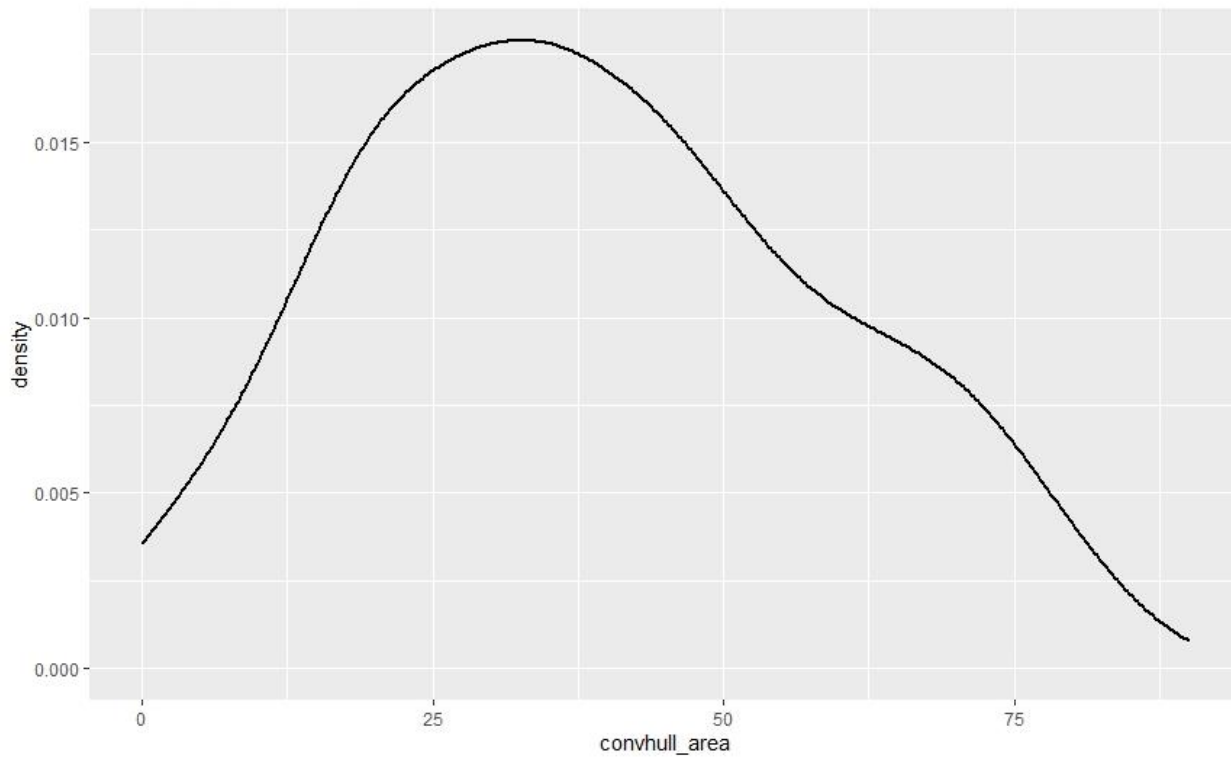
Annexe 17: courbe de densité de hauteurs de l'îlot F



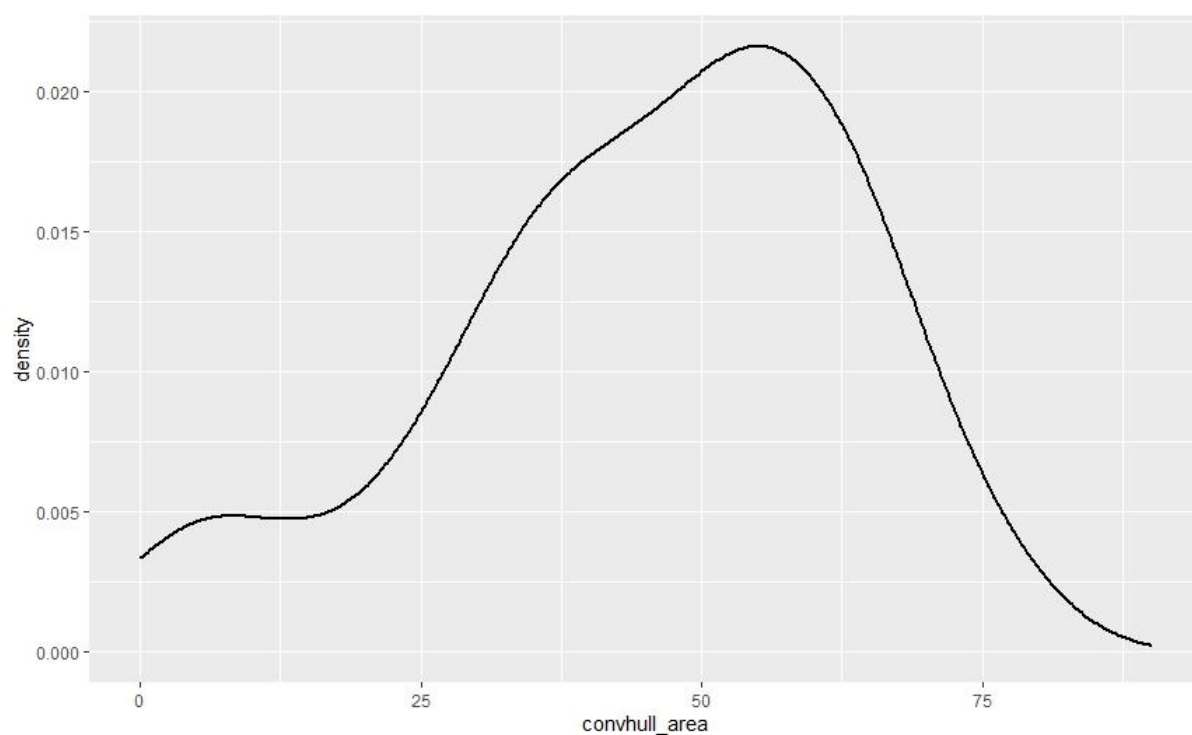
Annexe 18: superficies des couronnes de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés (m²)



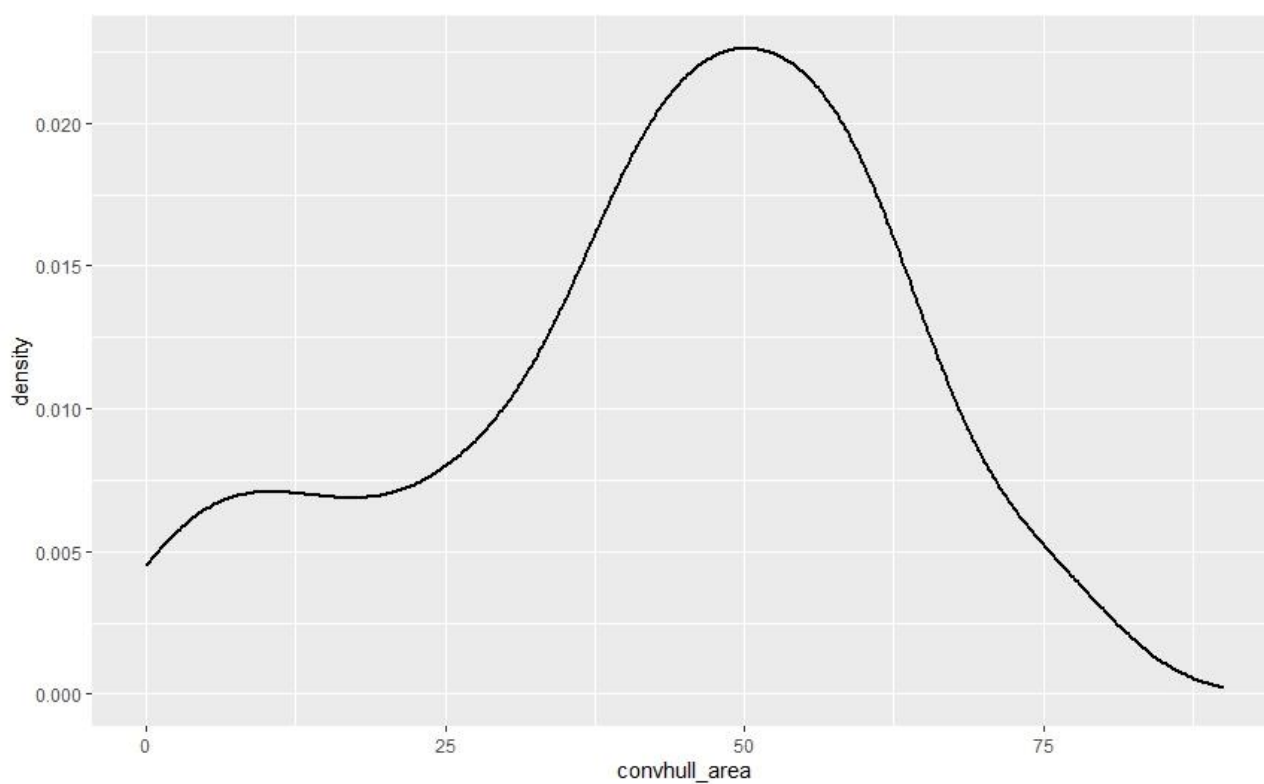
Annexe 20: courbe de densité de superficies de couronnes de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés (m²)



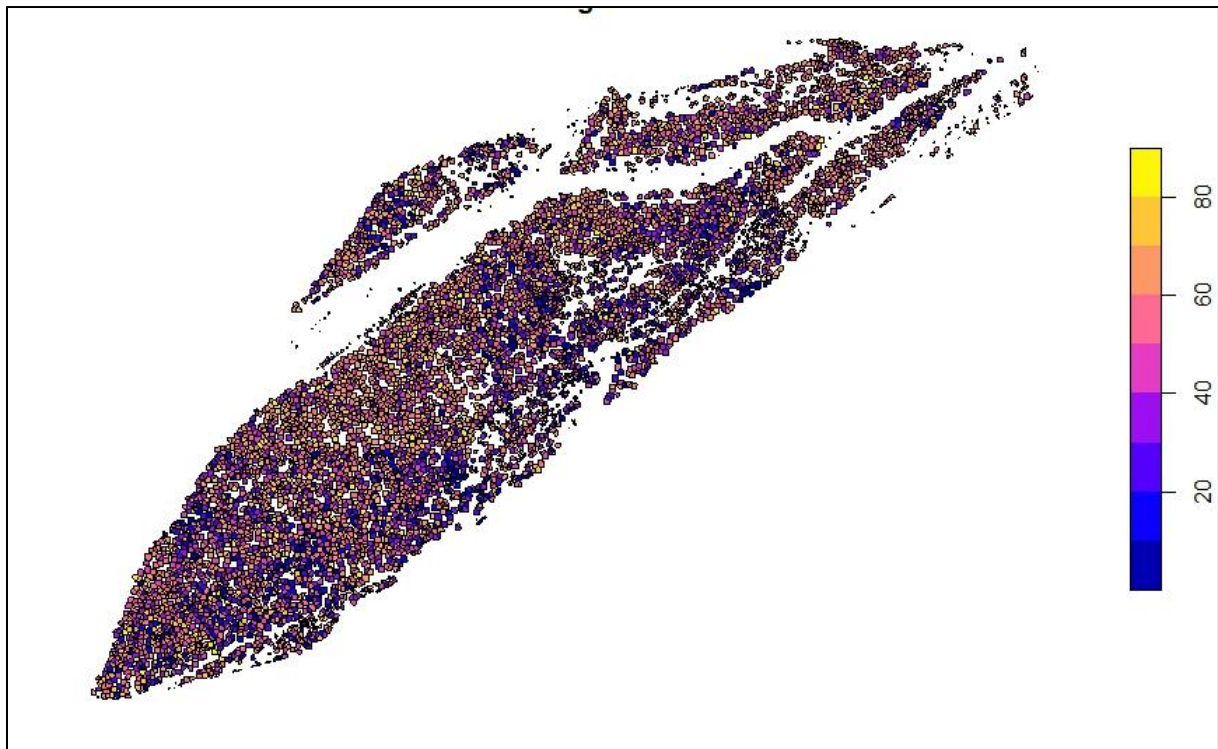
Annexe 19: courbe de densité de superficies de couronnes de l'îlot A (m²)



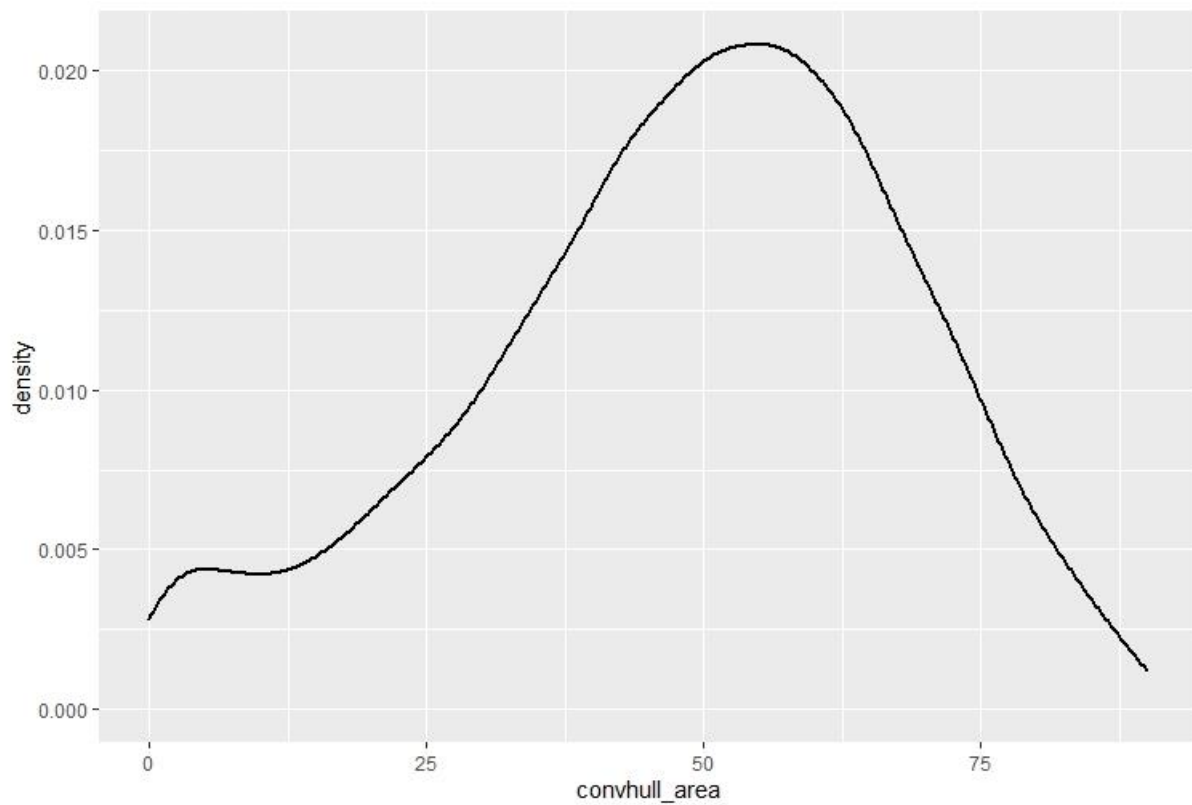
Annexe 22: courbe de densité de superficies de couronnes de l'îlot B (m²)



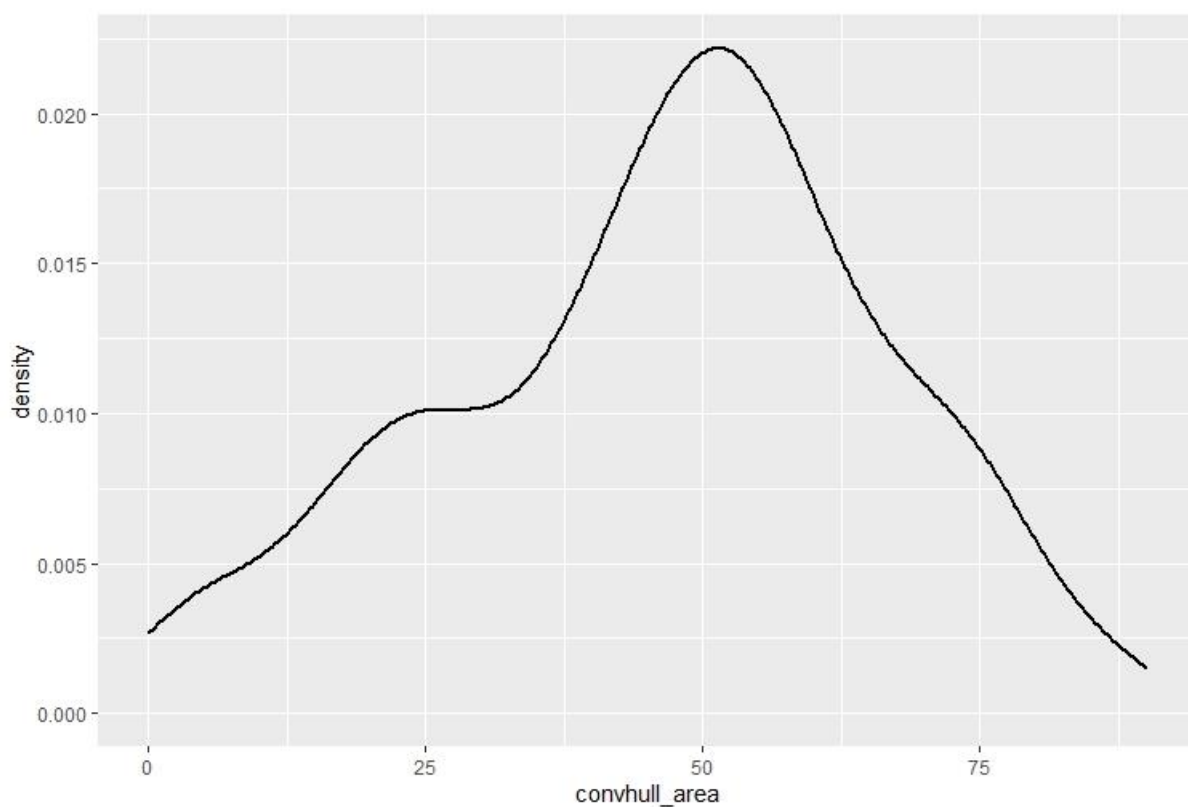
Annexe 21: courbe de densité de superficies de couronnes de l'îlot C (m²)



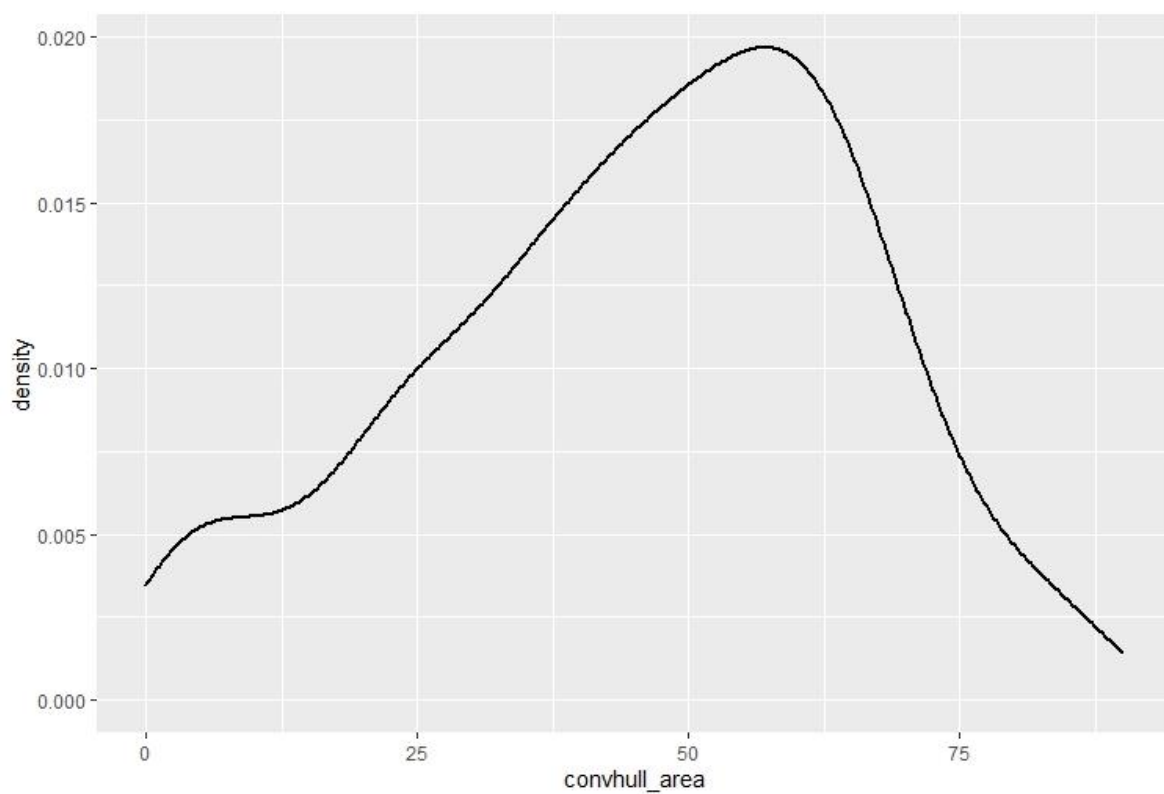
Annexe 23: superficies de couronnes de l'ensemble du site de Bréhémont (m²)



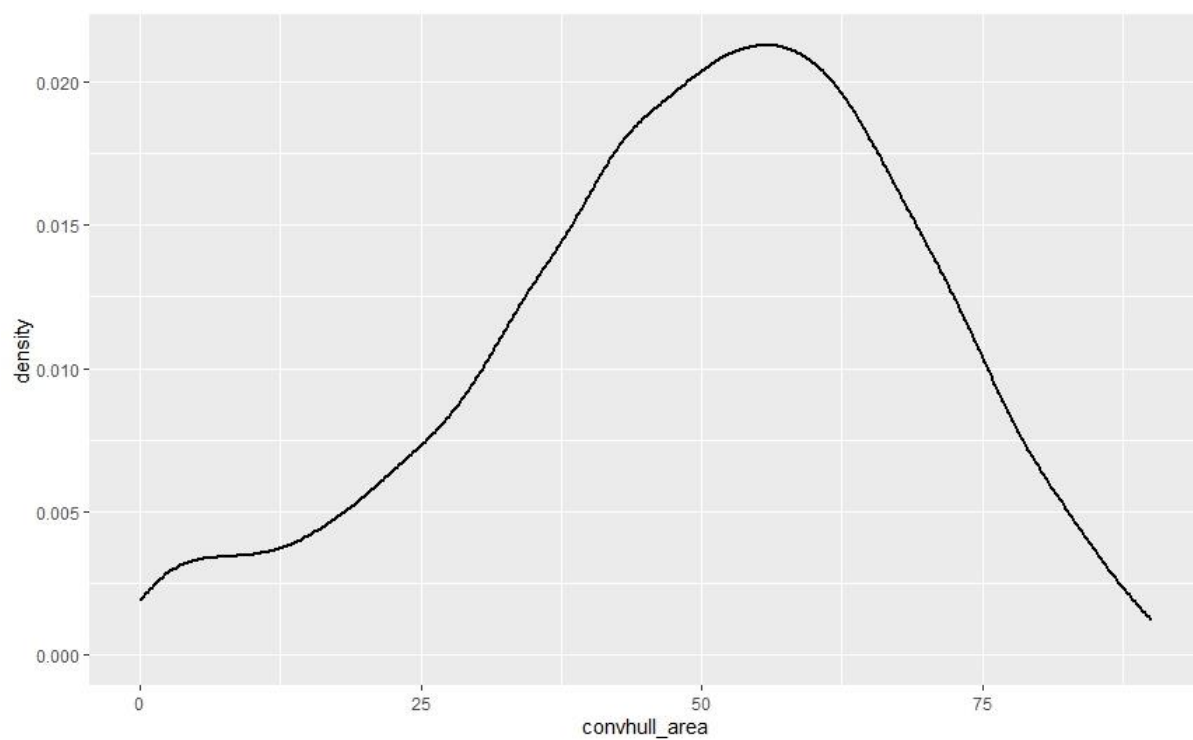
Annexe 24: courbe de densité de superficies de couronnes de l'ensemble du site de Bréhémont (m²)



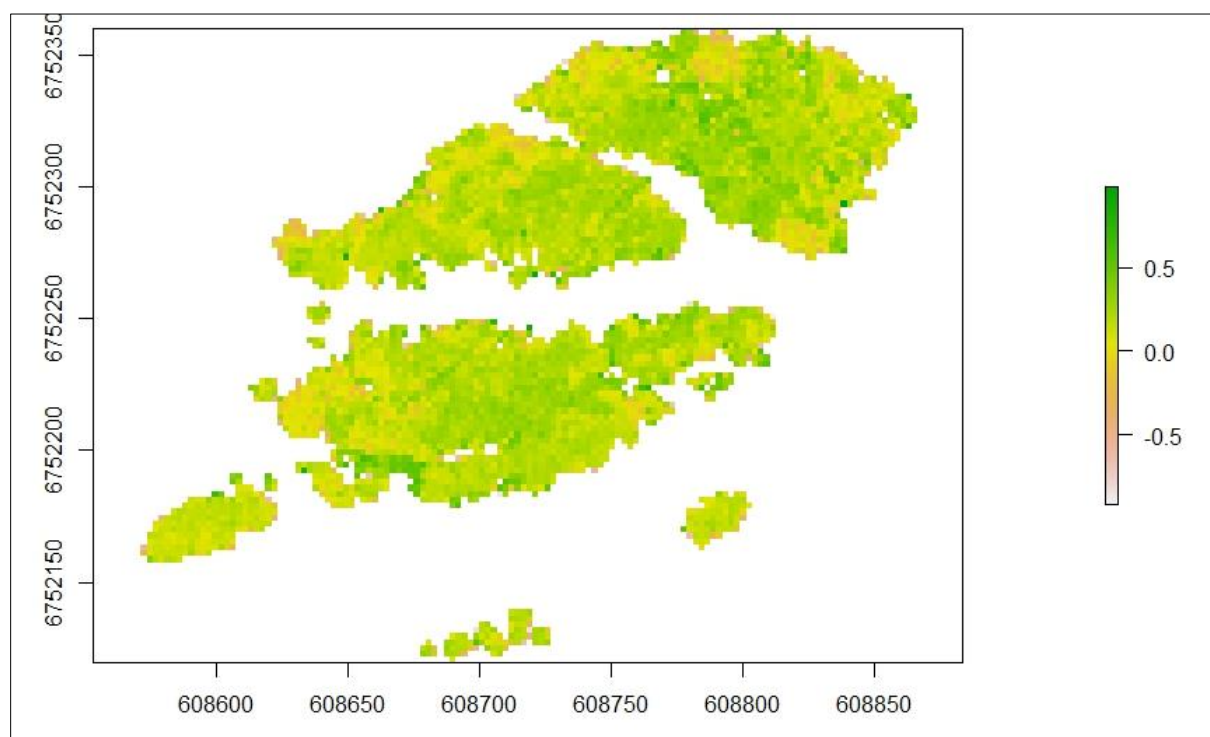
Annexe 25: courbe de densité des superficies de couronnes de l'îlot D (m²)



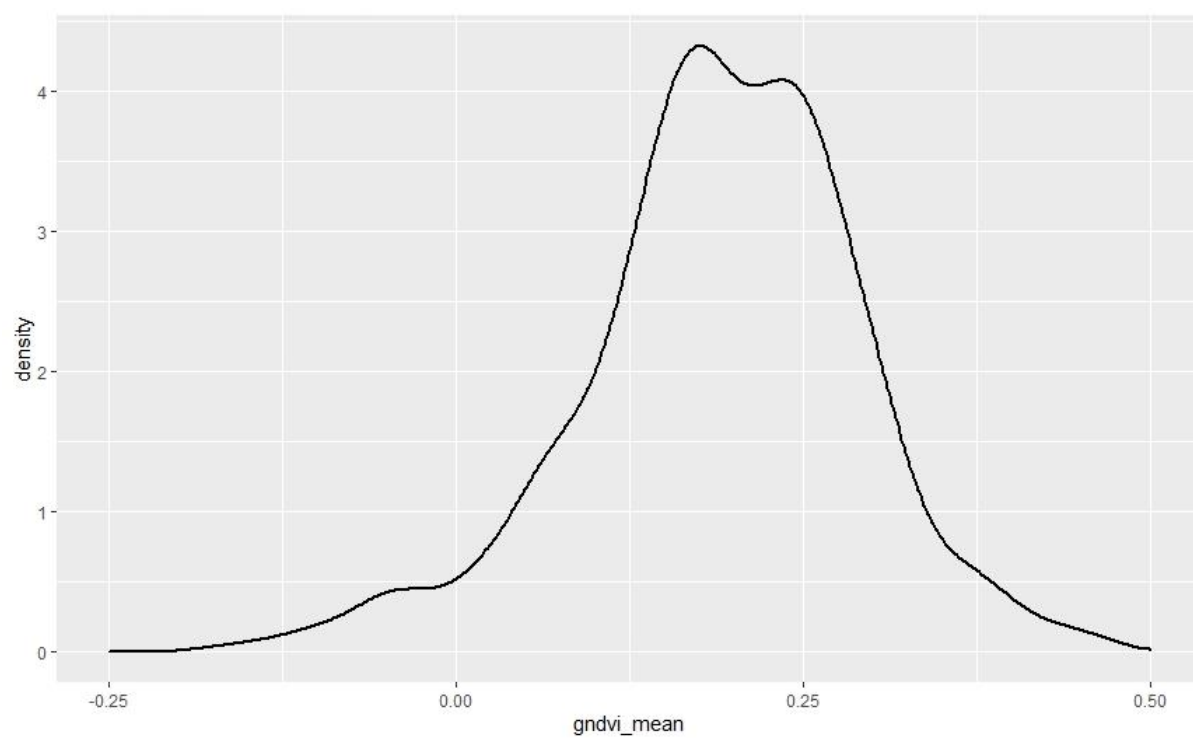
Annexe 26: courbe de densité des superficies de couronnes de l'îlot E (m²)



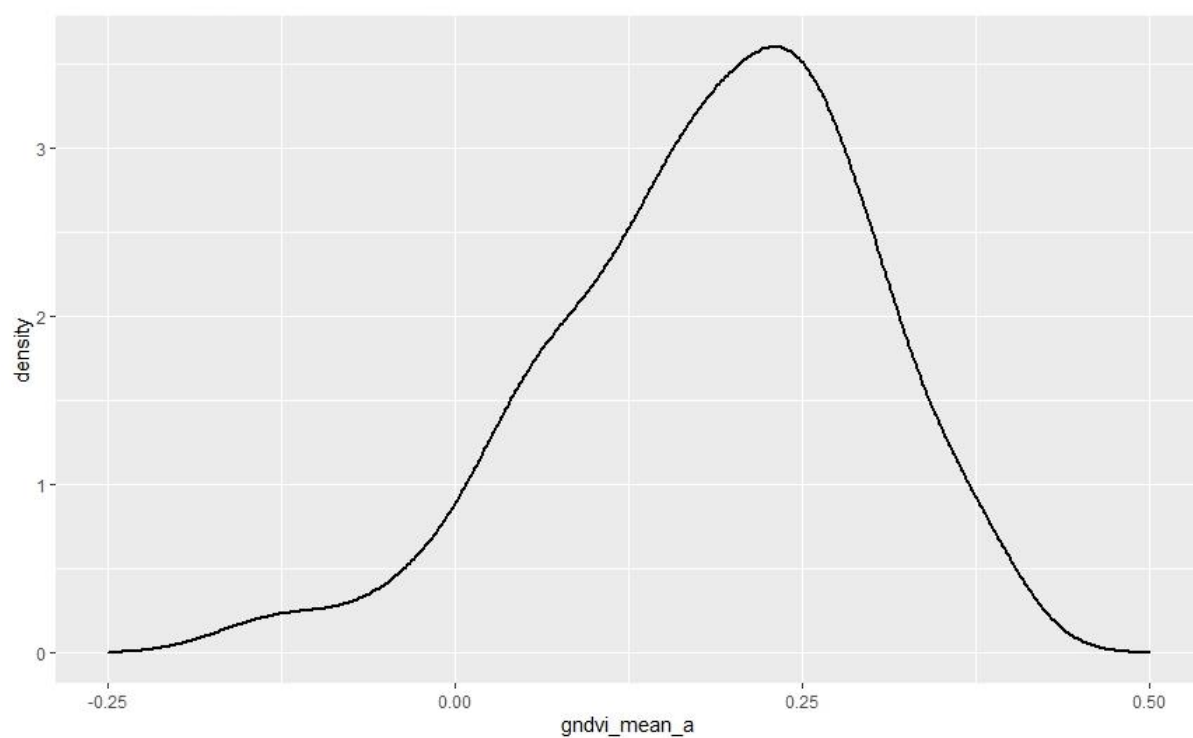
Annexe 28: courbe de densité de superficies de couronnes de l'îlot F (m²)



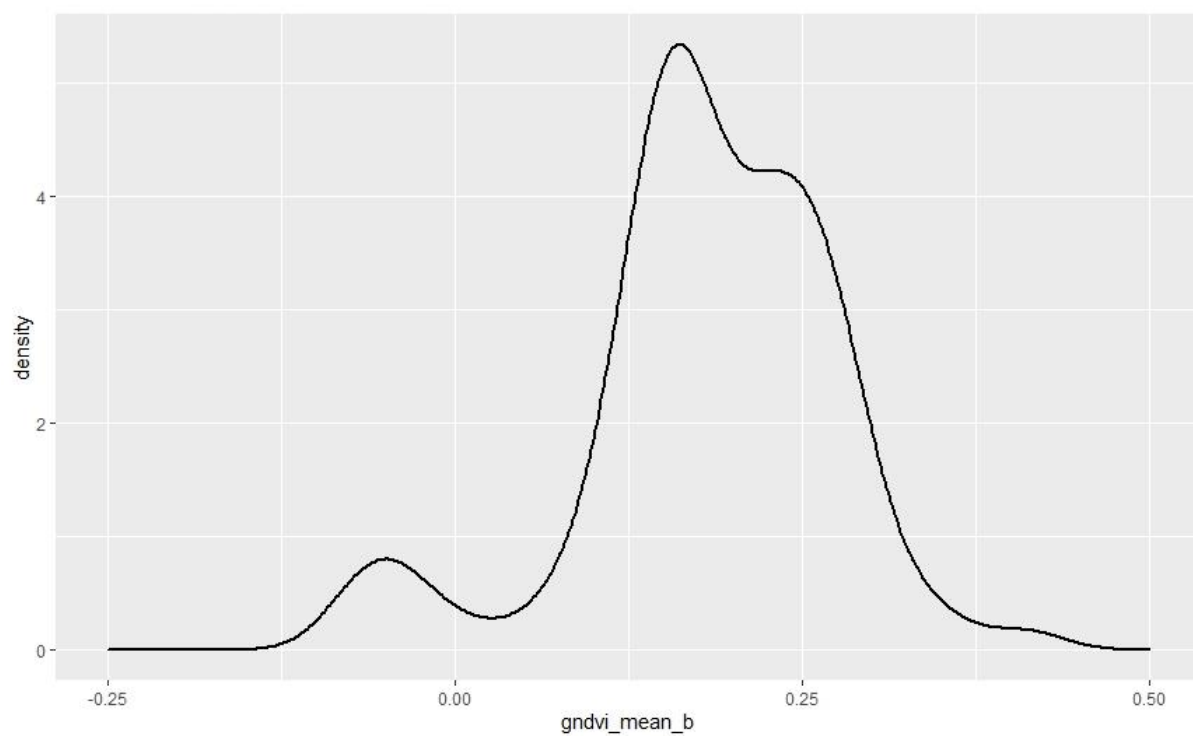
Annexe 27: GNDVI de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés



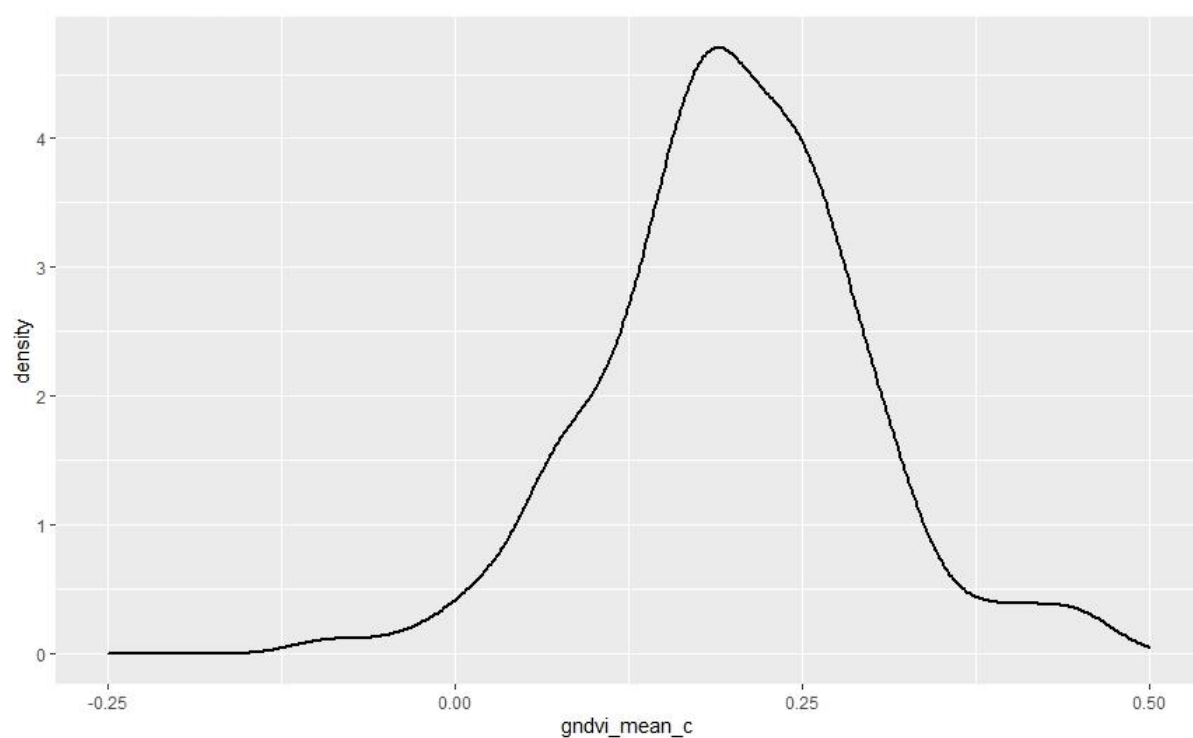
Annexe 29: courbe de densité du GNDVI de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés



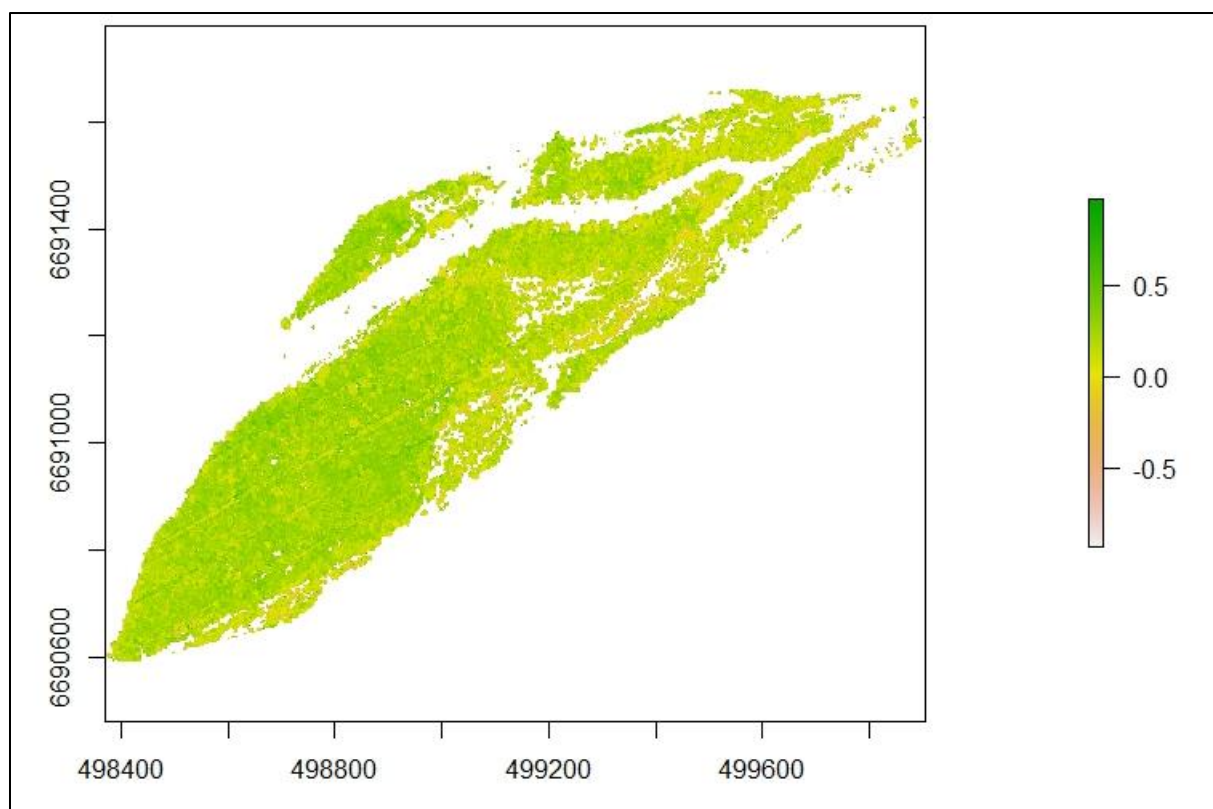
Annexe 30: courbe de densité du GNDVI de l'îlot A



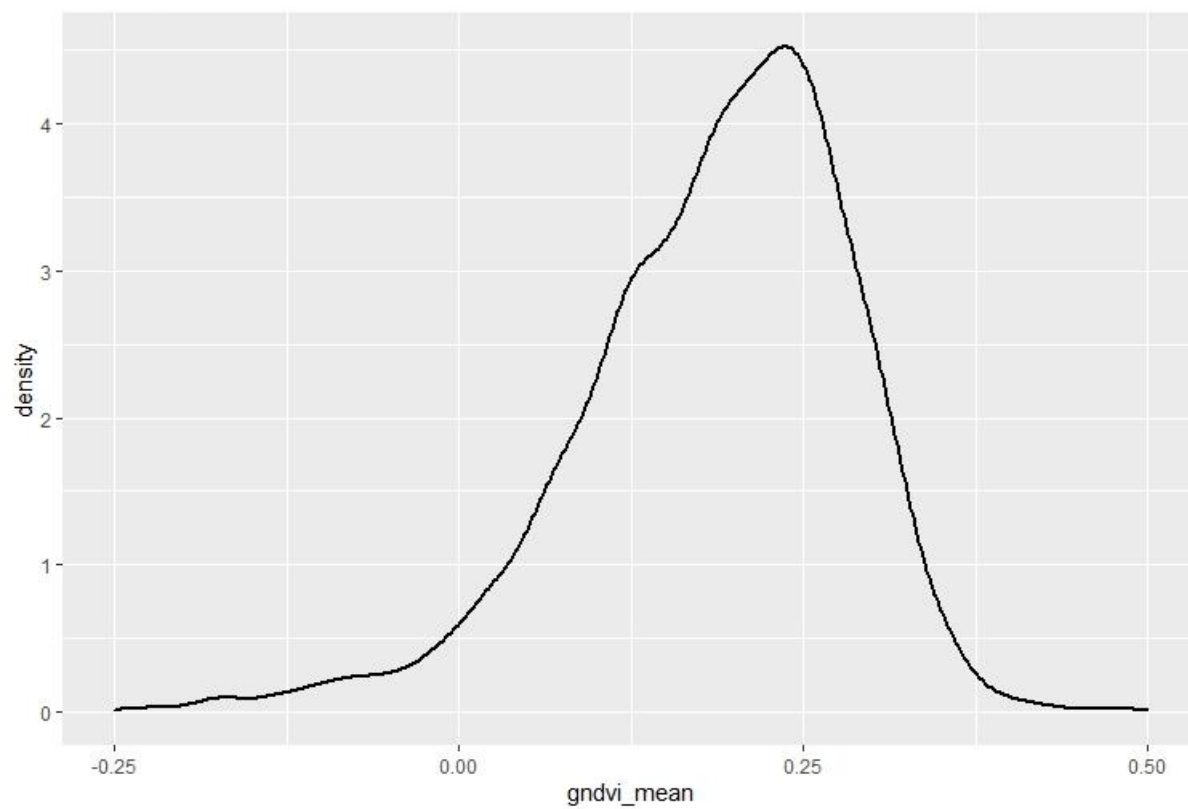
Annexe 31: courbe de densité du GNDVI de l'îlot B



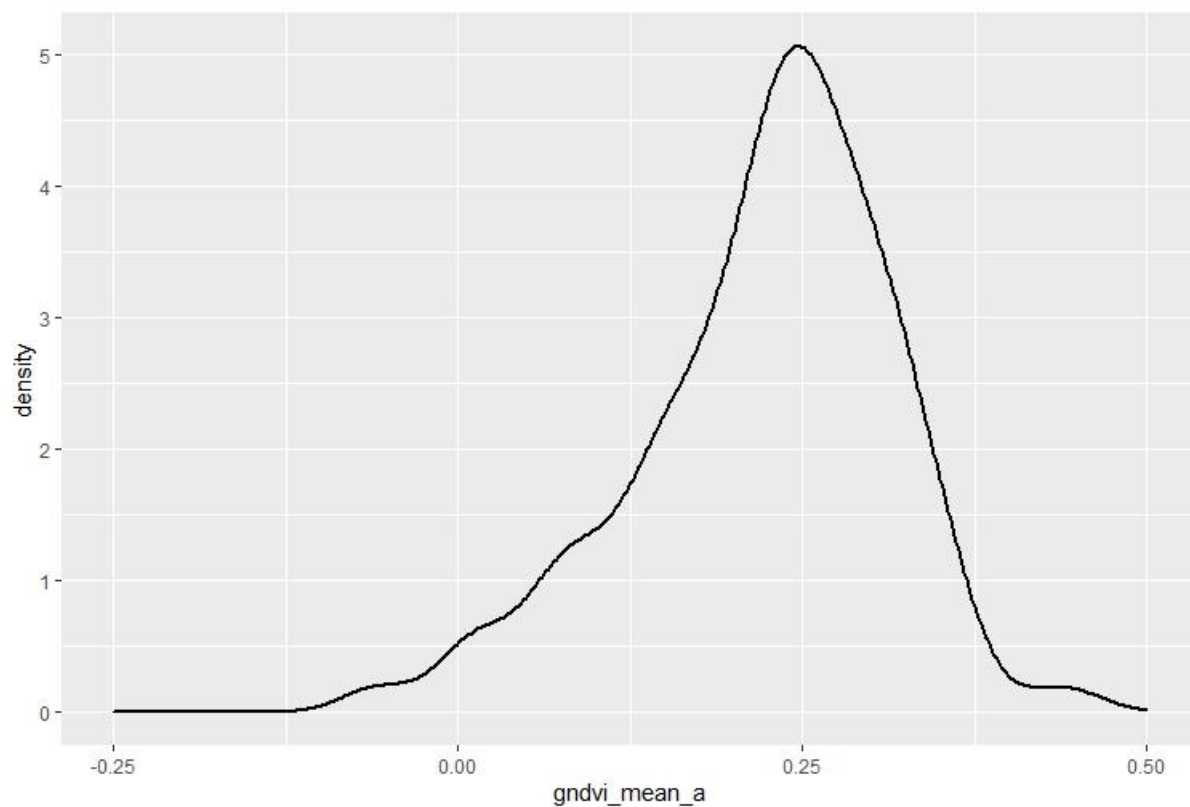
Annexe 32: courbe de densité du GNDVI de l'îlot C



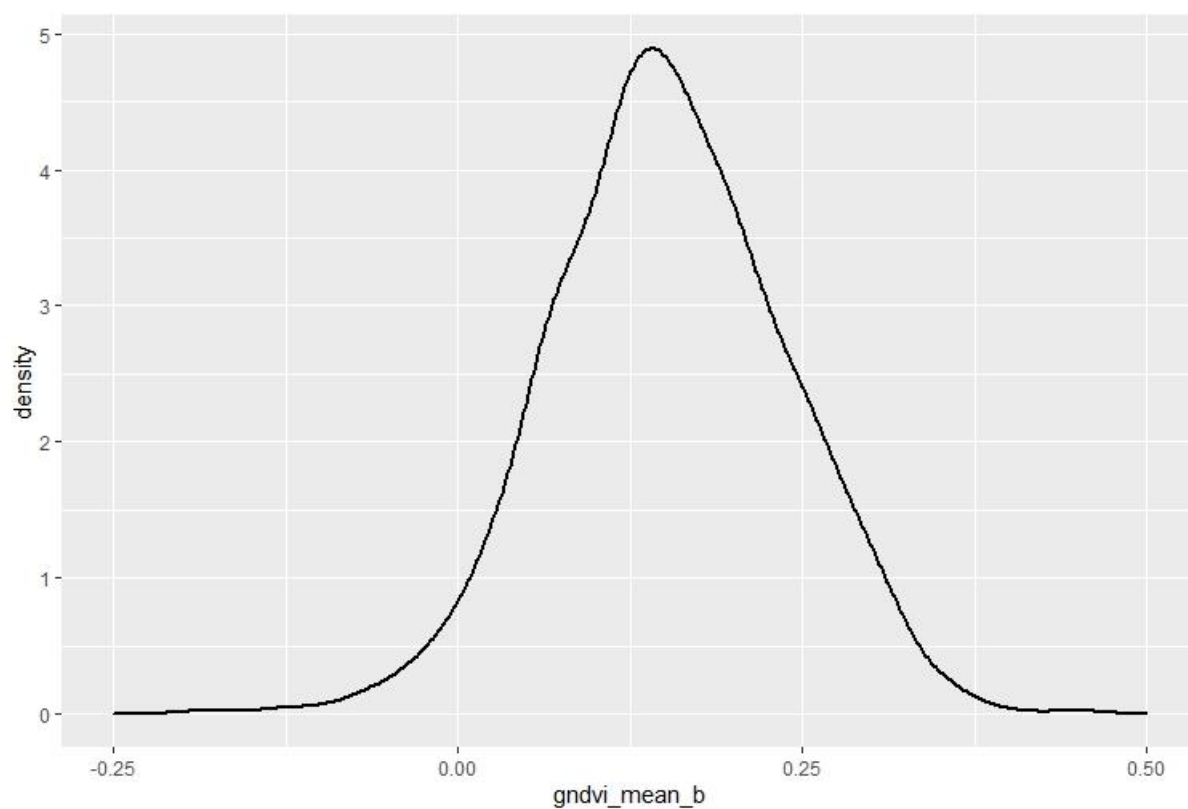
Annexe 33: GNDVI du site de Bréhémont



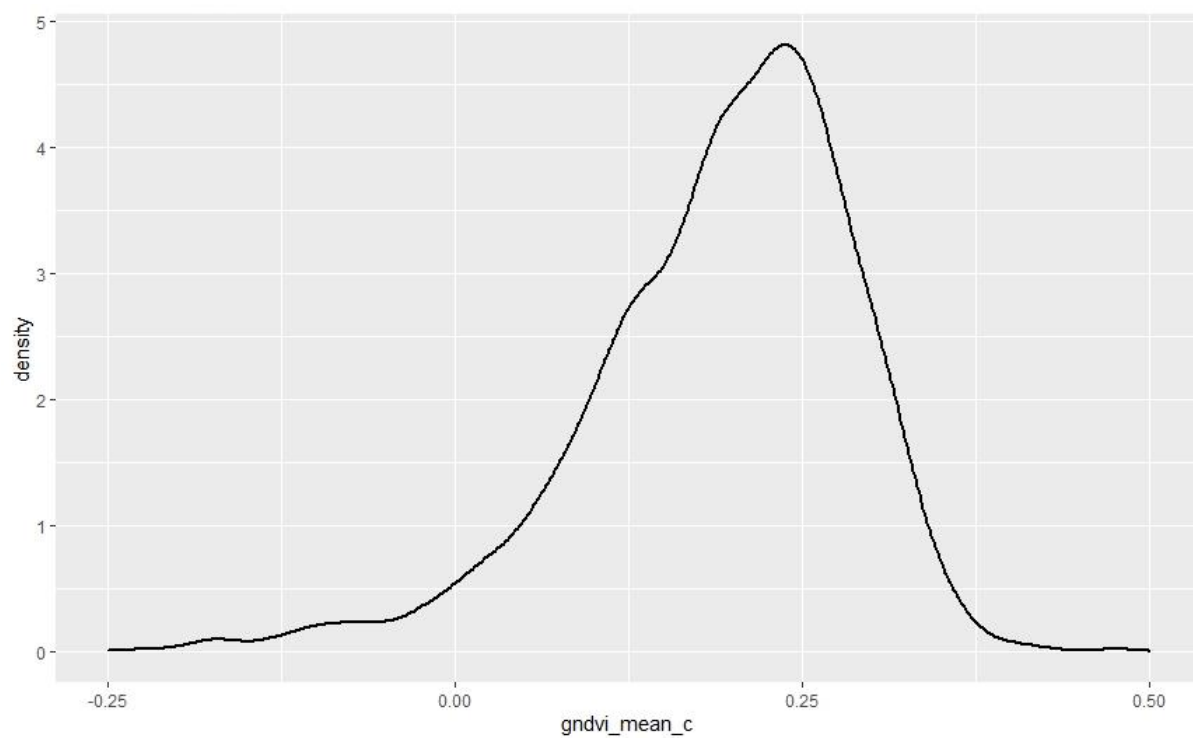
Annexe 34: courbe de densité du GNDVI de l'ensemble du site de Bréhémont



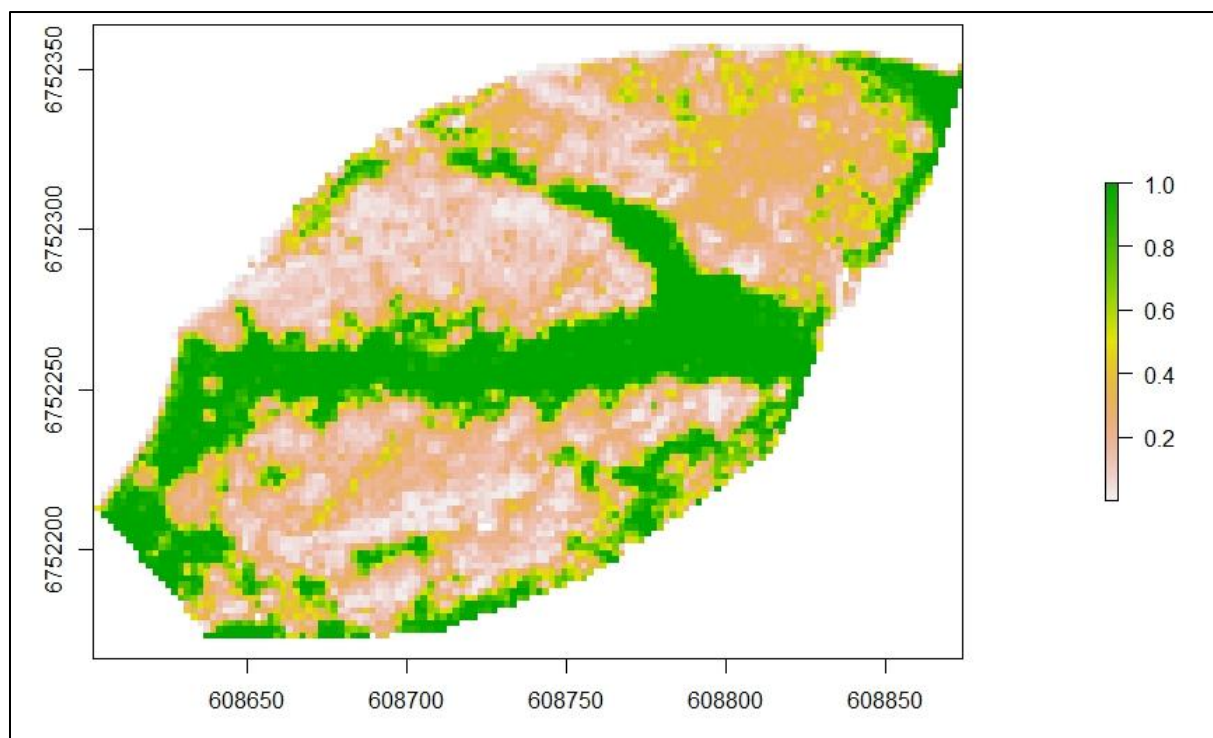
Annexe 35: courbe de densité du GNDVI de l'îlot D



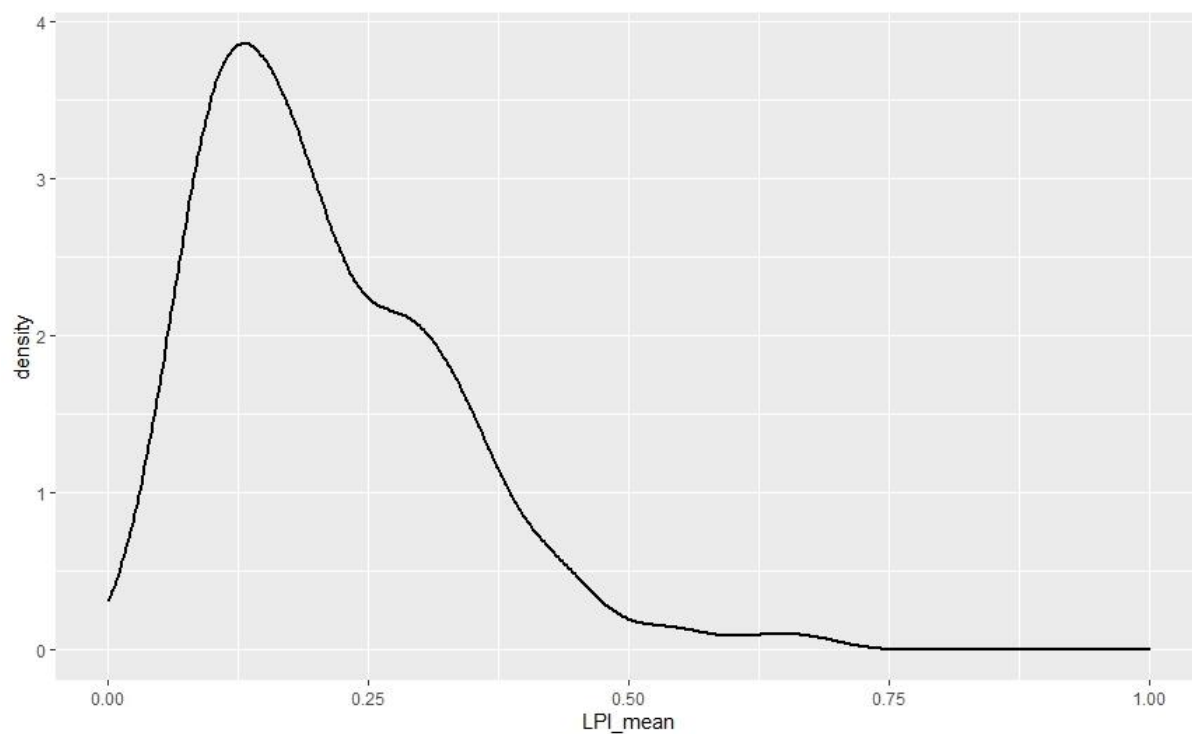
Annexe 36: courbe de densité du GNDVI de l'îlot E



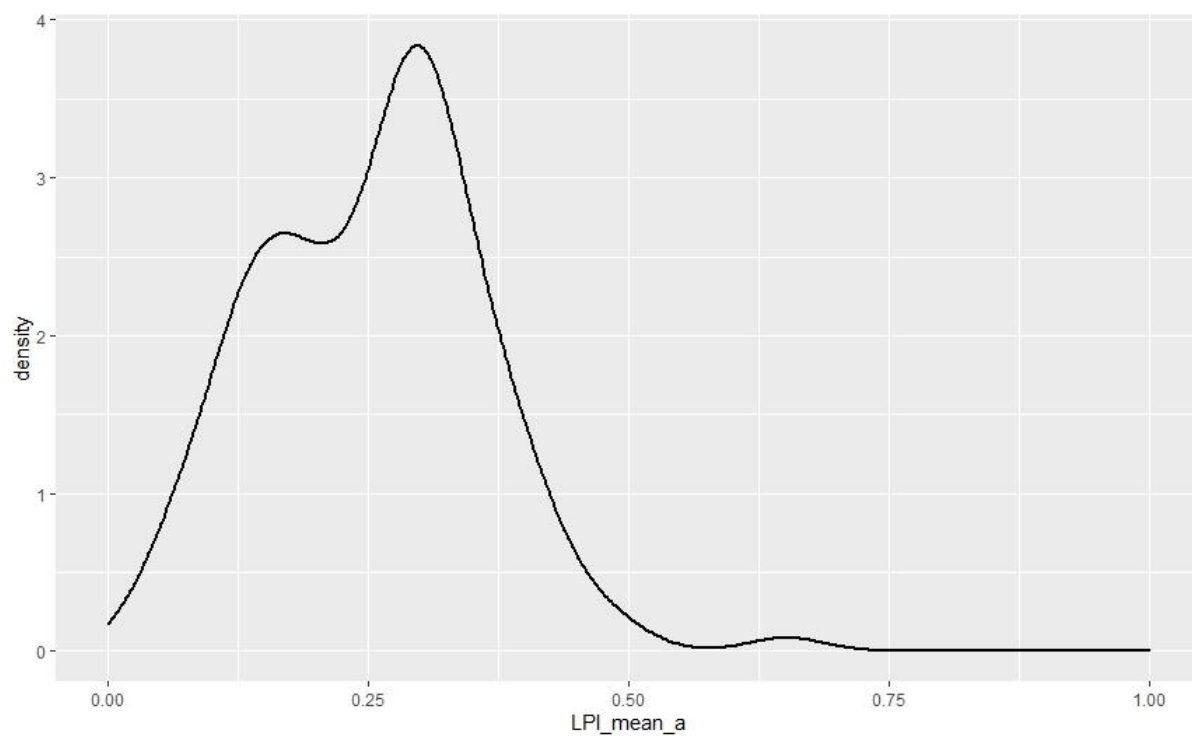
Annexe 38: courbe de densité du GNDVI de l'îlot F



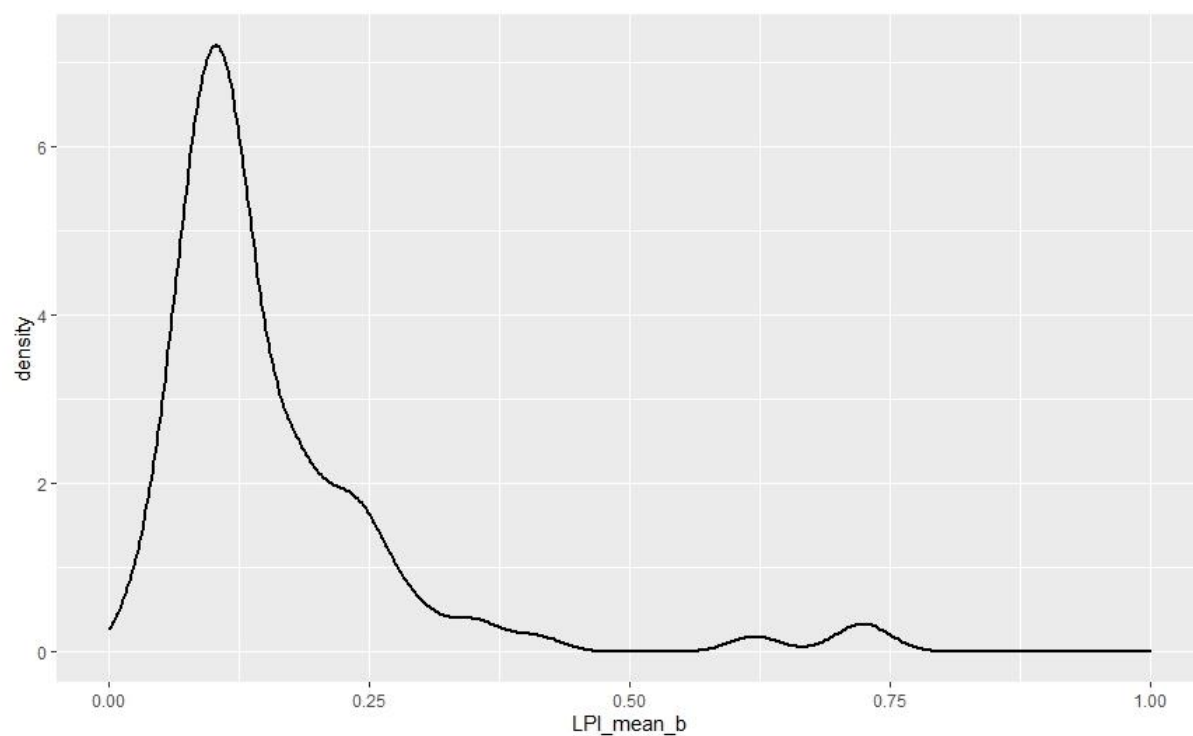
Annexe 37: LPI de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés



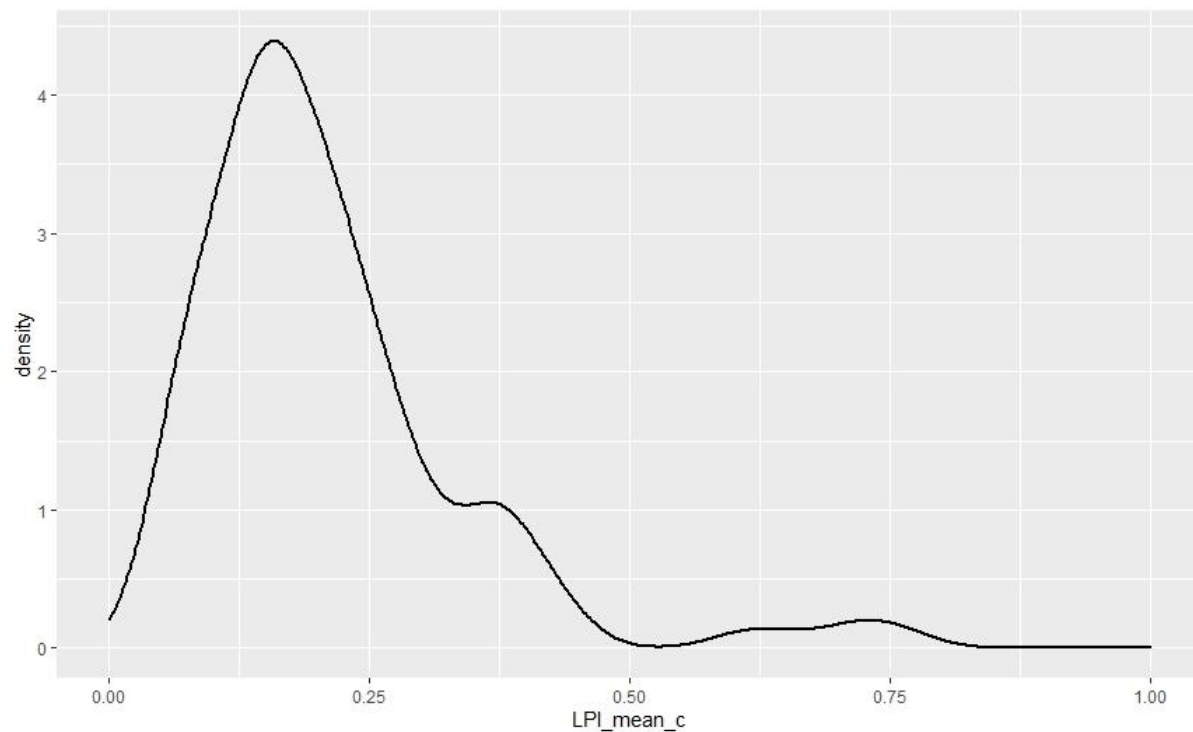
Annexe 39: courbe de densité du LPI de l'ensemble du site de Mareau-aux-Prés



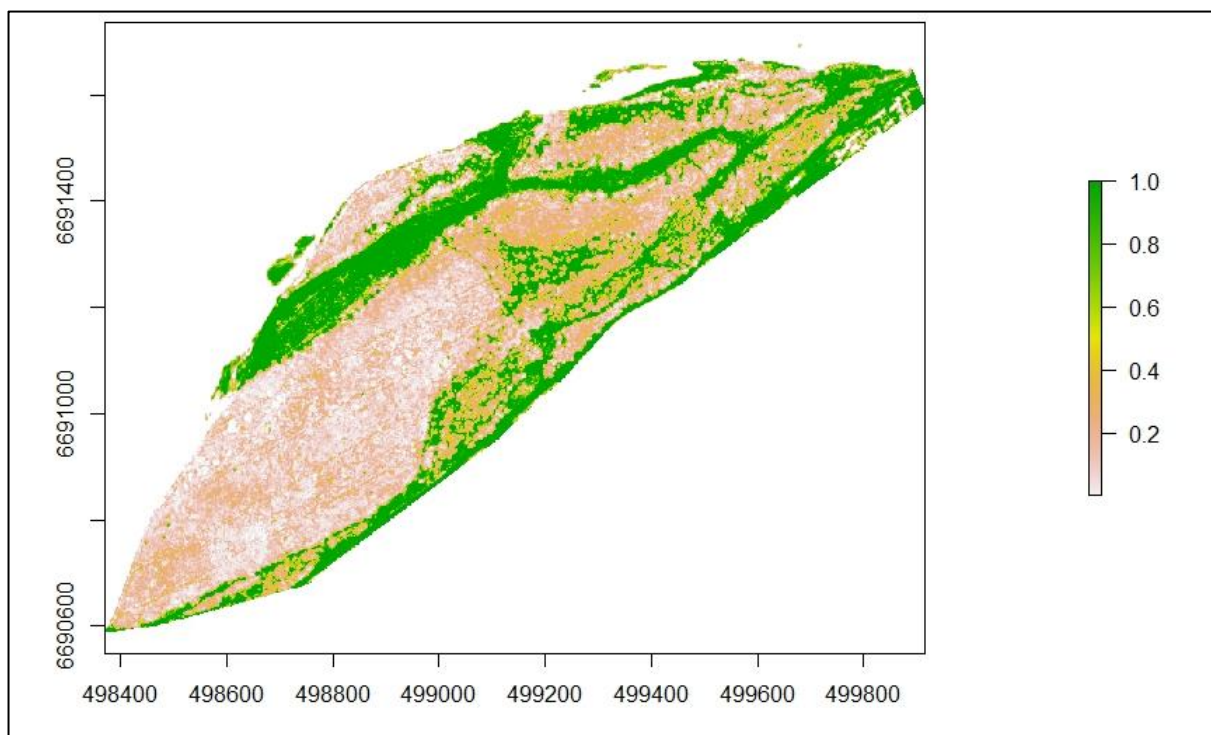
Annexe 40: courbe de densité du LPI de l'îlot A



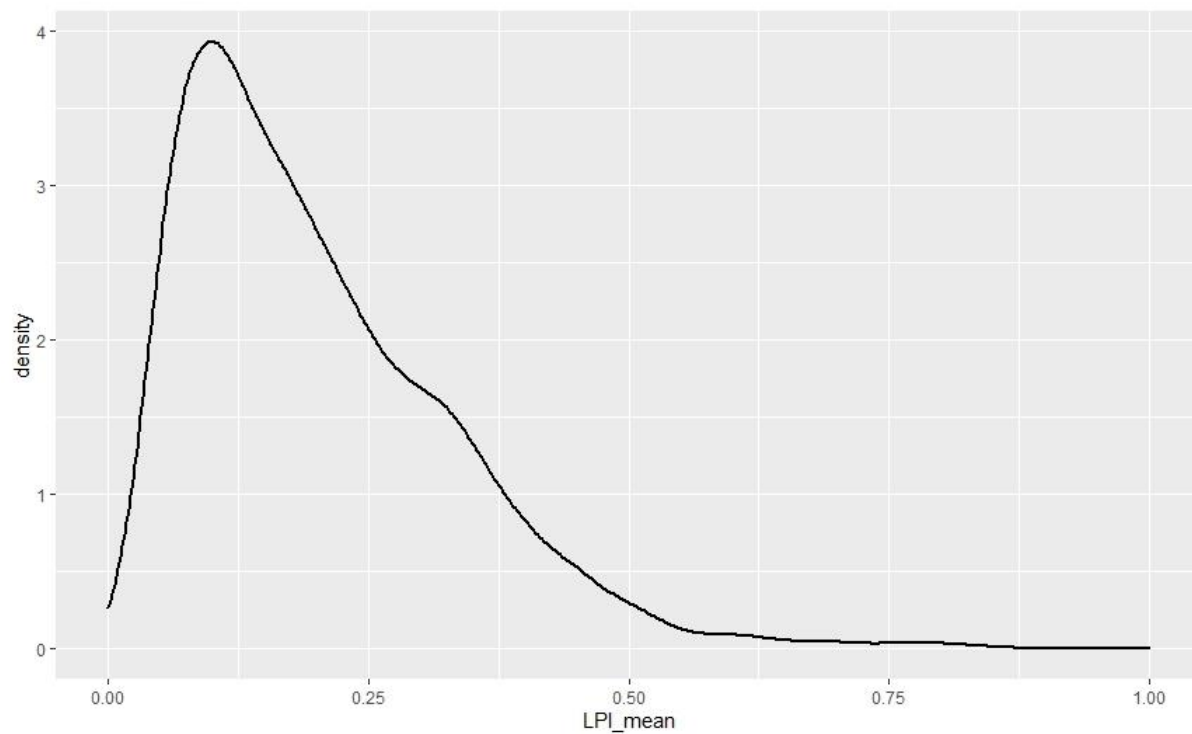
Annexe 41: Courbe de densité du LPI de l'îlot B



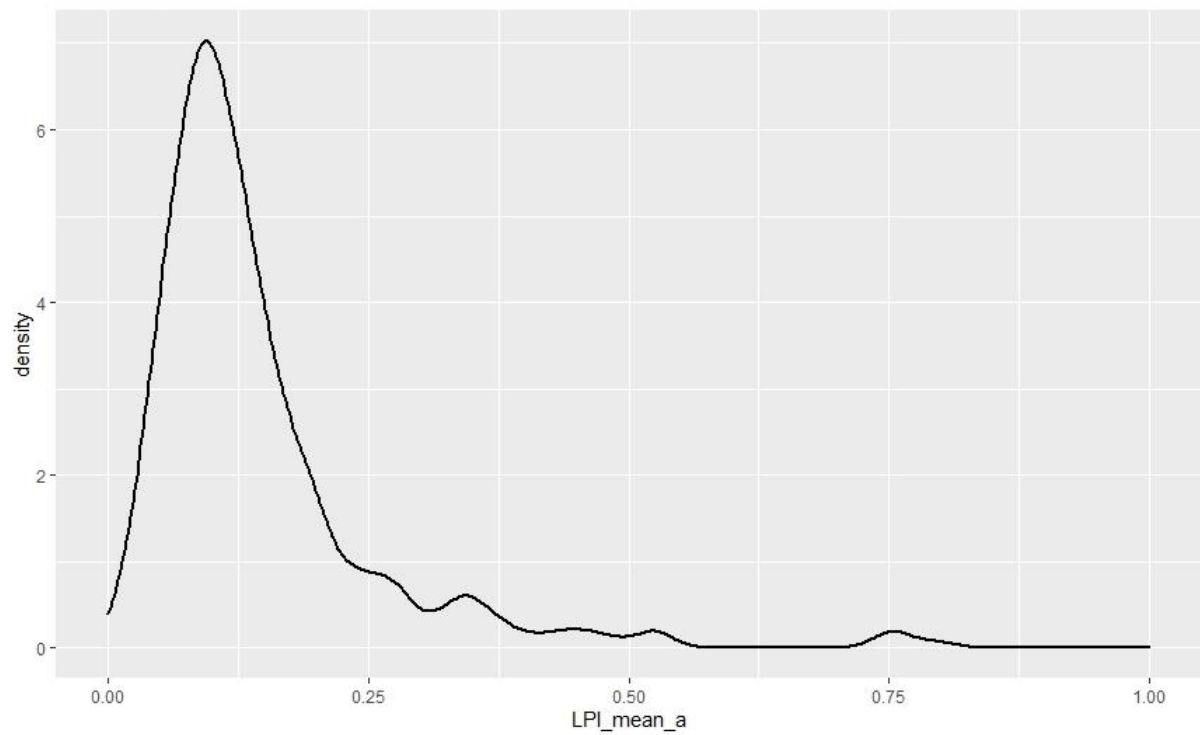
Annexe 42: courbe de densité du LPI de l'îlot C



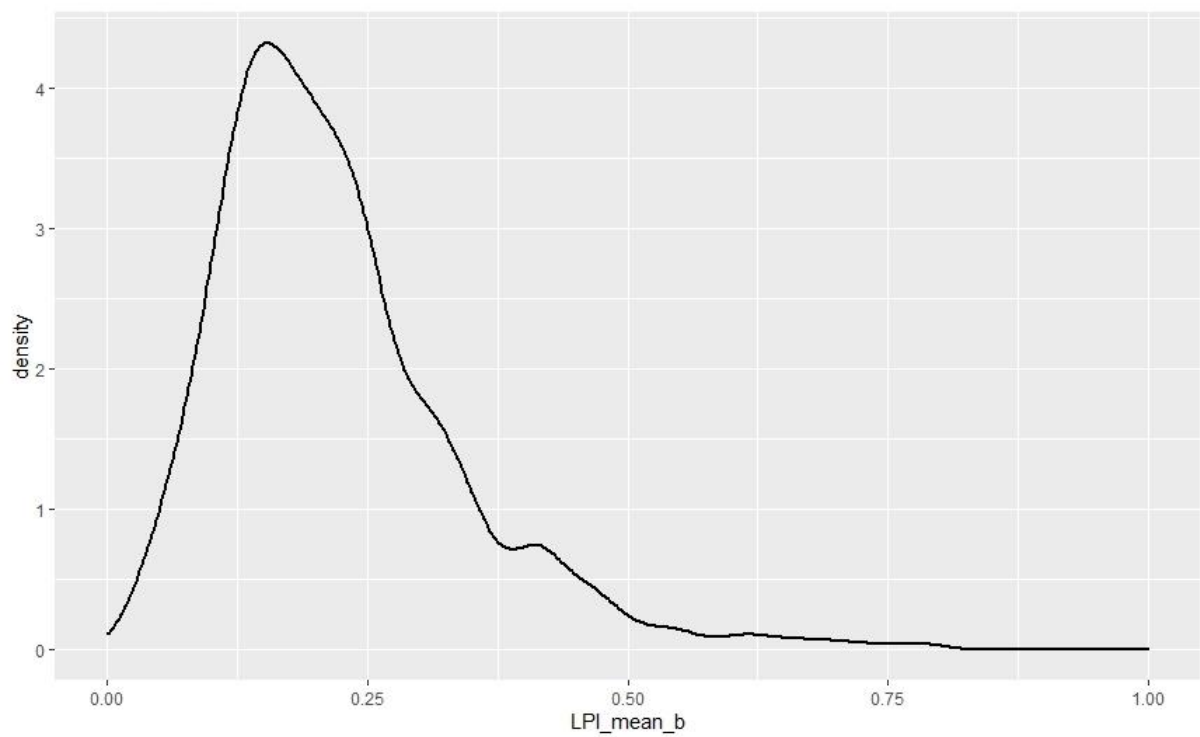
Annexe 43: LPI du site de Bréhémont



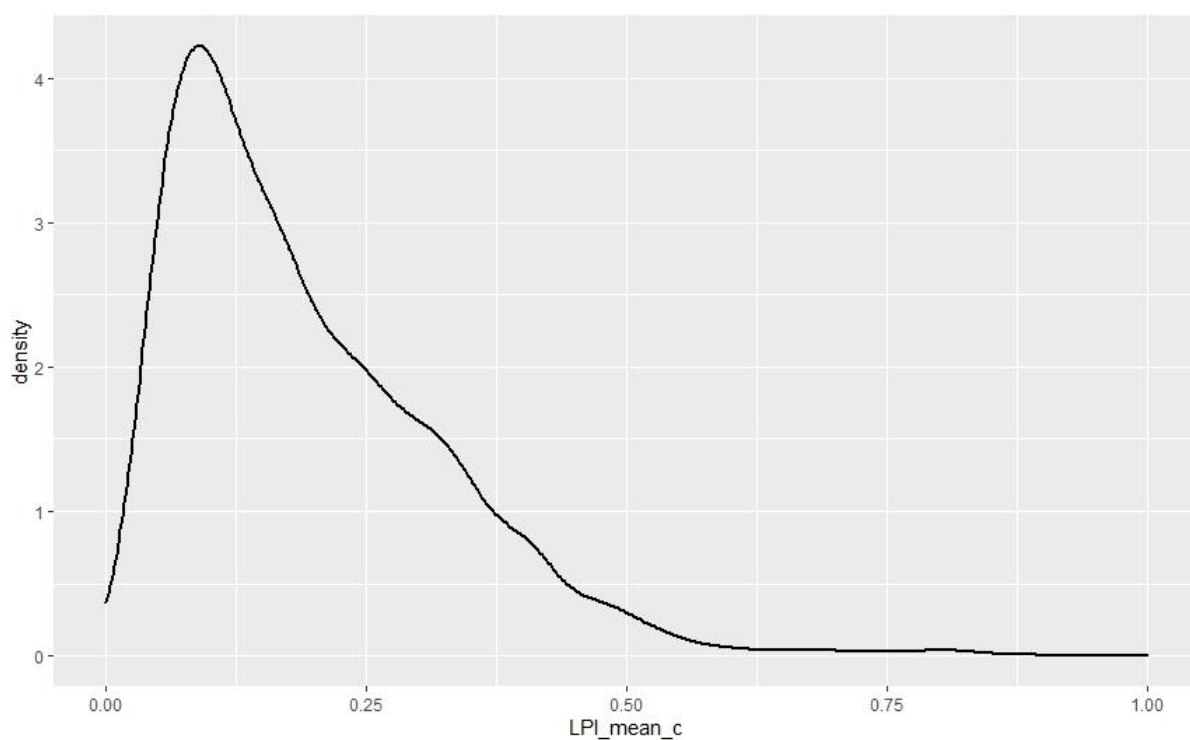
Annexe 44: Courbe de densité du LPI du site de Bréhémont



Annexe 46: Courbe de densité du LPI de l'îlot D



Annexe 45: Courbe de densité du LPI de l'îlot E



Annexe 48: Courbe de densité du LPI de l'îlot F

	Hauteur	Couronnes	GNDVI	LPI
Hauteur		0,33	0,0052	0,0027
Superficie couronnes			0,0066	-0,00025
GNDVI				0,02
LPI				

Annexe 47: R^2 de l'ensemble du sous-site D

	Hauteur	Couronnes	GNDVI	LPI
Hauteur		0,23	0,0013	0,0015
Superficie couronnes			-0,0011	0,0017
GNDVI				0,021
LPI				

Annexe 50: R^2 de l'ensemble du sous-site E

	Hauteur	Couronnes	GNDVI	LPI
Hauteur		0,2	0,0027	0,00091
Superficie couronnes			0,001	0,00035
GNDVI				0,29
LPI				

Annexe 49: R^2 de l'ensemble du sous-site F

	Hauteur	Couronnes	GNDVI	LPI
Hauteur		0,079	-0,0028	-0,0073
Superficie couronnes			-0,0021	0,0018
GNDVI				0,014
LPI				

Annexe 53: R^2 de l'ensemble du sous site A

	Hauteur	Couronnes	GNDVI	LPI
Hauteur		0,17	0,0094	-0,0032
Superficie couronnes			-0,0089	-0,0035
GNDVI				0,046
LPI				

Annexe 52: R^2 de l'ensemble du sous-site B

	Hauteur	Couronnes	GNDVI	LPI
Hauteur		0,34	-0,0067	-0,0031
Superficie couronnes			0,015	0,000039
GNDVI				-0,0003
LPI				

Annexe 51: R^2 de l'ensemble du sous-site C

	<u>Mareau</u>	Bréhémont	A	B	C	D	E	F
Minimum (m)	2,5	2,077	2,733	3,054	2,542	2,367	2,304	2,094
1 ^{er} quartile (m)	6	13	6	14,5	8	10,5	10	14,25
Médiane (m)	17,5	17,5	10	24	20	15	14,8	18
3 ^{ème} quartile (m)	24	22,5	20	26	22,5	18	18,5	22,75
Maximum (m)	30,8	39,016	29,839	30,839	27,155	30,505	30,967	39,016
Etendue de la distribution (m)	28,3	36,939	27,106	27,785	24,613	28,138	28,663	36,922
Intervalle interquartile (m)	18	9,5	14	11,5	14,5	7,5	8,5	8,5

Annexe 54: Paramètres statistiques des hauteurs à l'échelle inter sous-sites

	Mareau	Bréhémont	A	B	C	D	E	F
Minimum (m²)	0,1	0,004	0,099	1,988	0,095	0,074	0,043	0,002
1^{er} quartile (m²)	28	37,5	23	35	39	36,5	33,25	38
Médiane (m²)	43,75	50	35,5	46	45,5	49	48,5	53
3^{ème} quartile (m²)	56,25	62,5	52,5	58	56,25	61,25	61	63,25
Maximum (m²)	83	89,985	82,542	76,765	78,085	89,222	89,711	89,98
Etendue de la distribution (m)	82,9	89,981	82,443	74,8	77,99	89,148	89,668	89,978
Intervalle interquartile (m)	28,25	25	29,5	23	17,25	24,75	27,75	25,25

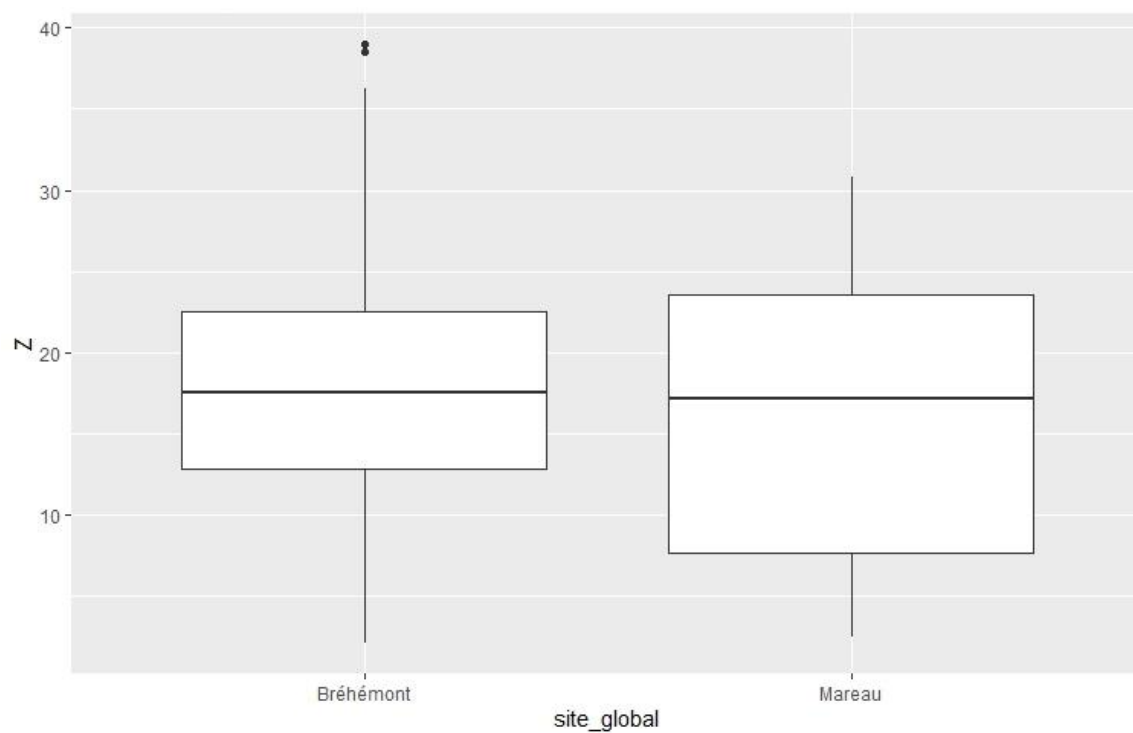
Annexe 55: Paramètres statistiques des superficies de couronnes à l'échelle inter sous-sites

	Mareau	Bréhémont	A	B	C	D	E	F
Minimum	-0,16	-0,7	-0,16	-0,077	-0,09	0,223	-0,74	-0,74
1^{er} quartile	0,125	0,12	0,11	0,15	0,15	0,19	0,1	0,12
Médiane	0,2	0,2	0,2	0,195	0,2	0,22	0,175	0,2
3^{ème} quartile	0,21	0,22	0,25	0,22	0,23	0,29	0,2	0,23
Maximum	0,46	0,8	0,39	0,41	0,46	0,62	0,55	0,55
Etendue de la distribution	0,62	1,5	0,55	0,487	0,55	0,397	1,29	0,43
Intervalle interquartile	0,085	0,10	0,14	0,07	0,08	0,1	0,1	0,11

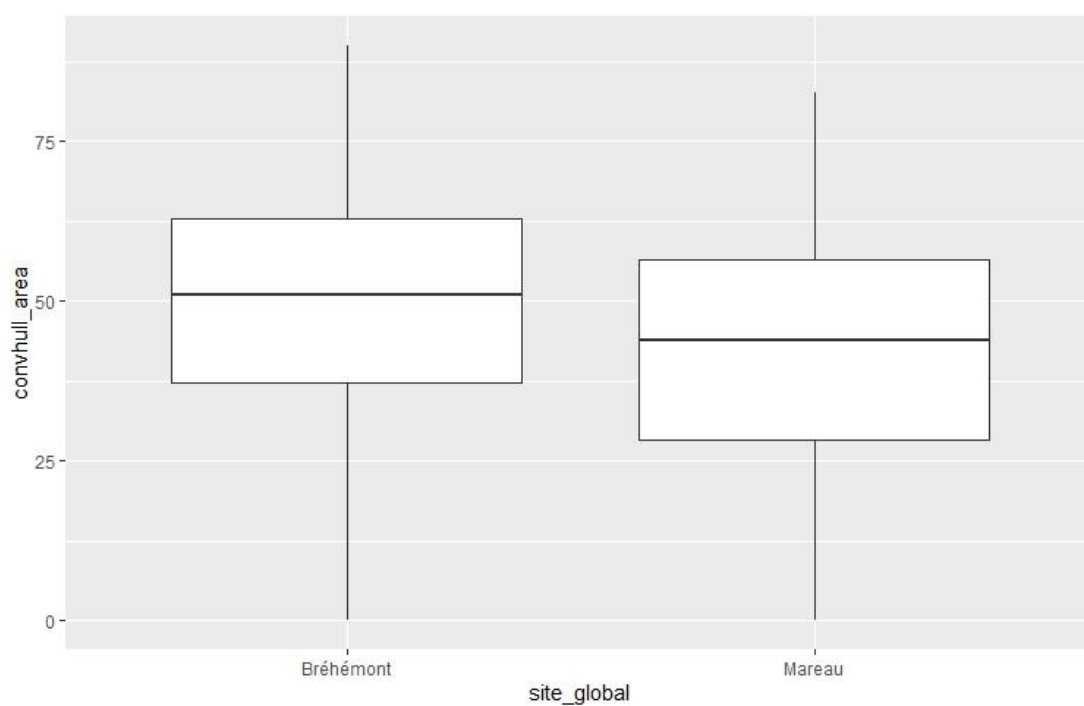
Annexe 56: Paramètres statistiques du GNDVI à l'échelle inter sous-sites

	Mareau	Bréhémont	A	B	C	D	E	F
Minimum	0,008	0,004	0,008	0,03	0,03	0,008	0,01	0,004
1^{er} quartile	0,125	0,1	0,115	0,10	0,125	0,08	0,13	0,09
Médiane	0,19	0,14	0,27	0,125	0,16	0,125	0,19	0,16
3^{ème} quartile	0,28	0,26	0,31	0,19	0,25	0,17	0,26	0,26
Maximum	0,82	0,97	0,53	0,68	0,82	0,79	0,78	0,89
Etendue de la distribution	0,8	0,97	0,522	0,63	0,79	0,782	0,77	0,89
Intervalle interquartile	0,16	0,16	0,20	0,09	0,13	0,09	0,13	0,17

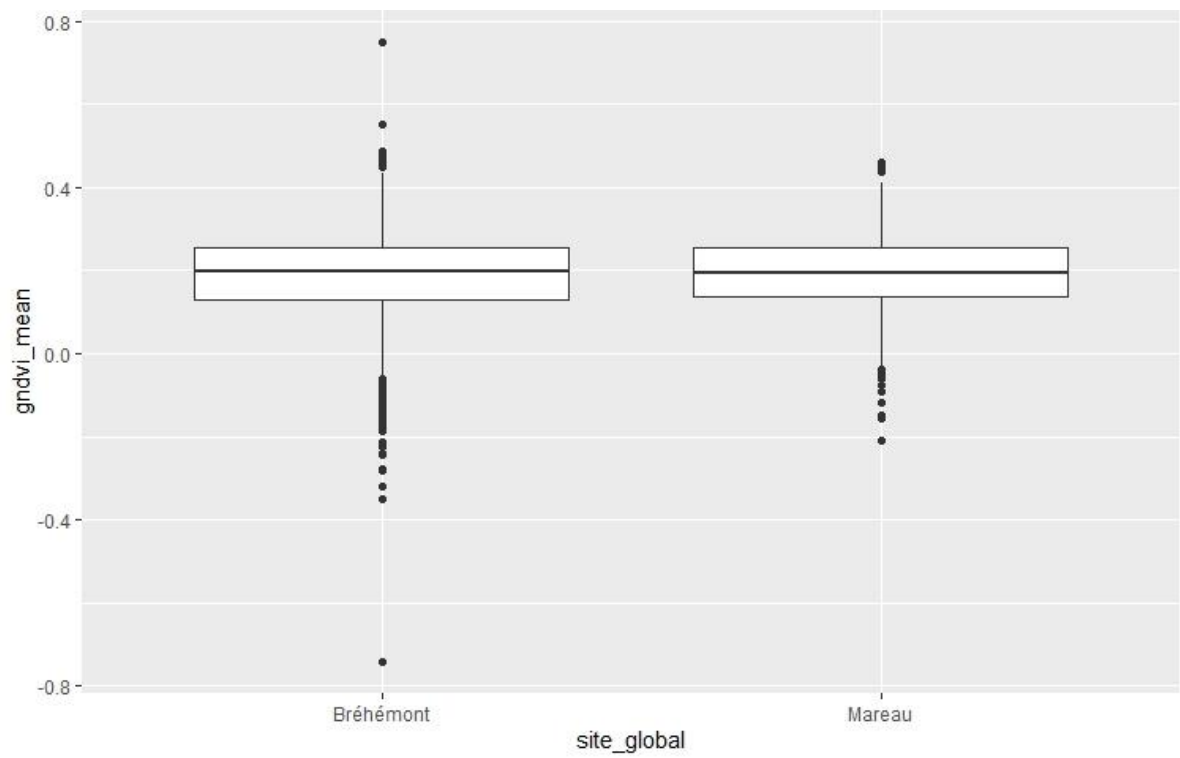
Annexe 57: Paramètres statistiques du LPI à l'échelle inter sous-sites



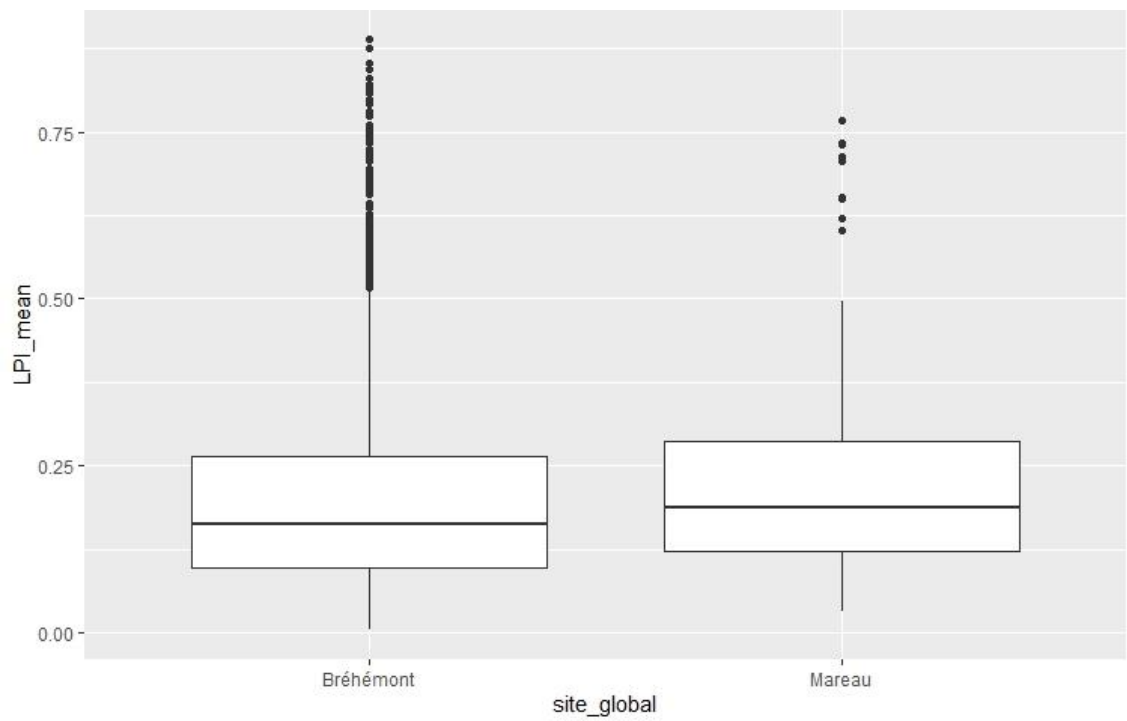
Annexe 58: Boîte à moustache de la distribution des hauteurs des deux sites d'études



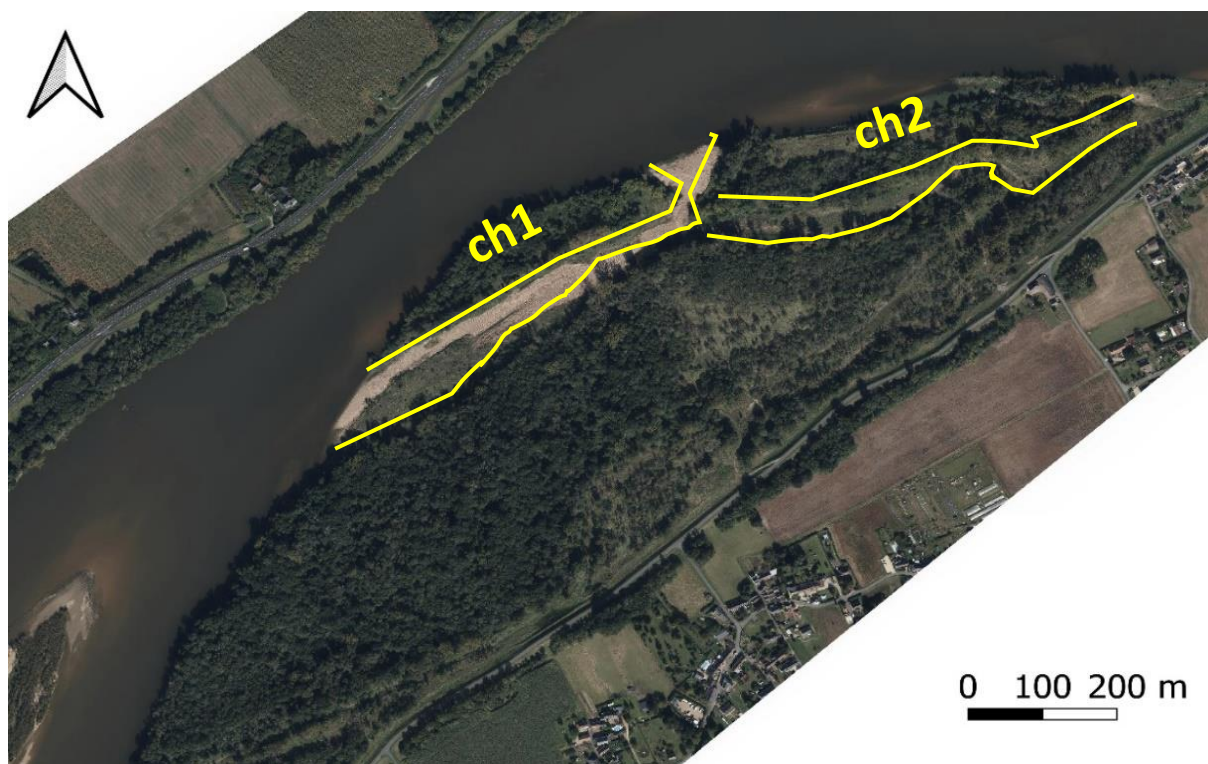
Annexe 59: Boîte à moustache de la distribution des superficies de couronnes des deux sites d'études



Annexe 60: Boîte à moustache de la distribution du GNDVI des deux sites d'études



Annexe 61: Boîte à moustache de la distribution du LPI des deux sites d'études



Annexe 62: chenaux secondaires du site de Bréhémont

Rapport de stage de 4^{ème} année, Polytech Tours, option Ingénierie des Milieux Aquatiques (IMA)

Effectué par : Pierrick Louet

Entreprise ou organisme : UMR CITERES, équipe DATE

Sujet de stage : Caractériser l'évolution des communautés végétales au sein du lit de la Loire depuis 1995 sur la base de données de télédétection LiDAR topobathymétrique.

Résumé

La végétation ligneuse alluviale fait partie intégrante des systèmes fluviaux et permet la régulation de sédiments, de nutriments, des crues, du ruissèlement, et enfin peut agir en tant que protection de berges. Depuis le début du 19^{ème} siècle, cette végétation ligneuse alluviale subit de nombreuses contraintes, pour la plupart d'origine anthropique. L'urbanisation et la modification de l'usage des sols ont réduits les espaces propices à son développement, et l'incision des cours d'eau provoque une réduction de la diversité d'espèces. Pour quantifier et qualifier ces changements, deux approches sont couramment utilisées, à savoir la prospection pédestre et l'utilisation d'images satellites. La première présente le désavantage d'être chronophage, tandis que la seconde fournit des résultats seulement en deux dimensions. L'utilisation d'une technologie LiDAR topo-bathymétrique comble ces deux contraintes, et peut permettre de caractériser de la végétation ligneuse alluviale dans le but de parvenir à qualifier et quantifier les contraintes s'exerçant sur cette dernière. Le lit de la Loire disposant depuis 2019 d'une couverture LiDAR topo-bathymétrique, ce stage s'est attaché à décrire de la végétation ligneuse alluviale sur deux sites situés en Loire Moyenne selon quatre métriques issues de ces données LiDAR : les hauteurs de végétation ligneuses, et superficies de couronnes de la végétation, le GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), et le LPI (Laser Penetration Index).

Mots-clés : LiDAR topo-bathymétrique ; nuage de points ; végétation ligneuse alluviale ; métriques ; morphologie de végétation ; vigueur de la végétation

Abstract

The riparian vegetation is integrated to the riverine systems and allowed sediments, nutrients, floods, runoff regulation, and can act as riverbanks protection. Since the beginning of the 19th century, this woody riparian vegetation is under several constraints, mostly anthropogenic. Urbanization and the soil-uses modifications have decreased the area needed for his development, and rivers incision lead to a species diversity reduction. To quantify and qualify these changes, two methods are used: the survey on the field, and the uses of satellite imagery. The first one is time consuming, while the second one provides only two dimensions results. The use of topo-bathymetric LiDAR technology deletes these constraints and can characterize riparian vegetation to achieve a quantification and qualification of the pressure on it. The Loire riverbed have been covered by a LiDAR survey since 2019, the aim of this internship was to describe middle Loire River woody riparian vegetation according to four metrics from these LiDAR data: the height of the woody riparian vegetation, the area of canopies, the GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), and the LPI (Laser Penetration Index).

Keywords: topo-bathymetric LiDAR ; points cloud ; woody riparian vegetation ; metrics ; vegetation morphology ; vegetation vigour