La prise en compte du changement climatique dans la gestion des milieux forestiers français. La forêt domaniale d'Écouves

Hugo Fontaine

▶ **To cite this version:**

Hugo Fontaine. La prise en compte du changement climatique dans la gestion des milieux forestiers français. La forêt domaniale d'Écouves. Géographie. 2021. dumas-03431473

HAL Id: dumas-03431473

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03431473

Submitted on 16 Nov 2021

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

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

UNIVERSITÉ CAEN NORMANDIE

UMR 6554 CNRS LETG

Mémoire d'initiation à la recherche

Sous la direction d'Olivier Cantat

La prise en compte du changement climatique dans la gestion des milieux forestiers français

La forêt domaniale d'Ecouves

Hugo Fontaine

Université de Caen Normandie, UFR SEGGAT, Master 1 GAED

parcours « Environnement : diagnostic des territoires »

Année 2020-2021

En partenariat avec :

Parc naturel régional Normandie-Maine

Office National des Forêts

UNIVERSITÉ CAEN NORMANDIE

UMR 6554 CNRS LETG

Mémoire d'initiation à la recherche

Sous la direction d'Olivier Cantat

La prise en compte du changement climatique dans la gestion des milieux forestiers français

La forêt domaniale d'Ecouves

Hugo Fontaine

Université de Caen Normandie,

UFR Science Economique, Gestion, Géographie et Aménagement des Territoires,

Master 1 GAED (Géographie, Aménagement, Environnement et Développement)
parcours « Environnement : diagnostic des territoires »

Année 2020-2021

En partenariat avec : Parc naturel régional Normandie-Maine ; Office National des Forêts

Remerciements :

Mes premiers remerciements vont bien sûr à Olivier Cantat mon encadrant pour cette initiation à la recherche, pour la qualité de ces conseils, ces disponibilités pour permettre de faire des points réguliers sur l'avancé du travail ou aller sur le terrain, ses relectures, sa confiance envers moi et sa bienveillance malgré des conditions sanitaires compliquées.

Je tiens également à remercier Patrick Le Gouée pour ces conseils et son professionnalisme sur le terrain en matière de sol et d'études pédologiques ainsi que ces disponibilités pour m'avoir accompagné sur le terrain et pour les réunions en visioconférence.

Mes remerciements vont ensuite à Michel Ameline, responsable scientifique et prospective du Parc Naturel Régional Normandie-Maine pour les conseils donnés pour mener à bien la recherche ainsi que ces disponibilités (terrain ou visioconférence) pour des points réguliers ainsi que Monsieur Samuel Autissier, directeur de l'ONF à Alençon pour son aval pour le terrain d'étude, la forêt domaniale d'Ecouves.

Je tiens ensuite à remercier, les deux géomaticiens avec qui j'ai pu échanger, Sylvain Montagner pour l'ONF et Romain Louvet pour le PNR. Ils m'ont permis d'acquérir des données SIG sur la zone d'étude.
Mais également Yves Adam, technicien forestier du triage sur lequel j'ai réalisé la recherche pour m'avoir fait découvrir le secteur, expliquer les particularités de celui-ci ainsi qu'aider à élaborer un devis pour une possible réalisation de fosses pédologiques.

Enfin, je souhaite remercier l'ensemble des enseignants-chercheurs, qui durant ce premier semestre m'ont apporté des connaissances à la fois techniques et méthodologiques, qui vont me permettre de réaliser mon mémoire de recherche dans de bonnes conditions.

Abréviations :

BH : **B**ilan **H**ydrique

CEC : **C**apacité d'**E**change **C**ationique

CNPF : **C**entre **N**ational de la **P**ropriété **F**orestière

CRPF : **C**entre **R**égional de la **P**ropriété **F**orestière

D : **D**éficit hydrique

ETM : **E**vapo**T**ranspiration **M**aximale

ETP : **E**vapo**T**ranspiration **P**otentielle

ETR : **E**vapo**T**ranspiration **R**éelle

GEOPHEN : **GEO**graphie, **PH**ysique et **En**vironnement

GIEC : **G**roupe d'experts **I**ntergouvernementales sur l'**E**volution du **C**limat

GPS : **G**lobal **P**ositionning **S**ystem

IGN : **I**nstitut national de l'information **G**éographique et forestière

ISBA : **I**nteraction **S**ol-**B**iosphère-**A**tmosphère

LETG : **L**ittoral – **E**nvironnement – **T**élédétection – **G**éomatique

LIDAR : **L**aser **I**maging **D**etection **A**nd **R**anging

MNA : **M**odèle **N**umérique d'**A**ltitude

MNT : **M**odèle **N**umérique de **T**errain

ONF : **O**ffice **N**ational des Forêts

P : **P**récipitation

Ph : **P**otentiel **H**ydrogène

PNR : **P**arc **N**aturel **R**égional

PNRNM : **P**arc **N**aturel **R**égional **N**ormandie-**M**aine

RSG : **R**ayonnement **S**olaire **G**lobal

RU : **R**éserve **U**tile

RUM : **R**éserve **U**tile **M**aximale

S : **S**urplus hydrologique

SIG : **S**ystème d'**I**nformation **G**éographique

T : **T**empérature

UNSECO : **O**rganisation des **N**ations **U**nies pour l'**Ed**ucation, la **S**cience et la **C**ulture

US : **U**nité **S**tationnelle

Sommaire :

INTRODUCTION GENERALE 1
PREMIERE PARTIE : ETAT DE L'ART DE LA RECHERCHE 4
1 - La forêt et le changement climatique : des thématiques actuelles liées entre elles 4
2 - Les connaissances actuelles sur le changement climatique en forêt 6
3 - Insertion de la recherche dans le monde scientifique 9
DEUXIEME PARTIE : CONTEXTUALISATION 13
1 - Localisation du terrain d'étude 13
2 - Contexte social 14
3 - Une forêt marquée par le relief 15
4 - Géologie de la forêt d'Ecouves 16
5 - Un climat favorable à la végétation forestière 17
6 - Approche forestière de la forêt d'Ecouves et de la zone d'étude 17
7 - Une forêt s'inscrivant au sein du PNR Normandie-Maine 22
TROISIEME PARTIE : PRESENTATION GENERALE DU SUJET DE RECHERCHE 24
QUATRIEME PARTIE : ADEQUATION DES ESSENCES FORESTIERES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE 25
1 - Particularités du climat régional sur la normale climatique 25
2 - Prise en compte du bilan hydrique dans les impacts du changement climatique en forêt domaniale d'Ecouves 29
3 - Spatialisation du bilan hydrique à fine résolution 37
4 - Renouvellement de la carte des stations forestières 59
5 - Adéquation des essences forestières par rapport au climat et aux stations forestières 85
CONCLUSION ET PERSPECTIVES 96
1 - Conclusion 96
2 - Perspectives 96
BIBLIOGRAPHIE 99
LISTE DES FIGURES 102

INTRODUCTION GENERALE

Depuis les années 1950, le système climatique subi un réchauffement climatique sans équivoque se traduisant par un réchauffement de l'atmosphère et des océans, une fonte de la couverture neigeuse et de la glace et par une élévation du niveau des mers. La température sur la planète a augmenté de + 0,85 °C sur la période 1880-2012 de manière linéaire, selon le dernier rapport du GIEC en 2014. Les émissions de gaz à effet de serre provoquées par l'homme sont les plus élevées jamais observées sur la planète provoquant d'importantes répercussions que ce soit sur les systèmes naturels ou humains. Le réchauffement climatique fait pressentir une disparition conséquente d'espèces animales et végétales.
L'existence d'un réchauffement climatique global planétaire est alors établie. Mais que se passe-t-il à l'échelle locale ? Les conséquences sont-elles les mêmes qu'à l'échelle planétaire ? Comment le réchauffement climatique se manifeste-t-il à l'échelle locale ? Sur les espaces forestiers ?

Le réchauffement climatique est néfaste pour nos forêts et la croissance des arbres. Cela engendre l'émergence de questions relatives aux changements climatiques dans les milieux forestiers français. Le contexte actuel montre que la forêt est très sévèrement touchée par ce dérèglement climatique puisque certaines essences forestières majeures comme le hêtre, l'épicéa et le frêne subissent depuis plusieurs années des dépérissements. Cela démontre l'importance aujourd'hui de ces questions et des réponses doivent être apportées pour permettre aux gestionnaires et/ou techniciens de continuer à gérer durablement la forêt.

Ce contexte de réchauffement climatique, les conséquences et les interrogations que nous nous posons sont à la base du travail de réflexion mené au cours de cette recherche. Elle porte sur la prise en compte du changement climatique dans les milieux forestiers français avec le cas de la forêt domaniale d'Ecouves. Cette étude s'inscrit dans des réflexions globales sur la prise en compte du changement climatique en forêt publique actuellement et dans le futur, dans un objectif de contrer ce phénomène devenu aujourd'hui nuisible pour notre environnement. Il se traduit par la mise en place d'une gestion sylvicole adaptée (le mélange d'essences) et la recherche de nouvelles variétés d'arbres plus résistantes aux sécheresses.

A l'avenir les gestionnaires et techniciens forestiers devront tenir compte de la notion de changement climatique dans la gestion des forêts. Notamment au moment du renouvellement où le choix des essences devra être fait de telle manière qu'elles puissent perdurer face au changement climatique dans un objectif de production de bois et de préservation de la ressource en eau.
Ce nouvel aspect a alors conduit à une nouvelle gestion forestière durable : « La gérance et l'utilisation des forêts et des terrains boisés, d'une manière et à une intensité telles qu'elles maintiennent leur diversité biologique, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur capacité à satisfaire, actuellement et pour le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes aux niveaux local, national et mondial ; et qu'elles ne causent pas de préjudices à d'autres écosystèmes ». (Résolution H1, conférence interministérielle sur la protection des forêts en Europe, Helsinki, 1993).

Les questionnements sur le sujet de recherche résultent d'un cheminement important. La volonté de mener une étude en lien avec les problématiques du réchauffement climatique en milieux forestier en est le point de départ. Ce sujet a pris sa source dans l'intérêt personnel porté pour la nature, la forêt et l'environnement en général et par les études antérieures basées sur la gestion forestière et les SIG (Système d'Information Géographique).
Des connaissances antérieures assez générales sur la forêt, la gestion sylvicole et les impacts du changement climatique sur les essences forestières ont très vite permis de cadrer le sujet de recherche et les intentions.
Les premiers temps du mémoire ont alors servi à construire une bibliographie riche et variée permettant d'enrichir mon bagage de connaissance sur le thème, de découvrir différentes études sur le changement climatique en forêt ainsi que de définir pour partie la méthodologie. Les nombreuses discussions auprès de mon encadrant, Olivier Cantat ainsi que de Michel Ameline (responsable scientifique et prospective du Parc Naturel Régional Normandie-Maine) ont également participé à la construction et l'affinage de ce sujet. Ces lectures, discussions et recherches ont permis de définir un sujet de recherche précis :

- Approche technique, sujet centré sur la forêt → Observer si les essences forestières présentes sur la zone d'étude sont en stations (bonne croissance de l'arbre en circonférence et en hauteur dans un objectif de production de bois) actuellement et le seront à l'horizon 2100. Cela s'effectuera aux travers d'analyses stationnelles, climatiques et techniques c'est-à-dire par la proposition de nouveaux modes de gestions sylvicoles ou de nouvelles essences forestières plus résistantes aux sécheresses pour anticiper la régénération des peuplements.

Afin de mettre en évidence les effets du changement climatique sur les milieux forestiers, il est préférable d'étudier ces effets à l'échelle d'un massif forestier ou d'une forêt. L'objectif de travailler à cette échelle-là permet de mieux comprendre la forêt de manière générale et la gestion qui est pratiquée ainsi que les enjeux attribués à la forêt.
C'est pour cela que l'échelle de travail sera la forêt domaniale d'Ecouves, dans le département de l'Orne. La recherche permettra de comprendre et d'anticiper les effets du changement climatique dans cette forêt en proposant des nouveaux modes de gestions et de nouvelles essences. Ce travail doit permettre d'apporter une aide au gestionnaire de la forêt qui n'est autre que l'Office National des Forêts (ONF) ainsi qu'au Parc Naturel Régional Normandie-Maine au vue de leur nouvelle charte (2023) centrée sur la prise en compte du réchauffement climatique sur le territoire du parc.

Ce travail de recherche s'effectuera sur un terrain d'expérimentation, la partie sud de la forêt d'Ecouves, d'une surface de 773 ha avec ensuite une possible spatialisation du modèle mis en place à fine échelle. Le choix de la forêt domaniale d'Ecouves comme terrain d'étude a été fait pour plusieurs raisons que voici :

- C'est un terrain où les recherches scientifiques sur le changement climatique en forêt sont absentes et nécessaires pour la gestion des forêts,

- C'est une forêt très intéressante avec un relief marqué et la présence de plusieurs versants (nord, sud et ouest) offrant des expositions différentes du soleil. Cela permet alors une variation dans les essences et stations forestières,

- C'est une étude qui intéresse l'ONF et le PNR Normandie-Maine (PNRNM). Pour l'ONF elle pourra permettre d'anticiper la régénération des peuplements de l'aménagement forestier suivant qui doit être renouvelé en 2023. Pour le PNRNM, elle est très intéressante au vue du renouvellement de la charte, en 2023 également, basée sur la résilience.

La recherche s'organisera autour d'un certain nombre de questionnements de recherches. La problématique centrale de ce mémoire est la suivante : Quelles sont les conséquences du changement climatique sur les essences présentes en forêt domaniale d'Ecouves et quelles solutions peut-on apporter pour lutter contre celui-ci ou le contrer ?

Pour tenter d'apporter des réponses à cette question, de nombreuses réflexions seront menées : Qu'est-ce que le réchauffement climatique ? Comment se traduit-il en milieux forestier ? Quels sont les conséquences ? Quels sont les moyens mis en place pour lutter ?
Quelle méthodologie est la plus adaptée pour répondre à ces questions pas seulement sur la forêt d'Ecouves mais l'ensemble des massifs forestiers du PNR Normandie-Maine ?
Quel est le climat actuel en forêt d'Ecouves et quelles conséquences a-t-il sur les essences à court et long terme ? Quelles sont les réactions des essences forestières face au changement climatique ? Quelles sont les essences forestières en adéquation avec la station et le climat sur la zone d'étude ? Quelles nouvelles essences peut-on proposer en cas de non résilience de l'arbre ? Quelles modes de gestions peut-on envisager pour les peuplements résilients ? Comment anticiper la régénération des peuplements ?

Le mémoire de recherche sera essentiellement centré sur l'élaboration d'une méthodologie générale applicable pour de nombreux massifs forestiers. L'objectif final du mémoire est d'observer l'adéquation des essences avec la station forestière et le climat. Il conviendra d'élaborer une méthode simple et réalisable par tous sur le renouvellement de la carte des stations forestières et la spatialisation à fine échelle du bilan hydrique actuel. La méthodologie sur la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle pourra également servir pour établir des bilans hydriques dans le futur car seules les données changent.

Le mémoire de recherche sera divisé en quatre grandes parties. Les deux premières parties seront consacrées à l'état de l'art et la contextualisation de la forêt d'Ecouves et du PNR Normandie-Maine dans lequel s'inscrit la forêt. Puis une présentation générale du sujet de recherche sera effectuée. Pour terminer, il conviendra d'observer l'adéquation des essences forestières avec le climat et la station via deux dimensions :

- La dimension en commençant par une approche climatique générale pour aller vers une approche très fine avec la spatialisation à fine échelle où la méthode serra expliquée,
- L'approche pédologique, avec le renouvellement de la carte des stations forestières et la méthodologie pour y arriver.

PREMIERE PARTIE : ETAT DE L'ART DE LA RECHERCHE

Cette première partie de ce mémoire vise à présenter les connaissances sur la problématique du réchauffement climatique en milieux forestier à travers divers articles et ouvrages. Le sujet de recherche s'inscrit dans les recherches actuelles sur la prise en compte de l'élévation du climat, néfaste pour les forêts françaises. L'ensemble des ouvrages étudiés ont permis de contextualiser ce travail de recherche ainsi que de connaitre les études déjà réalisées dans ce domaine.

1 - La forêt et le changement climatique : des thématiques actuelles liées entre elles

Aujourd'hui, la forêt, dans son ensemble, ainsi que le changement climatique sont deux thématiques très liées. La hausse du climat a un impact direct sur la forêt, notamment sur la durée de vie de certaines essences forestières ainsi que sur sa gestion qui doit être durable. Il est alors important de connaitre les causes et conséquences de ce réchauffement climatique en vue d'apporter des réponses.

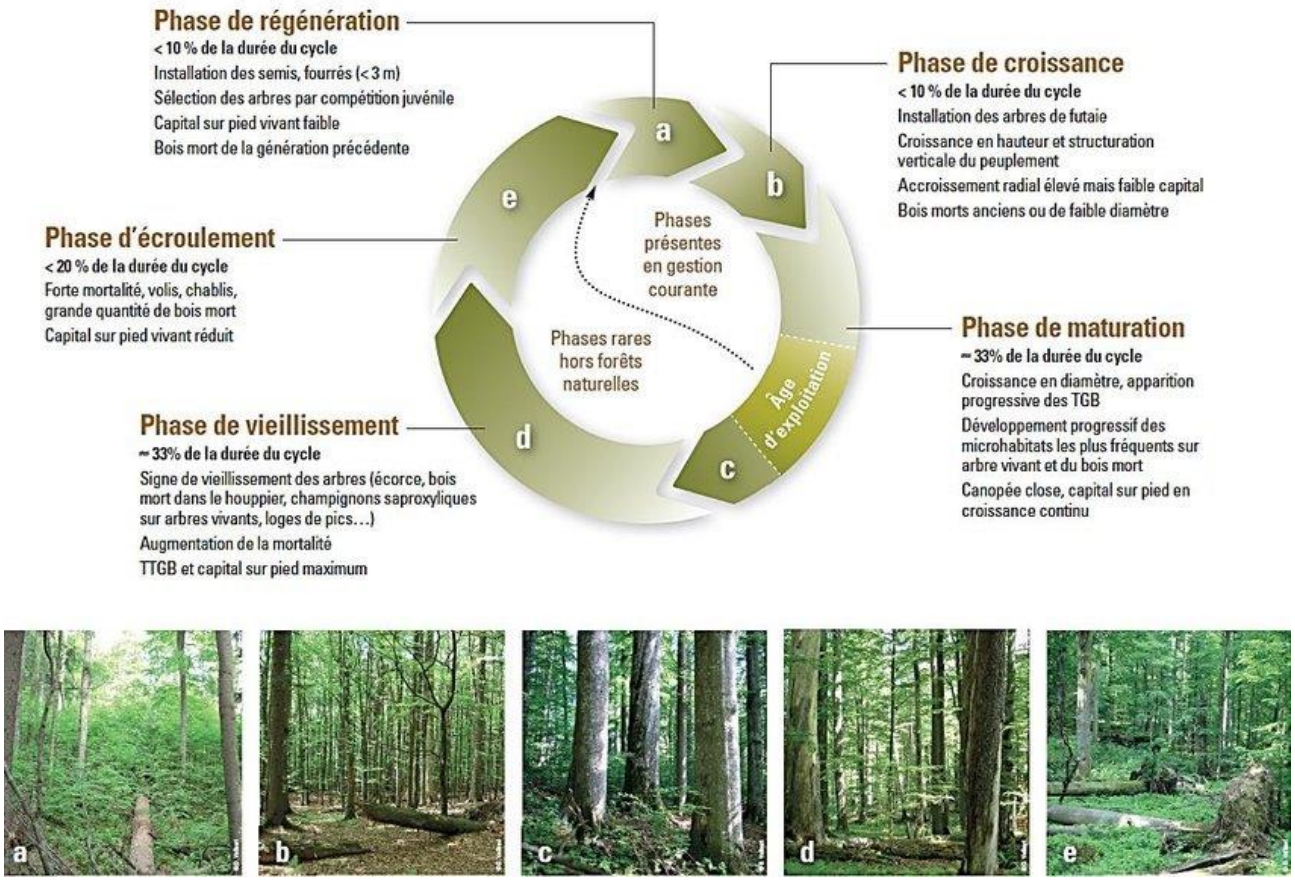
1.1 - La forêt : un écosystème, aujourd'hui, cultivé durablement

Une forêt est une grande étendue de terrain couverte d'arbres pouvant également contenir des zones non boisées comme des landes, des clairières ou des pâtures. C'est un écosystème composé d'un biotope c'est-à-dire un milieu physique, ici la forêt et d'une biocénose correspondant à l'ensemble des êtres vivants qui le constitue. En forêt, cette biocénose est principalement ligneuse (arbres) où de fortes interactions existent : la compétition pour obtenir le plus de lumière possible et la coopération du fait que tous les arbres se tiennent entre eux.

La forêt est un espace cultivé, comme pour les terres agricoles. La sylviculture est le nom donné quand on parle de culture en forêt. C'est « l'ensemble des sciences et techniques orientant l'évolution naturelle des peuplements forestiers pour les guider vers les objectifs fixés dans le cadre d'une gestion durable de la forêt ». (Bastien et Gauberville, 2011). Les fonctions de la forêt sont au nombre de 4 :

- Une fonction économique de production de bois,
- Une fonction environnementale de protection de la biodiversité,
- Une fonction de protection contre les risques naturels tels que les chutes de blocs, les avalanches, l'érosion, etc,
- Une fonction sociale d'intérêt paysager, d'accueil du public et de protection de la ressource en eau.

Figure 1 *: Le cycle sylvigénétique en 5 phases (mosaïque de taches unitaires > 200 m²). (Rossi et Vallauri, 2013).*



Une forêt dite naturelle, a son cycle sylvigénétique qui s'exprime de façon complète (Figure 1). Il est composé de plusieurs mosaïques de phases :

- La phase de régénération naturelle correspondant à l'installation des semis,
- La phase de croissance se rapportant à l'installation des arbres en futaie[1] marquée par une croissance en hauteur importante,
- La phase de maturation, la plus longue avec la phase de vieillissement, où là la croissance des arbres n'est plus en hauteur mais en diamètre,
- La phase de vieillissement où on commence à observer des signes de dépérissements (bois mort dans la cime, écorce, champignons saproxyliques, etc),
- La phase d'écroulement où une forte mortalité est présente.

La gestion forestière appliquée aux forêts françaises court-circuite le cycle sylvigénétique complet en récoltant les arbres pendant la phase de maturation, là où les arbres ont atteint leurs âges d'exploitabilités. Une fois les arbres coupés, on revient à la première phase du cycle, la phase de régénération.

1.2 - Caractérisation du changement climatique

Avant de parler du changement climatique en forêt, des impacts et des perspectives pour contrer ce phénomène, il est important de ne pas confondre deux expressions qui sont très proches l'une de l'autre mais qui n'ont pas la même signification : le changement climatique et le réchauffement climatique.
Le réchauffement climatique est une des manifestations du changement climatique se traduisant par un changement du climat de la Terre ici caractérisé par une augmentation des températures en surface. Tandis que le changement climatique englobe toutes les modifications de tous les paramètres climatologiques. Ici, on parlera plutôt de la notion de changement climatique plutôt que de réchauffement climatique même si les deux sont très proches et souvent utilisées en forêt.

1.2.1 - Définitions

De nombreuses définitions du changement climatique ont été proposées provenant de sources différentes, parfois pas toujours très fiables où les deux termes sont parfois confondus amenant la confusion. Ici, la définition provient de sources scientifiques fiables.

Pour le GIEC (2013), le changement climatique est une « variation de l'état du climat, qu'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus ».

[1] ***Futaie :*** *Peuplement forestier composé d'arbres issus de semis ou de plants. (Définition 1). Régime sylvicole fondé sur la reproduction sexuée des arbres. (Définition 2). (Bastien et Gauberville, 2011).*

Outre le fait que le changement climatique provoque des modifications ou variabilités du climat, les Nations Unies (1992) expliquent que les changements climatiques « sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine » et qu'ils « viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat ». Ces définitions reprennent très bien les dires évoqués auparavant où le changement climatique englobe toutes les modifications des paramètres climatologiques et le réchauffement climatique est une composante de celui-ci.

Pour caractériser au mieux, la situation d'aujourd'hui on peut même parler de changement climatique brusque. C'est un « changement de grande échelle touchant le système climatique et s'étalant sur quelques décennies voire moins. Il persiste (ou devrait persister) durant quelques décennies au moins, provoquant des bouleversements dans les systèmes humains et naturels ». (GIEC, 2013).

2 - Les connaissances actuelles sur le changement climatique en forêt

2.1 - Caractérisation du changement climatique

Les changements climatiques sur notre planète existent depuis des millions d'années, avant même la préhistoire, avec des successions de périodes glaciaires et interglaciaires. Ces changements étaient autrefois « naturels » car ils dépendaient de trois principaux cycles climatiques qui expliquaient ces variations climatiques (période glaciaire et interglaciaire) :

- La variation de l'excentricité de l'orbite de la terre,
- L'obliquité de la planète,
- La précession terrestre.

Mais le changement climatique que nous connaissons depuis 1850, avec le début du recul des glaciers, est bien trop rapide pour qu'il puisse s'expliquer à partir de ces trois paramètres. La revue Forêt de France (2007) mentionne qu'à partir de la révolution industrielle de 1850, a eu lieu « le développement des activités humaines (industries, automobiles, élevage intensif, combustibles fossiles) qui accroît l'effet de serre ». La cause humaine a donc été établie pour expliquer ce réchauffement climatique.

Les changements climatiques affectent aujourd'hui de nombreux domaines dont les milieux forestiers. Ils ont réellement été impactés à partir du XX^{ème} (1950) avec l'évolution des températures annuelles moyennes. Ainsi pour le XX^{ème}, les températures moyennes ont subi une augmentation « entre + 0,7 °C et + 1,1 °C ». (Piedallu et al, 2009). Mais cet accroissement ne s'arrête pas là et les scénarios climatiques prévus au terme du XXI^{ème}, annoncent « une augmentation supplémentaire des températures moyennes comprise entre 2 et 4 °C ». (Piedallu et al, 2009). A cela on peut rajouter une augmentation de « la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur ». (Piedallu et al, 2009).

En forêt, le changement climatique se traduit par un réchauffement des températures d'une part en hiver provoquant un débourrement[1] précoce des bourgeons sensibles aux gelées tardives et d'autre part en été par des périodes de forte sécheresse. Une sécheresse est « une réduction de la réserve en eau des sols, suffisamment sévère pour que le fonctionnement des arbres ne soit plus optimal ». (Landman et al, 2003).

2.2 - Les conséquences sur la forêt et la biocénose

Aux premiers abords, le changement climatique provoque des conséquences néfastes sur l'environnement. Mais les impacts attendus sur les essences forestières ne sont pas tous négatifs, du moins dans un premier temps.

Le réchauffement climatique permet une augmentation de la croissance en hauteur de l'arbre. En effet l'accroissement du taux de CO_2 entraine « une augmentation de la photosynthèse[2], ce qui signifie une hausse de la croissance de l'arbre ». (Revue Forêts de France, 2007). La hausse des températures provoque également un allongement des périodes de végétations. Ce prolongement stimule alors les racines ce qui va dans le sens d'un gain de productivité.
Mais ce gain ne peut pas perdurer indéfiniment, notamment à cause de la baisse des réserves en eaux dans le sol, provoquée par la répétition de sécheresses ce qui entraine un déclin de la croissance de l'arbre et de sa productivité.

Les impacts du changement climatique sont irréversibles les essences forestières. Ils affectent à la fois les jeunes peuplements mais également les arbres de grande envergure, propice à la production de bois.
Les fortes sécheresses affectent en premier lieu les plantations de l'année où « des dégâts prévisibles » (Landman et al,2003) seront observables au vu de la hausse des températures. Les plantations résineuses et principalement le douglas sont très souvent touchées. On peut observer « des rougissements importants » (Landman et al, 2003) au niveau des aiguilles entrainant ensuite leurs chutes et la mort de l'arbre.

Les peuplements plus âgés, feuillus ou résineux, sont également touchés par le changement climatique. L'épicéa est aujourd'hui l'essence résineuse la plus sensible aux sécheresses et est victime « d'une épidémie de scolytes » (Manuel Nicolas, 2020), un insecte se développant « après des tempêtes ou, […] après une sécheresse ». (Manuel Nicolas, 2020).
Les essences feuillues comme le hêtre, le peuplier, le charme ou encore le bouleau sont aussi touchées par « des chutes de feuilles […] précoces » (Landman et al, 2003) depuis des années. Elles sont classées, aujourd'hui, comme « espèces les plus « sensibles » » (Landman et al, 2003) à ce phénomène.

[1] ***Débourrement :*** *Courte période au printemps caractérisée par l'épanouissement des bougeons. (Bastien et Gauberville, 2011).*

[2] ***Photosynthèse :*** *Transformation énergétique et chimique des radiations par la chlorophylle contenue dans les chloroplastes, conduisant principalement à une réduction chimique du dioxyde de carbone en substances carbonées. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Le chêne pédonculé, essence la plus répandue sur le territoire français, est de plus en plus touché par le changement climatique. Cela s'observe principalement au niveau du feuillage et des rameaux où pendant la saison de végétation, on a « une chute importante de rameaux verts » (Delangle, 2011) ainsi que le « desséchement des rameaux et des branches » (Delangle, 2011) lorsque que la sécheresse est trop importante.

2.3 - La gestion durable face au changement climatique

Face à cela, les gestionnaires forestiers sont alors obligés de s'adapter pour permettre à la forêt française de pérenniser dans le temps. Les peuplements en monoculture d'épicéa, de douglas ou de hêtre sont maintenant à éviter et le mélange d'essences est quant à lui à favoriser. Il permet de tamponner et de limiter les effets de perturbations.
Face à un stress, par exemple, toutes les essences d'un même peuplement ne sont pas attaquées de la même manière. Les stress biotiques (insecte ou champignon) « n'affectent qu'une seule essence, ou quelques-unes, dans le peuplement » (Legay et al, 2008) car l'agent pathogène n'est « adapté qu'à un nombre limité d'espèces ». (Legay et al, 2008). Le stress hydrique fonctionne de la même manière. Si, sur un même peuplement on met des essences à la fois sensibles aux sécheresses et moins sensibles, le changement climatique n'affectera pas toutes les espèces.
Au vu de ces explications, le mélange d'essences forestières permet d'améliorer « la résistance globale du couvert et ses capacités de cicatrisation ». (Legay et al, 2008).

Le mélange d'essences sur une parcelle est un moyen de gestion sylvicole pour l'avenir, c'est-à-dire une fois que le peuplement en monoculture a été exploité. Des moyens de gestions ont également été établis pour les peuplements encore en place. Face au changement climatique en forêt, la revue Forêts de France (2007) a mis en place 3 grandes catégories de peuplements avec des moyens de gestions différents :

- Peuplements sans avenir : La revue Forêts de France (2007) songe à une récolte anticipée des bois présents sur la parcelle si le diagnostic décèle une station « limite », un mauvais état sanitaire ou une instabilité du peuplement,

- Peuplements à avenir incertain : Il est nécessaire de raccourcir la révolution[1] d'un peuplement et intensifier la gestion pour atteindre au plus vite des dimensions suffisantes pour l'exploitation. (Revue Forêts de France, 2007),

- Peuplements à avenir potentiel : La revue Forêts de France (2007) préconise de revoir à la baisse les âges d'exploitabilités des essences, de dynamiser les interventions au sein du peuplement pour réduire la densité et s'orienter vers la « futaie claire[2] » pour diminuer la consommation en eau.

[1] ***Révolution :*** *Nombre planifié d'années séparant la régénération d'un peuplement forestier et le moment où ce même peuplement est abattu aux fins de récolte filiale.*
[2] ***Futaie claire :*** *Peuplement forestier composé d'arbres issus de semis ou de plants à faible capital sur pied et à couvert discontinu de l'étage principal. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Il est alors important aujourd'hui de multiplier les études sur le changement climatique en forêt pour permettre de mieux comprendre comment doit s'adapter la forêt et les essences forestières qui la compose car toutes ne réagissent pas de la même manière. La forêt est une ressource naturelle que l'on ne peut pas négliger et procure différents enjeux (politique, scientifique et économique). L'étude des conséquences du changement climatique sur l'environnement souligne également les enjeux politiques, économiques et scientifiques qu'il représente.

3 - Insertion de la recherche dans le monde scientifique

Pour rappel, le sujet de recherche est la prise en compte du changement climatique dans la gestion des milieux forestiers avec le cas de la forêt domaniale d'Ecouves. L'axe de recherche est un travail à fine échelle pour permettre de comprendre au mieux le terrain d'étude et les disparités locales. L'objectif est d'observer si actuellement, les essences forestières sont en stations.
Pour cela, une méthodologie sera établie pour cette zone d'étude pour répondre à cette question, applicable à de nombreux massifs forestiers. Cela passera par des analyses stationnelles (cartographie des stations), climatiques (bilans hydriques) et techniques (adéquation des essences).

Avant de poursuivre les recherches sur la technique et la méthodologie, il est important de faire des recherches documentaires préalables pour voir ce qui a été fait sur la question du changement climatique en forêt. Il ne sera présenté que les ouvrages qui ont un lien direct avec la recherche.

3.1 - BioClimSol : un outil d'aide pour les gestionnaires forestiers

Pour la présentation et la description de cet outil, on s'appuiera sur une revue de Forêt-entreprise (n°218) datant de 2014 rédigée principalement par Jean Lemaire, ingénieur au CRPF (Centre Régional de la Propriété Forestière).

3.1.1 - Présentation de l'application

BioClimSol est un outil numérique développé depuis 2009 par le CNPF (Centre National de la Propriété Forestière), aujourd'hui devenu CRPF, visant à aider les gestionnaires et techniciens forestiers dans la gestion des peuplements en place ou pour le choix d'essences forestières au moment du renouvellement dans un contexte de changement climatique. L'acronyme BioClimSol se décompose en trois parties :

- Bio pour la prise en compte du vivant, ici les essences forestières ou peuplements en place,
- Clim pour la prise en compte du climat et de la notion de changement climatique,
- Sol pour la prise en compte des facteurs compensateurs ou aggravants le climat, liés au sol ou à la topographie, en particulier la disponibilité en eau.

L'objectif premier de cet outil numérique est de pouvoir cartographier des « zones de vigilance climatique » spécifiques à chaque essence en intégrant des hypothèses d'évolution du climat. Cette cartographie des zones, couplée à un diagnostic stationnel et du peuplement, préconise in fine des recommandations sylvicoles pour la gestion des peuplements ou pour le renouvellement. L'outil BioClimSol fonctionne en 6 étapes :

- **Etape 1** : Référencer la parcelle où va être réalisé le diagnostic,
- **Etape 2** : Diagnostic climatique où grâce à une géolocalisation de la parcelle d'étude, le niveau de vigilance climatique est précisé à partir de la carte de vigilance établie par BioClimSol à partir des données Météo-France,
- **Etape 3** : Diagnostic stationnel avec un relevé de la topographie et une estimation de la réserve utile et de la présence ou non de traces d'hydromorphie,
- **Etape 4** : Bilan pédoclimatique : croisement entre le diagnostic climatique et stationnel pour définir si le peuplement est en adéquation avec la station,
- **Etape 5** : Relevé dendrométrique[1] et du niveau de résilience du peuplement pour connaitre la forme du peuplement (diamètre, densité, etc) et son état sanitaire,
- **Etape 6** : Pistes de recommandations sylvicoles.

3.1.2 - Application « FORECCAsT by BioClimSol »

Depuis 2016 un projet FORECCAsT a vu le jour, porté par le CRPF, le PNR du Haut-Languedoc et la coopérative forestière Alliance Forêts Bois. L'objectif de ce projet est de mettre « à disposition des propriétaires et des gestionnaires forestiers un outil d'aide à la décision sous forme d'application mobile appelée « FORECCAsT by BioClimSol » ». (FORECCAsT, 2020). Elle consiste à reprendre la démarche mis en place par l'outil BioClimSol en l'appliquant à l'ensemble du territoire métropolitain. Pour l'instant l'application est développée pour le territoire du PNR du Haut-Languedoc et pourrait être appliquée sur l'ensemble du territoire français en 2021 à la fois pour les forêts privées et publiques.

3.1.3 - Discussions / Limites de l'outil

Au vue de l'outil numérique déployé par le CRPF, on peut être amener à dire que la recherche qui est envisagée est sensiblement la même. La trame principale ressemble fortement à celle du sujet de recherche avec une analyse stationnelle sur le terrain, analyse climatologique puis symbiose des deux pour voir si l'essence est en adéquation avec la station.

[1] ***Dendrométrie :*** *Discipline relative à la mesure des arbres (hauteur, diamètre) et à leur croissance. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Pour la recherche, la méthodologie et les analyses seront plus poussées. Pour l'analyse stationnelle, il est envisagé de réaliser une carte des types de sols ainsi qu'une multitude d'analyses physico-chimiques qui permettront de définir par la suite la présence de contraintes chez les essences forestières (déficit hydrique, engorgement en eau ou manque d'apports nutritifs). Pour l'outil BioClimSol l'analyse stationnelle s'effectue uniquement sous forme d'estimation de la réserve en eau, de la texture et des contraintes ce qui reste approximatif et non envisageable pour une recherche scientifique.
Pour l'analyse climatologique de BioClimSol, elle n'intègre la notion de bilan hydrique que partiellement alors que dans la recherche, cette notion centrale pour permettre de déterminer l'adéquation des essences.

Malgré 24 études effectuées depuis 2009, elles ne recouvrent pas l'ensemble du territoire français et ne concernent que quelques espèces : le hêtre, le châtaignier, les chênes (pédonculé et sessile), l'épicéa et le douglas. Pour la Normandie, BioClimSol n'a été utilisé que pour des études sur le chêne pédonculé et sessile. Un manque d'information est alors observable pour les autres essences forestières. C'est pour cela que la recherche serra focalisée sur l'ensemble des essences présentes.

3.2 - Avancée de la recherche sur le changement climatique sur les forêts normandes

L'avancée de la recherche sur la prise en compte du changement climatique en milieux forestiers normands est relativement peu développée. Sur ce sujet, seuls deux travaux ont été réalisés : l'évaluation de la sécheresse des sols forestiers du Calvados à l'horizon 2100 et une étude sur la prise en compte du changement climatique sur le massif forestier de Moussonvilliers

3.2.1 - Evaluation de la sécheresse des sols forestiers du Calvados

Cette première étude est un poster réalisé par des enseignants-chercheurs de l'université de Caen (laboratoire LETG : Patrick Le Gouée, Olivier Cantat et Abdelkrim Bensaid) et de Metz (laboratoire CEGUM-EA : Edwige Savouret) en 2010. Cette étude consiste à évaluer et cartographier la sécheresse des sols forestiers du Calvados en appliquant une méthodologie en trois points :

- La connaissance des sols pour permettre d'estimer le stress hydrique, dans ce cas-là à partir d'analyses en laboratoire et de « la cartographie des réserves utiles élaborée à partir de 250 sondages ». (Le Gouée et al, 2010),
- Evaluer et cartographier la sécheresse des sols forestiers par un calcul de bilan hydrique appliqué à chaque station rencontrée et par une spatialisation du climat, du relief et du sol pour permettre in fine une spatialisation de la sécheresse des sols forestiers,
- Evolution de la sécheresse des sols forestiers à l'horizon 2100 en appliquant le scénario climatique du GIEC.

Cette étude montre que les résultats obtenus sur les sols forestiers du Calvados sont très préoccupants. A l'horizon 2100 c'est « 62 % des forêts qui seraient affectées par un manque d'eau très prononcé ». (Le Gouée et al, 2010). Alors qu'en 2010 « la sécheresse des sols forestiers d'intensité faible à modérée concerne 95 % des massifs du Calvados ». (Le Gouée et al, 2010).

Cette étude a permis de bien visualiser les grandes étapes de la recherche : analyse des sols, évaluation et cartographie de la sécheresse des sols forestiers et mise en perspective de l'évolution de la sécheresse dans le futur. La recherche ne reprend en aucun cas à l'identique l'étude présentée car le terrain d'étude n'est pas le même (forêt d'Ecouves dans l'Orne) et l'étude réalisée ne rentre pas en détails dans la dimension « forêt » qui est l'une des grandes étapes pour celle-ci.

3.2.2 - Etude du réchauffement climatique sur le massif de Moussonvilliers

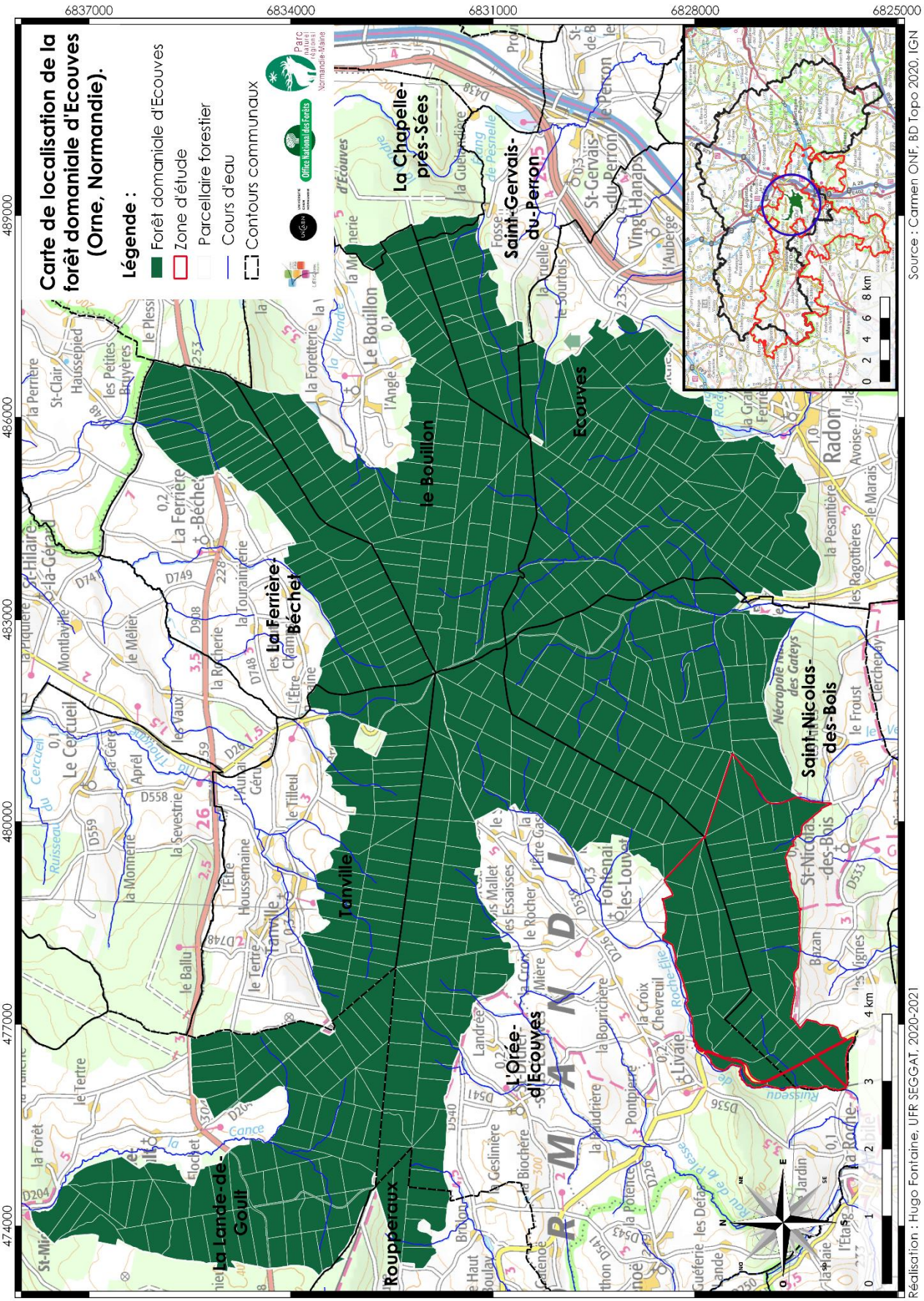
Cette seconde étude est un mémoire de stage réalisé par Lydia Delangle durant l'année universitaire 2010/2011. Cette étude a consisté à prendre en compte le réchauffement climatique sur le massif forestier de Moussonvilliers situé dans le sud de l'Orne.
L'axe principal de ce mémoire a été d'observer les impacts du réchauffement climatique sur le chêne pédonculé. Il a été démontré après l'analyse des sols, la cartographie de l'adaptation du chêne pédonculé sur les stations du massif et de l'étude de fosses pédologiques que « le chêne pédonculé n'est pas adapté aux stations présentes sur le massif » (Delangle, 2011). En effet, le massif forestier présente pour la majeure partie de sa surface des stations hêtraies-chênaies acidiphiles atlantiques à houx qui sont des stations acides avec une réserve en eau limitée.

Outre le fait que le chêne pédonculé ne soit pas en stations sur ce massif forestier, la lecture de ce mémoire de stage a servi à élaborer la méthodologie de la fiche type de relevé de terrain qui sera utilisée sur le terrain (*cf. 4.2.3 - La fiche de diagnostic stationnel*).

3.2.3 - Discussions

Sur la région Normandie, 2 études ont été réalisées jusqu'à aujourd'hui sur des territoires différents : le Calvados et le massif forestier de Moussonvilliers. Les études convergent en certains points avec la recherche qui va être exécutée sur la forêt d'Ecouves.
Le plus de la recherche et la dimension « forêt » que l'étude sur le Calvados n'a pas et celle du massif forestier a mais uniquement pour le chêne pédonculé. De plus, la recherche va être réalisée sur la forêt domaniale d'Ecouves, un terrain d'étude qui ne connait pas encore d'étude sur le changement climatique actuellement. L'intérêt est donc d'amener des réponses, des analyses là où il n'y en a pas encore.

Figure 2 : *Carte de localisation de la forêt domaniale d'Ecouves et de la zone d'étude. (IGN, BD Topo, Carmen ONF).*



DEUXIEME PARTIE : CONTEXTUALISATION

1 - Localisation du terrain d'étude

1.1 - Renseignements généraux

La forêt domaniale d'Ecouves (Figure 2) est située en Normandie, ancienne Basse-Normandie, dans le sud du département de l'Orne au sein du Parc Naturel Régional Normandie-Maine. Elle se situe à proximité des départements de la Sarthe et de la Mayenne situés en région Pays de Loire et au nord-ouest de la ville d'Alençon (12 km). La forêt est facilement localisable sur une carte car elle est considérée comme l'un des points les plus haut de la région Normandie, à plus de 400 m d'altitude. Cette forêt, d'une superficie totale de 8 177 ha est composée de 8 161 ha de forêt et 16 ha de terrains bâtis remis en dotation à l'ONF (maisons forestières). La forêt est répartie sur 10 territoires communaux :

- Ecouves : 1 347,6 ha
- Saint-Nicolas-des-Bois : 1 512,2 ha
- L'Orée-d'Ecouves : 1 489,8 ha
- Roupperoux : 105,2 ha
- La Lande-de-Goult : 1 134,2 ha

Tanville : 583 ha
La Ferrière-Béchet : 626,2 ha
Le Bouillon : 1 091,8 ha
La Chapelle-près-Sées : 35,8 ha
Saint-Gervais-du-Perron : 251,2 ha

Le parcellaire forestier (en gris clair Figure 2) est divisé en 579 parcelles pour 8 161 ha, soit une moyenne par parcelle de 14 ha.

1.2 - L'Office National des Forêts

La forêt domaniale d'Ecouves est gérée par l'Office National des Forêts (ONF) qui est un établissement public français chargé de la gestion des forêts publiques, c'est-à-dire les forêts domaniales et communales. Il est sous la direction de l'Etat.
L'ONF est un établissement national à caractère industriel et commercial dont les statuts sont définis dans le Code Forestier. Il est sous la double tutelle du Ministre de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt ainsi que du Ministre de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

Aujourd'hui, l'ONF gère 25 % de la forêt française, contre 75 % de forêts privées en France, soit un total de 11 millions d'hectares avec 4,9 millions en métropole et 6,1 millions en Outre-Mer. L'Office National des Forêts assure également 3 grandes missions :

- La production et la mobilisation des bois,
- L'accueil du public dans les forêts de l'Etat,
- La protection du territoire tant par la gestion durable des forêts que par la préservation ou le maintien de la biodiversité (Natura 2000) et de l'environnement.

Pour cette recherche, l'ONF sera l'un des partenaires car elle est effectuée sur une forêt qui leur appartient : la forêt domaniale d'Ecouves. Ils m'ont permis de circuler librement sur la forêt, m'ont aidé avec leur savoir-faire et m'ont permis de récupérer tout un ensemble de données sur la forêt (peuplements, essences et stations forestières).

1.3 - La zone d'étude

La recherche sur la forêt domaniale d'Ecouves ne va pas se réaliser sur la totalité des 8 161 ha car cela serait trop long. Il a été décidé, de travailler sur un site d'expérimentation d'une surface de 773 ha. Il se situe au sud-ouest de la forêt d'Ecouves (Figure 2) sur deux communes à savoir l'Orée-d'Ecouves et Saint-Nicolas-des-Bois.

2 - Contexte social

Le mémoire de recherche va être essentiellement centré sur le côté environnement/forêt. Mais il est important aussi de consacrer un peu d'attention au contexte social car il permet de mieux comprendre la zone d'étude.

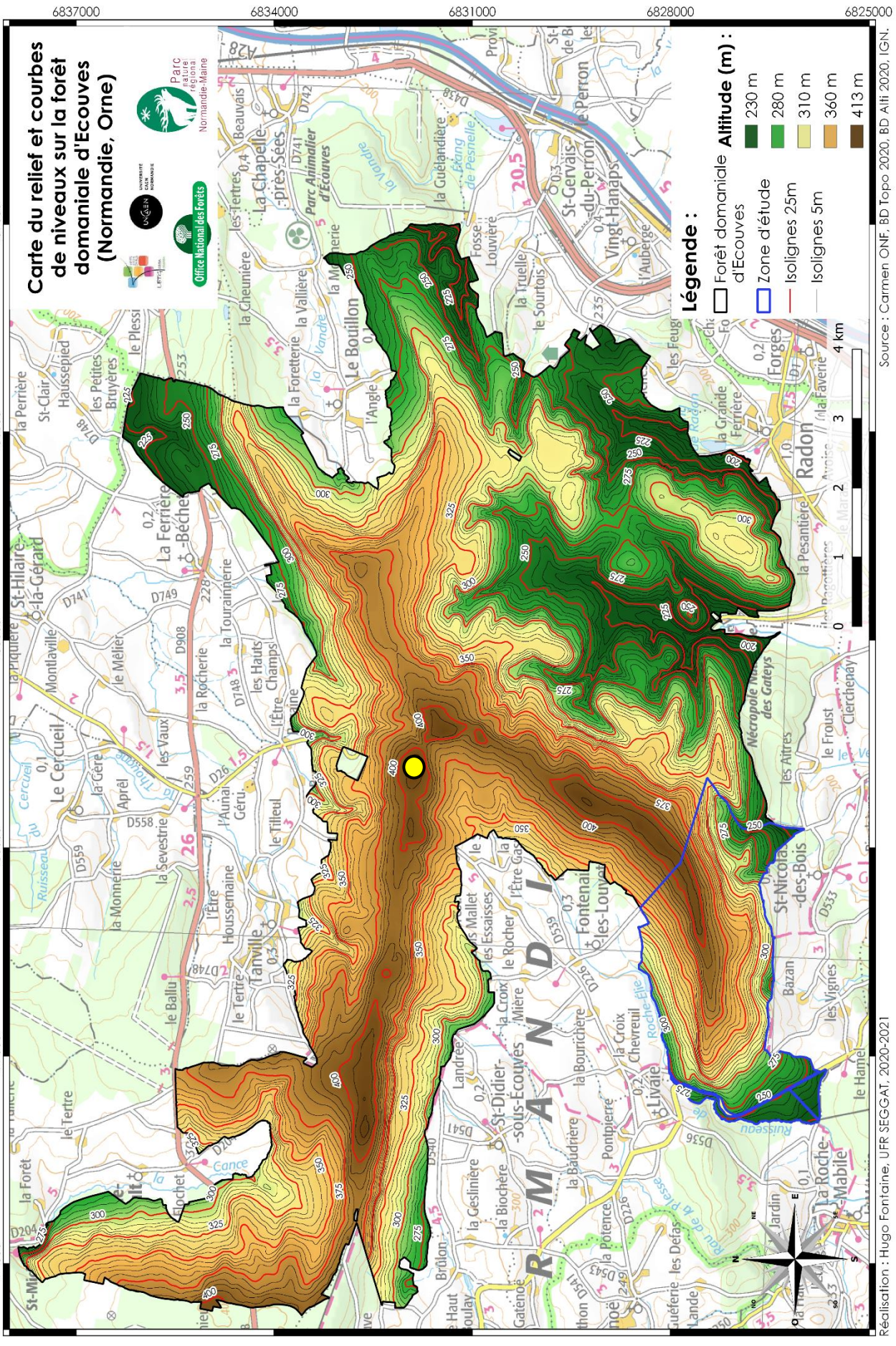
Figure 3 : *Récapitulatif des données démographiques par commune. (Insee Recensement population 2017).*

Commune	*Population*	*Superficie (km²)*	*Densité (hab/km²)*
Ecouves	1 703	31,3	54,3
Tanville	228	13,3	17,2
Roupperoux	188	9,8	19,2
Le Bouillon	171	17,9	9,5
La Chapelle-près-Sées	449	9,9	45,5
L'Orée-d'Ecouves	737	40,2	18,4
La Lande-de-Goult	192	28,6	6,7
La Ferrière-Béchet	242	13,8	17,5
Saint-Gervais-du-Perron	372	11,4	32,7
Saint-Nicolas-des-Bois	285	25,4	11,2
Total	**4 567**	**201,6**	**22,7**

La forêt domaniale d'Ecouves est répartie sur 10 territoires communaux. Ce sont des communes rurales de l'Orne profonde regroupant en 2017, 4 567 habitants sur une superficie de 201,6 km². La densité moyenne est de 22,7 hab/km², moitié moins que celle de l'Orne qui est à 46 hab/km² en 2017. Cela témoigne de cette campagne rurale (Figure 3).
Seule la commune d'Ecouves ne se présente pas comme étant une commune rurale de l'Orne car la densité est supérieure à la moyenne départementale avec 54,3 hab/km². Cela s'explique en partie par la proximité avec la commune d'Alençon, ville attractive, et du regroupement de trois communes (Radon, Forges et Vingt-Hanaps) en 2016.

A l'instar de la commune d'Ecouves, les 9 autres communes n'échappent pas au vieillissement de sa population où en 20 ans l'âge médian des habitants a augmenté de 8 ans passant de 37 à 45 ans. Les résidents âgés de plus de 45 ans représentent 50 % sur chacune des 10 communes. La tendance montre que les jeunes préfèrent fuir les campagnes pour aller en ville pour pouvoir étudier et/ou travailler.

Figure 4 : *Carte des reliefs sur la forêt domaniale d'Ecouves. (IGN, Carmen ONF, BD Alti).*



3 - Une forêt marquée par le relief

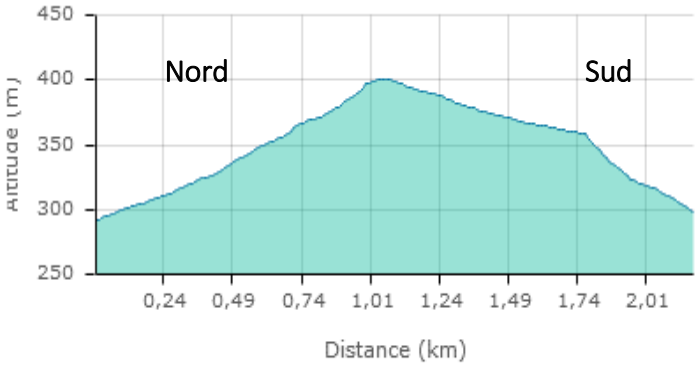
La forêt domaniale d'Ecouves est située dans la région naturelle des hautes collines de Normandie, une région vallonnée de bocage. Elle « coiffe les derniers contreforts orientaux du Massif armoricain, à la limite du Bassin parisien ». (Blanchard et al, 2020). La Figure 4 montre cela par la présence de reliefs marqués sur l'ensemble de la forêt avec des altitudes allant de 197 m à 414 m. 414 m d'altitude étant le point le plus haut de la forêt correspondant au « signal d'Ecouves » (rond jaune sur la Figure 4).

Le « signal d'Ecouves » « domine de près de 200 m les bocages et campagnes qui l'entourent : plaines d'Alençon, de Sées et d'Argentan ». (ONF,2004). Ces hauteurs sont formées par des lignes de crêtes, arrondies ou abruptes, dépassant très souvent les 400 m d'altitude (couleur marron Figure 4). De part et d'autre de ces lignes de crêtes, les bocages et campagnes apparaissent comme c'est le cas à l'est et au sud-est de la forêt où l'altitude diminue de moitié ; on passe de 400 m à 200-225 m d'altitude.

La forêt domaniale d'Ecouves s'étend sur près de 16 km d'est en ouest et 10 km du nord au sud avec une composition des lignes de crêtes en X. La Figure 4 montre bien cela avec des lignes de crêtes aux quatre points cardinaux se rejoignant tous au « signal d'Ecouves ». Les fortes pentes, que l'on peut observer par les isolignes de 5 m rapprochées, se terminent à leur base par de vastes glacis[1]. La partie sud-est de la forêt se présente avec des reliefs moins prononcés engendré par le cours d'eau « la Briante » et ses affluents.

La zone d'étude (contour bleu Figure 4) présente également un relief escarpé allant de 225 m à 400 m d'altitude. Le profil altimétrique du nord au sud du terrain d'étude (Figure 5) montre bien ce relief marqué avec une pente moyenne à 11 % et une dénivelé de 100 m pour 1 km. La pente est moins prononcée et de manière constante sur le versant nord alors que sur le versant sud on peut remarquer des ruptures de pentes où là elle peut monter jusqu'à 20 %.

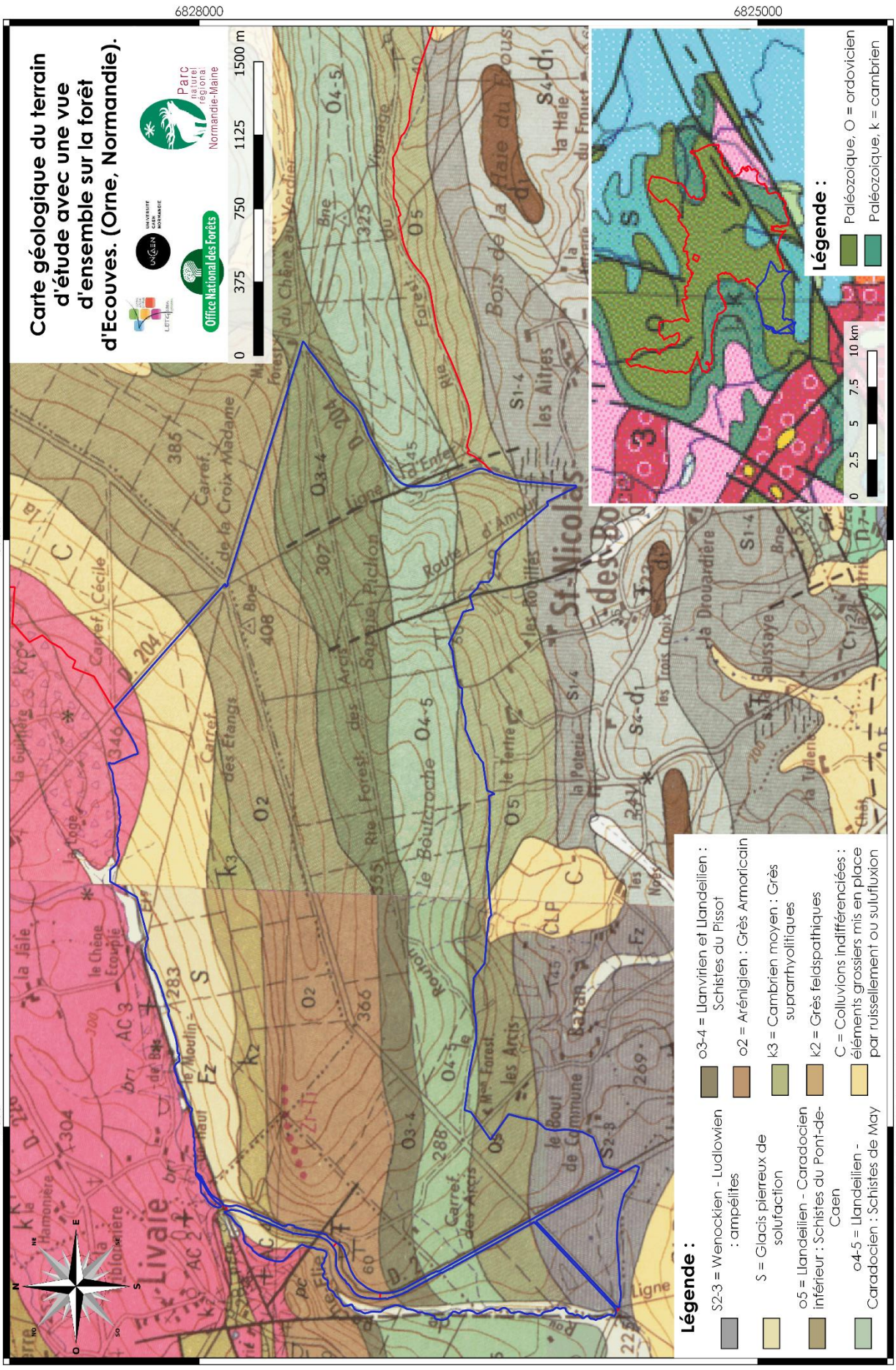
Figure 5 : *Profil altimétrique de la zone d'étude du nord au sud. (Géoportail).*



Ce terrain est très intéressant pour la recherche car il offre dans un premier temps un relief prononcé avec une ligne de crête, des versants (nord, sud) ainsi que des zones de glacis. Cela permet d'avoir des expositions variées du soleil ce qui joue sur la diversité des essences et stations forestières mais également sur le climat.

[1] ***Glacis :*** *Surface de terrain inclinée (pente douce) que l'on rencontre essentiellement en bas de versant.*

Figure 6 : *Carte géologique du terrain d'étude avec vue d'ensemble sur la forêt. (InfoTerre BRGM, Carmen ONF).*



4 - Géologie de la forêt d'Ecouves

La forêt domaniale d'Ecouves recouvre des terrains précambriens et de l'ère primaire aussi appelé Paléozoïque appartenant au Massif armoricain. La vue d'ensemble sur la forêt (Figure 6) permet de constater cet effet-là avec la présence deux formations : l'Ordovicien et le Cambrien, deux couches géologiques du Paléozoïque.
L'Ordovicien correspond au second système du Paléozoïque allant de -485 à -443 millions d'années, présent en majorité sur la forêt. Tandis que le Cambrien, -541 à -485 millions d'années, est très peu présent uniquement aux extrêmes est et ouest de la forêt d'Ecouves.

En allant plus en détails, la zone d'étude est caractérisée par une succession de couches de grès durs et de schistes, principalement issues de l'Ordovicien. Ici serra présenté les différents substrats du versant sud (Figure 6):

- Le grès armoricain (o2) est la première formation de l'Ordovicien sur la zone d'étude et constitue l'armature des lignes crêtes autour desquelles s'articule la forêt d'Ecouves,
- Les schistes du Pissot (o3-4) ceinturent les zones de crêtes formant de vastes replats à pentes douces. C'est ce que l'on peut observer sur le profil altimétrique (Figure) en versant sud avec une zone de replat avant une grosse rupture de pente,
- Les grès de May (o4-5) entourent à nouveau les deux premières formations supérieures. Ils aident les grès armoricains dans la structure géologique en contenant les produits d'altération des schistes,
- Les schistes du Pont de Caen (o5) viennent ceinturer les grès de May correspondant à la dernière couche ordovicienne présente sur ce côté du versant.

Le versant nord est quant à lui composé de formations issus du Cambrien avec des grès feldspathiques (k2) issus principalement de solifluxion et des grès supra-rhyolitiques (k3). Au pied de ce versant on retrouve des formations de glacis pierreux de solifluxion superficielles du quaternaire (S). Elles se composent de blocs de grès enrobés, entourés de matière argilo-sableuse jaune.

Ces différentes formations offrent des terrains déterminants quant à leur influence sur les formes avec des successions de grès et schistes influant eux-mêmes sur les facteurs stationnels, la topographie et les expositions du soleil. Cette diversité se fait ressentir sur la pédologie de la zone d'étude où 8 des 9 stations forestières de la forêt d'Ecouves sont présentes sur la zone d'étude. (*cf. 6.4 - Contexte édaphique – pédologique de la forêt d'Ecouves).*
Les substrats vont jouer également un rôle au moment de la phase de terrain ; On est en présence de formations pierreuses et les prospections à la tarière à main ne seront sans doute difficiles sur plusieurs mètres. Des fosses pédologiques pourraient être envisagées pour permettre de bien étudier le sol et les différentes formations.

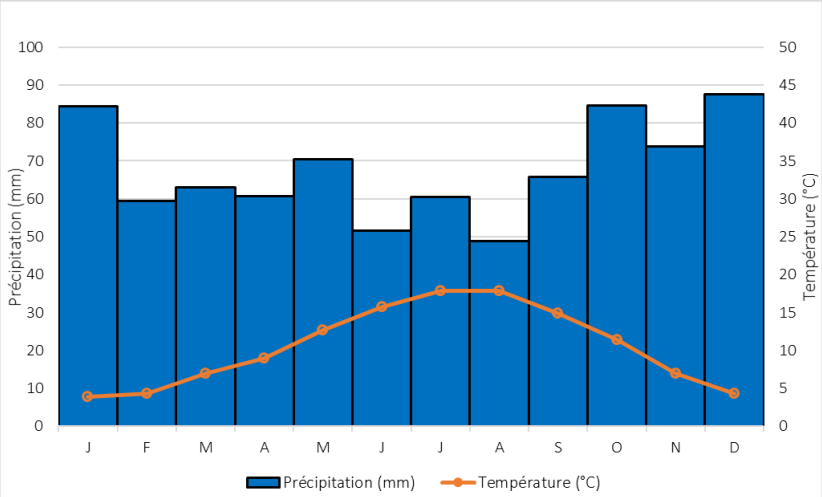


Figure 7 : *Diagramme ombrothermique de Gaussen de la commune de Sées selon les moyennes de 1981 à 2010. (Météociel).*

Figure 8 : *Mise en perspective du massif d'Ecouves. (IGN, Carmen ONF, GéoNormandie).*

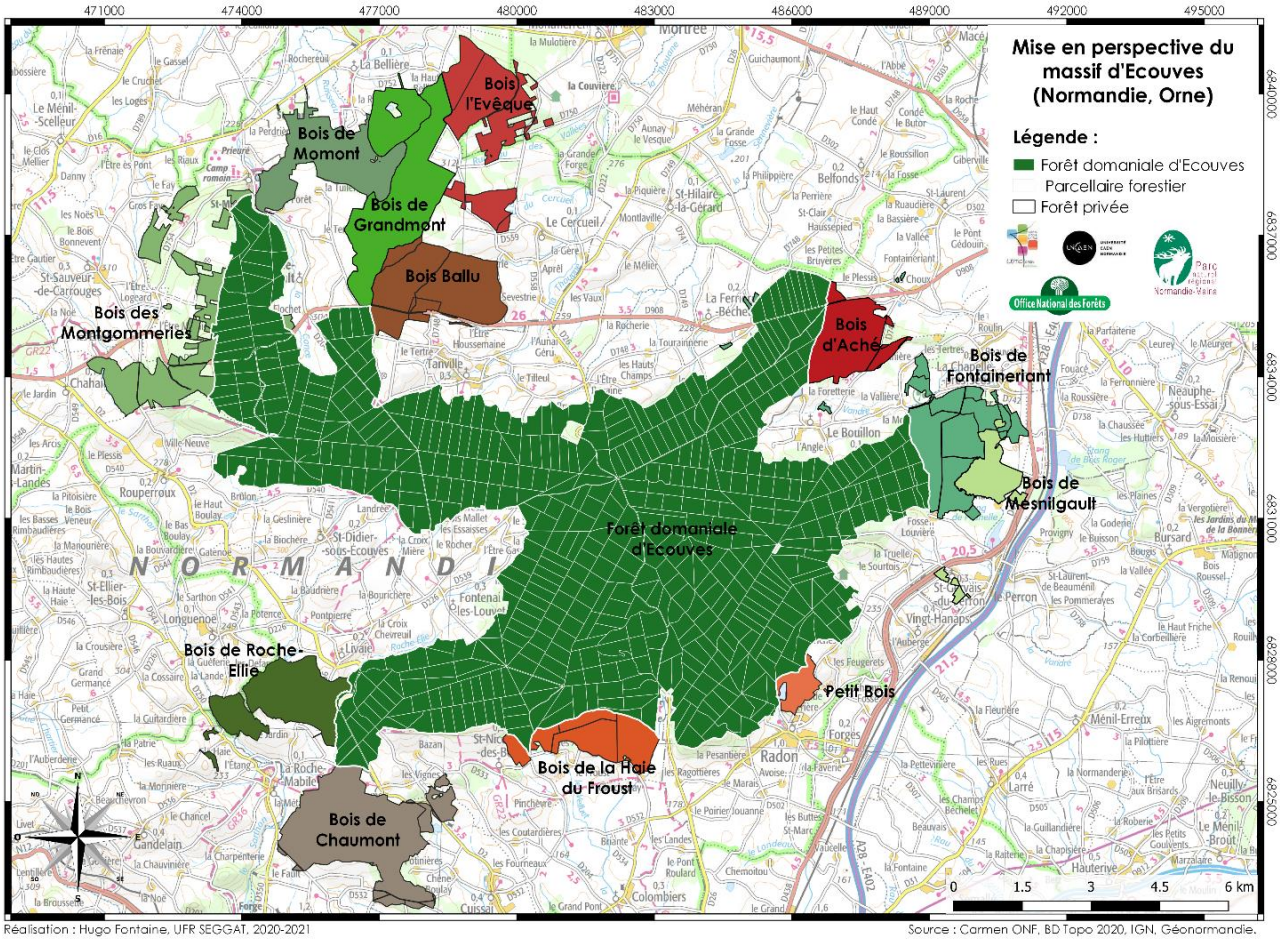


Figure 9 : *Récapitulatif des bois privés sur le massif forestier d'Ecouves. (GéoNormandie).*

Nom	*Surface (ha)*	*Nom*	*Surface (ha)*
Bois de Montgommeries	381,4	Bois de Fontaineriant	248,6
Bois de Roche-Ellie	319,6	Bois d'Aché	395,2
Bois de Chaumont	592,6	Bois Ballu	413
Bois de la Haie-du-Froust	227,9	Bois de Grandmont	548
Petit Bois	60,7	Bois l'Evêque	370,8
Bois de Mesnilgault	138,8	Bois de Momont	345,4

5 - Un climat favorable à la végétation forestière

« Les stations climatologiques de référence sont celles de Carrouges (altitude 325 m) et de Radon (altitude 165 m) » (ONF, 2004). N'ayant pas trouvé de données pour ces deux communes sur le site de « Météociel », c'est la station de Sées non loin de la forêt d'Ecouves (12 km) qui a été choisie et ressemblant fortement aux données de Radon.

Le climat de la forêt d'Ecouves est une climat océanique frais avec des précipitations moyennes à 810 mm. Le minimum est pour le mois août (48,8 mm) tandis que le maximum et pour le mois de décembre (87,5 mm), (Figure 7). En fonction du relief les précipitations peuvent varier et permettent alors au climat de la forêt d'être considéré comme favorable à la végétation forestière. L'humidité atmosphérique est très importante et les brouillards sont fréquents d'octobre à mars.

La température moyenne annuelle est de 10,5 °C avec un minimum en janvier (3,9 °C) et un maximum en juillet-août (18 °C). L'amplitude thermique est faible mais il existe tout de même une dissymétrie climatique liée à la forme de la forêt.
Les zones de crêtes et les versants tournés vers le nord représentent des pôles nettement plus froids avec une neige qui descend plus bas et qui reste plus longtemps. Tandis que les versants sud « bénéficient des influences adoucissantes des flux de secteurs ouest et sud-ouest » (ONF, 2004). A noter également que les gelées tardives sont très fréquentes en mai localisées souvent dans le fond des vallées.

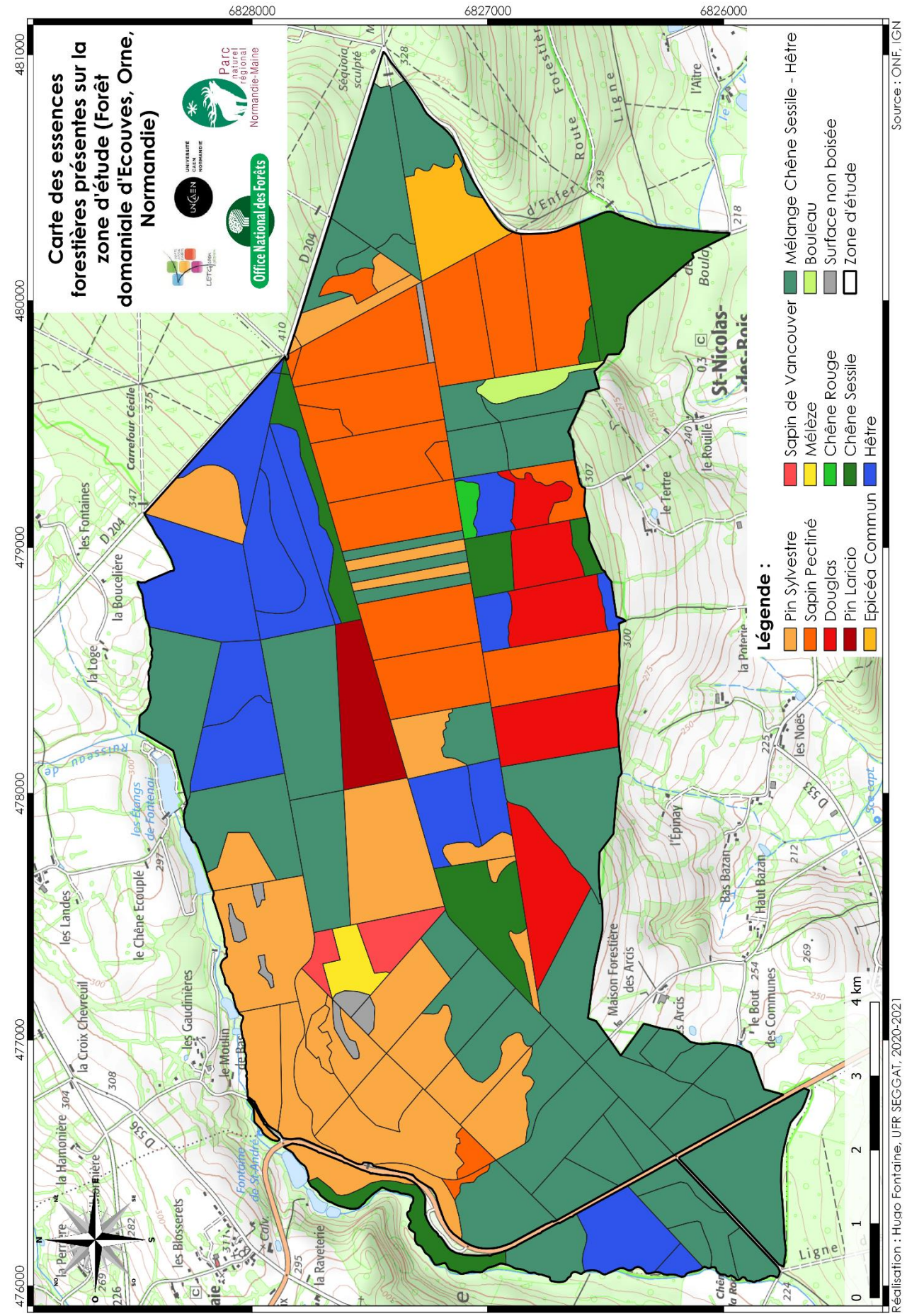
6 - Approche forestière de la forêt d'Ecouves et de la zone d'étude

6.1 - Mise en perspective du massif forestier

La forêt domaniale d'Ecouves, qui était au XIII^{ème} une forêt royale, se retrouve encerclée dans un massif forestier de plus 12 000 ha, le plus grand de Basse-Normandie. Cette morphologie se répercute sur la carte (Figure 8) avec au centre la forêt domaniale d'Ecouves et aux alentours la plupart des bois privés du massif d'Ecouves.
Ce massif est composé de 8 161 ha de forêt publique et de plus de 4 000 ha de bois privés. Le bois de Chaumont figure parmi ces bois, connu notamment pour la butte Chaumont. La Figure 8 montre que le massif forestier a tendance à s'étendre au nord-ouest de la forêt domaniale d'Ecouves avec une concentration importante de bois privés.

La Figure 9 recense l'ensemble des surfaces des bois privés du massif forestier. On comptabilise 4 042 ha de surface forestière privée. On peut apercevoir que ce ne sont pas des petits bois enclavés, d'une dizaine d'hectares, comme on a l'habitude de voir en forêt privé avec de petits propriétaires mais plutôt de grande étendue comme le bois de Chaumont (592,6 ha).
Malgré cela, la carte présente une petite limite. La couche trouvée pour les bois privés dans l'Orne ne les recense pas tous mais juste ceux qui sont soumis à un régime sylvicole. Cela veut dire que tous les petits bois, moins de 25 ha, ne figurent pas dans cette couche car ils n'ont pas forcément besoin d'être soumis à un régime de gestion.

Figure 10 : *Répartition des essences forestières sur la zone d'étude. (ONF, IGN).*



6.2 - Répartition des essences sur la zone d'étude

La Figure 10 représente la répartition actuelle des essences forestières sur la zone d'étude. Cette carte est issue de l'aménagement forestier de la forêt domaniale d'Ecouves en 2003. Suite à la phase de terrain et à l'observation des peuplements, la répartition des essences s'est révélée identique d'où le choix de reprendre la carte initiale sans faire de modifications.

D'une surface totale de 773 ha, la zone d'étude est composée de 358,5 ha de résineux (douglas, pin sylvestre, sapin pectiné) soit 46,4 % de la surface totale contre 410,1 ha de feuillus (chêne sessile, hêtre) soit 53 %. Seulement 4,4 ha ne sont pas concernés par une occupation d'essences forestières soit 0,6 % de la surface (Figure 11). Une légère domination des feuillus se fait ressentir sur la zone d'étude en raison de la nouvelle gestion mise en place dont l'intention est de réduire l'occupation des résineux par les feuillus. (*cf. 6.5 - Gestion antérieure de la forêt domaniale d'Ecouves*).

Figure 11 : *Proportion des essences présentes sur la zone d'étude. (Hugo Fontaine).*

Essence	*Surface (ha)*	*Proportion (%)*	*Essence*	*Surface (ha)*	*Proportion (%)*
Pin Sylvestre	143,4	18,5	Chêne Sessile – Hêtre	260,1	33,5
Sapin Pectiné	132,6	17,2	Hêtre	96	12,4
Douglas	44,7	5,8	Chêne Sessile	49,1	6,4
Pin Laricio	13	1,7	Bouleau	3,2	0,4
Epicéa Commun	12,4	1,6	Chêne Rouge	1,5	0,2
Sapin de Vancouver	8,2	1,1	Pas de sylviculture	4,4	0,6
Mélèze	4,4	0,6	**Total**	**773**	**100**

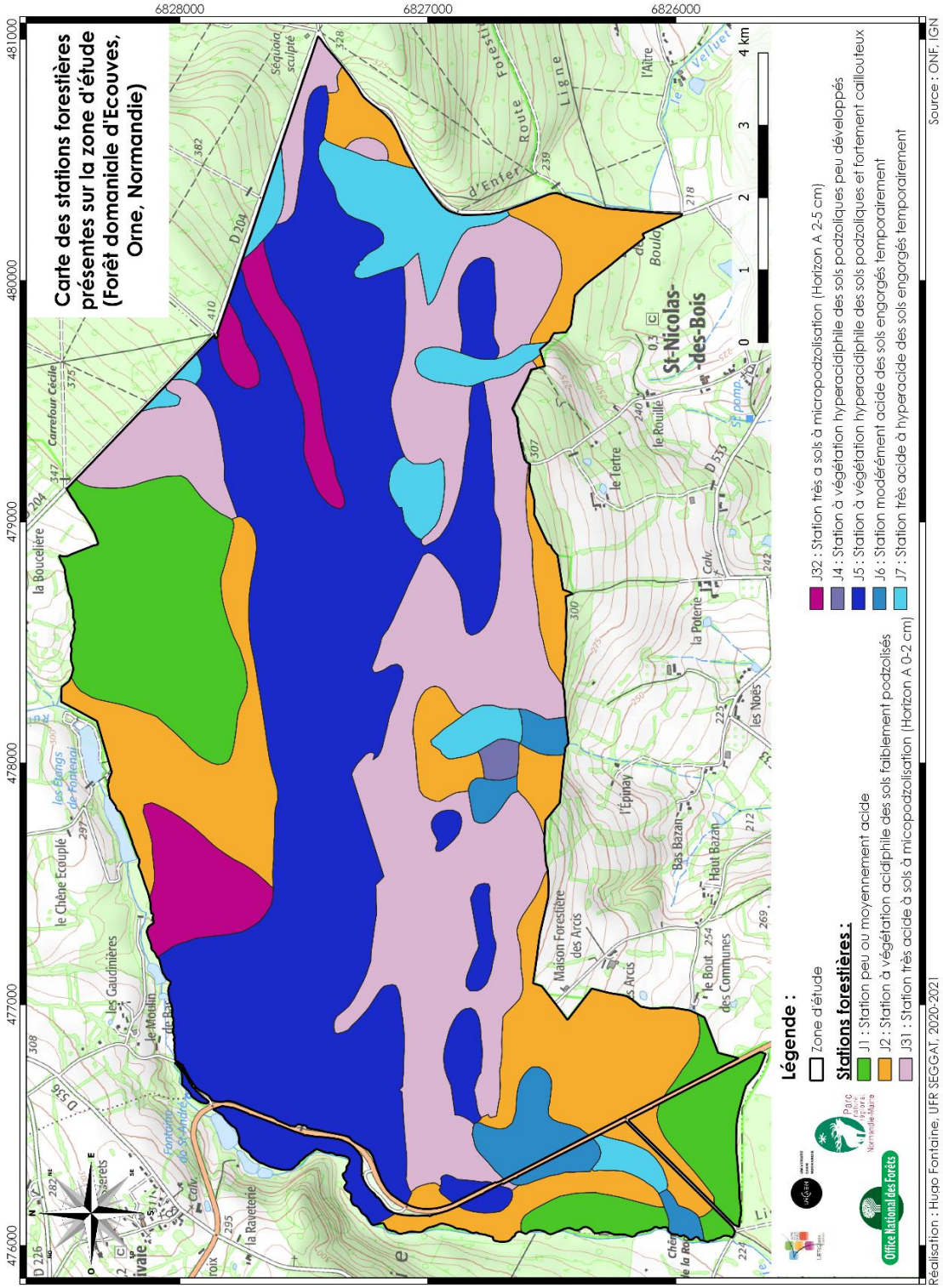
Le terrain d'étude est principalement composé en résineux de pin sylvestre (143,4 ha) et de sapin pectiné (132,6 ha) couvrant respectivement 18,5 % et 17,2 % de la surface totale (Figure 11). En feuillus c'est le mélange chêne sessile/hêtre qui domine en terme d'occupation du sol dont son étendue couvre 33,5 % de la surface (260,1 ha) suivi du hêtre avec 12,4 % (96 ha).
La répartition des essences (Figure 10) colle assez bien avec la répartition des stations forestières (*cf. 6.4 - Contexte édaphique – pédologique de la forêt d'Ecouves*). Là où il y a du résineux, les stations sont acides voir très acides et la podzolisation est marquée. A l'inverse, là où il y a la présence de feuillus les sols sont beaucoup moins acides avec une tendance neutre-riche.

A l'échelle de la forêt domaniale d'Ecouves (8 161 ha) on comptabilise 3 788 ha de feuillus soit 46 % de la surface totale et 3 924 ha de résineux soit 48 %. Les 449 ha restant correspondent à des vides boisables ou des zones non forestières.
Le sapin pectiné est l'essence résineuse la plus abondante sur la forêt avec une surface de 1 105 ha soit 14 % de la surface totale. On a ensuite le pin sylvestre avec 752 ha et le douglas avec 748 ha couvrant chacun 9 %. Pour les feuillus c'est le hêtre qui est majoritairement présent avec une occupation de 20 % de la forêt (1 661 ha) suivi du mélange chêne sessile/hêtre avec 19 % de la forêt d'Ecouves (1 584 ha). La carte des essences forestières à l'échelle de la forêt d'Ecouves est présente en **Annexe 1**.

Figure 12 : *Proportion des essences objectifs sur la zone d'étude. (Hugo Fontaine).*

Essence	*Surface (ha)*	*Proportion (%)*	*Essence*	*Surface (ha)*	*Proportion (%)*
Pin Sylvestre	141,2	18,3	Hêtre	233,6	30,1
Sapin Pectiné	134,8	17,4	Chêne Sessile	180,7	23,4
Douglas	44,7	5,8	Bouleau	3,2	0,4
Pin Laricio	13	1,7	Chêne Rouge	1,5	0,2
Epicéa Commun	12,4	1,6	Pas de sylviculture	3,5	0,5
Mélèze	4,4	0,6	**Total**	**773**	**100**

Figure 13 : *Carte des stations forestières du terrain d'étude. (ONF, IGN).*



6.3 - Essences objectifs à long terme sur la zone d'étude

Les essences objectifs sont les essences à favoriser sur le long terme dans un peuplement pour répondre aux objectifs fixés dans les documents de gestion durable. La carte des essences objectifs est représentée en Annexe 2.

La Figure 12 met en évidence des évolutions par rapport à la Figure 11 représentant la proportion des essences actuellement en place. Chez les résineux les peuplements de sapin de Vancouver seront remplacés par du pin sylvestre (Annexe 2). De plus les surfaces de pin sylvestre et de sapin pectiné vont subir des modifications : le pin sylvestre connaitra une baisse de 1,5 % d'occupation du sol tandis que le sapin pectiné une augmentation de 1,7 %. Néanmoins ces variations restent très faibles et ne changent pas les objectifs fixés sur ces deux essences.

Les plus grandes variations ont lieu chez les feuillus avec notamment la disparition des peuplements mélangés de chêne sessile/hêtre qui représentent actuellement la plus grande occupation sur la zone d'étude (Figure 11). Les stations, le climat, la topographie jouent des rôles importants quant au choix de l'essence objectif. La carte des essences objectifs (Annexe 2) montre que c'est le hêtre qui sera prioritairement préservé avec une emprise qui explosera à 233,6 ha soit 30,1 % de la surface totale. Le hêtre sera présent sur l'ensemble de la zone d'étude bien qu'il subisse depuis 2-3 ans des sécheresses répétées et sévères. Cela peut le mettre en limite de station notamment à cause de la forte pierrosité provoquant de faibles réserves en eau.
Quant au chêne sessile son emprise sera moins importante mais tout de même marquée au sud-ouest. Toutefois, son occupation augmentera par rapport à la répartition actuelle puisque le chêne sessile couvrira 180,7 ha du terrain d'étude (23,4 %).

La Figure 12 et l'Annexe 2 montrent bien la nouvelle volonté en terme de gestion forestière que les techniciens veulent imposer sur la forêt d'Ecouves avec une occupation grandissante des feuillus.

6.4 - Contexte édaphique – pédologique de la forêt d'Ecouves

La Figure 13 représente la carte des stations forestières du terrain d'étude issue de l'aménagement forestier de 2003. Cette carte a été réalisée selon la typologie que JABIOL a élaboré en 1985 : « *Les stations forestières en forêt domaniale d'Ecouves (Orne)* ». La nouvelle carte des stations est l'un des axes de recherche de cette étude et sera présentée dans la suite de ce mémoire (*cf. 4.7 - Représentation cartographie de la carte des stations*).

La carte des stations forestières présente 8 stations allant de J1 correspondant à des stations peu ou moyennement acides à J7 se référant à des sols très acides à hyperacides dont l'engorgement est temporaire. Sur l'ensemble de la forêt on recense 9 stations avec la station J8 en plus correspondant à des sols dont l'engorgement est permanent dès la surface. La carte des stations forestières à l'échelle de la forêt d'Ecouves se trouve en Annexe 3.

Figure 14 : *Proportion des stations forestières sur la zone d'étude. (Hugo Fontaine).*

Station	*Surface (ha)*	*Proportion (%)*	*Essence*	*Surface (ha)*	*Proportion (%)*
J1	87,9	11,4	J5	273,4	35,4
J2	132,7	17,2	J6	19,6	2,5
J31	179,5	23,2	J7	42,9	5,6
J32	33,7	4,4	J8	0	0
J4	3,3	0,4	**Total**	**773**	**100**

La Figure 14 représente l'emprise des stations répertoriées sur la zone d'étude. Sur l'ensemble des 9 stations, 3 stations sont dominantes sur la zone d'étude :

- La station J2 (132,7 ha) couvrant 17,2 % de la surface dont l'emprise est au nord et sud-ouest de la zone d'étude (Figure 13),
- La station J31 (179,5 ha) couvrant 23,2 % de la surface dont l'emprise est sur toute la partie sud du terrain d'étude (Figure 13),
- La station J5 (273,4 ha) couvrant 35,4 % de la surface totale dont l'emprise va du nord-ouest au sud-est de la zone d'étude (Figure 13).

Comme il est évoqué auparavant (*cf. 6.2 - Répartition des essences sur la zone d'étude*), la répartition des essences dépend bien de l'emprise des stations forestières. Là où les stations sont moins acides (J1, J2 et J6) on observe la présence d'essences feuillus avec le chêne et le hêtre (Figure 10). Par contre là où les stations sont acides (J31, J32, J5 et J7), ce sont les résineux qui dominent avec le pin sylvestre, le sapin pectiné et le pin laricio (Figure 10).

A l'échelle de la forêt domaniale d'Ecouves, ce sont les mêmes stations culminantes par rapport à la zone d'étude c'est-à-dire la station J2 avec une emprise de 1 613 ha, la station J31 avec 1 526 ha et la station J5 avec 1 778 ha.

6.5 - Gestion antérieure de la forêt domaniale d'Ecouves

6.5.1 - Généralités

« Les surexploitations du 18ème siècle et de la première partie du 19ème siècle », (ONF,2004), ont rendu la forêt domaniale d'Ecouves comme un espace de landes et de taillis peu développé inintéressant pour l'exploitation et la production de bois. Cela a alors fait prendre conscience que la forêt devait être mieux gérée d'où l'apparition des premiers aménagements au milieu du 19ème siècle, 1865 pour le premier.
A partir de cette date, les aménagements prévoyaient une conversion de la forêt d'Ecouves par voie naturelle ou artificielle en résineux. Au départ en pin sylvestre puis au moment de la révision d'aménagement en 1911 en sapin pectiné et épicéa commun.

En 1961, l'effort engagé sur la conversion de la forêt en résineux est poursuivi avec le sapin pectiné considéré comme l'essence majeure de la forêt. Mais la futaie régulière[1] de feuillus gagne du terrain au profit des résineux notamment avec le hêtre qui à cette époque est également considérée comme l'essence majeure de la forêt en feuillus. En conclusion de cet aménagement, qui aura duré jusqu'en 1983, les résineux sont devenus majoritaires en surface et la place des résineux exotiques à croissance rapide (douglas, pin laricio) a fortement augmenté. Une hausse non négligeable des feuillus est également à prendre en considération.

[1] ***Futaie régulière :*** *Peuplement où la majorité des arbres appartiennent à la même classe de diamètre.*

6.5.2 - L'aménagement passé : 1984-2003

La volonté d'attribuer une place importante aux résineux et notamment à ceux à croissance rapide est jugée non souhaitable dans cet aménagement pour des raisons d'incendie, de dégradation des sols et de risques phytosanitaires quand l'essence est en limite ou hors station.
Au cours de cet aménagement, une étude des stations a été réalisée et a permis d'estimer à 60 % l'emprise des feuillus sur la forêt dans le futur. Cette fois-ci c'est le chêne sessile qui est considéré comme l'essence principale de la forêt alors que le hêtre ne doit être conservé qu'en mélange. Mais le chêne sessile ne fournit du bois de qualité que sur les meilleures stations. Par conséquent, durant l'application de cet aménagement les objectifs fixés en 1984 ont été revus et là où le chêne sessile ne produit pas de qualité, le hêtre doit être favorisé.

6.5.3 - Etude de l'aménagement en cours d'application : 2004-2023

L'aménagement actuellement en place (2004-2023) répond à la multifonctionnalité de la forêt (écologie, économie et social) par la mise en place de trois séries[1] :

- Série 1 : Une série de production ligneuse sur 7 773 ha.

La majorité de la forêt a pour objectif principal la production ligneuse avec le hêtre sur la majorité de la surface, le sapin pectiné sur les stations intermédiaires, le pin sylvestre ou laricio sur les lignes de crêtes et le chêne sessile sur les meilleures stations.
Les peuplements sont principalement traités en futaie régulière (98 % de la surface) sauf pour les zones de fréquentations touristiques, les carrefours et les peuplements irrégularisés de sapin pectiné traités en futaie irrégulière[2] (2 % de la surface).
Compte tenu des objectifs émis lors de l'aménagement précédent, les essences à favoriser sur le long terme sont le hêtre (35 % de la surface), le sapin pectiné (21 %), le pin sylvestre (17 %) et le chêne sessile (15 %).

- Série 2 : Une série d'intérêt écologique sur 318 ha.

Dans les secteurs d'intérêts écologiques (tourbes, mares, landes), l'objectif sera de conserver ou de favoriser une flore et faune spécifique à chacun de ces milieux spécifiques. Il conviendra également de protéger ces espaces remarquables ce qui veut dire que l'aspect paysager, l'accueil du public et la production de bois sont secondaires. Ces milieux sont principalement traités en futaie irrégulière.

- Série 3 : Une réserve biologique intégrale sur 71 ha.

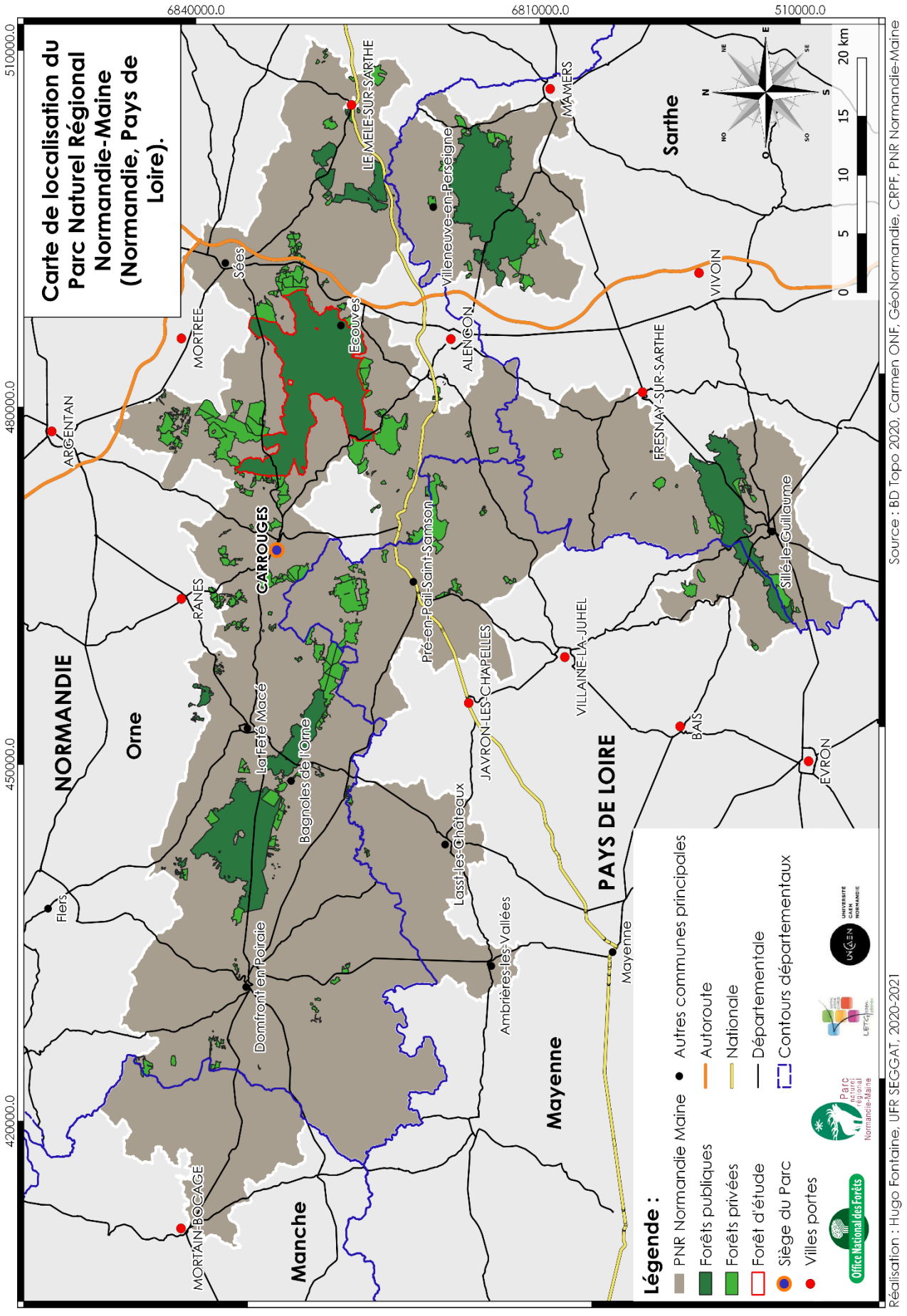
C'est un projet qui porte sur l'habitat « Chênaie-hêtraie atlantique acidiphile à houx » et fait l'objet d'une série d'intérêt écologique général où toutes les récoltes de bois sont abandonnées.

---

[1] ***Série :*** *Ensemble de parcelles pouvant être regroupées en une unité d'objectif qui peut correspondre à une unité de traitement sylvicole. Chaque série fait l'objet de prescriptions spécifiques dans le document d'aménagement forestier. (Bastien et Gauberville, 2011).*

[2] ***Futaie irrégulière :*** *Peuplement qui comporte des arbres de toutes les classes d'âges, du semis au gros bois, et de toutes les hauteurs.*

Figure 15 : *Carte de localisation du PNR Normandie-Maine. (Carmen ONF, PNR Normandie-Maine, GéoNormandie, IGN, BD Topo 2020).*



7 - Une forêt s'inscrivant au sein du PNR Normandie-Maine

7.1 - Renseignements généraux

Le Parc Naturel Régional Normandie-Maine (Figure 15) est situé sur 2 régions : la Normandie et les Pays de Loire. C'est un parc de grande envergure avec une surface totale de 257 000 ha pour 137 communes et 94 573 habitants. Le PNR Normandie-Maine est répartis sur 4 territoires départementaux avec la plus grande emprise sur le département de l'Orne :

- Le sud-ouest de la Manche : 14 661 ha pour 5 870 habitants sur 5 communes
- Le sud de l'Orne : 146 101 ha pour 57 680 habitants sur 85 communes
- Le nord de la Mayenne : 45 398 ha pour 14 556 habitants sur 21 communes
- Le nord de la Sarthe : 50 840 ha pour 16 467 habitants sur 26 communes

L'est du PNR Normandie-Maine est mieux desservi par les axes routiers avec l'autoroute A28 passant du nord au sud ainsi que la route nationale N12 d'est en ouest (Figure 15). Cette partie du parc est plus avantagé en terme d'infrastructures routières avec notamment la proximité de la ville d'Alençon, la préfecture du département de l'Orne.
Le territoire a également quelques communes importantes sur le territoire à commencer par Carrouges, le siège du PNR. Le choix de cette commune pour positionner le siège est qu'elle se situe au centre du parc entre l'ouest, l'est et le sud. Les communes de la Ferté-Macé, Domfront-en-Poiraie, Sillé-le-Guillaume, Sées ou encore Ecouves sont présentes au sein du PNR et ont un poids important pour le parc.
La proximité des villes d'Alençon à l'est, d'Argentan et de Flers au nord et de Villaine-la-Juhel au sud a un impact sur le PNR Normandie-Maine principalement dans le domaine du travail. De plus elles jouent le rôle de portes d'entrées dans le parc.

7.2 - Le Parc Naturel Régional Normandie-Maine

Selon le site des PNR de France, les Parcs Naturels Régionaux sont des syndicats mixtes ouverts créés en 1967 par le Général de Gaulle pour protéger et mettre en valeur de grands espaces ruraux habités. « Peut être classé « Parc naturel régional » un territoire à dominante rurale dont les paysages, les milieux naturels et le patrimoine culturel sont de grande qualité, mais dont l'équilibre est fragile ». (Site des PNR de France). Un parc s'organise alors autour « d'un projet concerté de développement durable, fondé sur la protection et la valorisation du patrimoine naturel et culturel ». (Site des PNR de France). Aujourd'hui il existe 56 PNR en France ce qui représente une surface totale de 9 millions d'hectares soit 16,5 % du territoire. On retrouve 37 % de forêts, 40 % de surfaces agricoles et 1,9 % de zones construites. On recense 4,4 millions d'habitants sur l'ensemble des parcs répartis sur 4 700 communes.

Le Parc Naturel Régional Normandie-Maine a été adopté par décret le 23 octobre 1975 est devenait alors le 14ème PNR de France. Son label Parc Naturel Régional a été renouvelé deux fois : en 1996 et en 2008. L'emblème du PNRNM est un cerf en raison des nombreuses zones boisées présentes sur le territoire qui représentent plus de 20 % du territoire du parc.

Chaque PNR est soumis à une charte qui fixe les objectifs à atteindre, les orientations de protection, de mise en valeur et de développement du territoire. La charte d'un parc est valide pour 15 ans. Celle du PNR Normandie-Maine est appliquée depuis 2008 et jusqu'en 2023 et elle est basée sur 3 axes :

- Favoriser la biodiversité en assurant l'équilibre des patrimoines naturels, culturels et socio-économiques du territoire,
- Responsabiliser, former et informer pour une gestion durable du territoire,
- Promouvoir les productions et les activités respectueuses du territoire.

Le PNR Normandie-Maine est devenu aujourd'hui un Géoparc Mondial de l'UNESCO car il présente un patrimoine géologique remarquable avec à l'ouest des paysages escarpés provoqués par la présence du Massif armoricain et à l'est le Bassin parisien.

Pour cette recherche, le PNR Normandie-Maine sera également l'un des partenaires. Ils m'ont permis de récupérer tout un ensemble de données sur le parc. De plus, l'objectif de leur nouvelle charte 2023-2038 est basée sur la résilience c'est-à-dire la capacité d'un territoire à s'adapter face aux changements climatiques brutaux. Le parc est alors très intéressé par des recherches scientifiques sur le changement climatique.

7.3 - Un PNR marqué par la forêt

Le PNR Normandie-Maine est un territoire marqué par la présence de forêts à la fois publique et privée représentant 20 % du territoire du parc soit 51 400 ha (Figure 15). On recense 23 731 ha de forêts publiques dont la forêt domaniale d'Ecouves (8 177 ha), d'Andaine (5 398 ha) et de Perseigne (5 100 ha). On remarque la très faible présence de forêts communales et départementales dans le parc avec seulement 242 ha.
En ce qui concerne les forêts privées, on dénombre 27 669 ha sur le territoire du PNR Normandie-Maine, une surface plus importante par rapport à la forêt publique. Cela est normal au vue de l'organisation de la forêt en France où le public domine à l'est tandis que le privé domine à l'ouest.

Une concentration massive des espaces boisés sur le territoire du parc est observable au nord, à l'est et au centre (Figure 15) avec notamment le massif forestier d'Ecouves (*cf. 6.1 - Mise en perspective du massif forestier*). Le sud est également boisé au niveau de Sillé-le-Guillaume mais apparait isolé par rapport au reste. L'ouest et le sud-ouest sont dépourvus de forêts/bois ainsi que le secteur situé entre Alençon et Fresnay-sur-Sarthe.
Pour une analyse sociale du territoire, se référer à l'annexe 4.

TROISIEME PARTIE : PRESENTATION GENERALE DU SUJET DE RECHERCHE

Le sujet de recherche est la prise en compte du changement climatique dans la gestion des milieux forestiers français avec pour problématique principale : Quelles sont les conséquences du changement climatique sur les essences présentes en forêts domaniale d'Ecouves et quelles solution peut-on apporter pour lutter contre celui-ci ou le contrer ?
Comme évoqué en introduction, le mémoire de recherche sera majoritairement focalisé sur l'élaboration d'une méthodologie sous forme de modèle à petite échelle pour répondre à l'objectif final qui d'observer l'adéquation des essences forestières avec le climat et la station. Cette méthodologie pourra ensuite être applicable à de nombreux massifs forestiers dont ceux présents au sein du Parc Naturel Régional Normandie-Maine.

Pour pouvoir répondre à cet objectif d'adéquations des essences forestières, la recherche s'organisera en 4 parties (Figure 16).

Figure 16 : *Organisation de la recherche pour répondre à l'objectif final. (Hugo Fontaine).*

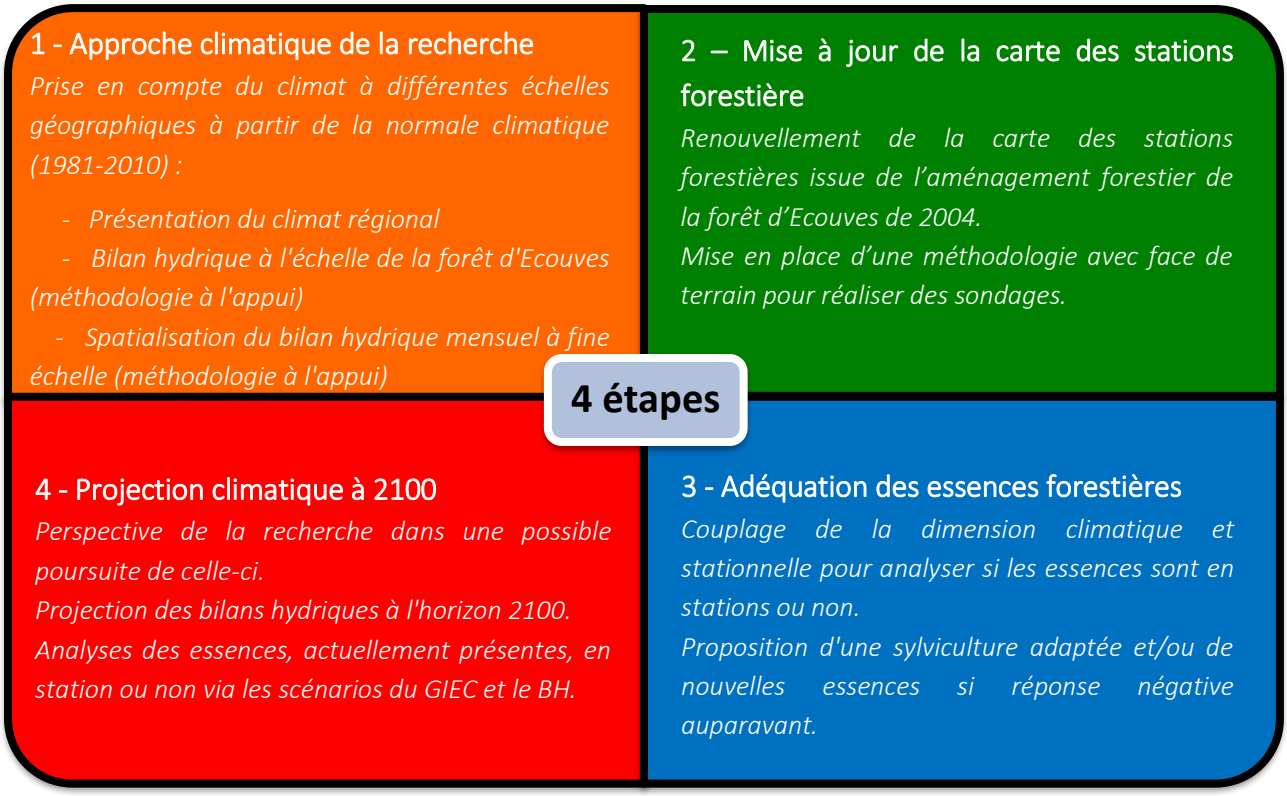


Figure 17 : *Tableau récapitulatif des précipitations moyennes sur la normale 1981-2010. (Hugo Fontaine).*

Mois	*Précipitations (mm)*	*Mois*	*Précipitations (mm)*	*Mois*	*Précipitations (mm)*
Janvier	98,6	Mai	76,4	Septembre	73,7
Février	72,4	Juin	57,5	Octobre	93,0
Mars	73,8	Juillet	65,4	Novembre	88,1
Avril	62,4	Août	50,9	Décembre	101,1
				Total	**913,3**

QUATRIEME PARTIE : ADEQUATION DES ESSENCES FORESTIERES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'objectif de cette recherche est d'observer sur l'ensemble de la zone d'étude l'adéquation des essences forestières face au changement climatique actuel. Cela passe par des observations sur les essences pour savoir si elles sont en station ou non, c'est-à-dire en bonne croissance en hauteur et en circonférence dans un objectif de production de bois. Pour observer si l'essence forestière est placée au bon endroit par rapport à la station, il est important de combiner 2 analyses : climatique et stationnelle. Une fois l'adéquation des essences forestières observée face au changement climatique, le gestionnaire pourra gérer durablement sa forêt en prenant en compte les possibles contraintes présentes chez certaines espèces.

1 - Particularités du climat régional sur la normale climatique

Cette première partie à pour intention de présenter les caractères climatiques à l'échelle régionale à partir de la normale climatique (1981-2010). Les caractères à présenter sont les précipitations, les températures et l'ETp, les trois variables amenant au calcul final du bilan hydrique. L'intérêt d'un tel travail est d'observer ces différents paramètres dans leurs dimensions saisonnières et les possibles variabilités inter-mensuelles et interannuelles qu'il peut y avoir sur la normale.

1.1 - Présentations des paramètres climatiques (P, T et Etp)

1.1.1 - L'offre pluviométrique

La Figure 17 récapitule les moyennes mensuelles faites sur l'ensemble de la normale climatique. L'offre pluviométrique spatialisée pour l'ensemble des années de la normale est à 913,3 mm. A l'année, ce sont des précipitations abondantes propices à la végétation forestière que ce soit les arbres, arbustes ou plantes.

Les précipitations obtenues, pour chaque mois, suivent les saisons avec en automne et en hiver une offre plus abondante et en été moins abondante. En automne-hiver, elles sont de l'ordre de 90 mm avec un maximum pour le mois de décembre à 101,1 mm tandis qu'en été elles tombent à 57 mm avec un minimum pour le mois d'août à 50,9 mm.

Le printemps apparait comme une saison où les précipitations sont également abondantes avec une moyenne de 70 mm pour les mois de mars, avril et mai. Une telle offre pluviométrique liée à une hausse des températures, durant cette période, est favorable pour la période de végétation des espèces car cela permet leurs croissances rapides.

Figure 18 : *Précipitations mensuelles pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).*

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
J	80,2	81,7	68,3	146,8	71,7	142,3	41,7	211,3	37,8	90,4
F	62,0	36,0	76,5	57,7	31,2	57,9	53,8	84,4	92,4	149,4
M	133,7	67,9	54,3	70,8	112,9	115,6	72,9	104,9	101,1	12,5
A	29,8	11,9	113,6	6,7	95,2	87,7	37,8	70,3	80,3	64,5
M	185,0	58,6	121,1	137,7	63,0	46,8	47,7	124,5	32,3	50,3
JN	34,6	105,2	35,1	27,6	66,6	41,3	133,2	31,7	48,7	71,5
JL	37,8	96,1	93,2	72,0	92,7	44,8	116,7	84,8	45,3	29,0
A	16,7	38,6	27,2	16,8	83,0	72,8	51,0	41,4	15,9	19,6
S	126,5	57,2	80,0	112,5	29,9	102,7	25,5	66,5	18,0	31,9
O	150,2	165,4	46,6	90,6	23,3	107,4	183,3	66,4	43,9	106,8
N	47,8	108,2	47,0	102,9	73,9	82,9	76,6	59,0	49,2	54,5
D	147,3	146,4	71,0	69,1	64,5	134,4	71,7	50,7	154,3	91,4
AN	1051,6	973,2	833,9	911,2	807,9	1036,6	911,9	995,9	719,2	771,8

1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
132,9	19,0	111,4	157,7	226,5	53,1	31,2	118,4	114,4	36,9
30,1	42,1	15,6	114,9	128,4	127,3	137,4	14,6	79,7	109,2
61,2	74,2	11,7	68,2	101,1	30,7	10,6	39,0	49,6	60,7
53,6	58,0	90,6	91,3	44,0	33,4	17,9	144,7	111,1	99,7
25,9	39,9	73,1	107,0	60,3	94,2	81,8	29,4	49,9	116,3
92,4	58,1	117,1	47,6	24,0	7,0	127,7	81,3	56,1	23,6
28,5	36,8	30,5	82,0	86,6	15,4	17,8	63,2	14,5	136,3
19,1	124,0	11,5	95,9	25,9	32,8	80,6	31,7	89,3	57,2
69,1	48,5	162,7	108,4	129,6	31,5	19,1	178,0	178,8	91,3
66,2	64,1	101,3	74,7	33,9	37,5	60,7	174,5	77,1	174,4
94,9	130,4	36,2	110,2	42,9	146,3	83,7	53,9	48,3	176,1
41,2	69,8	148,0	115,7	83,0	59,4	102,5	138,7	246,9	130,4
715,1	764,9	909,7	1173,6	986,2	668,6	771,0	1067,4	1115,7	1212,1

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
J	162,4	70,7	79,9	160,0	67,7	54,7	96,4	121,7	107,5	63,5
F	76,6	118,5	47,6	10,2	29,0	71,3	123,2	66,1	41,7	88,2
M	189,7	78,5	34,7	64,1	39,2	122,2	80,1	127,7	43,6	79,9
A	100,1	24,8	45,8	80,0	55,1	36,3	18,8	70,6	76,0	22,2
M	18,4	91,7	89,5	44,4	79,9	80,1	110,8	110,6	68,4	52,4
JN	55,8	48,6	54,1	22,2	17,4	31,8	111,7	34,0	83,3	35,1
JL	94,8	66,8	94,4	79,5	52,1	43,9	155,8	69,7	62,0	11,8
A	61,2	90,0	6,1	78,3	42,1	56,5	83,0	76,3	31,4	50,1
S	88,9	70,6	37,5	62,1	28,2	104,7	32,4	46,5	26,9	44,9
O	76,1	153,4	82,3	128,9	111,9	118,7	37,9	85,5	48,0	98,7
N	66,7	150,0	112,7	49,7	78,5	113,5	61,3	102,9	142,0	142,2
D	56,4	139,6	95,6	68,8	56,2	106,5	98,0	60,8	130,4	82,8
AN	1047,1	1103,2	780,2	848,2	657,3	940,2	1009,4	972,4	861,2	771,8

La Figure 18 reprend les précipitations mensuelles pour chaque année de la normale climatique et permet d'observer entre 1981 et 2010 les variabilités climatiques mensuelles et annuelles.
Sur la normale, une alternance d'années plutôt sèches et plutôt humides est observable. De 1989 à 1992 on est sur des années sèches où les précipitations oscillent entre 715 mm et 771 mm. Tout comme la période 1996-1997 (668 mm et 771 mm), 2003-2005 et 2009-2010. C'est 2005 l'année où l'offre pluviométrique est la moins conséquente avec 657 mm, suivi de 1996 avec 668 mm.
Ces périodes sèches sont entrecoupées de périodes plus humides, où l'offre est plus importante avec de 1986 à 1988 un premier cycle humide où les précipitations sont de 950 mm en moyenne. On a également de 1993 à 1995, de 1998 à 2002 et de 2006 à 2008. Le maximum de précipitations atteint est en 1994 avec 1 173 mm suivi de 1999 (1 115 mm), 2000 (1 212 mm) et 2002 (1 103 mm).

Au niveau des variabilités inter-mensuelles, la logique de la répartition des précipitations est respectée. Sur la période estivale elles sont moins abondantes, d'où la présence de la couleur jaune sur ces mois-là tandis que pour la période hivernale, c'est l'inverse d'où la couleur bleue dominante.
Néanmoins au sein des mois, il existe des disparités comme c'est le cas pour le mois de janvier. Pour le mois de janvier, les précipitations sont généralement conséquentes notamment en 1995 avec 226 mm. Mais il se peut que pour certaines années, l'offre soit très faible notamment en 1992 avec 19 mm, en 1997 avec 31 mm ou en 2000 avec 37 mm.

La normale climatique (1981-2010) se présente avec une alternance de périodes sèches et humides par rapport à l'offre pluviométrique avec des disparités apparentes pour un même mois, par exemple le mois de janvier. Il va être intéressant, maintenant, d'observer s'il se passe la même chose avec les températures c'est-à-dire une alternance de périodes fraiches et chaudes.

1.1.2 - Quelles variations pour les températures ?

La Figure 19 renvoie aux moyennes mensuelles des températures sur la normale climatique. Comme pour l'offre pluviométrique, les températures suivent les saisons avec en hiver des températures fraiches dont la moyenne s'établie à 3,8 °C avec un minimum à 3,6 °C pour janvier. Pendant la période estivale, les températures grimpent notamment en juillet-août où les températures moyennes avoisinent les 17,5 °C.
En ce qui concerne l'automne et le printemps, ils jouent le rôle d'intermédiaires entre la période hivernale est estivale. Au printemps, les températures réaugmentent progressivement, passant de 6,4 °C en mars à 12,4 °C en mai tandis qu'en automne c'est l'inverse. Elles passent de 14,3 °C en septembre à 6,5 °C en novembre.

Figure 19 : *Tableau récapitulatif des températures moyennes sur la normale 1981-2010. (Hugo Fontaine).*

Mois	*Températures (°C)*	*Mois*	*Températures (°C)*	*Mois*	*Températures (°C)*
Janvier	3,6	Mai	12,4	Septembre	14,3
Février	3,8	Juin	15,5	Octobre	10,8
Mars	6,4	Juillet	17,5	Novembre	6,5
Avril	8,6	Août	17,3	Décembre	4,0
				An	**10,0**

Figure 20 : *Températures mensuelles pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).*

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
J	4,0	3,9	5,1	4,0	-1,2	3,8	-2,9	5,6	2,7	4,7
F	1,1	4,3	1,2	2,8	1,9	-2,6	2,2	3,5	4,3	7,8
M	8,5	5,4	5,5	4,0	3,9	4,5	3,5	6,0	7,9	7,4
A	8,6	7,8	6,8	8,4	8,1	5,3	10,0	9,3	6,5	8,0
M	11,1	12,3	9,6	8,5	11,2	11,2	10,0	12,7	14,8	14,9
JN	14,2	16,4	15,5	14,6	13,4	16,1	13,2	14,9	16,1	13,7
JL	15,7	17,9	20,6	16,8	17,0	16,3	16,4	15,0	19,3	18,9
A	17,2	15,7	17,1	17,1	14,8	14,7	16,3	16,3	17,1	19,9
S	14,3	15,5	14,0	13,2	14,4	11,2	15,0	13,5	15,5	14,1
O	9,5	9,8	9,6	10,1	9,4	11,6	10,4	10,7	12,6	11,9
N	6,5	7,1	6,2	8,2	3,5	6,8	5,6	3,8	4,9	5,8
D	3,4	4,1	3,4	3,6	4,5	4,8	3,7	6,1	3,9	2,5
AN	9,5	10,0	9,6	9,3	8,4	8,6	8,6	9,8	10,5	10,8

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
J	2,8	2,4	6,4	5,3	4,4	4,5	0,5	3,8	5,6	3,5
F	0,1	4,2	2,8	4,6	7,3	2,1	6,3	5,2	4,2	6,2
M	7,9	6,3	6,3	8,0	5,7	5,6	8,3	7,2	7,3	6,3
A	7,3	7,8	9,6	7,6	8,3	9,0	8,7	7,6	9,3	8,4
M	10,0	14,4	12,7	12,3	12,7	10,0	12,8	14,1	14,4	13,6
JN	12,1	15,6	15,9	16,1	15,0	16,7	14,7	15,3	15,2	16,5
JL	16,3	17,7	15,8	19,9	20,2	17,5	17,2	15,7	19,3	15,9
A	19,0	17,7	16,0	17,6	19,6	17,4	20,6	17,3	17,8	18,0
S	16,4	13,5	12,7	12,9	12,9	12,8	14,4	14,6	16,3	14,9
O	9,6	8,0	8,5	10,8	13,5	11,1	10,7	10,6	10,8	10,4
N	5,8	8,6	3,3	9,9	6,4	5,7	8,1	4,4	5,9	7,0
D	3,1	4,1	5,8	6,4	2,9	1,3	4,8	4,5	5,2	6,6
AN	9,2	10,0	9,7	11,0	10,7	9,5	10,6	10,0	10,9	10,6

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
J	4,2	5,8	2,2	4,5	4,9	2,9	6,3	5,9	1,2	0,4
F	4,7	6,6	3,1	4,4	2,6	2,3	6,9	5,9	3,5	3,0
M	7,4	7,4	8,8	5,4	6,9	5,0	6,4	5,8	6,6	5,7
A	7,8	9,2	10,1	8,9	9,5	8,9	12,9	8,1	9,7	9,6
M	13,7	12,1	12,8	12,3	12,7	12,7	12,6	14,7	13,1	11,3
JN	15,8	15,7	18,5	16,4	17,7	17,4	15,2	15,3	16,1	16,5
JL	17,9	16,4	18,4	16,8	17,9	21,3	15,6	16,6	16,9	19,2
A	18,4	16,7	21,5	17,8	16,8	15,7	15,7	16,2	17,8	16,1
S	12,9	13,8	15,5	15,6	15,8	17,2	13,1	12,7	14,8	14,0
O	13,6	11,1	8,9	11,2	14,2	13,5	10,1	9,5	11,3	10,4
N	5,9	8,2	8,2	7,1	6,1	8,3	6,4	7,1	9,0	5,7
D	2,5	6,2	4,3	3,5	3,1	4,7	4,0	2,8	3,2	0,2
AN	10,4	10,8	11,0	10,3	10,7	10,8	10,4	10,1	10,3	9,3

Figure 21 : *Tableau récapitulatif de la demande évapotranspiratoire sur la normale 1981-2010. (Hugo Fontaine)*

Mois	*ETP (mm)*	*Mois*	*ETP (mm)*	*Mois*	*ETP (mm)*
Janvier	10,1	Mai	93,3	Septembre	64,8
Février	17,9	Juin	112,2	Octobre	32,4
Mars	40,7	Juillet	120,5	Novembre	12,4
Avril	66,2	Août	98,5	Décembre	7,8
				Total	**676,8**

La Figure 20 reprend les températures mensuelles pour chaque année de la normale climatique. Cela permet d'observer, sur cette période, les variabilités climatiques mensuelles et annuelles.
En comparant année après année, la normale climatique est coupée en 3 cycles bien distincts. De 1981 à 1988, on est sur une moyenne annuelle plutôt faible (9,2 °C), ne dépassant pas les 10,0 °C avec en 1985 la moyenne la plus basse (8,4 °C) et en 1982 la plus haute (10,0 °C).
De 1989 à 1996, on a une transition avec une alternance d'années plus chaudes et plus froides. 1989-1990 se présentent comme 2 années chaudes (moyenne à 10,5 °C et 10,8 °C) relatif à la sécheresse de 89-90. Quand on fait le rapprochement avec la Figure 18, les précipitations de ces 2 années vont de pair avec les températures. A côté de ça on a des années plus froides comme 1991 avec 9,2 °C où on a 1,3 °C d'écart avec les années les plus chaudes de cette période. Elle marque le passage d'un cycle froid (1981-1988) à un cycle chaud (1997-2009).
De 1997 à 2009, la moyenne est toujours supérieure à 10°C avec même un maximum en 2003 à 11 °C relatif à la sécheresse de 2003. Entre ces 2 périodes on observe bien le réchauffement de la planète avec une hausse de + 1,3 °C. Sur l'intervalle 1981-1987 on a une température moyenne de 9,2 °C contre 10,5 °C sur la période 1997-2009.

Pour les années où il y a eu de fortes sécheresses (1989-1990 et 2003) on remarque que les températures sont nettement plus élevées sur l'ensemble de l'année par rapport à la moyenne (Figure 19). Par exemple en 2003 du mois de juin au mois de septembre, il y a de gros écarts par rapport à la moyenne notamment en août où on est à 21,5 °C contre 17,3 °C en moyenne.

Sur la normale climatique, il n'y a vraiment pas de disparités inter-mensuelles pour les températures. Elles sont plus élevées sur la période estivale qu'hivernale en raison d'alternances de masses d'airs chauds et froids. Il n'y a pas d'écarts de 10 °C sur un même mois sur la normale climatique.

1.1.3 - La demande évapotranspiratoire

La Figure 21 récapitule les moyennes mensuelles de la demande évapotranspiratoire sur l'ensemble de la normale climatique. La demande évapotranspiratoire moyennée pour l'ensemble des années est de 676,8 mm.
Plus la demande est importante, plus le climat est chaud et aride. Lorsque que la demande évapotranspiratoire dépasse l'offre pluviométrique, on est sur une zone aride. Ici, il y a un écart de 235 mm entre la demande et l'offre ce qui montre que le climat est océanique frais.

Comme pour l'offre pluviométrique et les températures, la demande évapotranspiratoire suit la saisonnalité. Plus on avance vers la période estivale plus elle est importante avec un maximum atteint à 120,5 mm en août. A l'inverse, plus on tend vers la période hivernale, plus les valeurs de l'ETp baissent pour atteindre un minimum à 7,8 mm en décembre.
En période estivale, la demande est plus importante ce qui s'explique par la transpiration des espèces engendrée par une hausse des températures et une baisse des précipitations. En hiver, les températures baissent et l'offre pluviométrique réaugmentent faisant diminuer la transpiration chez les espèces ainsi que la demande évapotranspiratoire.

Figure 22 : *ETP mensuels pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).*

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
J	11,1	7,0	8,4	12,3	7,1	10,8	13,4	11,5	9,3	9,8
F	15,2	10,1	16,6	18,3	16,8	12,3	11,5	22,4	14,1	22,5
M	28,6	37,1	31,7	34,2	35,2	29,3	32,2	29,7	37,0	45,1
A	56,0	73,8	38,7	77,7	55,6	45,6	69,6	63,9	48,6	73,1
M	46,7	81,5	59,9	48,5	67,7	79,5	90,1	87,3	116,7	115,5
JN	88,7	97,4	102,4	119,4	84,3	114,4	81,5	109,9	122,4	85,3
JL	94,0	106,9	125,6	121,6	116,8	107,2	108,0	93,9	133,9	154,8
A	90,9	83,2	91,1	89,4	75,0	77,9	88,6	93,3	96,5	116,9
S	49,0	59,4	49,8	49,7	74,1	57,6	46,4	55,7	69,5	75,2
O	20,0	17,2	30,1	23,1	39,9	36,9	21,9	25,2	41,5	33,6
N	10,2	10,4	11,8	11,1	8,8	12,2	11,8	13,3	14,6	12,0
D	9,2	7,3	7,3	5,6	8,2	11,4	5,2	5,0	10,5	10,9
AN	519,6	591,3	573,4	610,9	589,5	595,1	580,2	611,1	714,6	754,7

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
J	11,5	8,7	16,5	13,5	13,9	11,2	9,0	15,2	9,3	6,2
F	12,6	16,9	23,5	14,6	21,0	19,6	20,3	23,9	17,2	18,0
M	37,8	29,8	48,5	48,7	43,3	44,3	51,9	42,4	44,8	42,0
A	56,2	69,3	57,0	66,2	67,1	67,9	98,1	48,9	62,9	47,9
M	95,1	126,6	89,4	92,2	101,4	88,6	108,5	113,5	105,0	92,2
JN	77,7	116,8	119,3	129,9	119,5	140,2	89,1	108,1	117,9	129,5
JL	98,9	117,9	111,2	135,9	136,9	139,4	129,0	112,2	143,2	95,5
A	110,6	86,7	110,6	93,5	118,4	108,7	97,6	122,1	85,8	92,8
S	61,3	57,2	53,2	54,8	51,5	75,2	80,0	57,0	67,5	60,7
O	23,9	36,1	34,5	36,9	43,9	37,7	40,8	24,2	31,6	22,8
N	10,8	18,9	15,1	12,0	13,7	14,6	10,7	9,4	10,1	7,9
D	6,0	13,5	14,0	11,0	5,7	7,1	2,5	4,5	4,8	5,9
AN	602,4	698,4	692,8	709,2	736,3	754,5	737,5	681,4	700,1	621,4

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
J	6,1	7,2	3,7	8,8	10,7	7,9	9,1	13,6	9,9	9,7
F	14,8	16,6	14,3	22,8	21,0	15,5	19,6	26,8	20,9	17,7
M	30,2	36,2	53,0	45,9	45,8	38,7	48,2	41,9	54,8	53,2
A	52,1	70,0	80,2	70,1	67,2	76,5	102,8	63,4	66,2	93,0
M	108,3	90,0	89,4	105,9	102,3	90,9	99,0	97,3	109,8	100,7
JN	123,2	102,4	117,7	124,3	131,6	132,1	102,4	122,7	124,2	130,4
JL	111,6	117,1	122,6	114,4	130,6	150,7	106,3	127,4	108,9	143,0
A	98,9	76,9	126,8	92,0	119,0	99,5	98,6	102,1	119,1	93,5
S	55,9	67,5	80,2	76,0	74,7	70,5	78,2	73,2	87,9	75,1
O	30,7	25,0	30,1	35,5	41,2	28,7	43,3	40,2	39,5	37,1
N	11,4	8,4	14,2	12,4	15,6	14,1	17,2	14,0	13,6	10,4
D	8,0	4,4	7,4	7,0	8,9	6,1	14,6	9,2	5,9	7,3
AN	651,2	621,7	739,6	715,1	768,6	731,2	739,3	731,8	760,7	771,1

La Figure 22 reprend l'ETp mensuelle pour chaque année de la normale climatique. La demande évapotranspiratoire suit relativement bien les températures en termes d'évolution. De 1981 à 1988, la demande est plus faible avec une moyenne de 584 mm et un maximum de 611 mm atteint en 1988. Sur cette même période, ce sont les températures les plus basses enregistrées sur la normale climatique avec une moyenne de 9,2 °C contre 10,0 °C sur l'ensemble de la période.
Comme pour les températures, on a une phase de transition avec une alternance d'années avec une demande évapotranspiratoire forte et faible. Néanmoins cette période est plus courte que pour les températures. Ici, elle va de 1989 à 1994 contre 1989 à 1996. Durant cette période la demande oscille entre 602 mm pour 1991 et 755 mm pour 1990.
A partir de 1995, la demande est forte et reste constante comme pour les températures. Sur cette période la moyenne est de 716 mm, soit + 132 mm par rapport à l'intervalle 1981-1988, avec un maximum atteint en 2010 de 771 mm. Tout comme les températures, l'ETp montre le réchauffement de la planète avec des valeurs d'ETp qui ont augmenté en moyenne de + 132 mm entre les années 80 et la fin des années 90.
Néanmoins une petite spécificité est observable de 2000 à 2002 où la demande est beaucoup plus faible (631 mm) par rapport à la période 1995-2010. Même si les températures augmentent à ce moment-là, les précipitations sont abondantes ce qui permet de limiter le phénomène évapotranspirant.

Sur la normale climatique, l'ETp ne varie pas de la même manière que l'offre pluviométrique avec de grosses différences pouvant apparaitre sur un même mois sur une longue période. En effet, l'ETp varie d'une journée à l'autre tandis que l'offre pluviométrique c'est plutôt annuel.
Il n'y a pas de disparités inter-mensuelles au sein des mois estivaux (mai à août) ni hivernaux (novembre à février). Par contre, il en existe pour les mois intermédiaires notamment en avril. En moyenne on est à 66,2 mm (Figure 21) mais on peut avoir des extrêmes : au maximum 103 mm (2007) et au minimum 39 mm en 1983. De telles différences s'expliquent par rapport au climat parfois chaud ou froid.

1.2 - Conclusion

En conclusion de cette partie, le climat régional sur la normale climatique est un climat océanique frais car l'offre pluviométrique, de 913 mm, est conséquente et la demande évapotranspiratoire n'est que de 676,8 mm. Elle est nettement inférieure à l'offre pluviométrique ce qui a tendance à rendre le climat océanique frais. De plus la température moyenne annuelle n'est que de 10 °C ce qui n'engendre pas un réchauffement du climat.
Néanmoins, on remarque la présence du réchauffement climatique aux travers des trois variables climatiques analysées. Les températures ont connu une hausse de + 1,5 °C entre les années 80 (1981-1987 : 9,2 °C) et la période 1997-2009, où les températures moyennes ont augmenté à 10,5 °C. Le même phénomène est observable pour la demande évapotranspiratoire avec une hausse de + 132 mm entre ces deux mêmes périodes.
Maintenant, il va être intéressant d'observer si le changement climatique se répercute également à l'échelle de la forêt domaniale d'Ecouves et à fine résolution (terrain d'étude).

Figure 23 : *Schéma simplifié du bilan hydrique en milieu forestier avec flux entrants et sortants. (Site web BILJOU).*

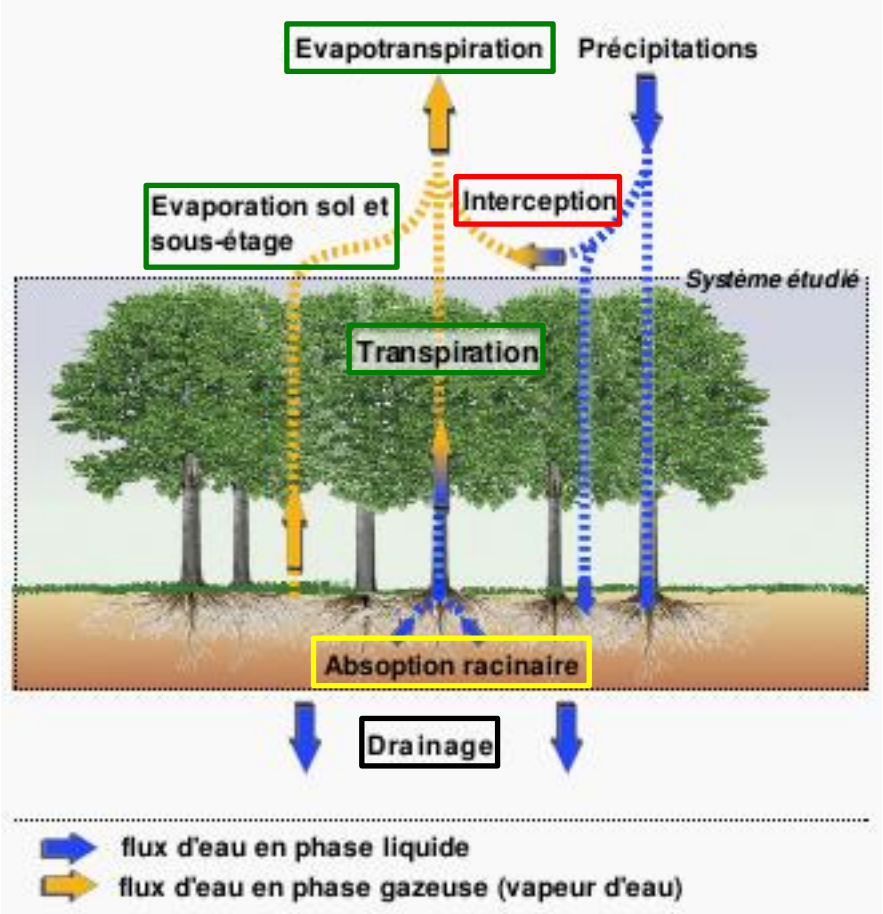
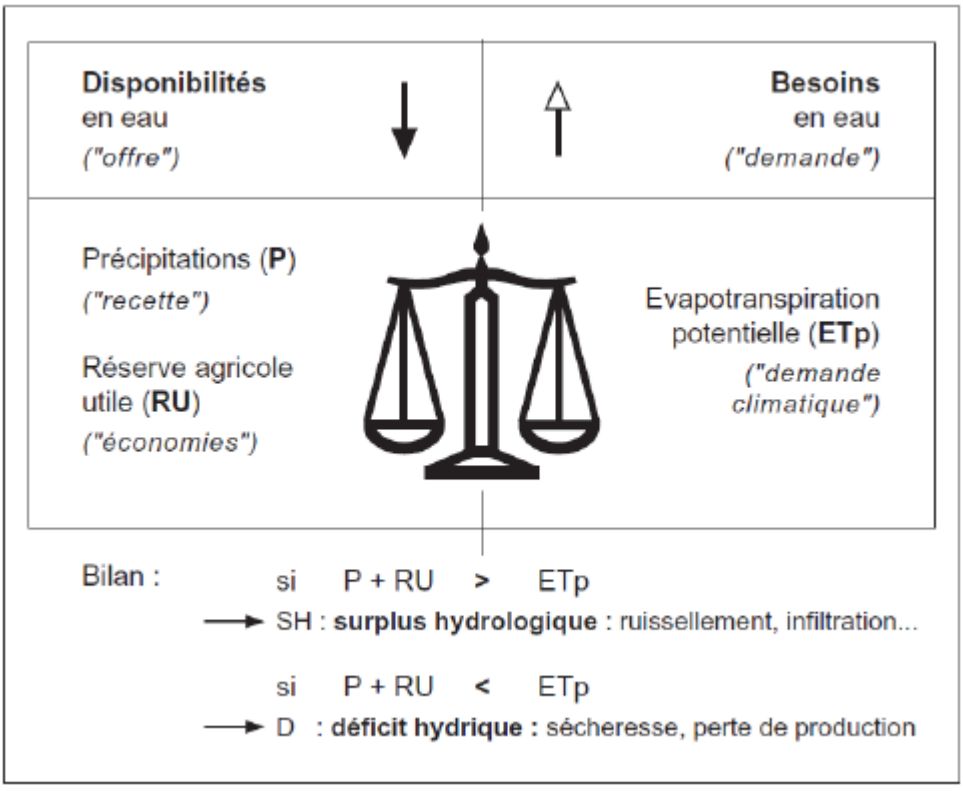


Figure 24 : *Equilibre hydrique entre les disponibilités et les besoins. (Cantat et al, 2009).*



2 - Prise en compte du bilan hydrique dans les impacts du changement climatique en forêt domaniale d'Ecouves

La présentation des principaux paramètres climatiques (P, T et ETp) à l'échelle régionale étant effectuée, on peut affiner l'échelle de travail à la forêt domaniale d'Ecouves. Cela permet d'observer les variabilités climatiques à une résolution plus fine, ici à partir d'un bilan hydrique ponctuel. Les études sur le réchauffement climatique en milieux forestier ont permis de faire prendre conscience aux techniciens et gestionnaires forestiers l'importance d'anticiper le changement climatique par l'intermédiaire d'actions. L'objectif ici est d'évaluer la résistance des essences forestières face au stress hydrique afin de trouver et d'élaborer des outils permettant de limiter les conséquences du réchauffement climatique notamment les sécheresses. Des outils tels que la création d'un bilan hydrique ponctuel à l'échelle de la forêt d'Ecouves vont permettre de comprendre le comportement des espèces face au changement climatique.

Dans cette partie, on commencera d'abord par une présentation de la notion de bilan hydrique dans un contexte forestier. Puis, on passera à la méthodologie pour élaborer une bilan hydrique ponctuel sur la normale climatique et à son analyse avec étude de cas de l'année 2020.

2.1 - Le bilan hydrique en milieux forestier : un bon indicateur pour comprendre l'impact des sécheresses

Un bilan hydrique en milieux forestier est « une variation du contenu en eau du sol résultant des apports et des pertes en eau, calculés sur une période déterminée (journée, semaine, décade, saison, année). Calculer un bilan hydrique consiste donc à déterminer, pour une période de temps donnée les quantités d'eau : interceptées par le couvert, disponibles pour la végétation dans les différentes couches de sol, consommées par la végétation (ETp) et drainées par chaque couche de sol et au-delà de la zone des racines. » (Site internet AFORCE : Petit lexique forestier du changement climatique).
La Figure 23 montre bien les 4 éléments déterminés par le bilan hydrique à savoir les précipitations interceptées (en rouge Figure 23), l'eau disponible pour la végétation (en jaune Figure 23), l'eau consommée par la végétation (en vert Figure 23) et l'eau drainée en profondeur (en noir Figure 23).

Le bilan hydrique se calcule en additionnant la réserve utile et les précipitations. De ce calcul, il y a alors 3 possibilités :

- Si P + RU = ETp alors il y a un équilibre entre les besoins et les disponibilités en eau,
- Si P + RU > ETp alors il y a un surplus hydrologique (Figure 24),
- Si P + RU < ETp alors il y a un déficit hydrique (Figure 24).

Dans cette recherche, la situation qui aura le plus d'importance sera la dernière lorsque l'addition des précipitations et de la réserve utile est inférieure à l'évapotranspiration potentielle (ETp). Cela provoque alors un déficit hydrique. Aujourd'hui, quand on parle de sécheresse en milieu forestier elle est tout de suite assimilée au déficit hydrique.
Ces deux notions sont identiques car elles évoquent toutes les deux une déficience des précipitations annuelles ainsi qu'un manque d'eau dans le sol qui n'est pas souhaitable pour le bon développement des essences forestières.

Les formules pour calculer un bilan hydrique en milieu forestier sont nombreuses (Turc, Thornthwaite, Penman). Les termes du bilan hydrique en forêt comprennent deux types de flux à savoir les flux entrants et sortants, tous observables sur la Figure 23. Pour les flux entrants, cela concerne principalement les précipitations mais aussi les remontées capillaires lorsqu'il y a la présence d'une nappe. A l'inverse, les flux sortants sont plus nombreux :
(Source : BILJOU)

- La transpiration des arbres (T) résultant d'un transfert de l'eau absorbée dans le sol par les racines vers les feuilles,
- L'interception des précipitations (In) correspondant à l'évaporation à la surface des feuilles de flux d'eau lorsque celles-ci sont déjà remplies d'eau,
- L'évaporation du sol et de la végétation herbacée (Eu),
- L'évapotranspiration réelle (ETr) correspondant à la somme des 3 précédents flux : ETr = T + In + Eu,
- Le drainage de l'eau (D) qui s'effectue en-dessous du plancher racinaire.

Pour conclure, sur cette présentation du bilan hydrique et de son calcul, les atouts de cet instrument sont plus intéressants que ceux d'un diagramme ombrothermique, même si les deux montrent les périodes plus humides et plus sèches pour une année.
Un bilan hydrique repose sur la prise en compte « de l'ensemble des facteurs atmosphériques responsables de l'évapotranspiration (rayonnement solaire, température, humidité et vent) alors que, le diagramme ombrothermique ne reflète indirectement que les seuls processus induits par la température. » (Cantat et al, 2009). En quelque sorte, le bilan hydrique est plus proche de la réalité et du terrain. Le deuxième point fort du bilan hydrique est « l'intégration de l'influence du sol dont la réserve en eau peut compenser, pour un temps, le déficit pluvial ». (Cantat et al, 2009).

Figure 25 : *Modèle pour le calcul du bilan hydrique à décroissance logarithmique. (GEOPHEN, 2011).*

Réserve Utile =	*100*	*valeurs à modifier en fonction de la nature des sols (texture, profondeur, charge caillouteuse…)*
a : coefficient écoulement direct =	*0,5*	*valeurs à modifier en fonction des caractères géomorphologiques du BV et de la nature des P… (en montagne, 0.7 à 0.8)*
Surplus du mois précédent =	*60*	*valeurs à modifier en fonction de la nature des sols…'--> donné valeur de écoulement mois précédent le tableau*

	jan	fév	mar	avr	mai	jui	jui	aoû	sep	oct	nov	déc	AN
T (°C)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
P (mm)													
ETP Penman (mm)													
Réserve Utile disponible sol *				***en supposant que la RU est pleine en fin d'année sous nos climats***								**100**	
Changement de Réserve Utile													
ETR													
Dédicit hydrique D													
Reconstitution Réserve Utile													
Surplus hydrographique			***à établir après avoir mis une valeur de base (1) pour faire tourner le modèle***									**60**	
Ecoulement superficiel	***pposant que la moitié du surplus hydrologique du mois précédent se retrouve à l'écoulement superficiel***											**30**	

** d'après les travaux de Thornthwaite, fonction de la RU max, du déficit pluviométrique et de l'état de la réserve antérieur (cf. Hufty d'après Thornthwaite)*

2.2 - Méthodologie du calcul du bilan hydrique ponctuel

La première étape pour pouvoir observer l'adéquation des essences forestières sur la zone d'étude et d'observer le climat sur la normale climatique. Cette étape se scinde en 2 parties. La première concerne le calcul du bilan hydrique à l'échelle de la forêt d'Ecouves et la seconde sera basée sur la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle. La méthodologie de cette deuxième partie sera présentée par la suite (*cf. 3.2 - Méthodologie du bilan hydrique spatialisé à fine échelle*). Elle prendra en compte la topographie, le rayonnement solaire, l'exposition du soleil facteurs importants pouvant faire varier l'intensité des résultats du bilan hydrique.
Le bilan hydrique à l'échelle de la forêt d'Ecouves servira de point de départ pour la spatialisation de ce dernier à fine résolution et avoir une image concrète du climat sur la normale climatique 1981-2010.

2.2.1 - Méthodologie générale pour calculer un bilan hydrique ponctuel

Que ce soit à l'échelle d'une forêt, d'une zone d'étude ou d'une région la méthodologie pour calculer un bilan hydrique ponctuel est la même. Le modèle employé est celui élaboré par Olivier Cantat, enseignant-chercheur rattaché au laboratoire GEOPHEN de l'université Caen Normandie. Ce modèle permet de calculer un bilan hydrique ponctuel par décroissance logarithmique de la Réserve Utile (Figure 25).

Le modèle permet d'après P (précipitation en mm), ETp (EvapoTranspiration Potentielle en mm), le coefficient d'écoulement « a », la Réserve Utile (RU en mm) présente dans le sol et le surplus du mois précédent de calculer automatiquement ETr (EvapoTranspiration Réelle en mm), le déficit hydrique « D », le surplus hydrographique ainsi que l'écoulement superficiel.
Les champs permettant de déterminer ceux calculés (ETr, D, S, etc) doivent être obligatoirement et préalablement remplis. Le champ « température », quant à lui, n'est que facultatif car il ne rentre pas dans les différents calculs.

Les données sur les précipitations, la température et l'évapotranspiration potentielle, sont récupérables sur différents sites comme Météociel, Météo-France ou encore le DRIAS si c'est pour des données futures.
Pour la réserve utile, une valeur par défaut a été établi à 100 mm (rond jaune Figure 25) modifiable si on en a la connaissance, soit par un sondage à la tarière ou une valeur de référence.
Le coefficient d'écoulement direct, la valeur par défaut est 0,5 (rond vert Figure 25) modifiable en fonction des caractéristiques géomorphologiques. Plus le terrain sera pentu et imperméable plus la valeur sera importante.
Pour le surplus du mois précédent, une valeur de base à 60 mm (rond rouge Figure 25) a été établie des suites de différents essais avec le modèle du bilan hydrique. Elle permet de calculer l'écoulement du mois précédent (coefficient d'écoulement direct * surplus du mois précédent, ici 0,5 * 60 = 30 mm), (rond bleu Figure 25). Cela est important car le calcul automatique de l'écoulement superficiel prend en compte l'écoulement du mois précédent. Un premier écoulement à 30 mm est alors calculé car si on commence à calculer notre bilan hydrique au mois de janvier pour une seule année, on ne possède pas l'écoulement du mois précédent.

Figure 26 : Descriptif des calculs réalisés sur chaque ligne du modèle. (GEOPHEN, 2011).

RU maximale	**RUx**	RU maximale (attention : case figée car référence)
RU disponible sol *	**RU**	rondi (si (P - ETP < 0 ; RU avant * exp ((P - ETP) / RUx) ; si (**RU avant** + P - ETP < RUx ; **RU avant** + P - ETP ; RUx)) ; 1
changement de RU	**CHRU**	RU - **RU avant**
ETR	**ETR**	si (P - ETP < 0 ; P - CHRU ; ETP)
Dédicit hydrique D	**D**	ETP - ETR
Reconstitution RU	**RRU**	RU + P - ETR - CHRU
Surplus hydro S	**S**	si (RRU >= RUx ; RRu - RUx ; 0)
Ecoulement superficiel Q	**Q**	arrondi (((a * S) + (1 - a) * **Q avant**) ; 1)

Figure 27 : Exemple de bilan hydrique sur une année. (Hugo Fontaine).

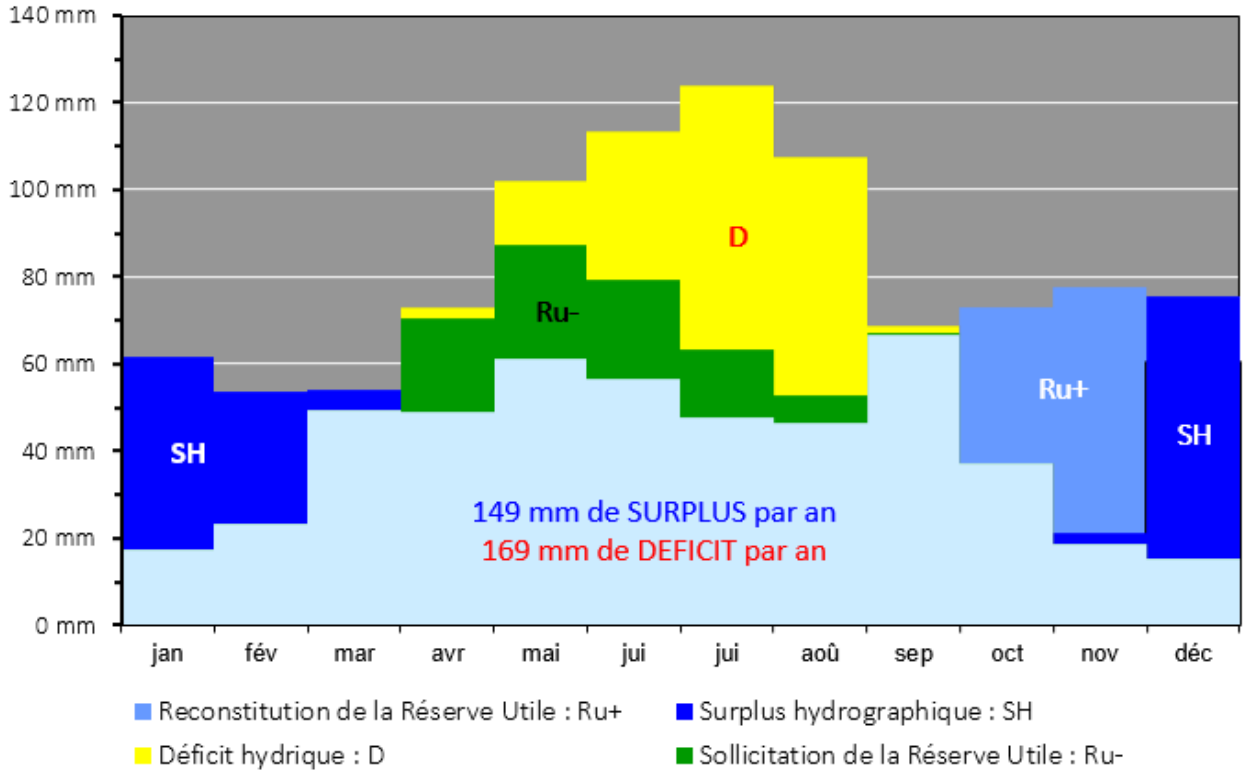
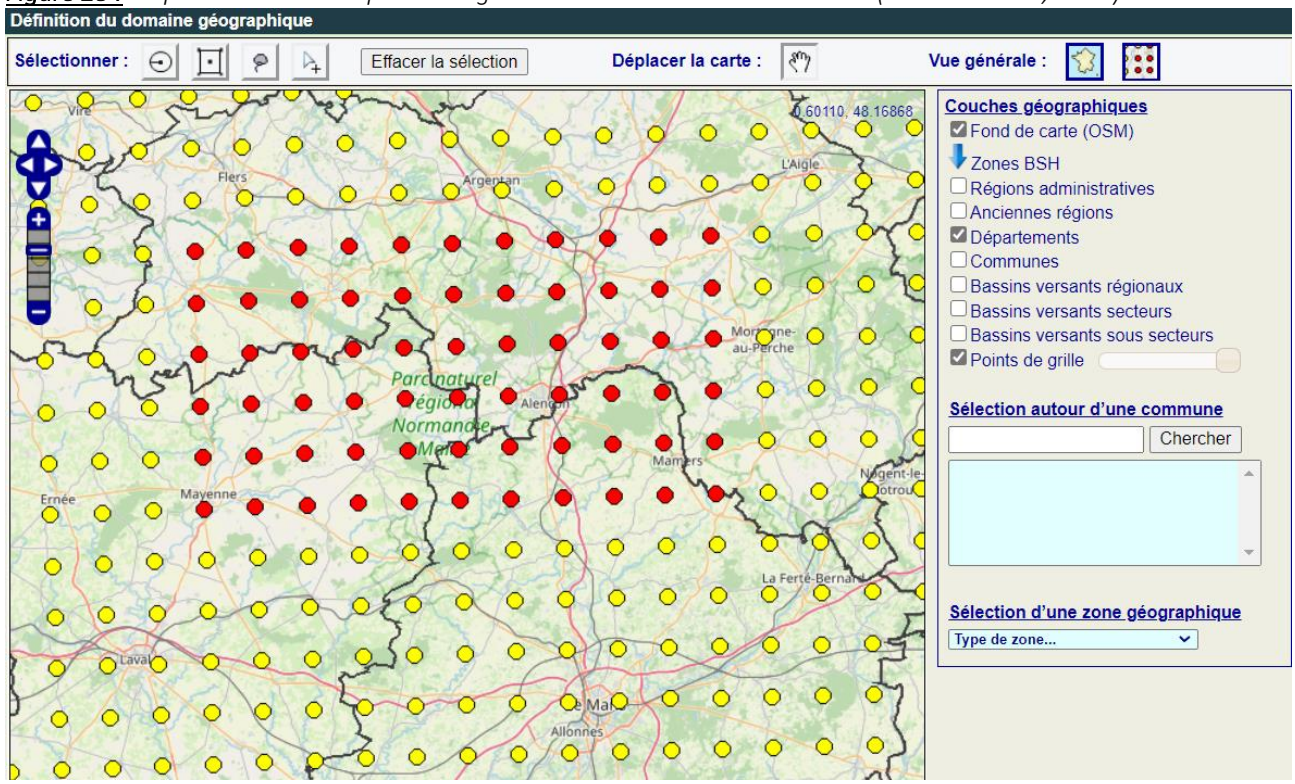


Figure 28 : Emplacement des 66 points de grille sur le PNR Normandie-Maine. (Météo-France, 2021).



En ce qui concerne les calculs réalisés durant ce processus, ils ne seront pas expliqués car ils sont assez complexes. Voici tout de même un tableau récapitulatif avec pour chaque ligne du modèle, le calcul réalisé (Figure 26). La formule pour calculer l'écoulement superficiel « Q » montre bien le principe de calculer un premier écoulement superficiel. En effet, il prend bien en compte la valeur de « Q avant », l'écoulement du mois précédent.
En plus de l'écoulement superficiel, plusieurs autres formules nécessitent des mesures du mois précédent : la réserve utile disponible et le changement de réserve utile. On voit bien que pour calculer le bilan hydrique d'un mois, les mesures obtenues pour le mois précédent sont nécessaire.

Ce modèle présente les résultats des calculs faits durant le processus permettant d'obtenir un graphique représentant le bilan hydrique d'un secteur défini ou d'un territoire agricole (Figure 27). Le graphique permet de mettre en évidence les zones de déficits hydriques ou carences en eaux (jaune) au printemps et en été et de surplus hydrologiques (bleu foncé) en hiver, éléments importants dans la prise en compte de l'adéquation de l'essence.
Cette approche graphique permet de prendre en compte l'ensemble « des facteurs atmosphériques responsables de l'évapotranspiration (rayonnement solaire, température, humidité et vent) » (Cantat et al, 2009).

2.2.2 - Bilan hydrique à l'échelle de la forêt domaniale d'Ecouves

La méthode employée pour déterminer le bilan hydrique de la forêt domaniale d'Ecouves va être expliqué, de l'acquisition de la donnée au calcul par le modèle (*cf. 2.2.1 - Méthodologie générale*). Cette sous-partie sera expliquée avec les données de l'année 2020 (recherche initialement prévue avec l'année 2020), mais la même chose a été réalisée sur la normale climatique (1981-2010) pour permettre de cadrer l'année 2020 sur une longue période climatique.

- <u>Acquisition des données météo :</u>

Pour aboutir à un graphique du bilan hydrique de la forêt d'Ecouves, les données sur les précipitations (mm), l'évapotranspiration potentielle (mm) et la température (°C) ont dû être récoltées. Les données utilisées sont celles issues du modèle ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) rattaché à Météo-France. Ce sont des données spatialisées sous forme de points de grilles 8 km que l'on peut récupérer au pas de temps horaire, décadaire ou mensuelle. Le réel intérêt avec ce modèle est qu'il simule l'ensemble des flux d'eau avec l'atmosphère (interception, évaporation, transpiration) et le sol (ruissellement des précipitations et drainage dans le sol). Ce sont donc des données intéressantes pour calculer un bilan hydrique.
L'acquisition de ces données nécessite un abonnement auprès de Météo-France mais par l'intermédiaire de Monsieur Olivier Cantat, l'acquisition des données a pu se faire. Les données (T, P et ETp) ont été récupérées du mois de janvier au mois de décembre 2020 sur 66 points de grille couvrant l'ensemble du PNR Normandie-Maine (Figure 28).

Figure 29 *: Points ISBA couvrant la forêt domaniale d'Ecouves. (ONF, IGN, Météo-France/ISBA).*

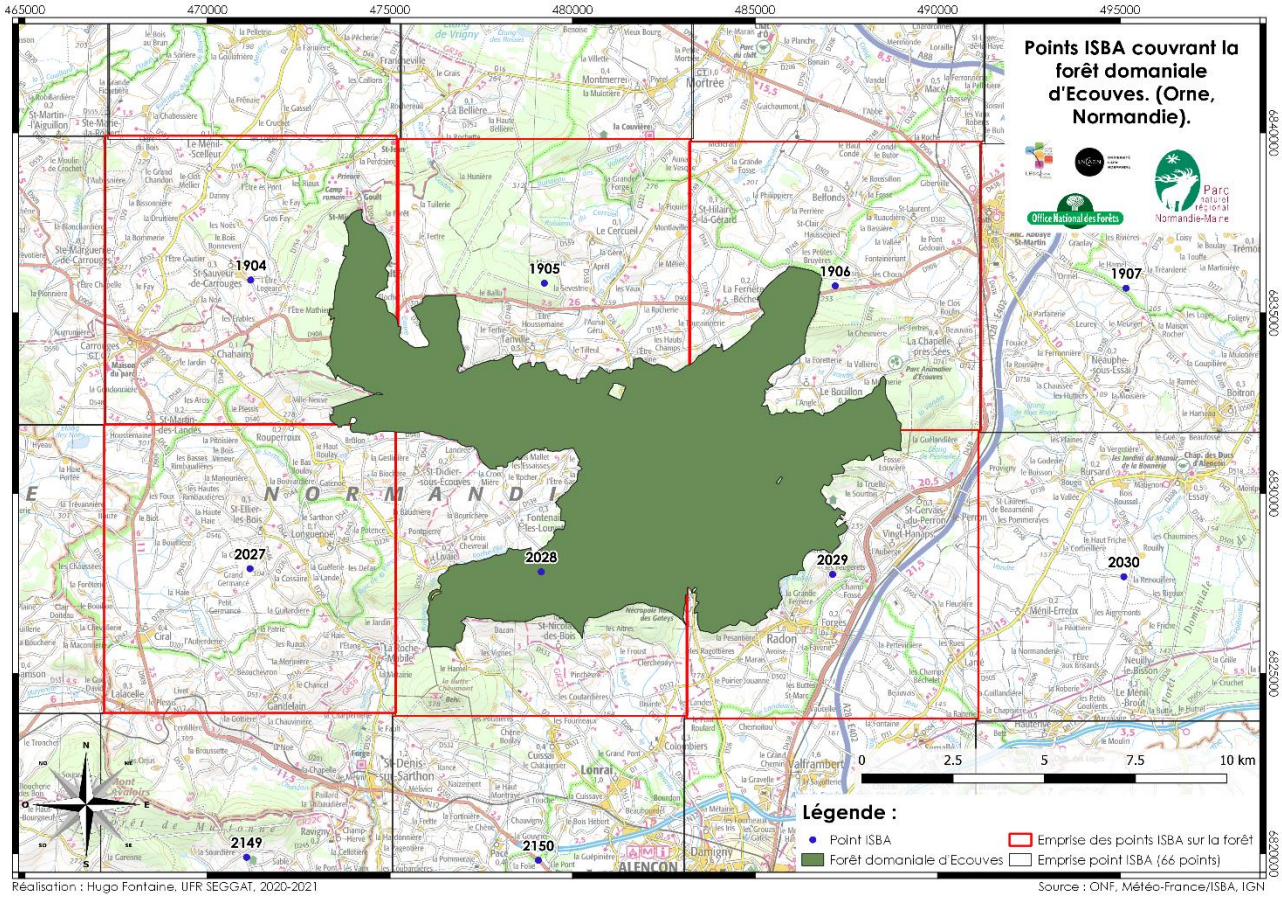


Figure 30 : *Moyenne des précipitations, de l'ETP et de la température par mois de l'année 2020. (Hugo Fontaine).*

Mois	*MOY_P*	*MOY_T*	*MOY_ETP*	*Mois*	*MOY_P*	*MOY_T*	*MOY_ETP*
Janvier	89,3	5,9	11,8	Juillet	22,7	17,8	141,3
Février	115,3	6,7	21,4	Août	53,5	20,1	94,9
Mars	63,6	6,5	52,9	Septembre	37,5	16,9	75,2
Avril	29,1	12	89,6	Octobre	121,7	10,5	19,6
Mai	18,9	13,8	134,6	Novembre	36,9	9,2	15,5
Juin	67	15,3	97,1	Décembre	173,9	5,7	6,3
				Moyenne	**69,1**	**11,7**	**63,4**

- Récupération des points couvrant la forêt d'Ecouves :

Pour le bilan hydrique à l'échelle de la forêt d'Ecouves, les 66 points ne sont pas nécessaires et via les SIG on peut récupérer les points qui sont nécessaire pour couvrir toute la forêt.

Réaliser une couche d'événement X Y. Cette couche va permettre une fois créée, d'obtenir une couche de points avec l'emplacement exact des 66 points ISBA. Cette couche d'événement se créée à partir d'une table où les coordonnées X et Y de chaque point sont définies. Attention à ce que les coordonnées soient en Lambert 93 et non un autre système GPS ou de coordonnées. Une fois la couche générée, on obtient une couche d'entités ponctuelles (points bleus Figure 29).
Ensuite, pour savoir précisément quelles sont les points qui couvrent la forêt, créer des zones tampons de forme carré d'un rayon de 4 km, car les points ISBA ont une emprise de 8 km. Après que la couche eu été générée, 6 points sont concernés par la forêt (points encadrés en rouge Figure 29).
Attention, concernant les zones tampons, elles ne se joignent pas correctement les unes aux autres à cause de la position approximative des points venant de la grille ISBA. Des légers décalages sont observables qui ne sont pas négligeables pour la recherche mais qui pourraient l'être si un travail plus fin doit être réalisé.

- Utilisation des données :

Une fois les données récupérées on peut effectuer les moyennes par mois des précipitations, de l'ETp et des températures. La Figure 30 récapitule les moyennes du mois de janvier au mois de décembre 2020. En moyenne, les précipitations sont à 69,1 mm, l'ETp est à 63,4 mm et les températures sont de 11,7 °C.

- Choix des valeurs pour les paramètres du modèle :

Comme évoqué auparavant (*cf. 2.2.1 - Méthodologie générale*) certains paramètres doivent être préalablement définis comme c'est le cas de la réserve utile (RU), du coefficient d'écoulement direct (a) et du surplus du mois précédent.

- Pour la réserve utile, une valeur moyenne à 120 mm a été établie, valeur en raison de la texture limoneuse des sols sur l'ensemble de la forêt d'Ecouves. N'ayant pas de connaissance assez précise pour déterminer localement la réserve utile, une valeur moyenne a été fixée. De plus, il existe de trop grandes variations de la réserve, surtout en sol forestier, où elle peut varier de 50 mm à plus de 200 mm,

- Pour le coefficient d'écoulement direct, la valeur retenue est 0,6. L'ensemble de la forêt d'Ecouves a une topographie prononcée où du nord au sud nous sommes sur des pentes moyennes à 10-12 % et des altitudes passant de 197 m à 414 m. Les sols présents sont limoneux mais tendent vers l'argile ce qui rend les sols moins perméables,

- Pour le surplus du mois précédent, la valeur retenue est celle de base, c'est-à-dire 60 mm. Cette valeur permet alors de calculer l'écoulement du mois précédent (60 * 0,6 = 36 mm) nécessaire pour le premier calcul de l'écoulement superficiel, celui du mois de janvier.

Figure 31 : *Bilan hydrique de la forêt domaniale d'Ecouves sur la normale 1981-2010. (ISBA, GEOPHEN).*

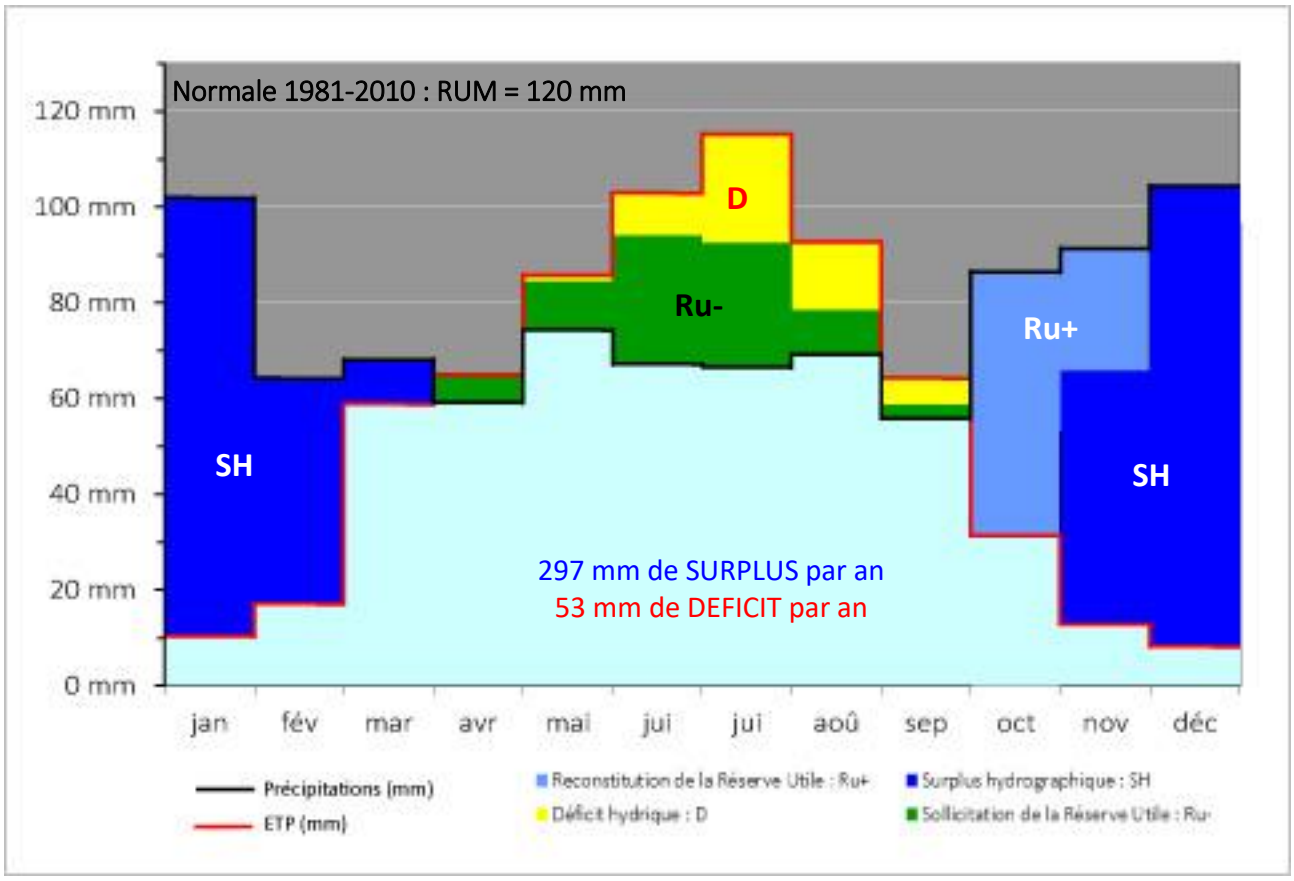


Figure 32 : *Résultats du bilan hydrique mensuel pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).*

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
J	69,1	74,7	59,9	134,5	64,6	131,5	28,3	199,8	28,5	80,6
F	46,8	25,9	59,9	39,4	14,4	45,6	42,3	62,0	78,3	126,9
M	105,1	30,8	22,6	36,6	77,7	86,3	40,7	75,2	64,1	-4,1
A	-2,7	-13,5	74,9	-17,4	39,6	42,1	-3,9	6,4	31,7	-2,3
M	114,8	-10,5	61,2	35,6	-0,1	-4,1	-15,0	37,2	-23,8	-29,5
JN	-10,6	0,0	-15,8	-27,6	-1,9	-31,4	0,0	-20,7	-46,4	-8,4
JL	-27,6	-5,0	-16,2	-30,7	-6,0	-42,2	5,1	-4,5	-71,8	-97,2
A	-52,1	-25,6	-42,3	-55,9	0,0	-3,9	-5,3	-31,6	-73,1	-88,7
S	0,0	-1,4	0,0	0,0	-16,6	0,0	-6,9	0,0	-48,8	-41,2
O	113,5	69,6	0,0	30,5	-8,6	23,9	115,1	0,0	0,0	0,0
N	37,6	97,8	0,0	91,8	0,0	70,7	64,8	15,3	0,0	0,5
D	138,1	139,1	56,3	63,5	55,3	123,0	66,5	45,7	65,9	80,5
D	93,0	56,0	74,3	131,6	33,2	81,6	31,1	56,8	263,9	271,4
S	625,0	437,9	334,8	431,9	251,6	523,1	362,8	441,6	268,5	288,5

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
J	121,4	10,3	94,5	144,2	212,6	41,9	22,2	103,2	105,1	30,7
F	17,5	25,2	-0,3	100,3	107,4	107,7	117,1	-0,4	62,5	91,2
M	23,4	44,4	-7,1	19,5	57,8	-0,7	-6,4	-0,3	4,8	18,7
A	0,0	-0,5	0,0	25,1	-2,1	-7,7	-38,7	83,8	48,2	51,8
M	-17,8	-30,5	-1,5	14,8	-12,4	0,0	-18,0	-23,6	-10,9	24,1
JN	0,0	-38,2	-0,4	-22,7	-56,9	-75,6	0,0	-14,9	-31,3	-35,5
JL	-34,6	-65,1	-31,9	-32,0	-39,4	-105,8	-66,8	-33,0	-98,9	0,0
A	-67,5	0,0	-70,5	0,0	-81,3	-71,2	-13,2	-73,7	0,0	-12,4
S	0,0	-4,9	11,8	0,0	0,0	-42,1	-50,8	15,9	10,3	0,0
O	0,0	0,0	66,8	12,3	-3,0	-0,2	0,0	150,3	45,5	129,4
N	35,1	69,5	21,1	98,2	0,0	15,5	0,0	44,5	38,2	168,2
D	35,2	56,3	134,0	104,7	67,2	52,3	88,1	134,2	242,1	124,5
D	119,9	139,2	111,7	54,7	195,1	303,3	193,9	145,9	141,1	47,9
S	232,6	205,7	328,6	519,1	445,0	217,4	227,4	531,9	556,7	638,6

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
J	156,3	63,5	76,2	151,2	57,0	46,8	87,3	108,1	97,8	53,8
F	61,8	101,9	33,3	-0,6	8,0	55,8	103,6	39,3	20,8	70,5
M	159,5	42,3	-1,3	6,2	-0,2	83,5	31,9	85,6	-0,5	26,7
A	48,0	-7,5	-8,7	9,9	-1,2	-6,0	-23,6	7,2	0,0	-17,3
M	-26,6	0,0	0,0	-13,4	-4,9	-3,4	0,0	13,3	-6,6	-26,3
JN	-43,0	-23,5	-31,8	-60,9	-61,9	-55,9	0,0	-26,0	-16,6	-70,9
JL	-12,6	-31,9	-18,7	-27,2	-62,7	-86,8	10,2	-35,8	-27,5	-117,8
A	-30,1	0,0	-97,8	-11,2	-68,8	-38,8	-1,0	-19,0	-66,6	-41,4
S	0,0	0,0	-38,7	-11,7	-43,6	0,0	-12,4	-21,0	-53,2	-29,2
O	0,0	59,9	0,0	0,0	0,0	14,0	-2,2	0,0	0,0	0,0
N	34,2	141,6	39,9	29,0	19,7	99,4	0,0	37,1	28,6	77,1
D	48,4	135,2	88,2	61,8	47,3	100,4	76,3	51,6	124,5	75,5
D	112,3	62,9	197,0	125,0	243,3	190,9	39,2	101,8	171,0	302,9
S	508,2	544,4	237,6	258,1	132,0	399,9	309,3	342,4	271,5	303,6

2.3 - Le bilan hydrique de la forêt domaniale d'Ecouves

2.3.1 - Bilan hydrique ponctuel de la forêt domaniale d'Ecouves

La Figure 31 renvoie au bilan hydrique de la forêt d'Ecouves sur la normale climatique 1981-2010 et permet de comprendre le contexte climatique de ces 30 dernières années. La normale climatique se décompose en 3 cycles :

- De décembre à mars, on a la présence de surplus hydrologiques ce qui entraîne des écoulements en surface. Les mois de décembre et de janvier sont les plus marqués par ces surplus avec respectivement 96 mm et 92 mm. En mars, ils sont nettement moins important (11 mm) en raison de la hausse des températures qui fait augmenter l'ETp et la baisse des précipitations,

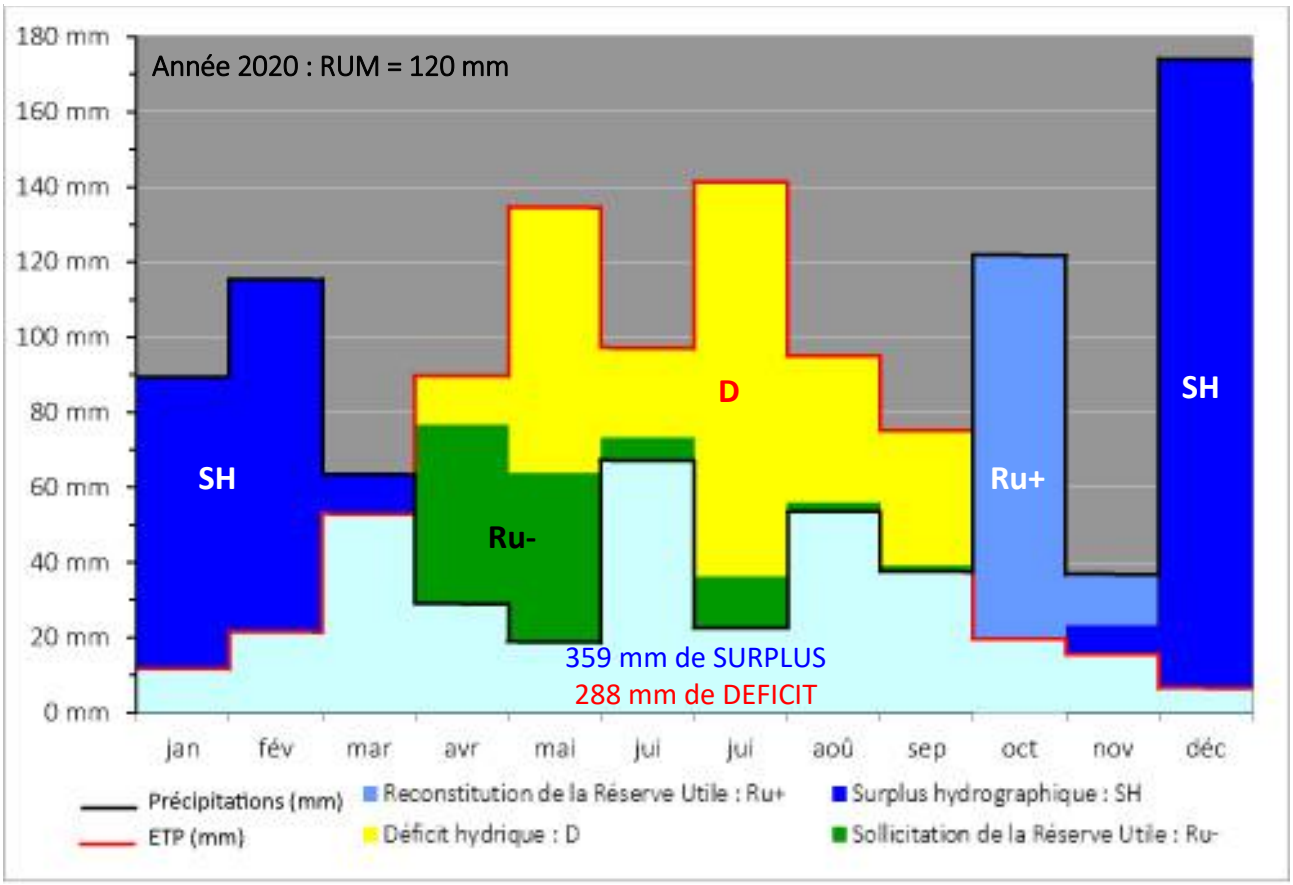
- Durant la période estivale (avril à septembre) on a les déficits hydriques qui prennent le dessus sur les surplus hydrologiques. Les déficits restent tout de même relativement faibles car le total s'élève à 53 mm. Cela s'explique par le fait que la réserve utile est sollicitée par les essences forestières et permet de limiter la carence en eau. C'est le mois de juillet où les déficits sont les plus importants (23 mm), suivi du mois d'août (14 mm),

- Le dernier cycle correspond aux mois d'octobre-novembre où après avoir été sollicitée, la réserve utile se reconstitue jusqu'à son maximum, c'est-à-dire 120 mm. La reconstitution se fait essentiellement en octobre. Pour le mois de novembre on a à la fois la reconstitution et du surplus hydrologique ce qui est dû au fait que la réserve utile est de nouveau remplie.

2.3.2 - Disparités interannuelles et inter-mensuelles sur la normale

La Figure 32 reprend les résultats du bilan hydrique pour toutes les années de la normale climatique (1981-2010) et montre que des disparités interannuelles et inter-mensuelles existent.
Au niveau des variabilités interannuelles, le total de surplus hydrologiques de chaque année dépend des précipitations annuelles (Figure 18). 1981 (625 mm), 1986 (523 mm), 1994 (519 mm), 1995 (445 mm), la période 1998 à 2002 (531 à 544 mm) sont les années où les surplus sont les plus conséquents avec un maximum à 639 mm en 2000.
Les déficits hydriques annuels suivent, quant à eux, l'évolution dans le temps des températures et de la demande évapotranspiratoire. De 1981 à 1988 les déficits sont relativement faible avec une moyenne à 70 mm. Cela va de pair avec les températures où la moyenne est de 9,2 °C sur cette même période (Figure 20) et la demande évapotranspiratoire est de 584 mm (Figure 22). A partir de 1989, les températures et l'ETP commencent à monter tout comme les déficits hydriques. La quasi-totalité des déficits sont supérieurs à 100 mm avec une moyenne de 161 mm et des maximums atteint en 1996 et 2010 (303 mm) ainsi qu'en 1989-1990 (265 mm de moyenne).

Figure 33 *: Bilan hydrique de la forêt domaniale d'Ecouves pour l'année 2020. (ISBA, GEOPHEN).*



Les disparités inter-mensuelles sont également présentes. Des mois de janvier à mars on remarque de grandes variations où pour les mois de février et mars on passe quelquefois en déficit hydrique. Par exemple en 1993 les mois de février et de mars sont soumis à un déficit hydrique : - 0,3 mm et – 7,1 mm.
Sur la période estivale, il n'y a pas de grandes disparités. Pour les mois de juin à août, ils sont concernés pour du déficit hydrique, tandis pour le mois de mai et de septembre, il y a une alternance d'années à surplus hydrologiques et à déficits hydriques. Cela est logique car ils font la transition entre la période hivernale et estivale et inversement.
Concernant, les mois d'octobre à décembre on passe de surplus hydrologiques à une reconstitution de la réserve utile (quand on est à 0 c'est-à-dire ni surplus, ni déficit). En fonction des années, la reconstitution peut être plus ou moins longue. Elle peut prendre un mois comme en 1985 ou 2008 ou 2-3 mois comme 1983. La durée de la reconstitution de la RUM va jouer sur la présence de surplus. Plus elle est longue, plus les surplus mettent de temps à arriver.

2.3.3 - 2020 : une année aux deux extrêmes

Une étude de cas à partir de l'année 2020 va être effectuée pour permettre d'analyser le climat actuel par rapport à la normale climatique. La Figure 33 représente le bilan hydrique pour l'année 2020 sur la forêt domaniale d'Ecouves. L'année 2020 sur la forêt d'Ecouves est représentée comme une année aux deux extrêmes avec une période estivale particulièrement sèche et chaude et une période hivernale très humide. La somme des surplus et des déficits en témoigne avec 359 mm de surplus hydrologiques sur l'année contre 288 mm de déficits hydriques.

La phase de déficit hydrique est très marquée, dès le mois d'avril et jusqu'au mois de septembre soit 6 mois de l'année. La carence en eau devient effective dès le printemps avec P + RU < ETp en avril (pour le mois d'avril 47,5 mm + 29,1 mm < 89,6 mm). On comptabilise sur toute la période estivale, pour 2020, 288 mm de déficit ce qui n'est pas négligeable en milieu forestier pour la bonne croissance des arbres. Le bilan climatique est également négatif dès le mois d'avril avec P < ETp d'où la sollicitation de la réserve utile (de 47,5 mm en avril). Toutefois, une RUM de 120 mm permet de limiter le déficit hydrique, au moins dans les premiers mois (avril et mai). Les déficits sont les plus marqués pour mai (malgré la sollicitation de la réserve utile) avec une carence de 71 mm et en juillet de 105 mm.

La phase de surplus hydrologiques occupe également une place importante avec un total à 359 mm réparti du mois de novembre à mars. C'est le mois de décembre où les surplus sont les plus conséquents (168 mm) à cause notamment des précipitations abondantes de 174 mm. La phase de reconstitution se déroule en octobre et novembre, avec comme pour la normale climatique une fin de reconstitution de la réserve utile et le début du surplus pour le mois de novembre. Le mois de novembre apparait de cette façon à cause des faible précipitations (37 mm).
Même si la phase de surplus hydrologiques est présente sur 5 mois de l'année, en milieu forestier « le mal est fait » avec l'important déficit hydrique d'avril à septembre. En effet, c'est sur ces mois-là que l'apport d'eau est le plus important notamment pour la croissance des arbres car ils sont en pleine phase de végétation.

Figure 34 : *Bilan hydrique de la forêt d'Ecouves sur l'année à partir d'une RUM minimale. (ISBA, GEOPHEN).*

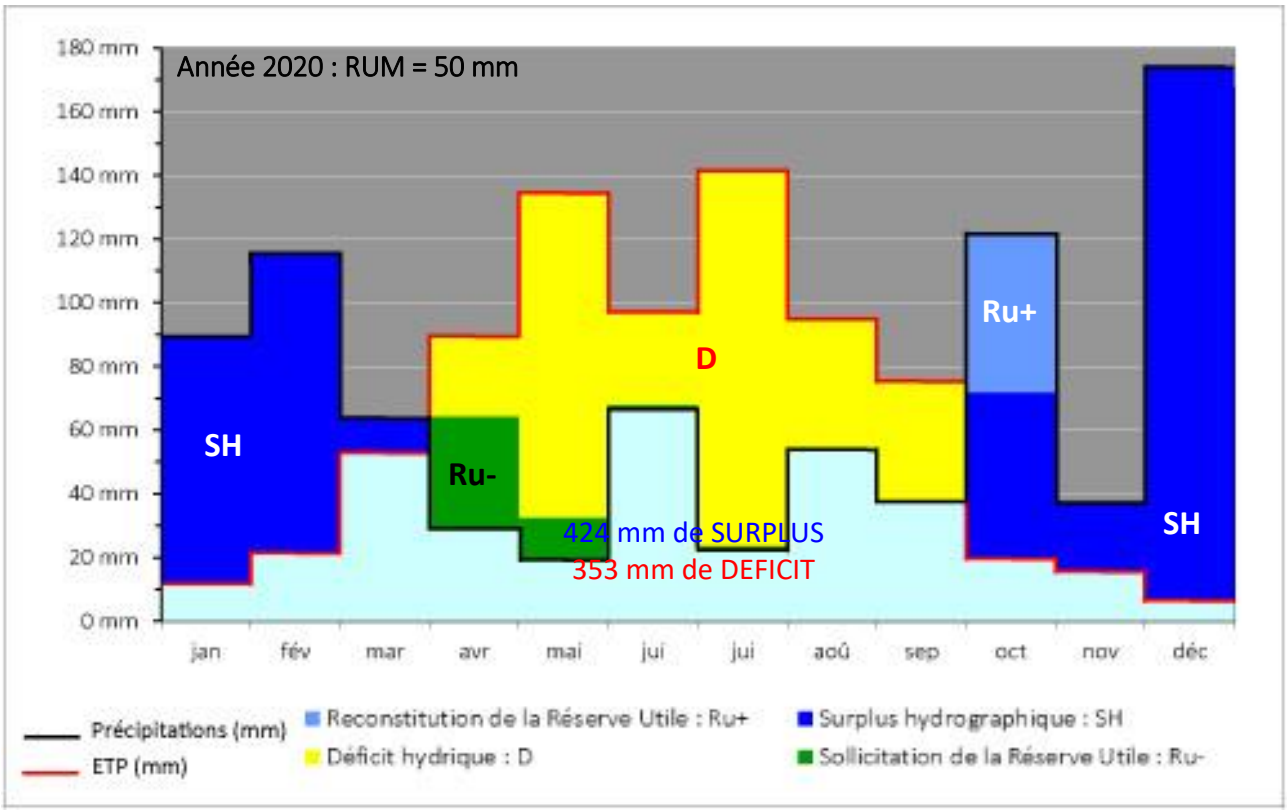
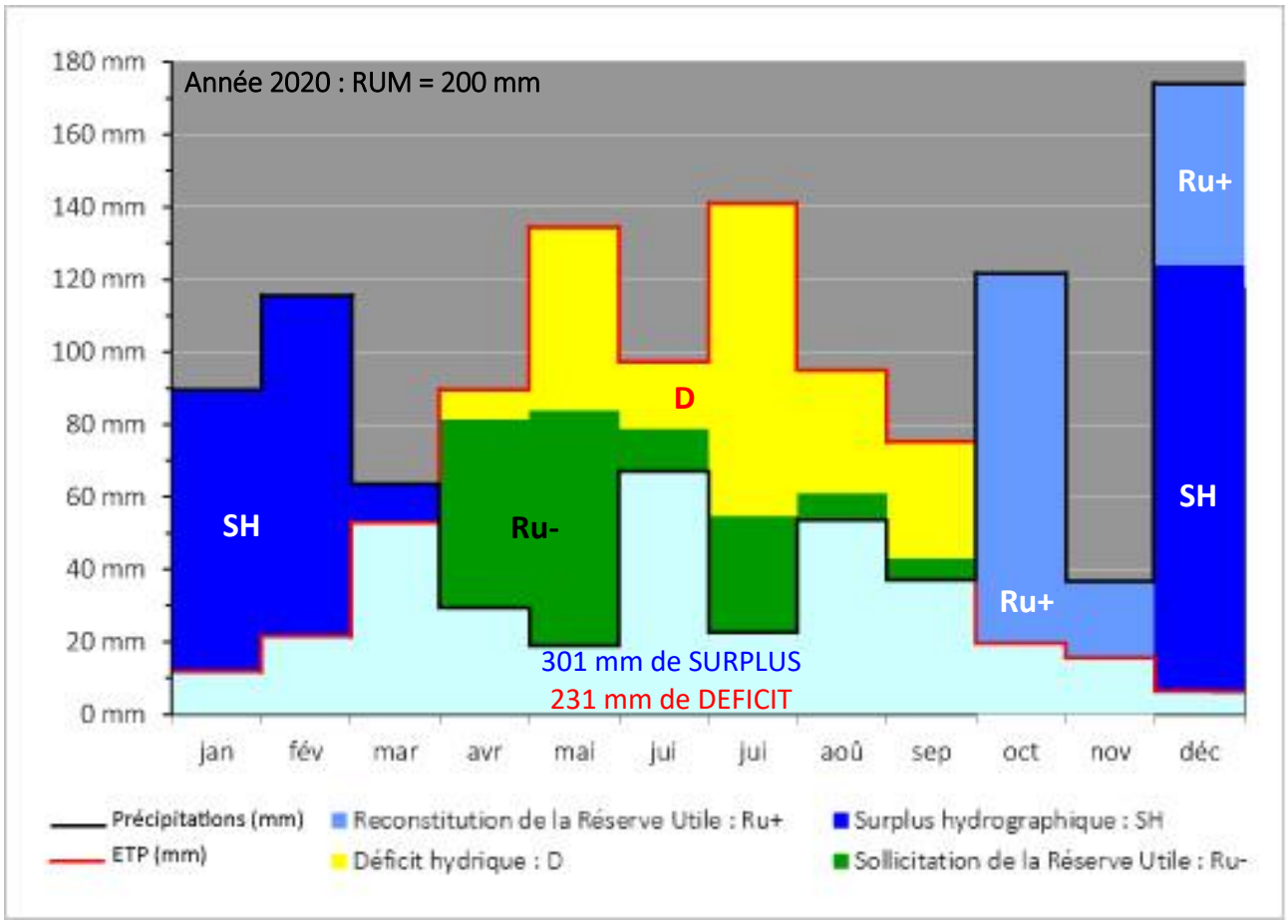


Figure 35 : *Bilan hydrique de la forêt d'Ecouves sur l'année à partir d'une RUM maximale. (ISBA, GEOPHEN).*



L'observation des deux graphiques (Figure 31 & Figure 33) permet de révéler que l'année 2020 apparait comme une année sèche par rapport à la normale climatique. Le déficit hydrique, sur la normale est beaucoup moins excessif que pour l'année 2020 avec seulement 53 mm. C'est 5,5 fois moins que sur l'année 2020 (288 mm). Les déficits étant moins forts sur la normale, la réserve utile permet de combler assez aisément la demande évapotranspiratoire du mois d'avril au mois de septembre. Le bilan climatique (P < ETp) est négatif dès le mois d'avril comme pour l'année 2020 alors que la carence en eau ne devient effective qu'à partir du mois de juin sur la normale 1981-2010 (le mois de mai la carence est quasi nulle → déficit de 1 mm).

Les différences entre la normale climatique et l'année 2020 sont dues à la répartition des précipitations sur l'année et à la demande évapotranspiratoire qui plus importante de quasiment + 100 mm pour l'année 2020 : 677 mm pour la normale contre 760 mm pour 2020.
Pour l'offre pluviométrique, elle est identique que ce soit pour la normale que pour l'année 2020 : 913 mm sur la normale et 829 mm sur 2020. La différence est, que sur la normale, les précipitations sont réparties sur l'ensemble des mois alors que pour 2020 elles sont abondantes en hiver et très faibles en mai et de juillet à septembre.

2.4 - Etude sur les correctifs imposés à la réserve utile des sols

Pour le calcul du bilan hydrique, en l'absence de nombreux sondages pédologiques représentatifs de la diversité régionale, la réserve utile a été fixée à 120 mm. Cependant, en contexte forestier la RUM varie, en fonction des différents contextes pédologiques mais aussi de la topographie, de moins de 50 mm à plus de 200 mm. Cette conséquente variation « n'est pas sans conséquence sur l'ampleur et la durée des phases de surplus hydrologiques ou de déficits hydriques, donc sur la vie des plantes » (Cantat et al, 2009) mais aussi des arbres.
Les deux bilans hydriques ci-contre (Figure 34 & Figure 35) montrent concrètement les répercussions « des différences de capacité de deux « réservoirs » » (Cantat et al, 2009) ici 50 mm et 200 mm.

La présence d'une réserve utile plus imposante (Figure 35) permet de mettre en évidence que la phase de déficit hydrique est mieux contrée par la réserve utile (vert) que sur la Figure 34. En effet, la réserve utile n'est que de 50 mm, sur l'autre graphique, ce qui entraine l'apparition plus prononcée des déficits hydriques sur la période estivale.
Cela n'est pas négligeable au niveau des essences forestières qui peuvent restituer plus d'eau plus longtemps avec une RUM de 200 mm. Elles peuvent restituer de l'eau sur toute la période estivale (d'avril à septembre). Ce n'est pas le cas une RUM de 50 mm où là les espèces ne peuvent utiliser la réserve utile que sur 2 mois (avril et mai) et en petite quantité.

A l'inverse, les surplus hydrologiques sont plus conséquents avec une RUM de 50 mm qu'avec une RUM de 200 mm. Les surplus sont de 424 mm avec une RUM de 50 mm contre 301 mm quand elle est à 200 mm. Quand la réserve utile est de 200 mm, la reconstitution à partir d'octobre est plus longue contre le montre la Figure 35. Alors que si la réserve est de 50 mm, la reconstitution est très rapide ce qui provoque beaucoup plus rapidement des surplus, dès octobre.

3 - Spatialisation du bilan hydrique à fine résolution

3.1 - Généralités

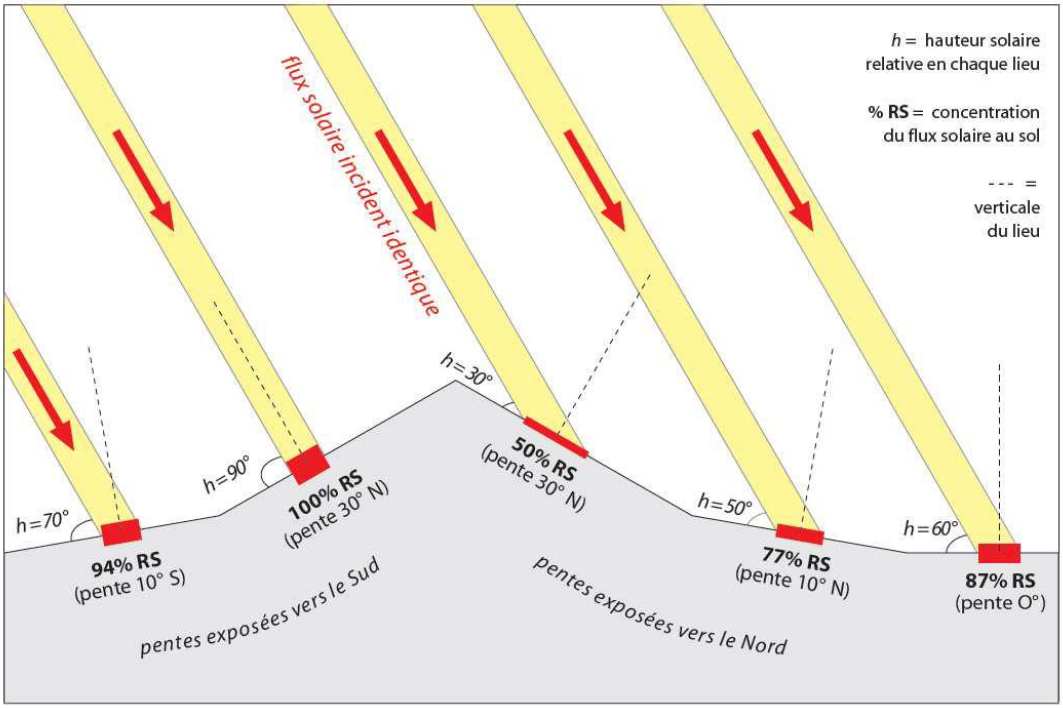
Le bilan hydrique à l'échelle de la forêt domaniale d'Ecouves a permis d'avoir une vue d'ensemble sur l'ensemble du climat sur la normale climatique avec une étude de cas de l'année 2020 pour permettre de comprendre le climat actuel. Il pose le cadre climatique de la forêt, dans laquelle est réalisée la recherche scientifique, en déterminant à partir des disponibilités et de la demande, les surplus d'eau et les carences en eau pour chaque mois de l'année.

Ce type de bilan hydrique ponctuel ne permet pas de définir précisément la tendance climatique sur la zone d'étude. La première limite et qu'il est « ponctuel » c'est-à-dire que l'on a connaissance du bilan hydrique qu'en un point donné et non une étendue géographique (terrain d'étude). Il ne prend pas en compte les paramètres géographiques comme la topographie, l'exposition du soleil au sein de la zone d'étude. De plus, le bilan hydrique a été établi par des données ISBA, qui sont des données spatialisées sur des mailles de 8 km par 8 km. Ces mailles sont trop grandes pour la zone d'étude.

L'objectif en ce qui concerne le calcul du bilan hydrique à fine échelle est de spatialiser en tous points différents présents sur la zone d'étude les zones de surplus hydrologiques, de déficits hydriques et équitables (là où il n'y a ni surplus ni déficits) en prenant en compte les conditions locales de la zone d'étude. Cette spatialisation s'effectuera à partir de la normale climatique (1981-2010) qui est plus représentative du climat qu'une seule année, par exemple 2020.
Ce calcul nécessite des étapes intermédiaires : le rayonnement solaire global pour le calcul de l'ETp (EvapoTranspiration Potentielle), le calcul de l'ETp par la formule de Turc ainsi que la spatialisation des précipitations à partir de la loi de la pluviosité. Ces étapes sont importantes pour permettre de spatialiser le bilan hydrique sur la totalité de la zone d'étude.

Dans cette partie, il sera présenté la méthodologie pour pouvoir spatialiser le bilan hydrique à fine résolution. Pour la méthodologie, c'est l'année 2020 qui a été utilisée comme exemple même si c'est la normale qui nous intéresse le plus. Ici, on est purement dans un point de vue méthodologique ce qui importe peu sur l'année utilisée.
Cette partie portera ensuite sur l'analyse de la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle ainsi que tous les résultats intermédiaires. Bien évidemment, les 12 mois ne seront pas analysés. C'est le mois de juillet qui a été choisi pour présenter finement les différents résultats. Une annexe sera jointe pour chaque étape intermédiaire et le bilan hydrique de l'ensemble des 12 mois. Ici, les données « raster » ont été harmonisées avec pour chaque mois la même valeur minimale et maximale. Cela permet de voir l'évolution au fil des mois.
Pour terminer une étude de cas sera faite sur l'année 2020 pour analyser le climat actuel ainsi que le possible climat futur qui attend les essences forestières de la zone d'étude.

Figure 36 : *Variation de la quantité d'énergie solaire disponible au niveau du sol par rapport à la topographie et l'exposition du terrain en fonction du soleil. (Cantat et al, 2009).*



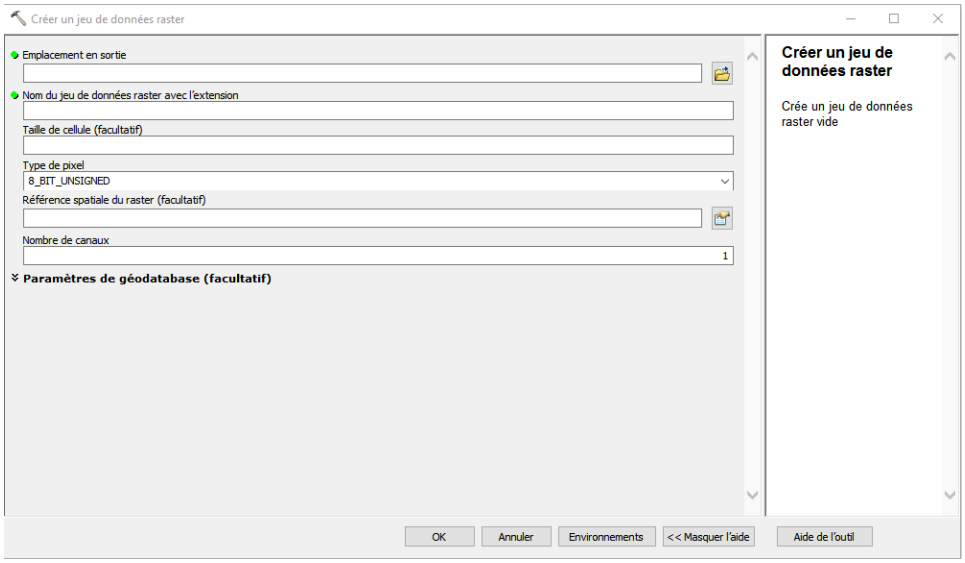
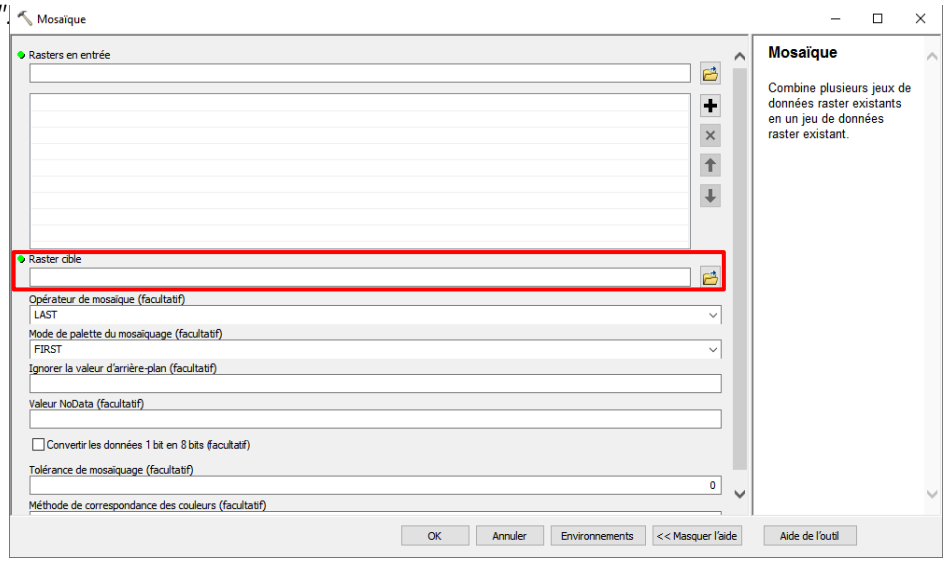


Figure 37 : *Outil "Jeu de données raster". (ArcGis).*

Figure 38 : *Outil "Mosaïque". (ArcGis).*



3.2 - Méthodologie du bilan hydrique spatialisé à fine échelle

3.2.1 - Le rayonnement solaire global sous ArcGis

La connaissance de la topographie représente le premier volet fondamental à prendre en compte pour obtenir une image crédible du bilan hydrique à échelle fine. Cela se réalise via la détermination du rayonnement solaire global (RSG) qui est le paramètre principal des phénomènes évapotranspiratoires.
Dans les stations météos, par exemple celle d'Alençon, « pour des questions d'homogénéisation des conditions de mesures, le rayonnement solaire est mesuré sur un plan horizontal. » (Cantat et al, 2009). Néanmoins, la topographie et l'exposition du terrain par rapport au soleil viennent faire varier la quantité d'énergie solaire disponible par unité de surface au niveau du sol (Figure 36). Le flux solaire n'a pas le même impact lorsque l'on est sur un adret (versant sud) où là l'intensité sera nettement plus importante (100 %) que lorsque que l'on est sur un ubac (50 %) à pente égale.

Aujourd'hui, grâce au développement de calculs puissants tels que ArcGis et grâce à la création des MNT (Modèle Numérique de Terrain) et MNA (Modèle Numérique d'Altitude), il est possible d'intégrer la topographie locale dans le calcul du bilan hydrique. La différence entre le MNT et le MNA est que le MNA prend en compte la hauteur des objets géographiques tels que les bâtiments et la végétation.

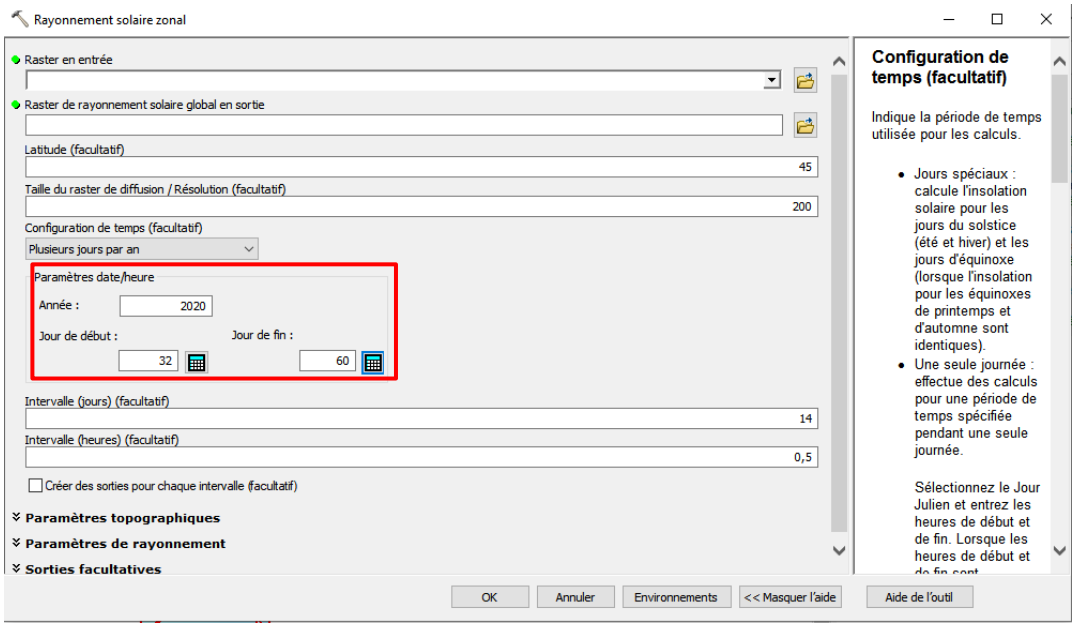
- Récupération de données raster (MNT) : Le calcul du rayonnement solaire global à partir de ArcGis nécessite un MNT ou MNA comme évoqué auparavant. Ici, ce sera le MNT, à une résolution de 5 m, qui sera utilisé car les données sont en open access contrairement aux MNA.

Pour réaliser le MNT, récupérer la BD Alti d'une résolution de 5 m du département de l'Orne. La BD Alti est disponible sur le site de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière). Ensuite, ouvrir le fichier « dalles.shp » dans le dossier « suppléments livraisons » de la BD Alti puis sélectionner les couches raster couvrant la zone d'étude (ici 2 couches).

- Création du MNT : Pour n'avoir qu'une seule couche, et plus deux comme c'est le cas ici, il est possible de combiner les couches entre elles pour former ce que l'on appelle en SIG une « mosaïque ». Une « mosaïque » est une combinaison ou fusion d'au moins deux images en un jeu de données raster existant.

Dans un premier temps, créer « un jeu de données raster » qui va créer un jeu de données vide nécessaire pour la suite de la combinaison des couches. Cet outil se trouve dans la ToolBox → Outils de gestion de données → Raster → Jeu de données raster → Créer un jeu de données raster (Figure 37).
Une fois le jeu de données créé, on peut terminer la fusion des images par l'outil « Mosaïque ». Cet outil se trouve dans la ToolBox → Outils de gestion de données → Raster → Jeu de données raster → Mosaïque (Figure 38). Le cadre rouge sur la Figure 38 montre l'endroit où doit figurer le jeu de données raster créer auparavant.

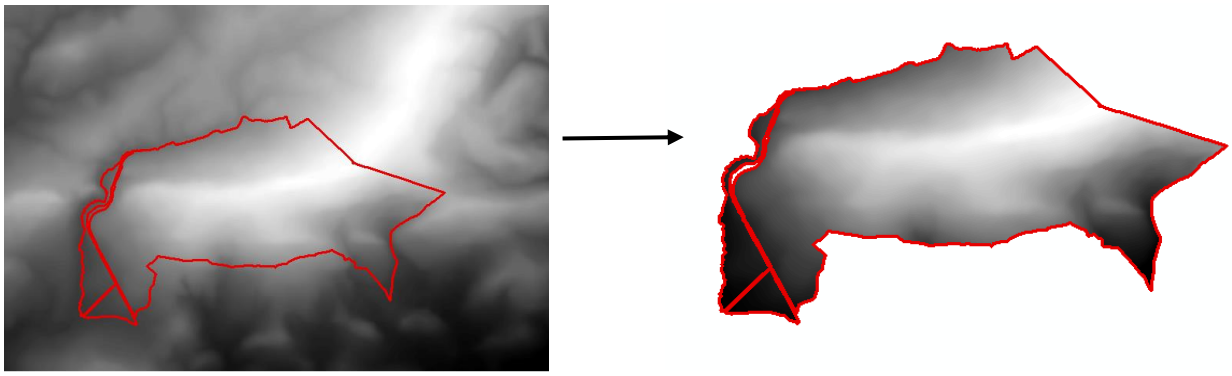
Figure 39 : *Outil « Rayonnement solaire global ». (ArcGis).*



Après avoir combiné les couches entres elles, il est possible de découper le MNT sur la zone d'étude à partir de l'outil « extraction par masque ». L'outil permet d'obtenir un résultat propre, ne dépassant pas les limites du terrain d'étude (Figure 40).

Pour découper un MNT, il faut le découper à partir d'un fichier vecteur qui est le contour du terrain d'étude. Ensuite on utilise l'outil « extraction par masque ». Cet outil se trouve dans la ToolBox → Spatial Analyst → Extraction par masque. L'utilisation de cet outil permet d'avoir le résultat présent ci-dessous. (Figure 40).

Figure 40 : *Principe de l'outil "Extraction par masque". (ArcGis).*



- Calcul du rayonnement solaire global (RSG) : Le calcul est une étape intermédiaire au calcul final du bilan hydrique spatialisé et il est réalisé à partir d'un algorithme développé par Rich et Fu (Rich et al, 1994 ; Fu et Rich, 2002).
  L'outil utilisé pour faire ce calcul est « le rayonnement solaire zonal » et permet à partir d'une surface raster de déterminer le RSG entrant pour une période donnée (un jour, quelques jours, un mois, un année) (Figure 39). Les données sont exprimées en Wh/m².

Cet outil se trouve dans la ToolBox → Spatial Analyst → Rayonnement solaire → Rayonnement solaire zonal (Figure 39).
Les paramètres de l'outil restent ceux imposés par ArcGis au départ mis à part le paramètre « configuration de temps » (encadré rouge Figure 39) qui permet de choisir la période de calcul. Dans le cas présent, il faut sélectionner « plusieurs jours par an » ce qui permet de calculer le rayonnement solaire pour une période spécifique de plusieurs jours par an.
Voulant un rayonnement solaire pour les mois de janvier à décembre, il suffit de mettre dans « jour de début » le premier du mois et dans « jour de fin » le dernier. Par exemple, pour le mois de janvier le jour de début sera le 1 et le jour de fin le 31.

L'outil proposé par ArcGis n'émet que des valeurs « théoriques » du rayonnement solaire pour un mois donné. Ces valeurs dépendent des données astronomiques prévisibles (hauteur solaire et durée du jour) et des données géographiques (pente et exposition). Les mesures de rayonnements solaires mesurées sur la station la plus proche, dépendent en plus d'une autre variable qui est la couverture nuageuse. Ces valeurs sont mesurées sur un espace plan et ne prennent donc pas en compte la topographie. On appellera ces données : « vraies » et servent de référence pour le calcul du rayonnement solaire.

Figure 41 *: Tableau des mesures « vraies » du rayonnement solaire à la station d'Alençon. (Météo France).*

Mois	*Rayonnement solaire mensuel (J/cm²)*
Janvier	9 940
Février	15 705
Mars	34 640
Avril	54 191
Mai	71 842
Juin	56 346
Juillet	67 910
Août	52 189
Septembre	41 786
Octobre	19 076
Novembre	12 069
Décembre	8 300,8

Figure 42 : *Problème de la valeur mesurée d'Alençon ne s'inscrivant pas dans l'intervalle du raster. (ArcGis).*

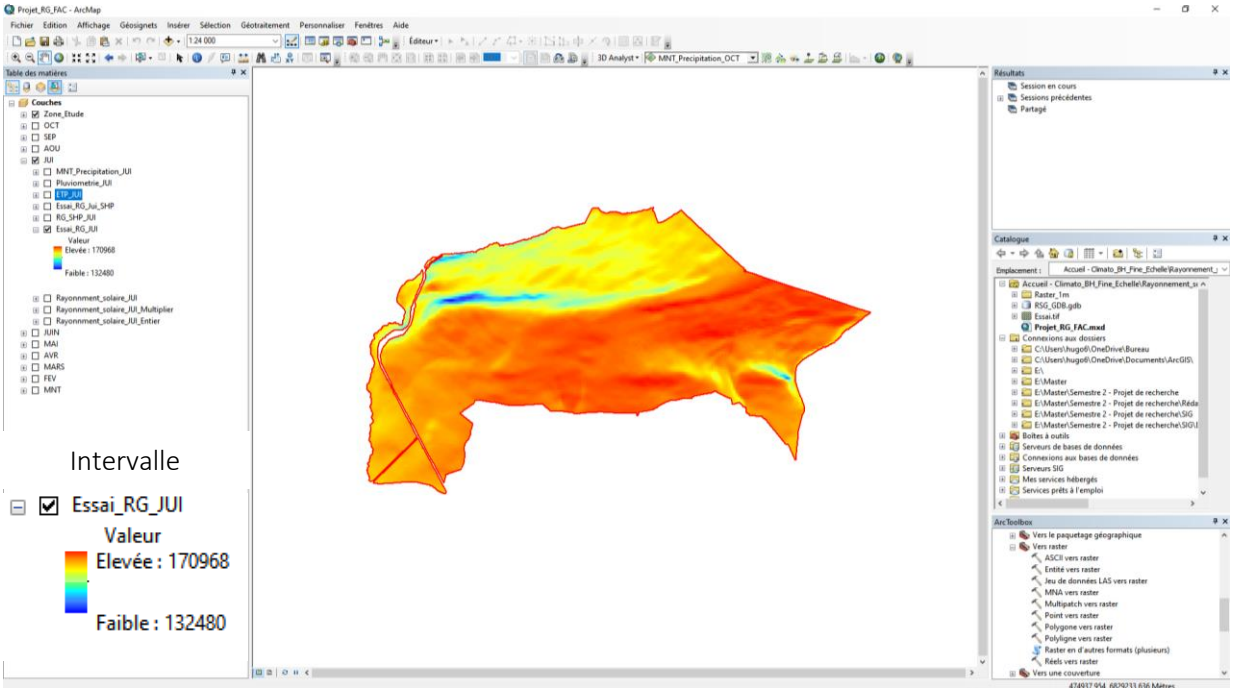


Figure 43 : *Tableau récapitulant pour chaque mois la transmittance utilisée et le cadrage de la valeur mesurée. (ArcGis).*

Mois	*Transmittance*	*Valeur max (Intervalle) en J/cm²*	*Valeur mesurée en J/cm²*	*Valeur min (Intervalle) en J/cm²*
Janvier	0,6	13 995,3	9 940	3 927,6
Février	0,6	24 000	15 705	7 547
Mars	0,6	44 780	34 640	21 251
Avril	0,6	61 487	54 191	39 235
Mai	0,62	80 009	71 842	62 142
Juin	0,52	64 463	56 346	51 663
Juillet	0,6	79 968	67 910	62 070
Août	0,6	68 113	52 189	46 345
Septembre	0,6	49 000	41 786	25 687
Octobre	0,6	30 831	19 076	11 028
Novembre	0,6	16 186,3	12 069	4 551,4
Décembre	0,62	11 023,9	8 300,8	3 042,9

L'objectif, ici, serait d'appliquer aux valeurs « théoriques », la valeur du rayonnement solaire mesuré à la station la plus proche qui est celle d'Alençon (Figure 41). Pour résumer, il conviendrait d'affecter à chaque point de grille le coefficient d'écart qu'il y a entre la valeur « théorique » pour un espace plan et la valeur « vraie » pour un même espace.
Voici un exemple : Si on a 100 unités de RSG théorique pour un espace plan, 70 unités pour un point de l'ubac et 150 unités pour un point de l'adret et que la valeur « vraie » de RSG sur un espace plan est de 120 unités, on a alors 84 unités sur l'ubac (120 * 70 %) et 180 unités sur l'adret (120 * 150 %).

Après plusieurs traitements SIG, un problème est apparu. C'est le fait que la mesure « vraie » provenant de la station d'Alençon, pour chaque mois, n'est pas prise en compte par l'intervalle que propose le raster du rayonnement solaire d'ArcGis.
Prenons un exemple avec le mois de juillet (Figure 42). Si on convertit l'intervalle du raster, car pour rappel les données issues d'ArcGis sont en Wh/m², on obtient 61 548 J/cm² comme valeur la plus élevée est 47 692 J/cm² comme valeur la plus basse (pour passer de Wh/m² à J/cm², multiplier par 0,36). Or la valeur donnée par la station d'Alençon pour le mois de juillet est de 67 910 J/cm² ce qui est au-dessus de l'intervalle.

Mais quand on modifie « la transmittance » dans « les paramètres de rayonnement » de l'outil on obtient de meilleurs résultats. La transmittance est la fraction du rayonnement traversant l'atmosphère (moyennée sur toutes les longueurs d'ondes). La valeur par défaut est de 0,5 pour des conditions de ciel dégagé. Pour le calcul, elle a été mise à 0,6 et cela permet d'avoir la valeur mesurée dans l'intervalle qui maintenant est de 78 968 J/cm² à 62 070 J/cm² pour juillet.

L'objectif de départ qui était d'affecter à chaque point de grille le coefficient d'écart qu'il y a entre la valeur « théorique » pour un espace plan et la valeur « vraie » pour un même espace est abandonné. Néanmoins dans une possible poursuite du sujet, l'idée peut être réalisée pour permettre d'apporter encore plus de finesse sur les données du rayonnement solaire.

Pour le mémoire de recherche, le but est de jouer avec le paramètre de « transmittance » pour chaque mois pour réussir à caser la valeur mesurée d'Alençon au centre de l'intervalle du raster. Cela veut dire que la valeur mesurée sera considérée comme étant la valeur « théorique » pour un espace plan.
La Figure 43 récapitule la transmittance utilisée pour chaque mois ainsi que le cadrage de la valeur mesurée par rapport aux valeurs min et max. On remarque que majoritairement, c'est une transmittance de 0,6 qui a été utilisée. Elle permet de bien centrer, pour ces mois, la valeur d'Alençon. Pour ce qui est des autres mois, une autre transmittance a été utilisée à savoir 0,62 et 0,52. Pour ces mois la transmittance a encore été modifiée car avec une transmittance de 0,6, la valeur mesurée n'était pas comprise dans l'intervalle proposé par ArcGis.

Figure 44 : *Tableau récapitulatif des températures mensuelles (2020) des points ISBA. (Hugo Fontaine).*

Mois	*Température (°C)*	*Mois*	*Température (°C)*	*Mois*	*Température (°C)*
Janvier	5,9	Mai	13,8	Septembre	16,9
Février	6,7	Juin	15,3	Octobre	10,5
Mars	6,5	Juillet	17,8	Novembre	9,2
Avril	12	Août	20,1	Décembre	5,7

3.2.2 - *Calcul de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETp)*

Le calcul de l'ETp sous ArcGis est la résultante du premier volet qui est de déterminer le rayonnement solaire global car son calcul dépend principalement des données du rayonnement solaire.

3.2.2.1 - Définition/Formule

Selon Bastien et Gauberville (2011), l'évapotranspiration générale « combine les pertes d'eau par évaporation (processus physique) et par transpiration d'un végétal (processus biologique). Elle s'exprime en millimètres (mm). Cette évapotranspiration dépend du rayonnement net, du déficit de saturation de l'air, de la disponibilité en eau et de l'ensemble des résistances qui s'opposent à son transfert depuis les sites de vaporisation jusqu'à l'air libre (résistance de l'air, du couvert végétal, des stomates, etc) ».
Au sein de l'évapotranspiration générale, on peut définir 3 valeurs à savoir l'évapotranspiration potentielle (ETp), l'évapotranspiration maximale (ETm) et l'évapotranspiration réelle (ETr). Pour le calcul du bilan hydrique, c'est l'ETp qui est prise en compte car elle est considérée comme la « demande » dans le calcul général du bilan hydrique. On s'attardera uniquement sur cette valeur.
L'évapotranspiration potentielle (ETp) « correspond à la valeur atteinte pour une disponibilité en eau maximale en l'absence de résistance. Cette ETp ne dépend que des facteurs climatiques liés au bilan d'énergie et de la résistance de l'air au-dessus de la surface. » (Bastien et Gauberville, 2011).

Pour calculer l'ETp, il existe deux formules à savoir la formule de Thornthwaite qui ne dépend que de la température et celle de Turc qui dépend des températures et du rayonnement solaire. Le choix s'est porté sur la formule de Turc car celle de Thornthwaite est plus ou moins valable en fonction de la zone climatique (régions humides les résultats sont satisfaisant mais pas en régions arides). Le calcul de l'ETp, selon Turc, pour un point donné s'effectue de la manière suivante :

$$ETp\ (mm) = k * (t_m / t_m+15) * (Ig + 50) * (1 + (50-hr / 70))$$ → source (Bonnet et al, 1970) où

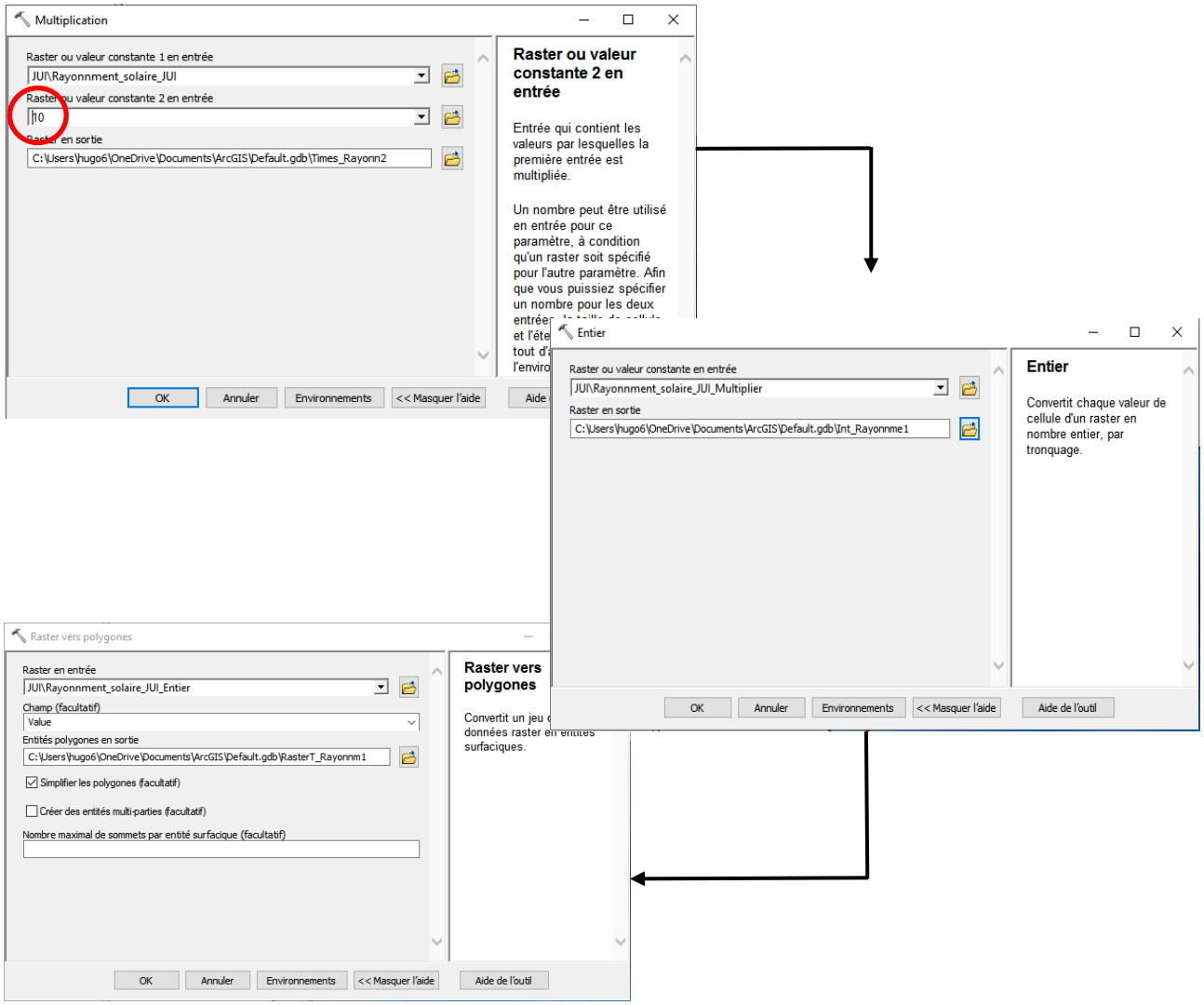
k = Une constante : 0,37 pour le mois de février et 0,4 pour les autres mois
t_m = Température moyenne mensuelle (°C)
Ig = Rayonnement solaire global en calories/cm² (cal/cm²)
hr = Humidité relative de l'air (%) pendant le mois considéré

Le facteur (1 + (50-hr / 70)) n'intervient que dans les régions ou pays semi-désertique où hr < 50. Ce n'est pas le cas en région Normandie et il n'interviendra pas dans le calcul.

3.2.2.2 - Données utilisées pour le calcul

Pour les mesures du rayonnement solaire, il suffit de prendre celles calculées par l'outil « rayonnement solaire zonal » des mois de janvier à décembre 2020. En ce qui concerne les données sur les températures, ce sont les moyennes mensuelles des 6 points ISBA qui couvrent la forêt domaniale d'Ecouves. La Figure 44 reprend les températures moyennes de janvier à décembre.

Figure 45 : *Cheminement pour convertir un raster de type "float" en fichier vectoriel. (ArcGis).*



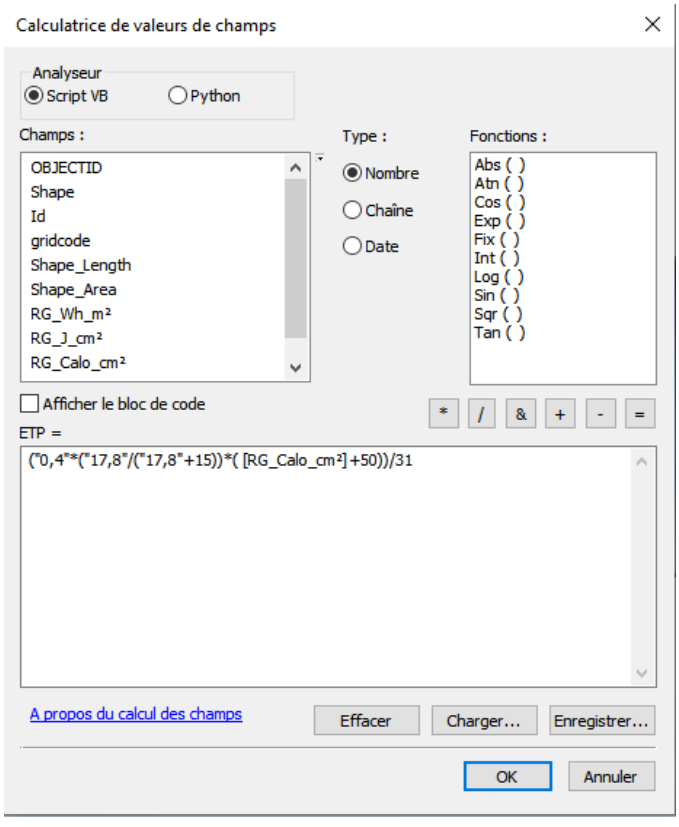


Figure 46 : *Exemple avec le mois de juillet pour le calcul de l'ETp. (ArcGis).*

3.2.2.3 - Méthodologie pour le calcul de l'ETp sous ArcGis

Pour effectuer le calcul de l'ETp sous ArcGis, il est nécessaire de partir des fichiers rasters du rayonnement solaire et de les convertir en fichiers vectoriels pour avoir une table attributaire avec toutes les valeurs de rayonnements solaires. Ces étapes doivent être réalisées pour chaque mois.

Les rasters du rayonnement solaire sont de type « float » c'est-à-dire avec des valeurs à virgules flottantes. La conversion raster vers un fichier vecteur polygone ne peut donc pas se faire car il faut que le raster soit de type « integer » c'est-à-dire avec des valeurs entières (par exemple 12, 25, 120, 8536, etc). Pour pouvoir faire la conversion, il est nécessaire de traiter préalablement le raster du rayonnement solaire.

Utiliser l'outil « Multiplier » qui se trouve dans la ToolBox → Spatial Analyst → Mathématique → Multiplication. (Figure 45). Cet outil permet de multiplier le raster de rayonnement par une constante en fonction de la précision que l'on veut. Ici, la constante utilisé est 10 (rond rouge Figure 45).

Le résultat obtenu précédemment doit maintenant être transformé en raster « integer » (de type « entier »). Cela veut dire que tous les chiffres après la virgule seront supprimés pour ne garder que des valeurs entières. L'outil utilisé est « Entier » qui se trouve dans la ToolBox → Spatial Analyst → Mathématique → Entier (Figure 45).

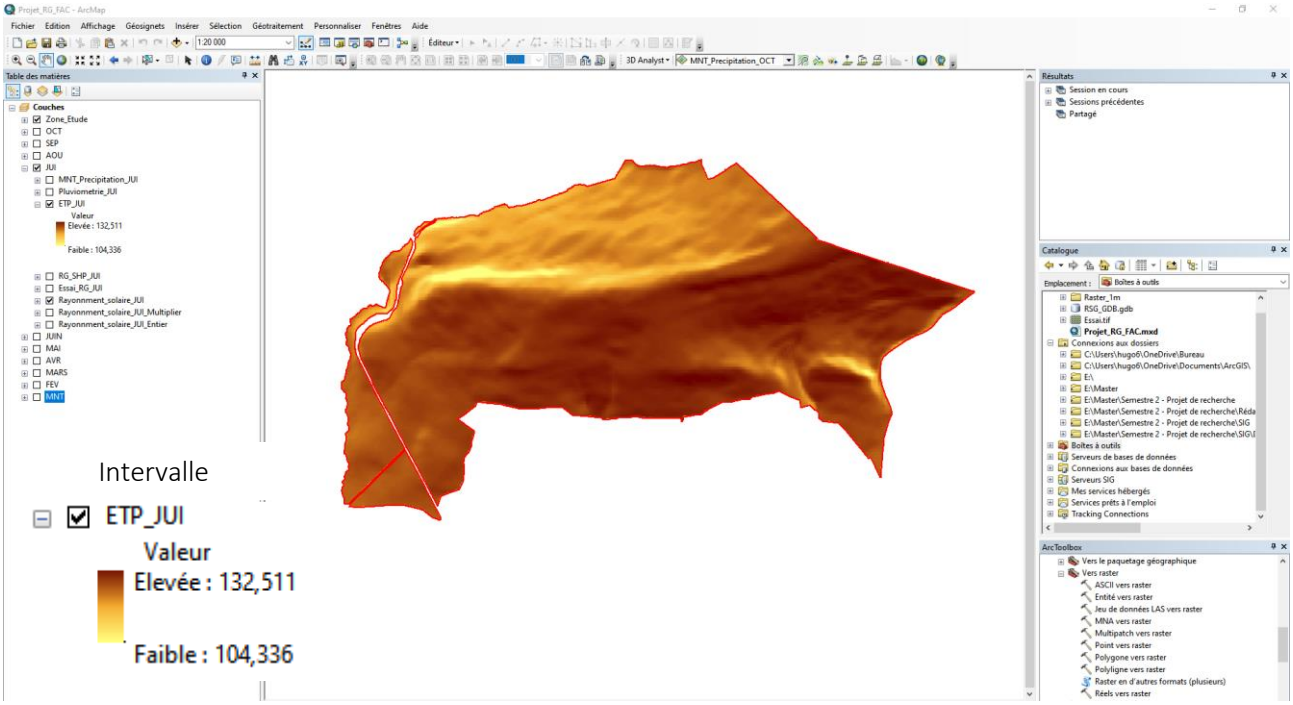
Maintenant que le raster est de type « integer » on peut effectuer la conversion avec l'outil « Raster vers polygones ». Il se trouve dans la ToolBox → Outils de conversion → A partir d'un raster → Raster vers polygones. (Figure 45),

Dans le nouvel objet polygone, ajouter un champ puis diviser les valeurs de départ par la constante (10) pour retrouver les données du rayonnement solaire.

Une fois les fichiers vectoriels générés pour chaque mois, on peut passer au calcul de l'ETp. Avant cela, des conversions sont nécessaires. Pour rappel, les données du rayonnement solaire provenant d'ArcGis sont exprimées en Wh/m². Il faut alors faire une première conversion pour passer de Wh/m² en J/cm² en multipliant les valeurs par 0,36. Puis une seconde pour passer de J/cm² en Cal/cm² en divisant les mesures par 4,184 car le rayonnement est exprimé en Cal/cm² dans la formule de Turc.

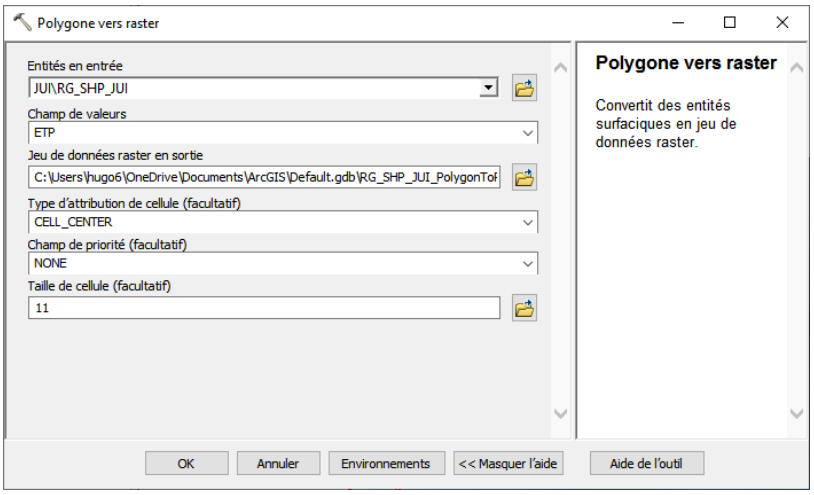
Pour le calcul de l'ETp, il suffit d'ajouter un nouveau champ puis dans la « calculatrice de champs » rentrer la formule de Turc précédemment évoqué (*cf. 3.2.2.1 - Définition/Formule*). Un exemple de calcul est présenté en Figure 46. Il ne faut pas oublier de diviser le calcul de l'ETp par le nombre de jours dans le mois car le rayonnement solaire est exprimé au mois, sinon cela produira des valeurs absurdes.

Figure 47 : *Type de résultat obtenu après la rastérisation des calculs de l'ETp (exemple avec le mois de juillet). (ArcGis).*



Les calculs terminés, on peut à nouveau faire la conversion mais cette fois-ci dans l'autre sens de polygone vers raster. Cela permet d'avoir un rendu rastérisé des calculs de l'ETp. Une fois la conversion faite, on obtient ce type de résultat (Figure 47) avec l'intervalle comprenant toutes les valeurs de l'ETp pour chaque mois, ici le mois de juillet.

Figure 48 : *Outil "Polygones vers raster". (ArcGis).*



L'outil utilisé est « polygones vers raster » qui se trouve dans la ToolBox → Outils de conversion → Vers raster → Polygones vers raster (Figure 48). Ne pas oublier de choisir dans le paramètre « champs de valeurs », le champ « ETp » pour que la conversion se fasse bien à partir du calcul de l'ETp.

3.2.2.4 - Perspective

La demande évapo-transpiratoire est principalement conditionnée par quatre paramètres à savoir le rayonnement solaire global, la température, l'humidité relative de l'air et le vent. En Normandie, la formule de Turc donne d'assez bons résultats car le vent et l'air sont porteur de pas mal d'humidité. En revanche, l'humidité relative et le vent serait à prendre compte dans une région chaude, sèche et venteuse comme la vallée du Rhône.

La formule de Turc s'appuie sur les mesures du rayonnement solaire et de la température. Pour le calcul de l'ETp, dans le mémoire de recherche, une température moyenne mensuelle a été prise en considération pour effectuer les calculs. Dans ce cas-là, prendre une même valeur de la température pour l'ensemble de la zone d'étude réduit un peu les différenciations spatiales liées à l'altitude (dénivelé de 200 m entre le bas et le haut du secteur).

Par contre, en montagne une même valeur de la température peut occasionner des différences sur les résultats de l'ETp que si on prenait des températures spatialisées par rapport à l'altitude. Il est alors plus judicieux de les spatialiser pour un secteur montagneux à partir d'un gradient vertical à 0,6 °C. Puis ensuite d'intersecter les données du rayonnement solaire avec celles sur les températures pour avoir pour chaque mesure de RSG, une température en adéquation avec l'altitude.

Ce type de traitement peut également se réaliser sur des secteurs non montagneux comme par exemple la zone d'étude de ce mémoire de recherche. Cela va permettre de gagner de la précision sur les résultats. Dans une possible poursuite de ce travail, ce traitement pourra être réalisé.

Figure 49 : *Tableau récapitulatif des précipitations mensuelles (2020) des points ISBA. (Hugo Fontaine).*

Mois	*Précipitations (mm)*	*Mois*	*Précipitations (mm)*	*Mois*	*Précipitations (mm)*
Janvier	89,3	Mai	18,9	Septembre	37,5
Février	115,3	Juin	67	Octobre	121,7
Mars	63,6	Juillet	22,7	Novembre	36,9
Avril	29,1	Août	53,5	Décembre	173,9

3.2.3 - Spatialisation des données sur les précipitations

La spatialisation des précipitations représente le second volet très important à prendre en compte dans l'objectif d'obtenir à la fin une image crédible du bilan hydrique spatialisé à échelle fine (la zone d'étude sur la forêt d'Ecouves).
Contrairement à l'ETp qui représente les besoins en eau (la demande) dans le calcul du bilan hydrique, les précipitations correspondent aux disponibilités en eau pour une plante, c'est-à-dire l'offre au même titre que la réserve utile. Spatialiser les précipitations permettra dans un premier temps de représenter le bilan climatique (P – ETp) puis le bilan hydrique du terrain d'étude.

3.2.3.1 - Loi de pluviosité

Spatialiser les pluies à échelle fine en fonction du relief est réalisable selon une loi simple d'augmentation des précipitations avec l'altitude (effet orographique) qui se nomme la loi de pluviosité. Cette loi dit que plus on monte en altitude plus les précipitations sont importantes et inversement.

Il s'agit, en réalité, d'une règle de trois élémentaire mais suffisante pour prendre en compte la diversité spatiale des pluies à échelle fine. Elle s'établie à partir d'un coefficient que l'on nomme « gradient vertical des précipitations ». Il varie entre 50 et 100 mm/an pour une élévation de l'altitude de 100 m. Par exemple s'il pleut 800 mm/an à Alençon à 140 m d'altitude, il doit pleuvoir de l'ordre des 1 000 mm/an à 340 m sur les hauteurs voisines.
Le gradient vertical des précipitations est alors important à déterminer car il permet de savoir combien de précipitations (mm) on a en plus ou en moins par rapport à la normale pour une élévation ou une baisse de l'altitude de 100 m.

Pour le mémoire de recherche, le gradient vertical a été calculé entre deux stations présentes au sein du PNR Normandie-Maine et représentatives du climat de la zone d'étude à savoir celle d'Alençon (143 m) et celle de Pré-en-Pail (277 m). Sur la station d'Alençon, il pleut annuellement 704,5 mm/an et sur celle de Pré-en-Pail il tombe 850,9 mm/an.
Entre les deux stations on a une différence de + 134 m pour l'altitude et de + 146,4 mm. En appliquant la règle de trois élémentaire, les précipitations sont de 109,3 mm pour une élévation de 100 m ([100 * 146,4] / 134 = 109,3 mm). Cela veut dire que le gradient vertical annuel est de 109,3 mm/an pour 100 m soit 9,1 mm pour 100 m par mois.

3.2.3.2 - Données utilisées pour la spatialisation

Pour la spatialisation des pluies, il est nécessaire de partir d'une normale pour pouvoir ensuite appliquer le gradient vertical calculé auparavant (*cf. 3.2.3.1 - Loi de pluviosité*). Les données sont les moyennes mensuelles des 6 points ISBA. La Figure 49 reprend les précipitations moyennes du mois de janvier à décembre.

Le choix s'est porté sur les données moyennes des points ISBA car les valeurs de chaque point ISBA intègre avec un pas de temps court la variabilité d'un jour à l'autre des conditions pluviométriques en fonction du relief et de la provenance des flux qui génèrent des positions d'abri/exposition variables.

Le gradient vertical des précipitations fonctionne par rapport à l'altitude. Il est alors nécessaire de déterminer l'altitude moyenne des données sur les précipitations mensuelles à partir de l'altitude des 6 points ISBA. L'altitude moyenne définie est de 270 m.
Cela veut dire qu'à 270 m, pour le mois de janvier 2020 il a plu 89,3 mm, à 370 m il a plu 98,4 mm (89,3 + 9,1 mm de gradient vertical) et à 170 m il a plu 80,2 mm (89,3 – 9,1 mm de gradient vertical). Mais qu'en est-il à 324 m d'altitude ?
On a une différence de + 54 m entre 270 et 324 m d'altitude. On sait que le gradient vertical mensuel est de 9,1 mm pour 100 m. Il suffit d'appliquer une règle de 3 : (54 m * 9,1 mm) / 100 = 4,9 mm, ce qui veut dire que pour une différence d'altitude de 54 m, il pleut soit + 4,9 mm si on monte ou – 4,9 mm si on descend. Dans le cas présent on monte en altitude (324 m), donc à 324 m il a plu pour le mois de janvier 2020, 93,4 mm (89,3 mm + 4,9 mm).

3.2.3.3 - Automatisation sous ArcGis

Pour pouvoir spatialiser les précipitations en fonction de l'altitude, il faut partir d'un fichier vecteur possédant les altitudes de la zone d'étude. En SIG, seuls les MNT semblent être la meilleure source d'information pour connaitre l'altitude sur un territoire donné.
Mais le problème du MNT, c'est que le fichier est de type « Raster », c'est-à-dire une grille composée de cellules organisées en lignes et en colonnes où chaque point de grille est un pixel unique. Pour résumer, le raster est une image numérique composée de pixels ne possédant pas de table attributaire.

Il est alors nécessaire de convertir, sous ArcGis, le raster MNT 5m (celui utilisé pour le traitement du rayonnement solaire) en fichier vectoriel pour obtenir une table attributaire avec pour chaque point une altitude. Cela permettra ensuite de faire la règle de 3 pour attribuer à chaque altitude, les précipitations (mm).
Les traitements pour la conversion sont les mêmes utilisés que pour la conversion des rasters pour le calcul de l'ETp, car le raster MNT est également un raster de type « float ». (*cf. 3.2.2.3 - Méthodologie pour le calcul de l'ETp sous ArcGis*). Il suffit de faire les traitements dans l'ordre suivant : Multiplier → Entier → Raster vers polygones → Fusionner.
Le dernier traitement « fusionner » peut s'avérer utile si on a une table attributaire avec un nombre de lignes conséquent : pour le cas + de 300 000 lignes. En effet, fusionner par altitude permet de faire un regroupement de tous les points ayant la même altitude ce qui permet de réduire le nombre de lignes : après fusion on est à 190 lignes.

	A	B	C	D	E
1	OBJECTID	Alti	Ecart	Loi de Pluviosité	Précipitation (mm)
2	1	219	51	-4,64	84,66
3	2	220	50	-4,55	84,75
4	3	221	49	-4,46	84,84
5	4	222	48	-4,37	84,93
6	5	223	47	-4,28	85,02
7	6	224	46	-4,19	85,11
8	7	225	45	-4,10	85,21
9	8	226	44	-4,00	85,30
10	9	227	43	-3,91	85,39
11	10	228	42	-3,82	85,48
12	11	229	41	-3,73	85,57
13	12	230	40	-3,64	85,66
14	13	231	39	-3,55	85,75
15	14	232	38	-3,46	85,84
16	15	233	37	-3,37	85,93
17	16	234	36	-3,28	86,02
18	17	235	35	-3,19	86,12
19	18	236	34	-3,09	86,21
20	19	237	33	-3,00	86,30
21	20	238	32	-2,91	86,39
22	21	239	31	-2,82	86,48
23	22	240	30	-2,73	86,57
24	23	241	29	-2,64	86,66
25	24	242	28	-2,55	86,75
26	25	243	27	-2,46	86,84
27	26	244	26	-2,37	86,93
28	27	245	25	-2,28	87,03
29	28	246	24	-2,18	87,12
30	29	247	23	-2,09	87,21
31	30	248	22	-2,00	87,30
32	31	249	21	-1,91	87,39
33	32	250	20	-1,82	87,48
34	33	251	19	-1,73	87,57
35	34	252	18	-1,64	87,66
36	35	253	17	-1,55	87,75
37	36	254	16	-1,46	87,84
38	37	255	15	-1,37	87,94
39	38	256	14	-1,27	88,03
40	39	257	13	-1,18	88,12
41	40	258	12	-1,09	88,21
42	41	259	11	-1,00	88,30
43	42	260	10	-0,91	88,39
44	43	261	9	-0,82	88,48
45	44	262	8	-0,73	88,57
46	45	263	7	-0,64	88,66
47	46	264	6	-0,55	88,75
48	47	265	5	-0,46	88,85
49	48	266	4	-0,36	88,94
50	49	267	3	-0,27	89,03
51	50	268	2	-0,18	89,12
52	51	269	1	-0,09	89,21
53	52	270	0	9,10	89,30
54	53	271	-1	0,09	89,39
55	54	272	-2	0,18	89,48
56	55	273	-3	0,27	89,57

Figure 50 : *Fichier « Excel » type pour les calculs de précipitations en fonction de l'altitude. Exemple avec le mois de janvier. (Hugo Fontaine).*

Une fois la conversion faite, il suffit d'exporter la table attributaire en fichier « Excel » pour ensuite automatiser les calculs de janvier à décembre. La Figure 50 représente le fichier « Excel » type utilisé pour chaque mois pour calculer les précipitations. Initialement le fichier issu de ArcGis ne se présente qu'avec les deux premières colonnes avec un champ « id » et un champ « altitude ». On observe bien sur la Figure 50, la normale à 270 m d'altitude qui est de 89,3 mm pour le mois de janvier. Au niveau du calcul, il a été effectué en trois étapes puis automatisé pour toutes les lignes et chaque mois :

- Calcul de l'écart entre la normale à 270 m et les autres altitudes de la zone d'étude → exemple pour l'altitude 219 m → 270 m – 219 m = 51 m,
- La règle de 3 (loi de pluviosité) consiste à mesurer combien de précipitations en plus ou en moins il y a pour une altitude donnée → exemple pour l'altitude 219 m → (- (écart * 100) / le gradient vertical) soit (– (51 m * 100) / 9,1 mm) = - 4,64 mm → On perd 4,64 mm entre 270 m et 219 m.
- Calcul des précipitations propre à chaque altitude → exemple pour 219 m → 115,3 mm + (- 4,64 mm) = 110,66 mm.

Les calculs effectués, il suffit ensuite de joindre au fichier vectoriel MNT préalablement convertit, le fichier « Excel » ce qui permet d'obtenir pour chaque altitude, une valeur de P en millimètres. La jointure exécutée, on peut à nouveau faire une conversion polygone vers raster. Cela permet d'avoir un rendu rastérisé des valeurs de précipitations (Figure 51), ici pour le mois de juillet.

Figure 51 : *Type de résultat obtenu après la rastérisation des calculs des précipitations (exemple avec le mois de juillet). (ArcGis).*

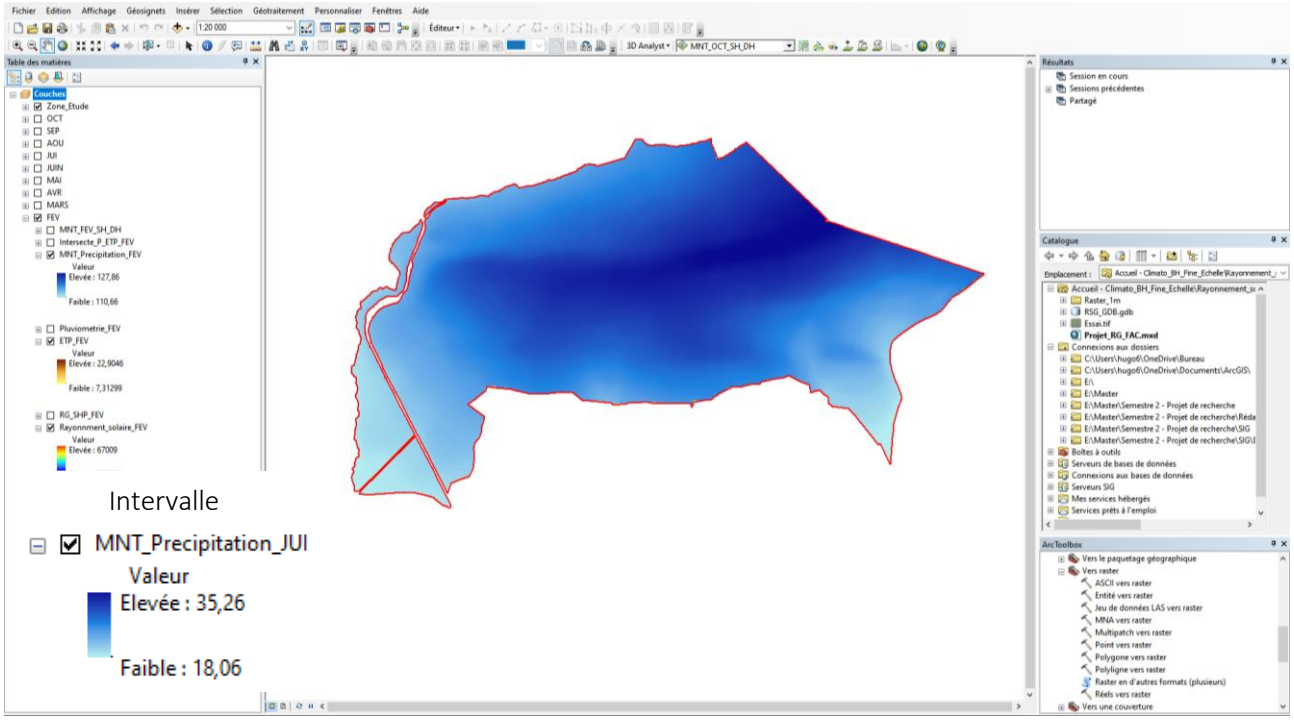


Figure 52 : *Outil « Intersecter». (ArcGis).*

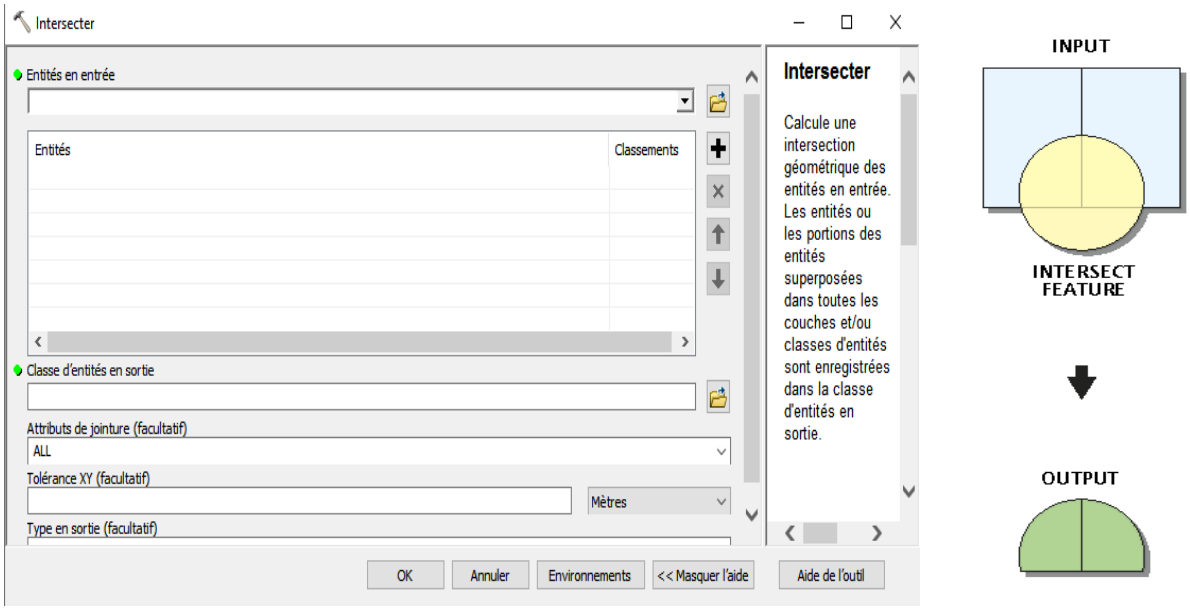
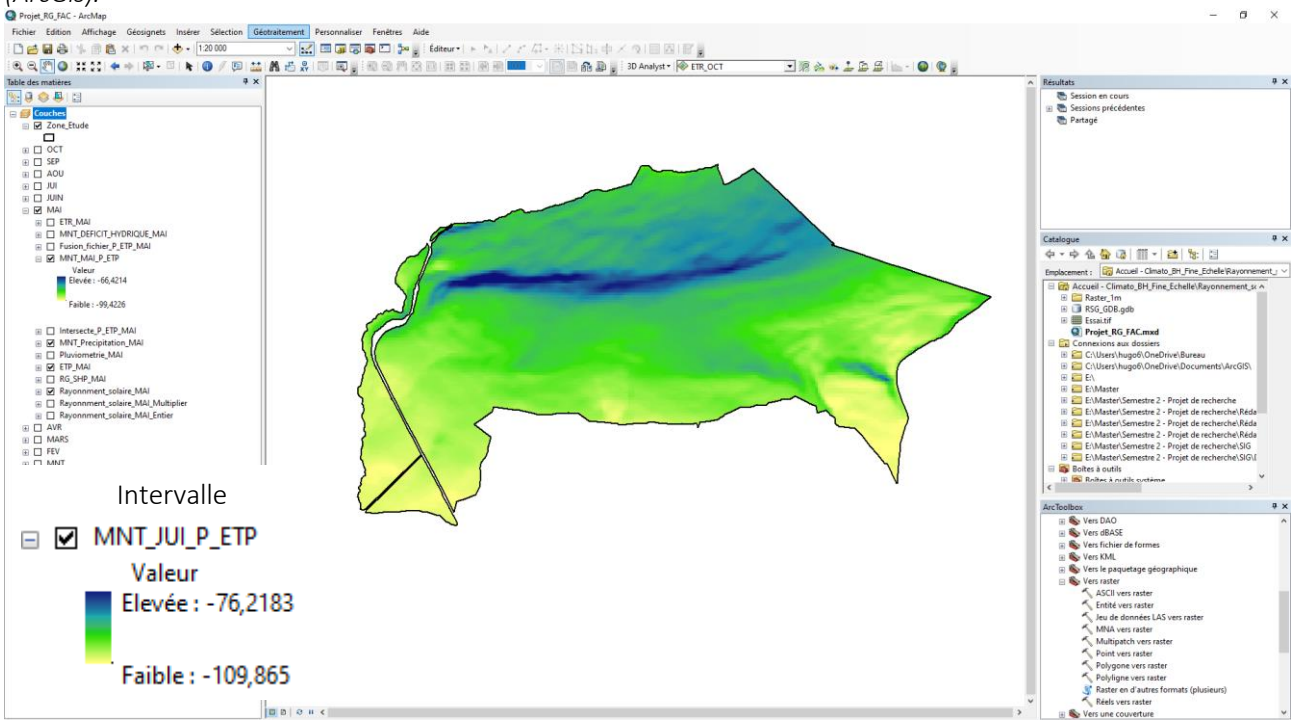


Figure 53 : *Type de résultat obtenu après la rastérisation des calculs de P-ETp (exemple avec le mois de juillet). (ArcGis).*



3.2.4 - Spatialisation et rastérisation du bilan hydrique à fine échelle

Maintenant que l'offre (précipitation) et la demande (ETp) sont mesurées et spatialisées à fine échelle on peut passer à la spatialisation et la rastérisation du bilan hydrique sur l'ensemble de la zone d'étude. Ce traitement est découpé en deux étapes : le bilan climatique et le bilan hydrique.

3.2.4.1 - Calcul du bilan climatique à fine échelle

Le calcul du bilan climatique est la première étape dans la spatialisation du bilan hydrique général. Il représente la quantité de pluie disponible pour les plantes, une fois les besoins en évaporation et en transpiration satisfaits. Le bilan climatique ne dépend que des données climatiques, P et ETp, et est calculé par la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETp).

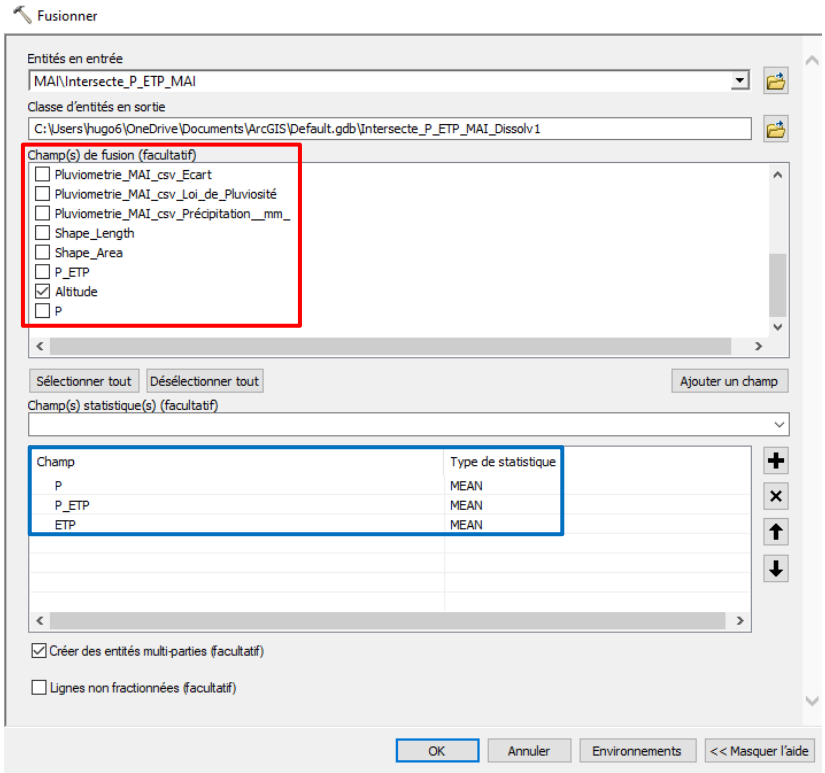
Le calcul P-ETp permet de mettre en éveil, de façon amplifié, les zones de surplus hydrologiques et de déficits hydriques sur une surface déterminée. Voici la méthodologie sous ArcGis permettant de définir pour chaque mois le bilan hydrique climatique :

Utiliser l'outil « intersecter » qui permet de calculer une intersection entre plusieurs entités en entrées (Figure 52). Les données d'ETp (mm) et de P (mm) sont dans deux tables attributaires différentes et il faut donc les regrouper.
L'outil se trouve dans la ToolBox → Outils d'Analyse → Superposition → Intersecter (Figure 52). Dans le paramètre « entités en entrée » mettre les fichiers dans l'ordre avec en premier celui comprenant l'ETp et ensuite celui avec les précipitations. Dans cet ordre, l'intersecte se fera de la manière suivante : pour chaque valeur d'ETp, une valeur de P sera assimilée.

Une fois « l'intersecte » réalisé, on peut maintenant faire le calcul P-ETp en ajoutant un nouveau champ, puis dans la « calculatrice de champs » rentrer la formule. Le calcul réalisé, on peut maintenant faire une conversion pour avoir un rendu rastérisé des valeurs de P-ETp. L'outil utilisé est « polygones vers raster » (Figure 48). La rastérisation permet d'obtenir ce type de résultat (Figure 53) pour chaque mois, ici le mois de juillet. Les valeurs du calcul P-ETp sont négatives, montrant ici un déficit hydrique.

Le calcul du bilan climatique permet une estimation très simplifiée de l'eau disponible pour les plantes ou les essences forestières. Le calcul ne prend pas en compte plusieurs paramètres tels que la Réserve Utile Maximale (RUM), élément important jouant un rôle dans le calcul du bilan hydrique.
Le bilan climatique exagère par rapport à la réalité les surplus hydrologiques et déficits hydriques. Tandis qu'avec la prise en compte de la RUM dans le calcul, elle permet d'atténuer, les déficits hydriques car les essences forestières sollicitent la réserve utile, c'est-à-dire qu'elles pompent de l'eau pour se nourrir.

Figure 54 : *Outil "Fusionner". (ArcGis).*



3.2.4.2 - Calcul du bilan hydrique à fine échelle

Contrairement au bilan climatique, le bilan hydrique va permettre d'insérer dans l'équation la Réserve Utile Maximale (RUM) qui joue beaucoup dans le calcul général que ce soit quand elle est sollicitée par les plantes (limite les déficits) ou quand elle est reconstituée (pas de surplus qui se met en place). Ce calcul est l'aboutissement final de tous les traitements et calculs précédents.
La spatialisation du bilan hydrique à fine résolution va permettre de faire ressortir les zones de surplus hydrologiques et de déficits hydriques. Pour les surplus, ils pourront servir dans une possible poursuite de la recherche pour étudier l'écoulement des eaux sur la zone d'étude. Cette étude sera évoquée dans les perspectives/conclusions du mémoire. Tandis que pour les déficits, le calcul permet de localiser précisément les endroits où ils sont les plus marqués pour ensuite voir si les essences sont ou non encore en stations.

On va pouvoir passer à l'explication de la méthode employée pour le calcul du bilan hydrique et sa spatialisation sur la zone d'étude.

- **Récupération des données et traitements préalables (P et ETp) :** Pour le calcul du bilan hydrique, il est nécessaire d'avoir les données P et ETp, les températures (T) n'interviennent pas dans le calcul et ne sont que facultatives.
  Le calcul P-ETp (bilan climatique) a déjà permis de regrouper les donnée P et ETp via l'outil « intersecter ». Cela était nécessaire pour que le calcul puisse se réaliser. Pour le calcul du bilan hydrique, il suffit alors de récupérer ce fichier vecteur dans lequel pour chaque mesure d'ETp, une valeur P est assimilée.

  Des traitements préalables ont tout de même dû être réalisés pour rendre le fichier plus compréhensible et facile dans la manipulation des formules mathématiques. Pour ce type de couche shapefile, la table attributaire est composée de plus de 300 000 champs, nombre relativement important. Un tel nombre permet d'avoir plus de précision mais est sujet à des risques fréquents d'erreurs de calculs pouvant fausser les résultats.

Pour ce cas-là, l'outil « fusionner » a été utilisé pour réduire le nombre de champs. La table attributaire étant composée de la colonne « altitude », une « fusion » a été effectuée en fonction de l'altitude réduisant le nombre de lignes à 190 (encadré rouge Figure 54).
Les moyennes des colonnes « P », « ETp » et « P-ETp » ont été réalisées pour avoir pour chaque altitude les données nécessaires pour le calcul du bilan hydrique (encadré bleu Figure 54).

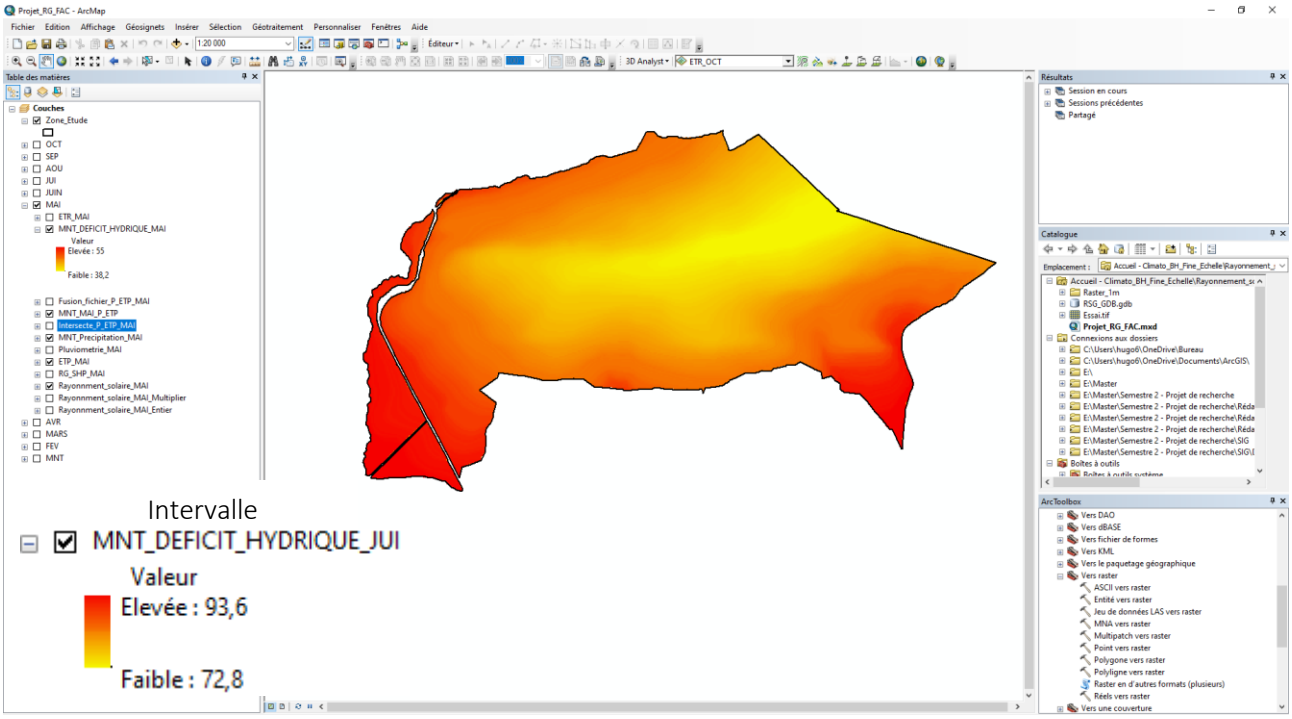
Figure 55 : *Récapitulatif des formules utilisées pour le calcul du bilan hydrique à fine échelle. (GEOPHEN, 2011).*

RU maximale	**RUx**	RU maximale (attention : case figée car référence)
RU disponible sol *	**RU**	arrondi (si (P - ETP < 0 ; RU avant * exp ((P - ETP) / RUx) ; si (**RU avant** + P - ETP < RUx ; **RU avant** + P - ETP ; RUx)) ; 1)
changement de RU	**CHRU**	RU - **RU avant**
ETR	**ETR**	si (P - ETP < 0 ; P - CHRU ; ETP)
Dédicit hydrique D	**D**	ETP - ETR
Reconstitution RU	**RRU**	RU + P - ETR - CHRU
Surplus hydro S	**S**	si (RRU >= RUx ; RRu - RUx ; 0)
Ecoulement superficiel Q	**Q**	arrondi (((a * S) + (1 - a) * **Q avant**) ; 1)

Figure 56 : *Fichier « Excel » type des calculs du bilan hydrique en fonction de l'altitude. (Hugo Fontaine).*

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	OBJECTID	Altitude	P-ETP	P	ETP	Ru_Avant_AVRIL	Ecoulement_superficiel_Q_Avant_AVRIL	Ru disponible sol	Chgt de RU	ETR	Déficit hydrique D	Reconstitution RU	Surplus hydro S	Ecoulement superficiel Q
2	1	219	-97,9	14,3	112,2	77,2	17,4	34,1	-43,1	57,4	54,8	34,1	0	7
3	2	220	-97,7	14,4	112,1	77,3	17,4	34,2	-43,1	57,5	54,6	34,2	0	7
4	3	221	-97,5	14,4	111,9	77,5	17,5	34,4	-43,1	57,5	54,4	34,4	0	7
5	4	222	-97,5	14,5	112,0	77,5	17,5	34,4	-43,1	57,6	54,4	34,4	0	7
6	5	223	-97,7	14,6	112,3	77,4	17,5	34,3	-43,1	57,7	54,6	34,3	0	7
7	6	224	-98,0	14,7	112,7	77,1	17,4	34,1	-43	57,7	55,0	34,1	0	7
8	7	225	-97,4	14,8	112,2	77,6	17,5	34,5	-43,1	57,9	54,3	34,5	0	7
9	8	226	-97,3	14,9	112,2	77,6	17,6	34,5	-43,1	58,0	54,2	34,5	0	7
10	9	227	-97,3	15,0	112,3	77,6	17,6	34,5	-43,1	58,1	54,2	34,5	0	7
11	10	228	-97,3	15,1	112,4	77,6	17,6	34,5	-43,1	58,2	54,2	34,5	0	7
12	11	229	-97,4	15,2	112,5	77,5	17,6	34,4	-43,1	58,3	54,3	34,4	0	7
13	12	230	-97,4	15,3	112,7	77,5	17,6	34,4	-43,1	58,4	54,3	34,4	0	7
14	13	231	-97,3	15,4	112,7	77,5	17,6	34,4	-43,1	58,5	54,2	34,4	0	7
15	14	232	-97,2	15,4	112,6	77,6	17,6	34,5	-43,1	58,5	54,1	34,5	0	7
16	15	233	-97,2	15,5	112,7	77,6	17,6	34,5	-43,1	58,6	54,1	34,5	0	7
17	16	234	-97,0	15,6	112,7	77,7	17,8	34,6	-43,1	58,7	53,9	34,6	0	7,1
18	17	235	-96,8	15,7	112,5	77,9	17,8	34,8	-43,1	58,8	53,7	34,8	0	7,1
19	18	236	-96,7	15,8	112,5	78	17,9	34,8	-43,2	59,0	53,5	34,8	0	7,2
20	19	237	-96,7	15,9	112,6	77,9	17,9	34,8	-43,1	59,0	53,6	34,8	0	7,2
21	20	238	-96,6	16,0	112,6	78	17,9	34,9	-43,1	59,1	53,5	34,9	0	7,2
22	21	239	-96,6	16,1	112,6	78	17,9	34,9	-43,1	59,2	53,5	34,9	0	7,2
23	22	240	-96,5	16,2	112,6	78,1	17,9	35	-43,1	59,3	53,4	35,0	0	7,2
24	23	241	-96,4	16,3	112,6	78,1	18	35	-43,1	59,4	53,3	35,0	0	7,2
25	24	242	-96,2	16,4	112,6	78,3	18	35,1	-43,2	59,6	53,0	35,1	0	7,2
26	25	243	-96,1	16,4	112,6	78,3	18	35,1	-43,2	59,6	52,9	35,1	0	7,2
27	26	244	-96,1	16,5	112,6	78,3	18	35,2	-43,1	59,6	53,0	35,2	0	7,2
28	27	245	-96,1	16,6	112,7	78,3	18	35,1	-43,2	59,8	52,9	35,1	0	7,2
29	28	246	-96,1	16,7	112,8	78,3	18	35,2	-43,1	59,8	53,0	35,2	0	7,2
30	29	247	-96,0	16,8	112,8	78,3	18	35,2	-43,1	59,9	52,9	35,2	0	7,2
31	30	248	-95,9	16,9	112,8	78,3	18	35,2	-43,1	60,0	52,8	35,2	0	7,2
32	31	249	-95,9	17,0	112,9	78,4	18	35,3	-43,1	60,1	52,8	35,3	0	7,2
33	32	250	-95,7	17,1	112,8	78,5	18,1	35,4	-43,1	60,2	52,6	35,4	0	7,2
34	33	251	-95,5	17,2	112,7	78,6	18,1	35,5	-43,1	60,3	52,4	35,5	0	7,2
35	34	252	-95,4	17,3	112,7	78,6	18,1	35,5	-43,1	60,4	52,3	35,5	0	7,2
36	35	253	-95,3	17,4	112,7	78,7	18,2	35,6	-43,1	60,5	52,2	35,6	0	7,3
37	36	254	-95,2	17,4	112,7	78,8	18,2	35,6	-43,2	60,6	52,0	35,6	0	7,3
38	37	255	-95,2	17,5	112,8	78,8	18,4	35,6	-43,2	60,7	52,0	35,6	0	7,4
39	38	256	-95,1	17,6	112,7	78,8	18,4	35,7	-43,1	60,7	52,0	35,7	0	7,4
40	39	257	-95,0	17,7	112,7	78,9	18,4	35,7	-43,2	60,9	51,8	35,7	0	7,4
41	40	258	-94,9	17,8	112,7	79	18,4	35,8	-43,2	61,0	51,7	35,8	0	7,4
42	41	259	-95,1	17,9	113,0	78,8	18,4	35,7	-43,1	61,0	52,0	35,7	0	7,4
43	42	260	-95,0	18,0	113,0	78,9	18,4	35,8	-43,1	61,1	51,9	35,8	0	7,4
44	43	261	-94,9	18,1	113,0	78,9	18,4	35,8	-43,1	61,2	51,8	35,8	0	7,4
45	44	262	-94,8	18,2	113,0	79	18,4	35,8	-43,2	61,4	51,6	35,8	0	7,4
46	45	263	-94,6	18,3	112,9	79,1	18,5	35,9	-43,2	61,5	51,4	35,9	0	7,4

Figure 57 : *Type de résultat obtenu après la rastérisation des calculs du bilan hydrique (exemple avec le mois de juillet). (ArcGis).*



Fusionner la couche ayant les données P et ETp pour chaque mois permet d'harmoniser les fichiers entre eux et d'avoir un paramètre commun, ici l'altitude, où la décroissance logarithmique du calcul du bilan hydrique pourra se réaliser. Pour rappel, pour un bilan hydrique stationnel, certains calculs pour un mois donné dépendent des résultats du mois précédent. (*cf. 2.2.1 - Méthodologie générale*). C'est donc la même chose pour les altitudes, certains calculs pour une altitude quelconque sur le mois de mai, par exemple, dépendent des résultats obtenus pour cette même altitude sur le mois d'avril. C'est la cas pour la réserve utile, le changement de réserve utile et l'écoulement superficiel (Figure 55).

- Calculs du bilan hydrique sous « Excel » : Pour réaliser ces calculs, il faut tout d'abord exporter la table attributaire comprenant les valeurs de P et ETp pour chaque altitude en fichier « Excel ».
  Une fois le fichier « Excel » obtenu, il suffit d'appliquer les formules du modèle du bilan hydrique par décroissance logarithmique. La Figure 55 est un récapitulatif des formules employées dans le calcul.

  La Figure 56 représente le fichier « Excel » type utilisé pour chaque mois pour calculer le bilan hydrique, ici le mois de mai. En plus des colonnes provenant d'ArcGis (Objectid, Altitude, P-ETp, P et ETp), on observe bien toutes les colonnes nécessaires pour déterminer le bilan hydrique : la RU disponible sol, le changement de RU, l'ETR, le déficit hydrique, la reconstitution de la RU, le surplus hydrographique et l'écoulement superficiel.
  En plus de cela on a deux colonnes en plus : la « Ru_Avant_AVRIL » et l' « Ecoulement_superficiel_Q_Avant_AVRIL ». Vu que certains calculs du bilan hydrique (Figure 55) du mois de mai dépendent des résultas du mois d'avril, la présence de ces deux colonnes est justifiée.

Les calculs effectués, il faut ensuite faire une jointure au fichier vectoriel préalablement fusionné ce qui permet d'obtenir pour chaque altitude, tous les calculs du bilan hydrique. La jointure exécutée, on peut rastériser certains résultats notamment le surplus hydrologique et le déficit hydrique.
La spatialisation permet d'obtenir ce type de résultat (Figure 57) pour chaque mois avec soit du déficit hydrique comme c'est le cas pour le mois de juillet ou du surplus hydrographique. Un dégradé jaune – rouge a été utilisé pour marquer la sécheresse tandis que c'est un dégradé de bleu pour représenter l'excès d'eau.

On observe bien la différence entre le bilan climatique et le bilan hydrique. En effet la Figure 53 & la Figure 57 représentent le déficit hydrique pour le mois de juillet. Entre les deux figures on comprend le rôle de la réserve utile dans l'atténuation du déficit hydrique car le déficit hydrique issus du calcul P-ETp est compris entre 76 et 110 mm tandis qu'à partir du calcul du bilan hydrique par décroissance logarithmique le déficit est entre 73 et 94 mm. Une légère baisse de l'intervalle est observable et n'est pas négligeable pour l'adéquation de l'essence face au climat.

Figure 58 : *Tableau récapitulatifs des données nécessaires pour la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle selon la normale climatique. (Météo France).*

Mois	*Précipitation (mm)*	*Température (°C)*	*Rayonnement solaire « vrai » (J/cm²)*
Janvier	98,6	3,6	10 444,7
Février	72,4	3,8	16 698,5
Mars	73,8	6,4	30 265,6
Avril	62,4	8,6	44 033
Mai	76,4	12,4	55 269
Juin	57,5	15,5	58 599,7
Juillet	65,2	17,5	59 021,4
Août	50,9	17,3	50 362,7
Septembre	73,7	14,3	36 087
Octobre	93	10,8	21 965,7
Novembre	88,1	6,5	12 069
Décembre	101,1	4	8 300,8
An	**913,1**	**10,1**	**403 117,1**

Figure 59 : *Tableau récapitulatifs pour chaque mois la transmittance utilisée et le cadrage de la valeur mesurée pour la normale climatique 1981-2010. (ArcGis).*

Mois	*Transmittance*	*Valeur max (Intervalle) en J/cm²*	*Valeur mesurée en J/cm²*	*Valeur min (Intervalle) en J/cm²*
Janvier	0,6	13 490,6	10 444,7	3 440,2
Février	0,6	23 130,7	16 698,5	7 206,9
Mars	0,6	44 115,5	30 265,6	20 688,9
Avril	0,55	53 236,4	44 033	33 539,6
Mai	0,52	62 325	55 269	46 798,9
Juin	0,52	66 759,1	58 599,7	53 550,7
Juillet	0,52	65 117,5	59 021,4	50 718,6
Août	0,55	60 263 ,6	50 362,7	41 031
Septembre	0,6	49 626	36 087	26 296,3
Octobre	0,6	31 447,3	21 965,7	11 408,3
Novembre	0,6	16 186 ,3	12 069	4 551,4
Décembre	0,62	11 023,9	8 300,8	3 042,9

3.2.5 - Spatialisation du bilan hydrique à partir de la normale climatique (1981–2010)

L'année 2020 a été utilisée pour expliquer très précisément la méthodologie sur la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle. En ce qui concerne la recherche, le travail d'analyses et d'adéquation des essences va s'effectuer à partir de la normale climatique (1981-2010). Prendre une seule année, par exemple 2020, n'est pas l'optimum si cette année est particulière car les résultats seront un peu faussés.

Pour la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle à partir de la normale climatique, la méthodologie utilisée est la même qui a été présentée auparavant (*cf. 3.2 - Méthodologie du bilan hydrique spatialisé à fine échelle).* Quelques petits paramètres changent tout de même. Les données sur la température (°C), les précipitations (mm) et les données du rayonnement solaire global « vraies » (servant de référence pour calculer et caler le rayonnement solaire issu d'ArcGis) sont les moyennes faites sur la normale 1981-2010 (Figure 58).
Pour le calcul du rayonnement solaire global à partir d'ArcGis, c'est l'année 2009 qui a été utilisée se situant dans l'intervalle de la normale climatique 1981-2010.

Comme évoqué dans la méthodologie de la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle (*cf. 3.2.1 - Méthodologie du bilan hydrique spatialisé à* fine échelle

Le rayonnement solaire global sous ArcGis), la mesure « vraie » pour chaque mois, n'est pas prise en compte par l'intervalle que propose le raster du rayonnement solaire d'ArcGis. Prenons un exemple avec le mois de décembre. Après conversion, on obtient 5 110 J/cm² comme valeur la plus élevée est 1 394 J/cm² comme valeur la plus basse. Or la valeur donnée par la station de Caen pour le mois de décembre est de 8 300,8 J/cm² ce qui est au-dessus de l'intervalle.
Quand on modifie « la transmittance » on obtient de meilleurs résultats. Pour le calcul, elle a été établie pour chaque mois pour permettre d'avoir la valeur mesurée dans l'intervalle qui maintenant est de 11 023 J/cm² à 3 043 J/cm² pour le mois de décembre.

La Figure 59 récapitule la transmittance utilisée pour chaque mois ainsi que le cadrage de la valeur mesurée par rapport aux valeurs min et max. Pour 6 mois de l'année, c'est une transmittance de 0,6 qui a été utilisée. Pour ce qui est des autres mois (avril, mai, juin, juillet, août et décembre) la transmittance change entre 0,52, 0,55 et 0,62. De telles valeurs ont été choisies pour cadrer au mieux la valeur mesurée de la station lorsque celle-ci était soit en-dessous ou au-dessus de l'intervalle.

3.2.6 - *Limite de la spatialisation du bilan hydrique*

La méthodologie employée pour la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle présente une principale limite d'utilisation. Les résultats de la spatialisation ne sont pas tout à fait exacts et voici la raison.

Pour spatialiser le bilan hydrique sur la zone d'étude, une Réserve Utile Maximale (RUM) moyenne a été choisie et établie à 120 mm. Cette moyenne est due à une présence majoritaire de sol limoneux sur le secteur. La RUM est alors identique sur l'ensemble du terrain d'étude que ce soit à 220 m (altitude la plus basse) ou 400 m (altitude la plus haute) et ne prend pas en compte la topographie. Dans la réalité, la RUM se modifie quand on passe d'une zone de plateau à un versant ou d'un versant à un fond de vallée ou d'un type de sol à un autre. Elle sera plus faible dans un versant et plus importante dans un fond de vallée.
Les résultats du bilan hydrique (*cf. 3.3 - Quelles sont les impacts du climat à fine résolution ?*) qui seront présentés par la suite montrent que plus on monte en altitude moins le déficit hydrique est prononcé et plus il y a de surplus hydrologiques et quand on descend en altitude, c'est l'inverse. Or dans les fonds de vallées, la RUM est généralement plus conséquente ce qui a tendance à minorer les déficits hydriques puisque que les essences vont avoir tendance à pomper la réserve utile du sol. Bien évidement il se passe l'inverse quand on est sur des versants car l'eau va s'écouler plutôt que s'infiltrer en profondeur et la réserve sera moins conséquente.

En conclusion, les résultats du bilan hydrique sont limités car dans cette recherche, il n'y a pas eu de prise en compte local de la Réserve Utile Maximale (RUM) car il n'y a pas eu de fosses pédologiques de réalisées.

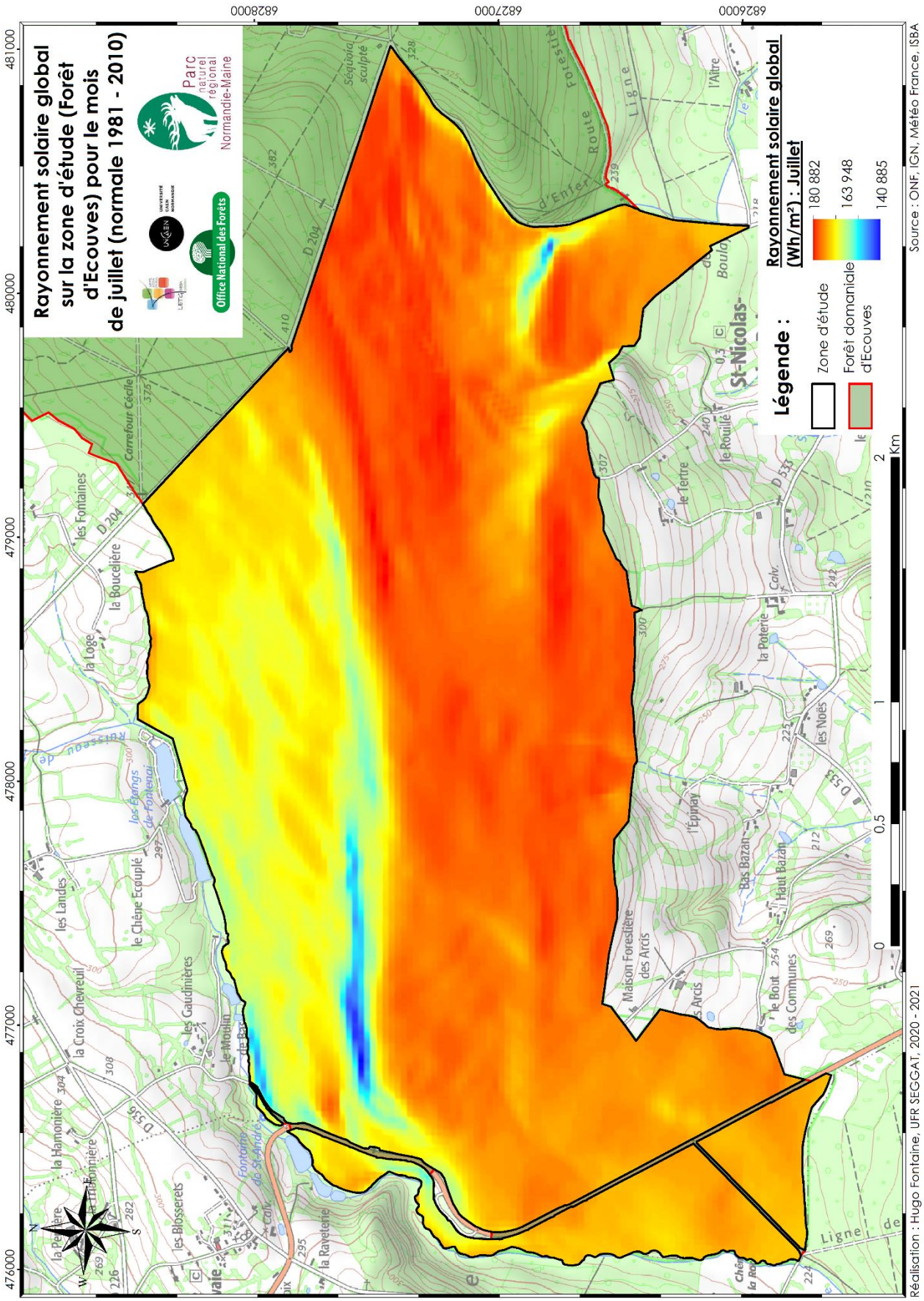
3.3 - *Quelles sont les impacts du climat à fine résolution ?*

La méthodologie de la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle étant expliquée, on peut passer à l'analyse des résultats que ce soit pour le bilan hydrique ou les résultats intermédiaires. L'objectif va être de montrer les disparités du climat local et les impacts qu'il peut avoir sur l'environnement proche à savoir les essences forestières et espèces herbacées. Ce travail s'effectuera d'abord sur la normale climatique (198-2010) puis une étude de cas sera faite sur l'année 2020 pour comprendre le possible climat futur pour les essences forestières.

3.3.1 - *Le rayonnement solaire global : Quelles impacts sur la zone d'étude ?*

Le rayonnement solaire global est un composant important car il permet de prendre connaissance de la topographie car l'intensité lumineuse est différente par rapport à un adret ou un ubac. Le RSG est un élément qui rentre en compte dans la formule de Turc qui détermine l'ETp au même titre que les températures (*cf. 3.2.2 - Calcul de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETp)*) d'où l'intérêt de le calculer via les outils SIG.

Figure 60 : *Carte du rayonnement solaire global pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).*



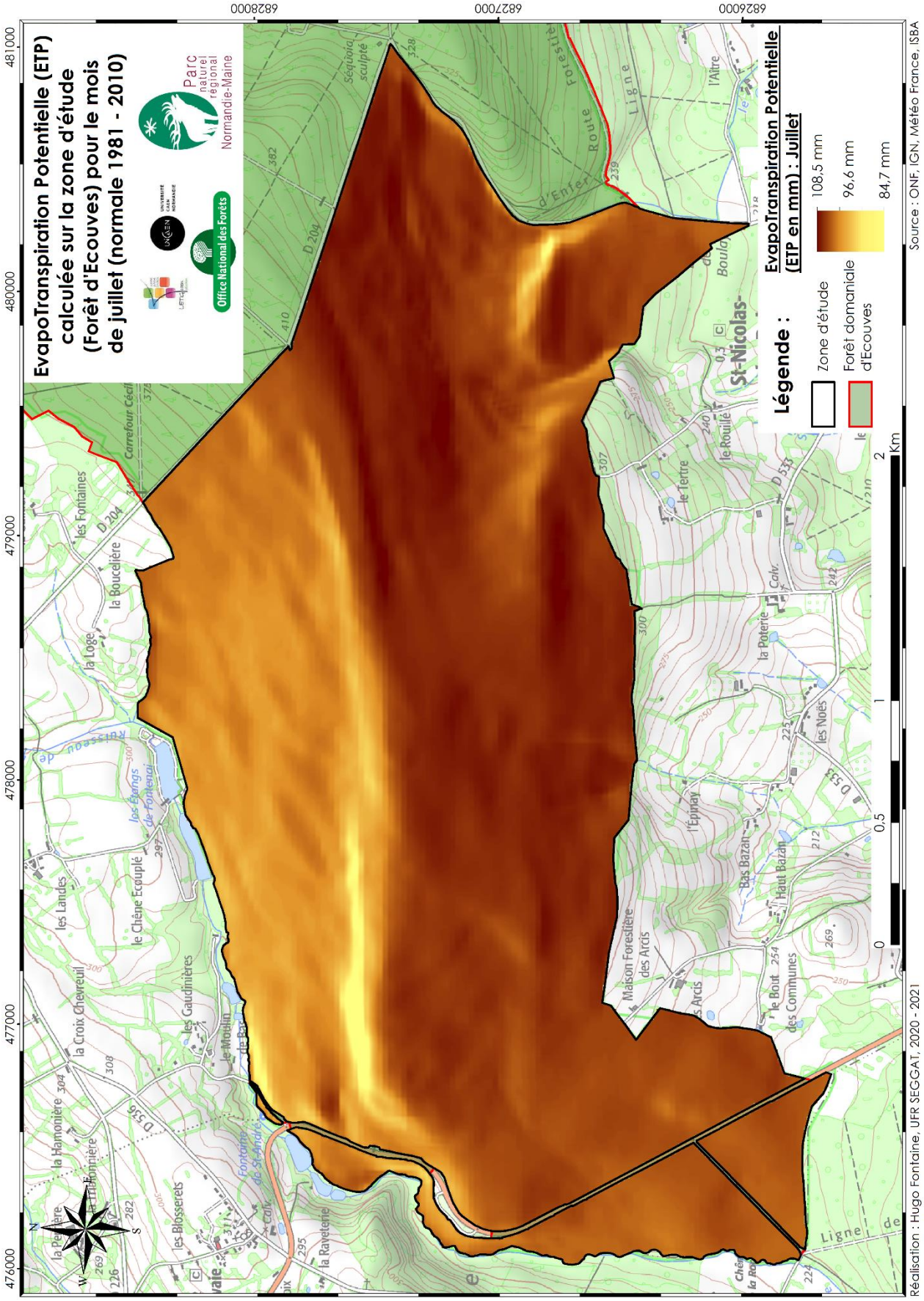
La Figure 60 représente le rayonnement solaire global pour le mois de juillet sur la zone d'étude et est exprimé en Wh/m² sur la carte. Le rayonnement global du mois de juillet est l'un des plus fort sur les 12 mois avec une amplitude allant de 140 885 Wh/m² à 180 882 Wh/m² soit 50 719 J/cm² à 65 118 J/cm². Il est très représentatif des mois les plus chauds (mai, juin et août).

Les contrastes d'éclairement solaire, sources de potentiels évapotranspiratoires différenciés, sont plus prononcés sur les secteurs où la topographie est contrastée. La zone d'étude est coupée horizontalement en son centre est marque une différence adret-ubac. Sur l'ubac l'intensité est plus faible oscillant entre 50 719 J/cm² et 59 400 J/cm² d'où la teinte bleue-jaune. Tandis que sur l'adret l'intensité lumineuse est plus prononcée (teinte rouge-orange) dont l'ensemble des valeurs sont proches de la valeur maximale qui est de 65 118 J/cm².
Ce contraste montre bien l'ubac au nord où l'exposition du soleil est minorée et l'adret au sud où là l'intensité du soleil est maximale. Ces oppositions solaires très fortes entre l'adret et l'ubac offrent des ambiances plus humides ou plus sèches.
La partie sud-ouest de la zone d'étude, présente une teinte jaune-orangé. L'intensité est à 59 500 J/cm² correspondant à la valeur mesurée sur la station de Caen sur un espace plan.

L'Annexe 5 présente le rayonnement solaire global pour les 12 mois de l'année. Pour rappel, pour chaque mois la valeur minimale et maximale est identique pour pouvoir observer une évolution. Les cartes du rayonnement solaire sur la zone d'étude suivent l'évolution des quatre saisons de l'année à savoir l'hiver, le printemps, l'été et l'automne.
Pour les mois de janvier et février on est en hiver et l'intensité du soleil est alors faible d'où la teinte bleue foncé témoignant que l'intensité ne dépasse pas 65 000 Wh/m² soit 23 400 J/cm². Le mois de mars sert de transition avec une teinte bleue-jaune (intensité oscillant entre 57 500 et 122 500 Wh/m² soit entre 20 700 et 44 100 J/cm²) témoignant de la fin de l'hiver et le début du printemps.
Pour les mois d'avril, mai, juin, juillet et août l'intensité du soleil est plus forte notamment montrée par des teintes jaune-orangé à rouge. Cela s'explique par l'arrivée des beaux jours au printemps et des chaleurs en été. Le mois de septembre joue, comme le mois de mars, le rôle de transition entre l'été et l'automne avec une teinte bleutée sur l'ubac (intensité lumineuse 80 000 Wh/m² soit 28 800 J/cm²) et jaune sur l'adret (120 000 - 130 000 Wh/m² de moyenne).
Les derniers mois de l'année (octobre, novembre et décembre) virent vers le bleu car on rentre dans des saisons (automne et hiver) où le froid revient et l'intensité du soleil se fait moins ressentir notamment en décembre où l'intensité dépasse tout juste les 10 000 J/cm² (Figure 59).

Pour conclure sur le rayonnement solaire global, ces impacts sont plus importants sur le versant sud de la zone d'étude (adret) que sur le versant nord (ubac) car l'intensité lumineuse est la plus forte lorsque le soleil est au sud et en raison de la non-présence de celui-ci au nord. Il va être intéressant, maintenant, de voir si la demande évapotranspiratoire fonctionne de la même manière vue que son calcul dépend des résultats du RSG.

Figure 61 : *Carte de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETp) pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).*



3.3.2 - Quelle répartition pour la demande évapotranspiratoire ?

Le corpus de cartes suivant (juillet + harmonisation des 12 mois de l'année) va permettre d'illustrer les apports de l'intégration de la topographie dans la connaissance des disparités de la demande évapotranspiratoire, en relation avec les variations d'intensités du rayonnement solaire induit par le relief et les températures. De plus cette donnée intervient dans le calcul final du bilan hydrique à décroissance logarithmique en représentant la demande, d'où l'intérêt de la calculer et la spatialiser.

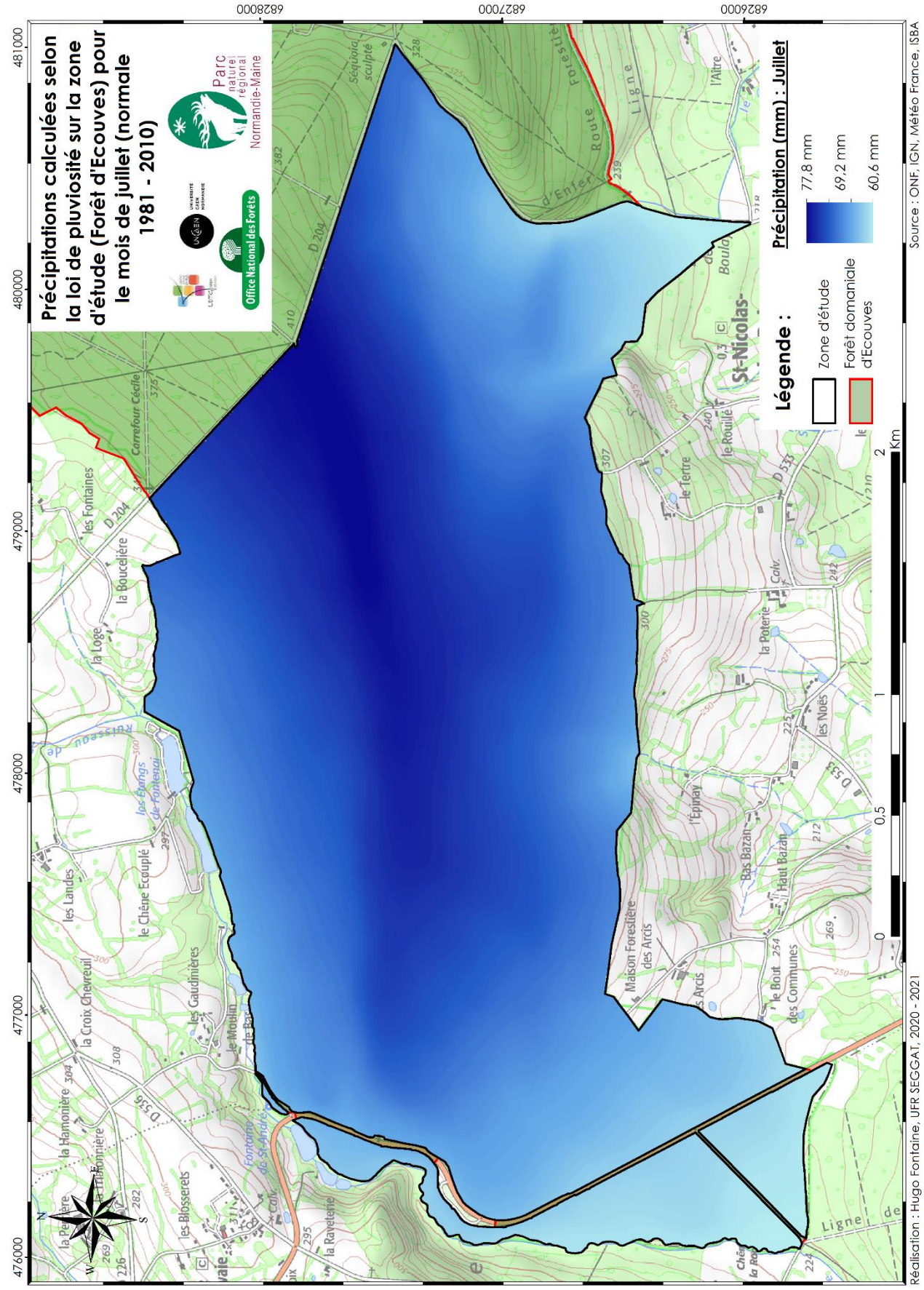
La Figure 61 représente l'EvapoTranspiration Potentielle pour le mois de juillet sur la période 1981-2010 sur le terrain d'étude. Elle est exprimée en millimètre (mm). Le mois de juillet se présente comme le mois où la demande évapotranspiratoire est la plus élevée avec le mois de juin. En effet, la demande atteint 108,5 mm au maximum contre 84,7 mm au plus bas ce qui est relativement élevée aussi. Le mois de juillet est représentatif des mois de l'été (juin, juillet et août) puisque la moyenne est de 96,6 mm pour juillet, 97,8 mm pour juin et 84,1 mm pour août. Pour les autres mois, la moyenne est beaucoup plus basse, inférieur à 70 mm.

Comme le montre la Figure 60, un contraste est observable entre l'adret et l'ubac pour l'ETp. Sur l'ubac, en versant nord, la demande est moins importante oscillant entre 84,7 et 95 mm d'où une teinte plus jaune. Tandis que sur l'adret et au sud-ouest la teinte vire au marron témoignant que la demande dépasse les 100 mm. Ces valeurs élevées sont donc liées à l'intensité lumineuse conséquente du mois de juillet qui varie entre 50 719 J/cm² et 65 118 J/cm².
Là où le terrain est accidenté, comme c'est le cas au sud-est, la demande est réduite (aux alentours des 85 mm) montrant le contraste avec le reste de l'adret. Ces conditions particulières observées montrent la mise en place de petits microclimats spécifiques sur la zone d'étude.

L'**Annexe 6** représente la spatialisation de l'ETp pour les 12 mois de l'année. Au minimum, la demande est de 2,1 mm observée au mois de décembre et au maximum elle est de 108,5 mm pour les mois de juin et juillet.
La demande évapotranspiratoire suit l'intensité du rayonnement solaire global ce qui est logique au vu de la présence du rayonnement global dans le calcul de l'ETp. La demande est faible du mois de novembre au mois de février, avec une demande faible, ne dépassant pas les 20 mm, tout comme l'intensité lumineuse. A partir du mois de mars le soleil se fait de plus en plus présent et la demande est alors plus élevée et cela jusqu'au mois d'octobre. Le pic de la demande est atteint en été avec des moyennes de 84,1 mm pour juin, 96,6 mm pour juillet et 97,8 mm pour août. Les autres mois servent de transition entre la période hivernale et estivale (mars et avril) et inversement (septembre et octobre).
Sur l'ensemble des 12 mois, on remarque toujours la différence adret-ubac avec une couleur plus claire présente sur l'ubac.

La demande évapotranspiratoire à la même répartition que celle du rayonnement solaire global à savoir une demande plus importante au sud et sud-ouest car ce dernier est présent dans le calcul de l'ETp.

Figure 62 : *Carte de l'offre pluviométrique pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).*



3.3.3 - L'offre pluviométrique : Comment s'organise-t-elle sur la zone d'étude à partir de la loi de pluviosité ?

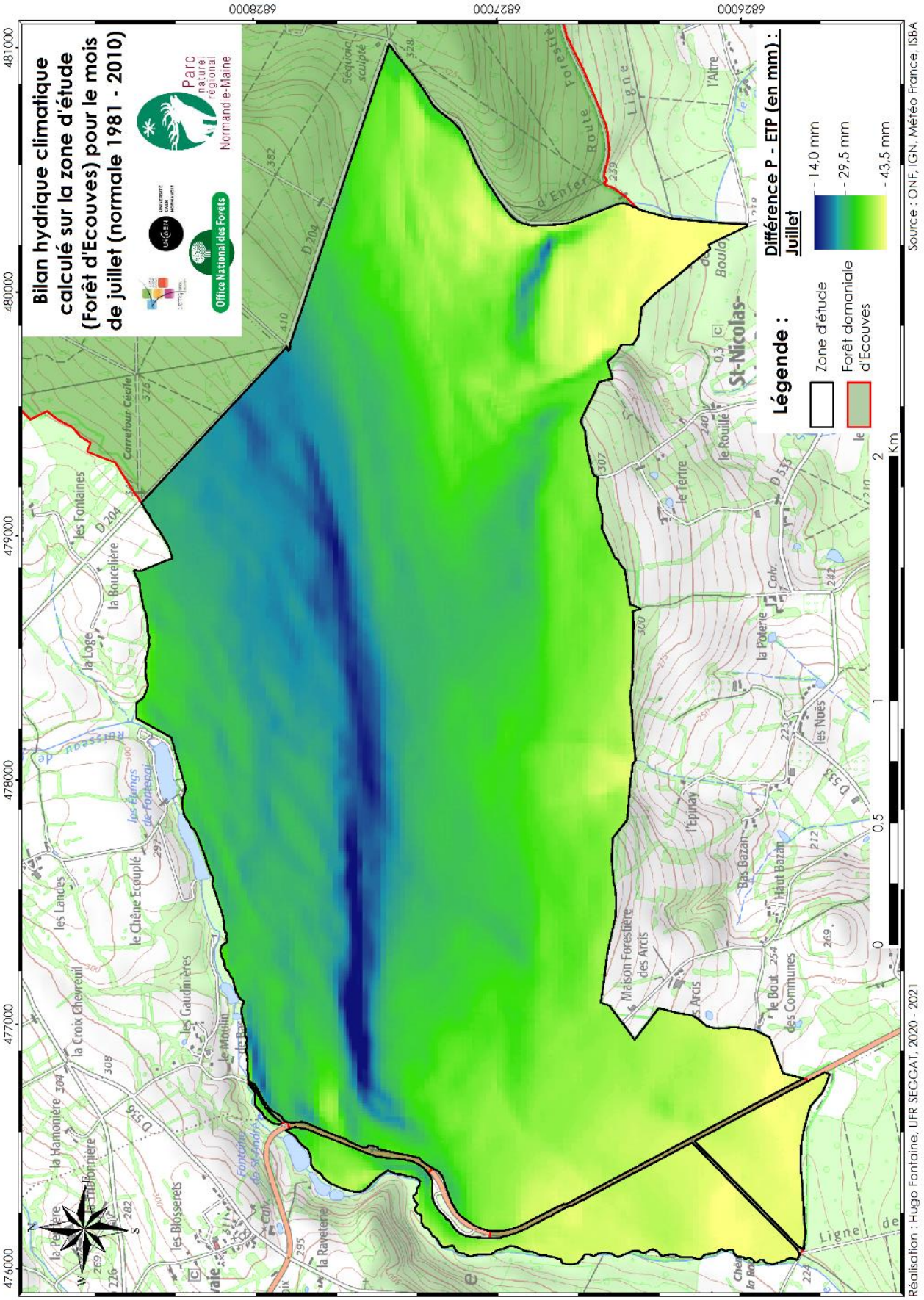
L'offre pluviométrique constitue le second volet essentiel à prendre en compte dans le but d'obtenir une image crédible spatialisée du bilan hydrique à fine résolution. Comme pour la demande évapotranspiratoire, l'offre pluviométrique intervient dans le calcul final du bilan hydrique mais cette fois-ci en représentant l'offre. Contrairement à l'ETp qui dépend de la topographie, l'offre pluviométrique repose sur le relief et la loi de pluviosité (*cf. 3.2.3 - Spatialisation des données sur les précipitations*).

La Figure 62 représente la spatialisation des précipitations pour le mois de juillet sur la normale climatique 1981-2010. Elles sont exprimées en millimètre (mm). Le mois de juillet se révèle comme un mois où les précipitations sont assez conséquentes. L'offre pluviométrique est de 60,6 mm à 219 m d'altitude (point le plus bas) et de 77,8 mm à 408 m d'altitude (point le plus haut). Le mois de juillet de la normale 1981-2010 est contradictoire par rapport aux dernières années car il a été chaud et sec. Par exemple en juillet 2020, il a plu 22,7 mm contre 65,2 mm sur la période 1981-2010 et l'amplitude proposée avec la loi de pluviosité est de 18,1 mm - 35,3 mm pour 2020 contre 60,6mm - 77,8 mm.
La carte de l'offre pluviométrique est en contraste au niveau de la répartition par rapport au rayonnement solaire global et à l'ETp. Elle s'organise par rapport au relief de la zone d'étude et non en fonction de la topographie d'où la forme pyramidale (Figure 62). Pour une même altitude sur la carte, les précipitations sont identiques et cela ne permet pas de voir des différences adret-ubac.

L'Annexe 7 présente la spatialisation de l'offre pluviométrique pour les 12 mois de l'année. Le maximum de précipitations est de 113,7 mm au mois de décembre tandis que le minimum est pour le mois d'août avec 46,3 mm.
L'Annexe 7 montre que c'est du mois d'octobre au mois de janvier que les précipitations sont abondantes et constantes avec une moyenne à 99,2 mm et une amplitude maximale pour le mois de décembre : de 96,5 mm à 113,7 mm.
Tandis qu'entre février et septembre, des contrastes sont observables. Durant cette période se sont les mois de mars, de mai et de septembre où l'offre est plus conséquente avec des intervalles qui vont de : 69,2 mm - 86,4 mm (mars), 71,8 mm - 89 mm (mai) et 69,1 mm - 86,3 mm (septembre). A l'inverse les mois d'avril, juin et août connaissent une offre faible avec une amplitude de 57,8 mm - 78 mm pour avril, 52,9 mm - 70,1 mm pour juin et 46,3 mm - 63,5 mm pour août. Toutefois, pour les mois de mai, de juin et de juillet les précipitations assez conséquentes permettent de lutter contre une demande évapotranspiratoire parfois élevée et limiter les déficits hydriques. Seul le mois d'août est plus marqué par ces phénomènes.

En conclusion, l'offre pluviométrique ne s'organise pas de la même façon que le rayonnement solaire et l'ETp. Contrairement à l'ETp qui suit une progression au fil de l'année en lien avec l'intensité lumineuse, l'offre pluviométrique ne suit pas d'évolution car les précipitations changent d'un mois à l'autre. Elle prend une forme pyramidale (dégradé du plus clair au plus foncé) causée par la loi de pluviosité qui dit que plus on monte en altitude plus les précipitations augmentent.

Figure 63 : *Carte du bilan climatique pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).*



3.3.4 - Le bilan climatique : une première appréciation du bilan hydrique

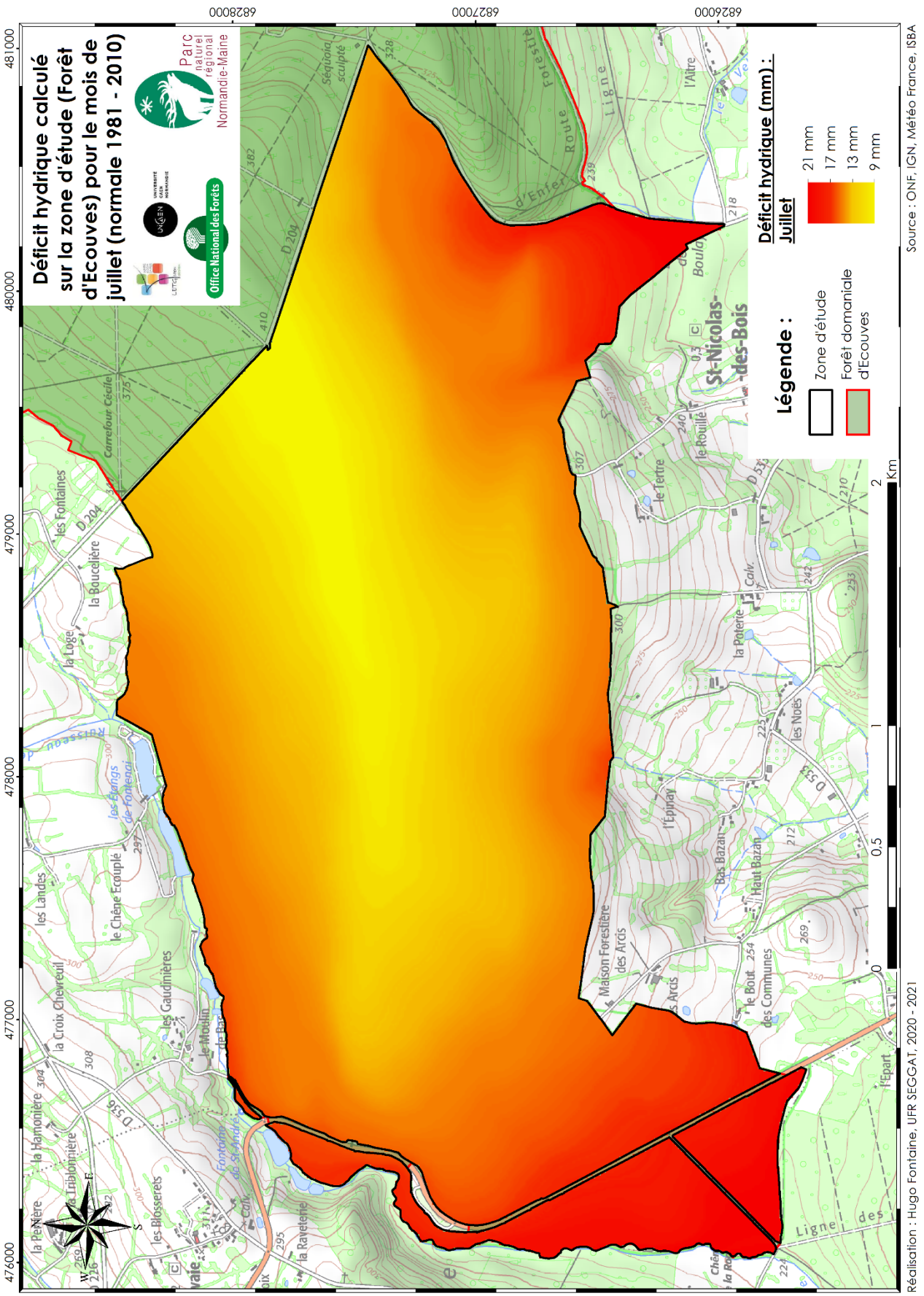
Le bilan climatique permet une appréciation des résultats finaux du bilan hydrique car il permet une première estimation très simplifiée de l'eau disponible pour les essences (surplus hydrologique et/ou déficit hydrique). Le bilan climatique est la résultant de la différence entre les précipitation (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETp).

La Figure 63 modélise le bilan climatique du mois de juillet sur la normale climatique et est exprimé en millimètre (mm). Le mois de juillet apparait comme un mois sec avec la présence de déficits hydriques sur l'ensemble de la zone d'étude. Le calcul P-ETp montre que les valeurs sont toutes négatives avec un intervalle allant de -14 mm à -43,5 mm. De telles valeurs négatives témoignent que les essences forestières sont en manque d'eau sur le mois de juillet et sont propices à des dépérissements et desséchements.
Le bilan climatique du mois de juillet est en adéquation avec les résultats précédents (ETp, rayonnement solaire et précipitations). En juillet on a un rayonnement puissant (50 719 - 65 118 J/cm²) ce qui entraine la transpiration chez les essences forestières. La demande évapotranspiratoire est alors conséquente (84,7 mm - 108,5 mm). L'offre pluviométrique, quoique raisonnable pour juillet avec 65,2 mm de moyenne, n'est pas assez conséquente pour répondre aux besoins des arbres engendrant un déficit hydrique sur l'ensemble du secteur d'étude.
La différence adret-ubac s'observe une nouvelle fois avec en versant nord (ubac) un déficit hydrique moins marqué allant de -14 mm à -30 mm (teinte bleu-vert). Alors que sur l'adret, les valeurs sont supérieures à -30 mm (teinte vert-jaune) notamment à la pointe sud-est et sur le versant sud-ouest, là où les altitudes sont les plus basses et les précipitations également.

L'Annexe 8 représente la modélisation du bilan climatique pour les 12 mois de l'année. Le maximum est atteint en décembre avec 110,2 mm, représentant du surplus hydrologique tandis que le minimum est juin avec -51,8 mm, annonçant un déficit hydrique.
Du mois d'octobre au mois de février, les valeurs sont supérieures à 50 mm propice à du surplus hydrologique conséquent sur la zone d'étude avec une moyenne de 83,5 mm. Du surplus est également présent en mars-avril mais nettement moins fort. On a même pour avril une différence P-ETp proche de 0 sur les altitudes les plus basses témoignant qu'il n'y a ni surplus ni déficit.
Les mois de mai, juin, juillet et août subissent des déficits hydriques et sécheresses à répétition d'où les valeurs négatives. Ce sont les mois de juin et d'août les plus touchés avec un intervalle allant de -24,2 mm à -51,8 mm pour juin et de -11 mm à -46,9 mm pour août.
Le mois de septembre varie, quant à lui, entre des zones de surplus hydrologiques en versant nord avec un maximum à 38 mm et des déficits hydrique en versant sud d'une faible intensité (-1,1 mm).

Le bilan hydrique climatique est en adéquation avec la demande évapotranspiratoire et l'offre pluviométrique. Plus la demande est faible (d'octobre à février) et l'offre élevée, les surplus hydrologiques sont majoritaires. Par contre, au printemps et été la transpiration des arbres est plus conséquente et les précipitations sont un peu moins nombreuses ce qui fait baisser pour les mois de mars et avril l'excès en eau et accroitre de mai à août les déficits hydriques.

Figure 64 : *Carte du bilan hydrique à décroissance métrique pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).*



3.3.5 - Le bilan hydrique mensuel spatialisé de la zone d'étude

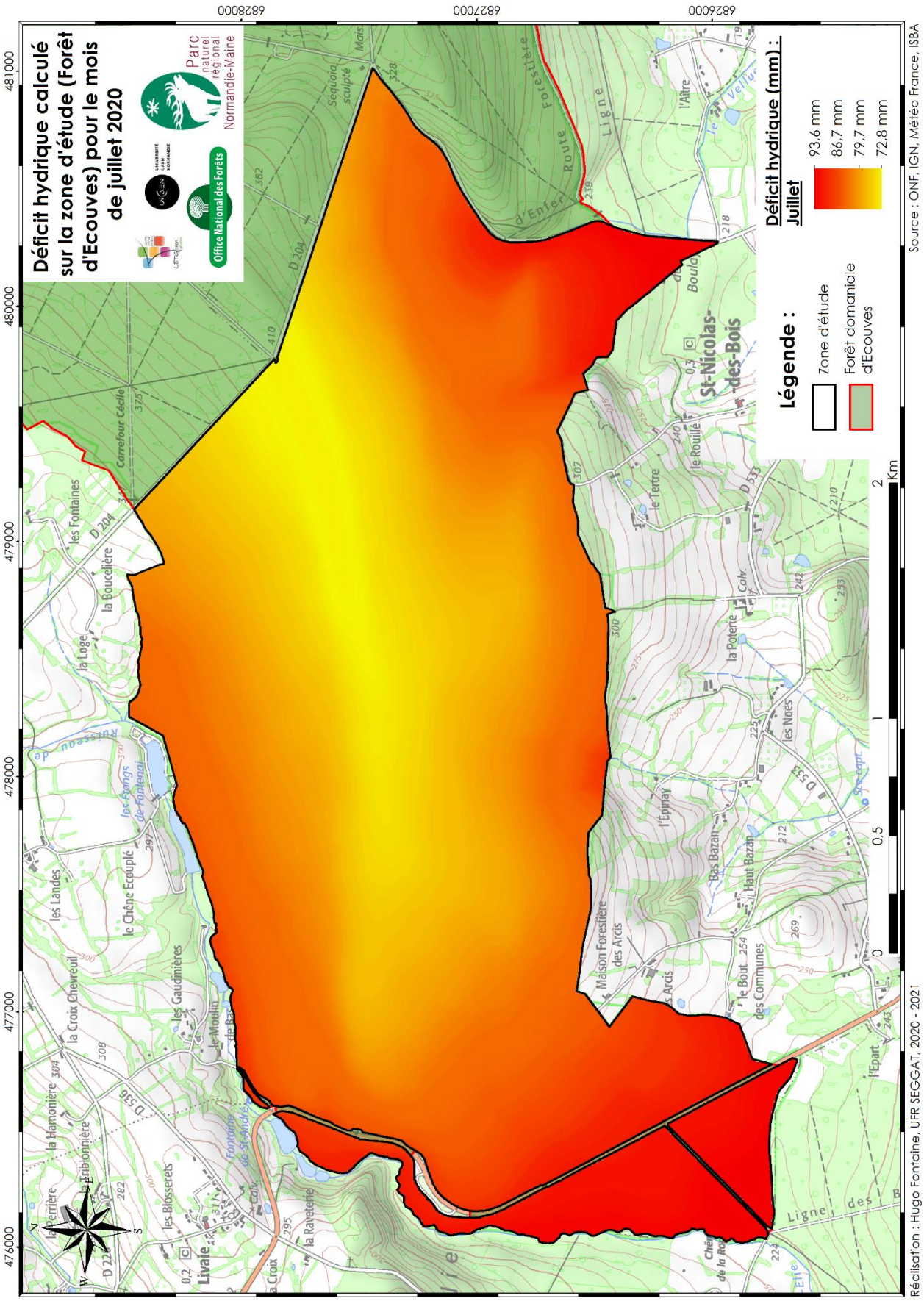
Le bilan climatique permet une première estimation des résultats finaux du bilan hydrique mensuel à décroissance logarithmique mais ne prend pas en compte un élément naturel que prend en considération le bilan hydrique. Il s'agit de la RUM (Réserve Utile Maximale) qui en été est sollicitée par les espèces pour limiter les déficits hydriques et en automne est reconstituée ne permettant pas le mise en place rapide des surplus hydrologiques.

L'Annexe 9 représente la spatialisation du bilan hydrique mensuel à décroissance métrique de la réserve utile sur la normale climatique et est exprimé en millimètre (mm).
Si on part du mois de janvier, quand la RUM est pleine, on a du mois de janvier au mois de mai du surplus hydrologique avec des surplus plus importants en janvier (105,7 mm - 88,6 mm) qu'en mai (5,8 mm - 0 mm). Plus on avance dans les mois, plus les surplus ont tendance à diminuer engendrés par une hausse de l'intensité lumineuse et de l'ETP mais aussi d'une baisse des précipitations. Plus les plantes transpirent plus elles ont besoin d'eau pour s'approvisionner et l'offre pluviométrique, moins conséquente à partir de mars-avril, ne répond plus suffisamment pour satisfaire le besoin des arbres et engendrer du surplus.
Les surplus hydrographiques sont plus conséquents en haute qu'en basse altitude à cause notamment de la loi de pluviosité qui dit que plus on monte en altitude plus les précipitations augmentent. On retrouve l'aspect pyramidale des cartes de l'offre pluviométrique.

Le mois de mai fait la jonction entre les mois concernés par du surplus et ceux concernés par des déficits hydriques. Sur le mois, on a à la fois du surplus et du déficit. Les surplus hydrologiques se situent en altitude, à partir de 318 m, et varient entre 5,8 mm et 0 mm.
Quant aux déficits hydriques, ils commencent à 219 m d'altitude jusqu'à 270 m et varient entre 0,4 mm et 0 mm. Le déficit hydrique commence en mai mais très faiblement, inférieur à 0,5 mm. Sur le mois, on remarque également une zone où il n'y a ni surplus ni déficit. Elle se situe entre 270 m et 340 m d'altitude. A cet endroit, la RUM est sollicitée par les arbres ce qui permet de ne pas provoquer de déficits hydriques.

Les mois de juin, juillet (Figure 64) et août apparaissent comme les seuls mois ayant du déficit hydrique sur l'ensemble de la zone d'étude. En juin, le déficit hydrique est moins marqué (inférieur à 15 mm) avec une amplitude entre 4,8 mm et 12,9 mm, tandis qu'il grimpe entre 9 mm et 21 mm pour juillet et entre 13,3 mm et 28,6 mm pour août.
Les déficits hydriques les plus marqués sont en basses altitudes, notamment toute la partie ouest et sud-ouest ainsi que la pointe au sud-est, là où les précipitations sont moins abondantes et où le RSG et l'ETp sont plus forts. La spatialisation sous SIG du déficit hydrique est inversée par rapport aux surplus. Les surplus les plus conséquents sont en altitude alors que les déficits hydriques les plus marqués sont en basse altitude.

Figure 65 : *Carte du bilan hydrique à décroissance métrique pour le mois de juillet 2020. (ArcGis, Météo France, ISBA).*



Le mois de septembre marque une nouvelle transition dans l'année avec ni surplus hydrologique ni déficit hydrique car il y a la reconstitution de la RUM (Réserve Utile Maximale). Cela veut dire que la réserve utile du sol se réapprovisionne en eau après avoir été sollicitée durant l'été et en mai. Pour rappel, la réserve utile va s'alimenter en eau jusqu'à ce qu'elle atteigne 120 mm, valeur fixée au départ. La carte, pour le mois de septembre, montre que c'est en altitude que la reconstitution est plus importante (aux alentours des 20 mm) car c'est là qu'il pleut le plus selon la loi de la pluviosité.

On retrouve ce phénomène de reconstitution de la réserve en octobre avec cette fois-ci un inversement. C'est en basse altitude qu'elle est la plus conséquente (aux alentours des 60 mm) car c'est là que les déficits étaient les plus marqués durant l'été. En altitude, la reconstitution est moins marquante (environ 40 mm) car elle avait déjà bien commencée durant le mois de septembre. C'est également là où les surplus recommencent progressivement, de 0 mm à 32 mm.
Pour les mois de novembre et de décembre, on a du surplus en conséquence avec une amplitude entre 49,8 mm et 89,6 mm pour novembre et de 91,8 mm et 108,9 mm pour décembre.

Le bilan hydrique spatialisé à fine résolution sur la normale climatique se rapproche assez fortement du bilan hydrique ponctuel à l'échelle de la forêt d'Ecouves sur la même période (Figure 31). Des petites différences sont observable notamment au mois d'avril et de septembre entre les deux représentations mais on est approximativement sur la même quantité de surplus et de déficits à l'année. Ces différences sont dues à la précision de l'échelle de travail.

3.4 - Etude de cas de l'année 2020 : Quelles spécificités par rapport à la normale climatique (1981-2010)

Le bilan hydrique spatialisé à fine résolution sur la normale climatique permet de définir la tendance climatique pour pouvoir ensuite analyser une année particulière. Ici, une étude de cas va être réaliser sur l'année 2020 pour permettre d'observer et d'analyser les spécificités du climat actuel et de la tendance future.
En analysant l'année 2020, elle apparait comme une année particulièrement sèche marquée par de nombreux mois avec du déficit hydrique.

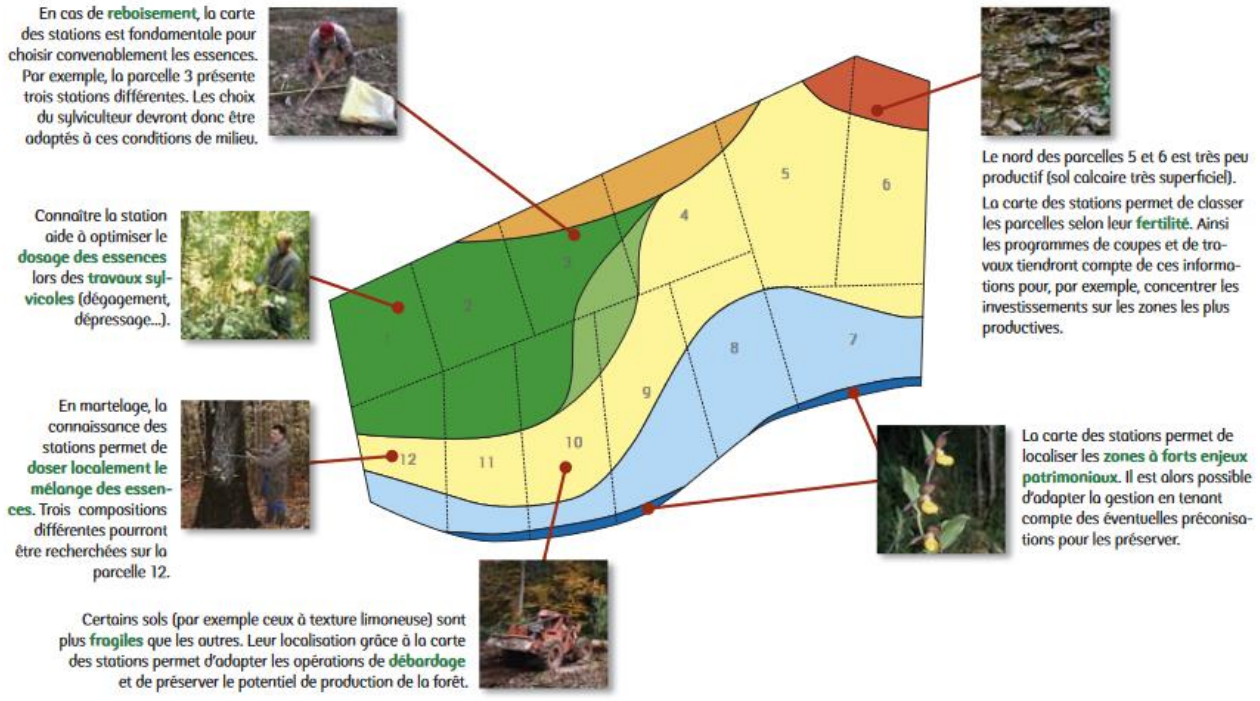
La comparaison de l'année 2020 (Annexe 10) et la normale climatique (Annexe 9), montre que six mois de l'année sont marqués par du déficit hydrique, avril à septembre, contre seulement quatre mois sur la normale climatique, de mai à août. C'est même trois mois sur la normale car en mai il y à la fois du surplus et du déficit d'une très faible intensité, de 0 mm à 0,4 mm.
En plus de sa présence sur six mois, le déficit hydrique est plus virulent par rapport à la normale climatique en terme de puissance. Sur la normale climatique, c'est le mois d'août où il est le plus marqué avec un maximum 28,6 mm. En 2020, les mois de mai, juillet, août et septembre ont un déficit hydrique important dépassant la valeur maximale du mois d'août sur la normale avec des amplitudes de : 38,2 à 55 mm (mai), 72,8 à 93,6 mm (juillet), 39,2 à 56,7 mm (août) et 17,7 à 34,8 mm (septembre). Pour 2020, c'est le mois de juillet qui est le plus impacté (Figure 65).
Comme sur la normale climatique, le déficit hydrique est présent sur les mois de l'année 2020 est plus intense en bas de versant et le moins fort en haute altitude.

L'aridité de l'année 2020, se répercute également sur les périodes de surplus hydrologiques, moins longues que sur la normale climatique. Sur la normale, les surplus sont présents et conséquents du mois de janvier au mois de mai. Tandis que pour l'année 2020, les surplus quoique importants pour janvier (76,3 mm - 93,4 mm) et février (94,1 mm - 111,1 mm) ne sont présents que de janvier à mars, soit 2 mois de moins par rapport à la normale.

La période d'octobre à décembre montre aussi la particularité de l'année 2020. Contrairement à la normale climatique où la reconstitution de la réserve utile a commencé en septembre et majoritairement en octobre (42,7 mm - 64,5 mm), elle débute pour 2020 à partir d'octobre et jusqu'en décembre. En octobre, la reconstitution de la réserve utile est conséquente avec une amplitude allant de 87,6 mm à 104,6 mm grâce notamment à une offre pluviométrique abondante de 121,7 mm.
Elle se poursuit sur le mois de novembre mais nettement moins forte car les précipitations manquent, uniquement de 36,9 mm. Cela ne permet pas une reconstitution optimale d'où l'amplitude plutôt faible, de 5,3 mm à 22,7 mm. Contrairement au mois d'octobre, la reconstitution de la RUM est plus élevée en basse altitude qu'en haute en raison d'une reconstitution plus avancée. La reconstitution de la réserve étant finalisée en altitude, les premiers surplus hydrologiques apparaissent avec un maximum à 32 mm.
En décembre, le même schéma se réalise qu'en novembre avec la reconstitution qui se termine dans les bas de versant. En parallèle, les surplus hydrologiques amorcés en novembre continues de manière exponentielle comme en témoigne les valeurs de décembre qui vont de 153,8 mm à 180,2 mm. Cela est dû aux précipitations abondantes de 173,9 mm.
La période octobre - décembre marque bien cette année 2020 sèche avec une reconstitution de la RUM qui s'étale sur 3 mois (octobre à décembre) contre seulement 2 mois sur la normale (septembre et octobre). De plus, les surplus hydrologiques commencent en novembre en 2020 contre octobre pour la normale climatique.

L'année 2020 apparait comme une année particulièrement sèche ce qui donne une bonne vision du climat présent ces dernières années et du climat futur. Cela permet de voir qu'actuellement de nombreuses essences forestières ne sont pas en adéquation avec le climat et connaissent des signes de dépérissements.
Néanmoins étudié une seule année comme 2020 n'est pas représentatif du climat et c'est pour cela que le travail de spatialisation a été réalisé à partir de la normale climatique. Cela permet de connaitre le climat sur une longue période pour ensuite voir l'adéquation de l'essence avec le climat pas sur une seule année mais sur plusieurs.

Figure 66 : *Les intérêts de la cartographie des stations forestières. (La cartographie des stations : méthodes et conseils, CRPF, 2004).*



4 - Renouvellement de la carte des stations forestières

L'objectif de ce mémoire de recherche est d'analyser l'adéquation des essences forestières en fonction du climat et de la station forestière. La dimension climatique vient d'être réalisée avec une approche d'abord générale du climat en allant vers une approche fine avec la spatialisation du bilan hydrique à fine résolution.
En plus de la dimension climatique, la dimension stationnelle est à prendre en considération. Cette dimension est représentée par un outil qu'on utilise en forêt et qui permet d'anticiper le réchauffement climatique appelé la carte des stations forestières (*cf. 4.1.1 - Utilités de la carte des stations forestières*). En ce qui concerne la zone d'étude, il y aura un renouvellement de la carte des stations forestières dû au fait que celle présente actuellement date du début de l'aménagement forestier de la forêt d'Ecouves (2004) et est basée sur une ancienne typologie. Cette typologie a été élaborée par Jabiol, datant de 1985.

Cette partie commencera par une présentation de l'outil cartographique puis de la méthodologie mise en place pour renouveler la carte des stations et de la phase de terrain effectuée. Ensuite il sera présenté les sondages, les types de sols rencontrés et la nouvelle carte des stations forestières. Sur cette quatrième partie, deux typologies seront évoquées. Il y a la typologie Jabiol (1985) avec la terminaison des stations en J1, J2, etc et celle du guide de Normandie (2018) dont la nomenclature est « US » : US9, US10, etc.

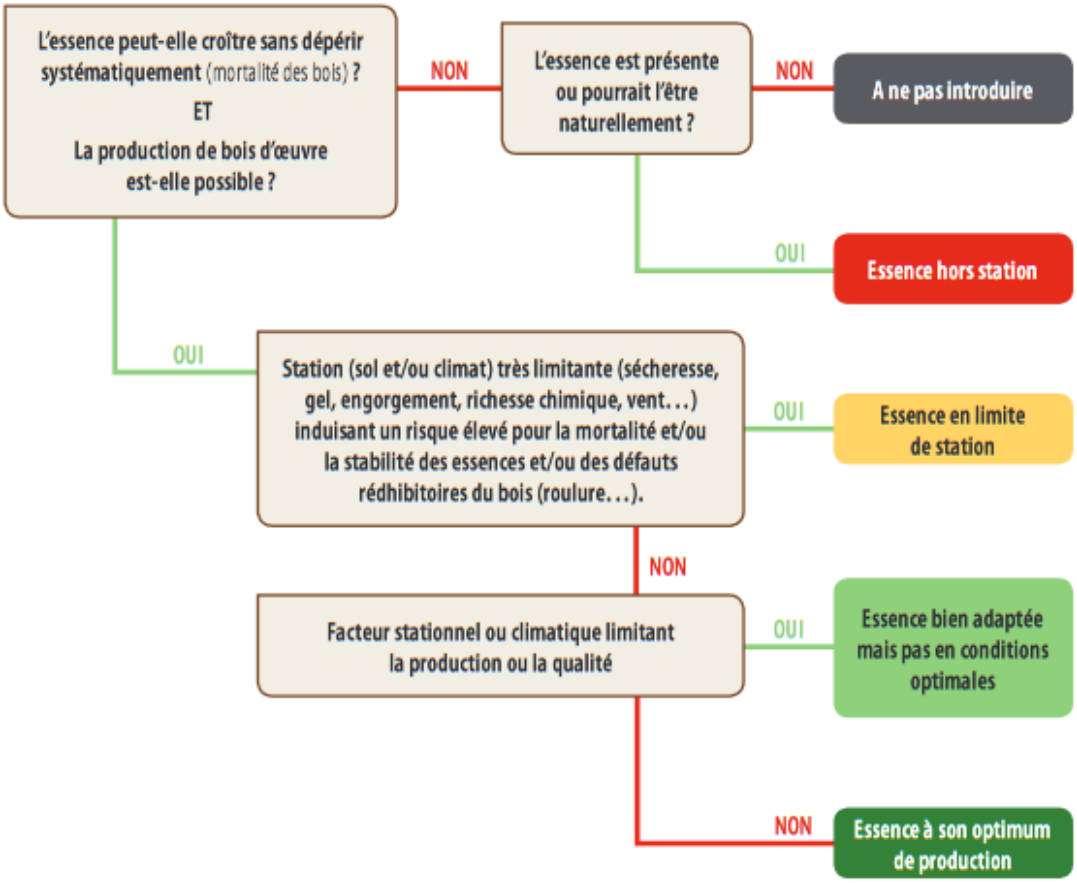
4.1 - La cartographie des stations : un outil essentiel pour anticiper le réchauffement climatique

4.1.1 - Utilités de la carte des stations forestières

La carte des stations forestières[1] est l'un des outils, en forêt, qui permet d'anticiper le réchauffement climatique aujourd'hui en forêt. La cartographie des stations forestières consiste à déterminer et à représenter les différents types de stations présents sur un massif forestier. Celle-ci peut être définie à partir de différentes méthodes dont une vous sera présentée par la suite (*cf. 4.2.2 - Méthodologie choisie pour la carte des stations*). Elle est basée sur un rafraîchissement des données stationnelles à partir de relevés sur le terrain et d'une lecture de la station correspondante dans le guide des stations.
Aujourd'hui, la carte des stations forestières est un outil privilégié en sylviculture[2]. Elle présente de nombreux intérêts pour la gestion forestière au quotidien dont certains sont représentés en Figure 66. La carte des stations est très souvent associée à la question du reboisement car elle permet de choisir convenablement les essences par rapport à leurs adéquations à la station. Elle peut être aussi utilisée pour localiser des zones avec un fort enjeux patrimonial (tourbière, lande, zone humide, etc) ou pour des questions de fragilité du sol au moment de l'exploitation.

[1] ***Station forestière :*** *Zone d'étendue variable, homogène dans ses conditions physiques et écologiques (climat, topographie, sol et végétation naturelle). (Madrolles et Reboul, 2018).*
[2] ***Sylviculture :*** *Ensemble des techniques orientant l'évolution naturelle des peuplements forestiers pour les guider vers les objectifs fixés dans le cadre d'une gestion durable de la forêt. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Figure 67 : *Clé "adéquation essence-station" présente dans les nouveaux guides de stations. (Guide des stations de Normandie, 2018).*



4.1.2 - Le guide des stations forestières

Un guide des stations forestières permet de décrire toutes les stations forestières d'un territoire et de fournir une liste d'essences adaptées et des préconisations de gestion pour chacune d'elles. Son utilisation nécessite quelques connaissances en gestion forestière c'est pourquoi c'est un document qui s'adresse aux gestionnaires et techniciens forestiers. Comme évoqué ci-dessus, il s'applique à un même territoire en raison de ces caractéristiques qui lui sont propres. En Normandie, il y a un guide qui aujourd'hui recouvre l'ensemble de la région en raison du nombre peu conséquent de territoires recouverts par des guides (Pays de Bray, PNR Normandie-Maine, Perche, Pays d'Auge).

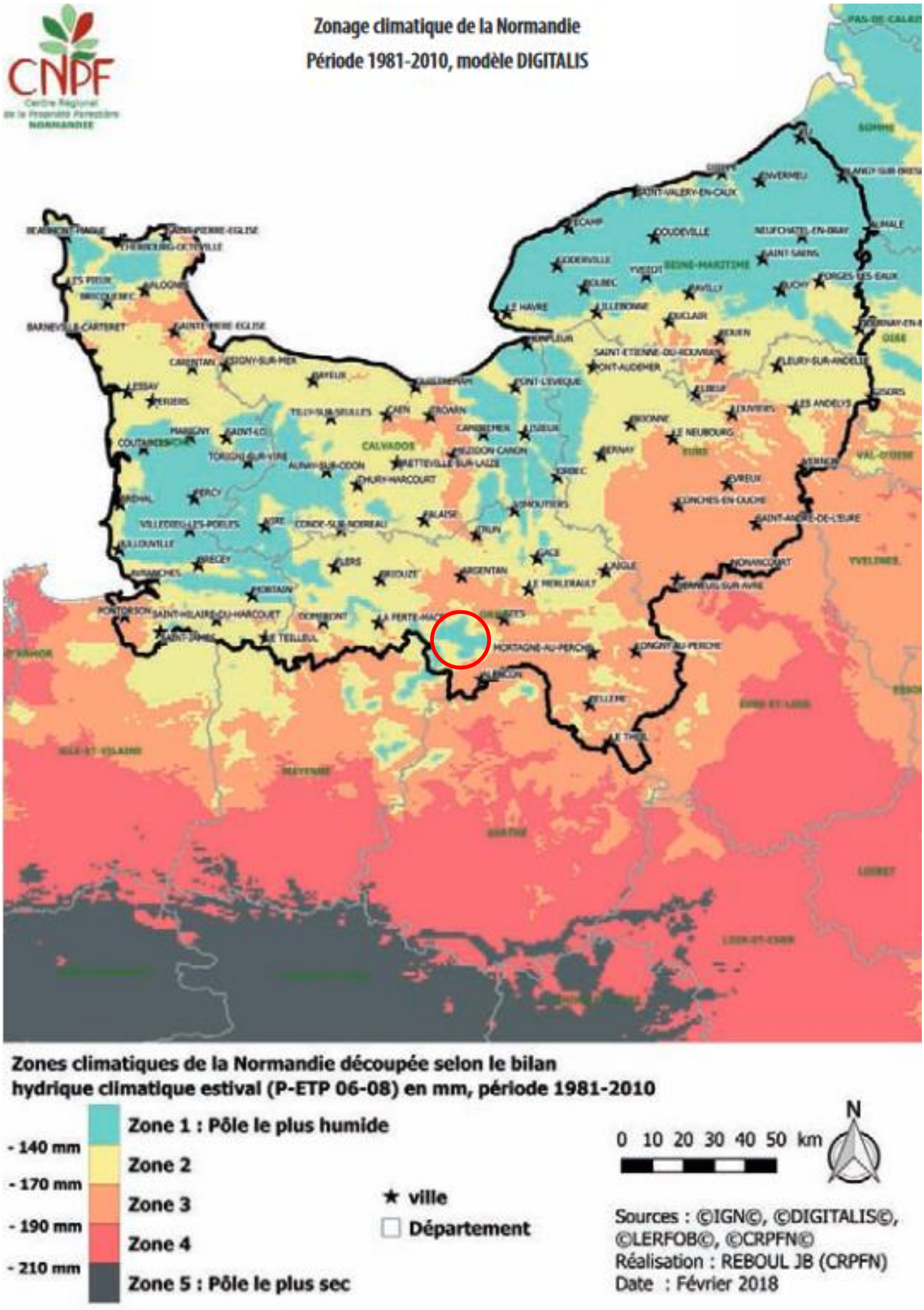
Pour reconnaitre une station forestière dans un milieu forestier, le guide des stations ne fonctionne pas tout seul. Il y a une fiche de relevés de terrain associée au guide (*cf. 4.2.3 - La fiche de diagnostic stationnel)* qui permet de récolter tout un ensemble de données.
Une fois la fiche de terrain remplie, on peut déterminer la station sur laquelle on est à partir d'une clé de détermination présente dans le guide. Cette clé, spécifique à chaque guide, renvoie à des fiches uniques pour chaque station composées d'informations synthétiques qui permettent de confirmer la station, d'énoncer les potentialités de la station et les préconisations sylvicoles.

4.1.3 - Le changement climatique : une notion très récente dans les guides

Depuis 2008, la question du changement climatique est prise en compte dans un guide que ce soit au moment de son renouvellement ou lors de la création d'un nouveau guide. Ce fait est notamment expliqué dans un article de Sylvain Gaudin, datant de 2008, intitulé « *La prise en compte des changements climatiques dans les guides de stations* ». Il est expliqué la façon dont doit être pris en considération ces questions de réchauffement climatique dans les catalogues de stations.
Aujourd'hui, il est important de connaitre l'avenir de nos forêts et il faut dès maintenant se poser les bonnes questions quant à l'introduction de nouvelles essences et sur la sylviculture ou le renouvellement à mener.

Le dernier guide de Normandie du CRPF (Centre Régional de la Propriété Forestière) datant de 2018 prend en compte ces questions de changement climatique en forêt. On retrouve, à l'intérieur de celui-ci, une clé « adéquation essence-station » (Figure 67). Elle permet de définir l'adéquation de l'essence par rapport à la station à court, moyen et long terme. La clé « adéquation essence-station » s'organise en cinq grandes catégories : essence « à ne pas introduire », « essence hors station », « essence en limite de stations », « essence bien adaptée mais pas en conditions optimales » et « essence à son optimum de croissance » (Figure 67). Cette clé s'applique pour chaque essence forestière présente sur la station.

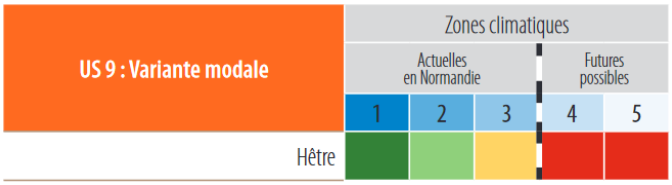
Figure 68 : *Zonage climatique de la Normandie. (Guide des stations forestières de Normandie, 2018).*



En plus de la clé de détermination, une carte de la Normandie découpée en zones climatiques est fournie. Elle est élaborée en fonction des moyennes sur la période 1981-2010 du bilan hydrique climatique estival P-ETp de juin à août. Elle « reflète la sécheresse estivale qui est l'un des paramètres climatiques les plus contraignants pour la croissance de l'arbre et sa survie ». (Madrolles et Reboul, 2018). Cinq zones climatiques ont été élaborées allant de la zone 1 (pôle le plus humide) à la zone 5 (pôle le plus sec) qui pour l'instant se situe au sud des Pays-de-Loire (Figure 68). Actuellement, la région Normandie est recouverte par les trois premières zones climatiques et notre zone d'étude par la première (cercle rouge Figure 68).

In fine la fusion des données issues de la clé « adéquation essence-station » et de la carte des zones climatiques permet de dire si l'essence en place est en station et si elle le sera à long terme. Bien évidemment, pour définir la zone climatique, il faut se référencer à la carte (Figure 68) et regarder dans quelle zone se situe notre terrain d'étude.

Figure 69 : *Exemple d'utilisation du guide sur la question du changement climatique. (Guide des stations de Normandie).*



Prenons un exemple avec la Figure 69. On est dans un peuplement de hêtre en station US9 qui est une station sur sols acides et sains. En observant la carte des zones climatiques de Normandie, la forêt d'Ecouves se trouve en zone climatique 1. Le hêtre est donc actuellement en station d'où la couleur verte foncée qui veut dire « essence à son optimum de production ». Mais quand on regarde les climats futurs (zones climatiques 4 et 5) pour le long terme, le hêtre est hors station en raison d'un manque d'eau qui se fera sentir.

4.2 - Méthodologie de la carte des stations forestières

4.2.1 - Première méthodologie

Pour réaliser la carte des stations forestières, une première méthodologie avait été mise au point et se rapprochait fortement de celle qu'utilise les gestionnaires et techniciens forestiers. Elle consiste à mettre en place un échantillonnage systématique[1] sur la zone d'étude en 50m*50m pour avoir de la précision dans les résultats. Ensuite, transférer l'échantillonnage sur un GPS puis se rendre sur chaque point pour récolter les données stationnelles. Une fois toutes les données récoltées on peut établir un fichier « Excel » avec les informations attenantes à chaque point (encodage) puis définir la station correspondante à partir du guide des stations. Une fois l'encodage réalisé et la station définie on peut produire la carte des stations forestières via un outil SIG.

Avec cette méthodologie un problème de taille est apparu. Les sondages pédologiques devaient se faire à la tarière à main. Mais comme on a pu le voir lors de la contextualisation géologique de la zone d'étude (*cf. 4 - Géologie de la forêt d'Ecouves*), elle est composée de sols avec une charge en cailloux conséquente. Un blocage de la tarière se serait fait ressentir et une mauvaise appréciation du sol aurait été donc faite.

[1] ***Echantillonnage systématique :*** *Echantillonnage dans lequel la population étudiée et repérée grâce à une grille et où les points sont des intersections de grille ou des points à distance régulière. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Figure 70 : *Tableau de correspondance entre le guide de 2018 et celui de 2000. (Guide des stations de Normandie, 2018).*

Unité stationnelle	Variantes	Hautes Collines de Normandie (F. Bercovici)
US 0 : Stations riveraines ou marécageuses	Acide marécageuse	**TA**
	Acide modale	**HN3b**
	Peu acide à riche marécageuse	**HN1, HN4, TN, TN2**
	Peu acide à riche modale	**HN4**
US 1 : Stations sur formations carbonatées à faible réserve en eau	Infertile	
	Carbonatée	
	Décarbonatée en surface	
US 2 : Stations sur formations carbonatées à réserve en eau moyenne à bonne	Argileuse	
	Fraîche	**C**
	Carbonatée	
	Décarbonatée en surface	
US 3 : Stations engorgées sur formations carbonatées	Argileuse	
	Modale	
US 4 : Stations sur sol peu acide à neutre et hydromorphe	Fond de vallon	**HN3a, HN3b, HN4, N3b2,** *N5*
	Faible réserve en eau superficielle	
	Argileuse	
	Hydromorphie de surface	**N2a**
	Hydromorphie de profondeur	
US 5 : Stations sur sol peu acide à neutre et sain	Fraîche	**C, HN2, N3a, N3b1, N4, N5, NM3**
	Sèche	**N2b1**
	Argileuse	**N1**
	Sableuse	
	Riche	*N2b2*
	Modale	**N2b2**
US 6 : Stations sur sol assez acide et hydromorphe	Fond de vallon	*HN3a, HN3b, N3b2,* **NM1, MH1a, MH2a, MH2b**
	Faible réserve en eau superficielle	**MH4**
	Argileuse	
	Hydromorphie de surface	*MH3b*
	Hydromorphie de profondeur	
US 7 : Stations sur sol assez acide et sain	Fraîche	*NM3,* **M4, NM2, M3a, M3b,** *N3b1*
	Sèche	**NM2b, M2b,** *M1b,* **M2a**
	Argileuse	**N1**
	Sableuse	
	Modale	**NM2a, M1a, M1b**
US 8 : Stations sur sol acide et hydromorphe	Fond de vallon	**AP2, A7a1**
	Faible réserve en eau superficielle	**MH4, A7b**
	Argileuse	**MH3a**
	Hydromorphie de surface	**MH3a, MH3b, A7a2**
	Hydromorphie de profondeur	**A1b, A4**
US 9 : Stations sur sol acide et sain	Fraîche	**A6a, M3a, AP1,** *M4,* **M3b**
	Sèche	**M2b, A2,** *M1b, M2a*
	Argileuse	
	Sableuse	
	Modale	**A6a, A3, A1a, A1b, M1a, A4, M1b, A6b**
US 10 : Stations sur sol très acide et hydromorphe	Faible réserve en eau superficielle	**HA1b,** *A7b*
	Modale	**HA1a, HA2,** *A4*
US 11 : Stations sur sol très acide et sain	Infertile	**XA**
	Sèche	*A2,* **A5b, A8a, A8b, A9b**
	Sableuse	**A9a**
	Modale	*A4, A6a, A6b,* **A5a, A9a**

4.2.2 - Méthodologie choisie pour la carte des stations

Dans cette sous-partie, il va être présenté toutes les étapes qui permettront de réaliser, de façon optimale, la carte des stations forestières de la zone d'étude en forêt d'Ecouves. Cette méthodologie s'organise 5 étapes.

- ***Etape 1 :*** Rafraichir les données de l'aménagement forestier de la forêt d'Ecouves qui sont issues de 2004. Les références pour ces données sont la typologie des stations de Jabiol de 1985 avec les stations de J1 à J8 et « *Le catalogue des stations forestières des Hautes collines de Normandie* » datant de 2000. Deux références sont présentes en raison de la correspondance faite par l'ONF entre les deux typologies au moment de l'aménagement forestier en 2004.

  Le renouvellement des données stationnelles se fera par un comparatif entre deux catalogues de stations, propre au secteur à savoir le catalogue de 2000 et « *Le guide de choix des essences de Normandie* » datant de 2018.
  Grâce à une première correspondance entre Jabiol et le catalogue de 2000 on sait à quelles stations correspond la station J1 (selon Jabiol) dans le guide de 2000. Ensuite on peut très facilement faire le lien entre la typologie de 2000 et celle du guide de 2018 par des tableaux de correspondances (Figure 70) permettant de passer d'un guide à un autre.

  Prenons un exemple pour voir la fonctionnalité du tableau de correspondance avec la station J5. La station J5, (couleur bleue foncé Figure 13), fait référence dans le guide des stations de 2000 aux stations A8a, A8b et A9b après correspondance des deux typologies. Quand on regarde le tableau de correspondance, les stations évoquées précédemment font référence à une seule station du guide de Normandie de 2018, à savoir la station US 11 (encadrée rouge sur la Figure 70). C'est de cette manière que les données sur les stations forestières seront mise à jour suivie d'une phase de terrain.

  Une dernière subtilité est à prendre en compte dans le tableau de correspondance entre les guides de 2000 et de 2018. Une même station du guide de 2000 peut correspondre à plusieurs stations du guide de 2018. C'est le cas notamment de la station A6a qui correspond à la fois à la station US9 et US11 du guide de 2018. Pour la station US9, la station A6a apparait en gras alors que pour l'autre elle apparait seulement en italique.
  Cela veut dire que lorsqu'une station apparait en italique, la station est en limite de correspondance avec la station du guide de 2018. Pour rafraichir les données, le choix de ne prendre que les correspondances apparaissant en gras a été opté.

- ***Etape 2 :*** Regarder si les stations forestières présentes sur la zone d'étude n'ont pas bougé par une approche empirique sur les peuplements forestiers. Avec la carte des essences forestières de 2003 (Figure 10), il conviendra d'aller sur le terrain et de noter au sein des peuplements les informations suivantes :

    - Emprise de l'essence objectif qui diminue ou augmente,
    - Couvert forestier[1], dépérissement, différence de croissance, problème pathologique au sein d'une même essence forestière,
    - Changement d'essence non référencé sur la carte de 2003.

  Toutes ces informations vont servir pour savoir si les stations forestières, par rapport à l'aménagement de 2004, ont bougé. Pour ce faire, si une quelconque modification apparait dans un peuplement lors de cette phase de terrain, il faudra alors délimiter cette zone au GPS. Cela permettra d'observer les possibles changements stationnels.

- ***Etape 3 :*** Proposer l'emplacement de fosses pédologiques. Il se fera en fonction de la représentativité des sites par rapport aux stations déjà en place mais également en fonction des variations observées lors de l'étape précédente et de son importance.
  Ce travail sera à compléter par d'autres fosses pédologiques et/ou sondages à la tarière à main pour valider les hypothèses de distributions spatiales des stations émises avec les premières fosses. Ce travail complémentaire permettra aussi aux endroits où il n'a pas été jugé bon de réaliser une fosse pédologique de faire un rapide sondage à la tarière à main.

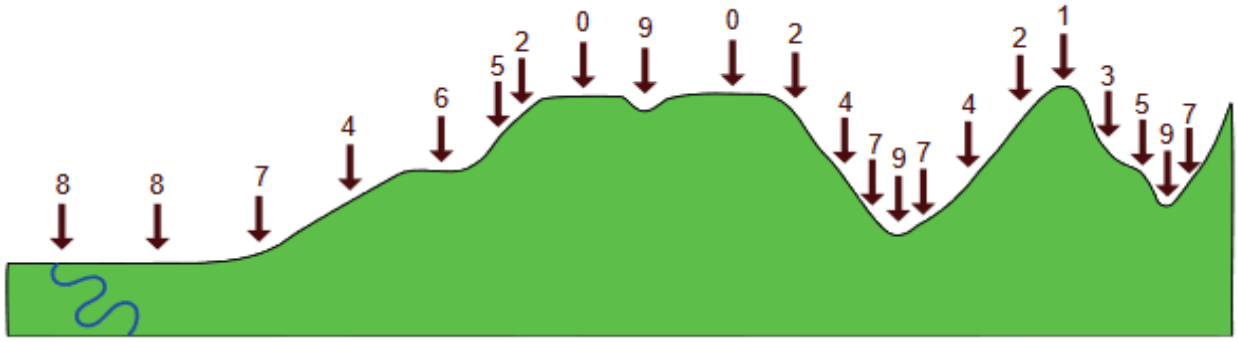
- ***Etape 4 :*** Prise de données sur le terrain à partir d'une fiche de terrain propre aux relevés stationnels. La fiche de terrain a été élaborée à partir d'informations présentes dans le guides de stations forestières de Normandie (Annexe 11). La fiche de terrain est composée d'une première partie correspondante au diagnostic stationnel puis d'une seconde partie pour le relevé floristique. Toutes ces informations sont essentielles pour déterminer la station forestière et créer la carte.

- ***Etape 5 :*** La phase de terrain va consister également à faire des analyses en laboratoire par la prise d'échantillons sur le terrain. Un échantillon sera prélevé pour chaque horizon rencontré. L'analyse de ces échantillons a pour objectif d'observer très finement trois contraintes que les essences forestières peuvent subir avec le changement climatique :

    - Le déficit hydrique par des analyses granulométriques pour déterminer la texture et la charge en cailloux pour ensuite calculer la RUM (Réserve Utile Maximale),
    - L'engorgement en eau,
    - Le manque d'éléments nutritifs par le biais d'analyses physico-chimiques comme la prise de pH, le taux de saturation (Sr), la capacité d'échange cationique (CEC), le rapport C/N et la somme des bases échangeables.

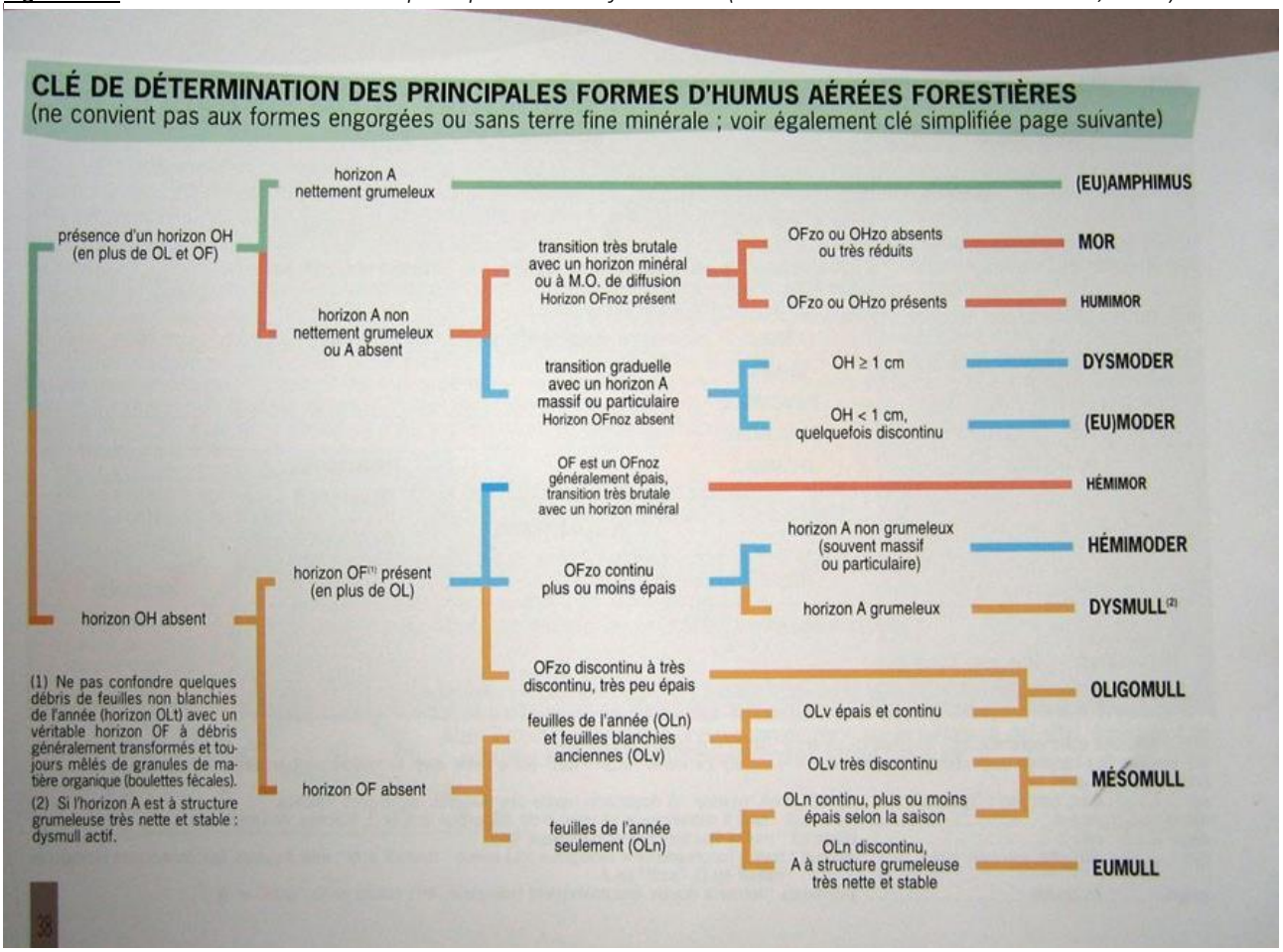
[1] ***Couvert :*** *Surface occupée par la projection horizontale des houppiers d'un arbre, d'une population d'arbre ou d'un peuplement dans son ensemble. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Figure 71 : *Situations topographiques rencontrées sur le terrain. (Guide des stations de Normandie, 2018).*



0 – Plateau
1 – Sommet
2 - Haut de versant
3 – Mi-versant concave
4 – Mi-versant rectiligne
5 – Mi-versant convexe
6 – Replat
7 – Bas de versant
8 – Vallée ou fond de vallon large
9 – Dépression ou fond de vallon étroit

Figure 72 : *Clé de détermination des principaux humus forestiers. (Jabiol et al : L'humus sous toutes, 2007).*



4.2.3 - La fiche de diagnostic stationnel

La méthodologie générale sur le renouvellement de la carte des stations forestières étant rédigée, on peut évoquer plus en détails la partie sur la fiche de diagnostic stationnel (**Annexe 11**).

4.2.3.1 - Détermination de l'habitat, de la variante et de la station

Lorsque l'on fait un diagnostic stationnel à un endroit donné, le relief joue un rôle important dans la détermination des stations forestières. Il est très souvent corrélé à certains paramètres qui caractérisent une station comme l'alimentation en eau, le rayonnement solaire, la charge en éléments grossiers ou encore l'épaisseur des matériaux de surface.
La plupart du temps le relief se détermine à l'œil nu sur le terrain. Les différentes situations topographiques sont représentées sur la Figure 71. La pente est un élément également important dans le diagnostic stationnel car elle peut modifier le bilan en eau d'une station forestière tout comme l'exposition des versants lorsque la pente dépasse les 10 %.

Une fois la position topographique déterminée, il est nécessaire de regarder le type d'humus. Un humus forestier est une « fraction de la matière organique du sol transformée par voie biologique ou chimique. L'humus possède une très forte capacité d'échange, ce qui lui confère des rôles importants dans les sols : fixation de cations nutritifs, stabilisation de la structure, rétention en eau, etc » (Bastien et Gauberville, 2011).
L'humus est composé de plusieurs couches provenant de la décomposition de la matière organique (feuilles, aiguilles) sous l'action de divers micro-organismes dans le sol. L'analyse de l'humus permet de déterminer la teneur en minéraux ainsi que la fragilité chimique d'un sol. Par exemple, pour les sols acides les organismes de décompositions de la matière organique se font rares ce qui entraine une décomposition lente.

Un humus forestier est composé de différents horizons classés en deux grandes catégories à savoir les horizons O « holorganiques » et les horizons A ou « organo-minéral ». Ces derniers, se trouvent après les horizons O et sont composés d'un mélange de matières organiques et de matières minérales (70 %). Les horizons O sont eux situés en surface et contiennent principalement la matière organique. On distingue trois types d'horizons :

- Horizon OL (L = Litière) → Horizon composé de débris foliaires/ligneux pas ou peu évolués. Cet horizon se divise en OLn correspondant aux feuilles de l'année et en OLv où là les feuilles sont plus anciennes, blanchies et collées les unes aux autres,
- Horizon OF (F = Fragmenté) → Horizon composé de résidus de feuilles et/ou aiguilles fragmentées, reconnaissable à l'œil nu, en mélange avec de la matière organique fine,
- Horizon OH (H = Humifère) → Horizon contenant plus de 70 % de matières organiques fines similaire à du terreau. Ici les feuilles ou aiguilles ne peuvent pas être reconnues.

La Figure 72 est la clé de détermination qui permet d'identifier le type d'humus forestier. Elle va des humus acides (mor, moder) aux humus riches en matière organique (type –mull).

Figure 73 : *Tableau du coefficient "k" pour chaque classe texturale. (Cours BTS GF).*

Texture	*Coefficient k*	*Texture*	*Coefficient k*
S	0,7	LAS	1,75
SL	1	LA	1,95
SA	1,35	AS	1,7
LS	1,45	A	1,75
L	1,75	ALS	1,75
LSA	1,65	AL	1,8

4.2.3.2 - Le relevé pédologique

Un relevé pédologique est l'analyse d'un échantillon du sol prélevé soit à partir d'un sondage pédologique (tarière à main) ou d'une fosse pédologique. Pour cette recherche, ce sont les fosses pédologiques qui sont les plus intéressantes en raison de la forte charge en cailloux présente sur la zone d'étude. Le relevé pour une fosse est de réaliser un trou, à la mini-pelle, entre 1 et 5 m de profondeur. Puis il conviendra de prélever des échantillons dans chaque horizon du sol pour en faire des analyses (granulométriques et physico-chimiques) et une description complète du profil en relevant :

- L'épaisseur du sol et de chaque horizon,
- La couleur de chaque horizon,
- La texture du sol. Elle détermine la capacité du sol à retenir l'eau et les minéraux nécessaires pour la croissance des arbres. On distingue trois grands groupes de texture : les argiles (A), les limons (L) et les sables (S).

Cette approche permet de relever de possibles signes de contraintes du sol comme la profondeur d'apparition de l'engorgement en eau et de la podzolisation ainsi que de déterminer la charge caillouteuse jouant un rôle sur la réserve en eau. L'ensemble de ces observations vont permettre ensuite de déterminer la Réserve Utile Maximale (RUM[1]).

Pour chaque horizon, son épaisseur sera notée, la texture du sol et la charge caillouteuse seront déterminées en laboratoire. Ce travail s'effectuera pour l'ensemble des horizons recensés sur chaque fosse pédologique. L'ensemble de ces informations (texture, charge en cailloux et épaisseur de l'horizon) est nécessaire pour calculer la RUM de chaque horizon. Une fois le calcul effectué sur chaque horizon d'un même sondage il suffira de faire la somme pour avoir la RUM totale du sondage. Le calcul de la Réserve Utile Maximale pour un horizon s'effectue de la manière suivante (source cours BTS GF) :

$$RUM\ (mm) = k*E(cm)*(100-EG) / 100$$ où

k = coefficient donnant pour chaque classe de texture, une valeur de RUM exprimée en mm d'eau pour 1 cm d'épaisseur d'horizon. (Figure 73)
E = épaisseur de l'horizon
EG = charge caillouteuse exprimée en pourcentage

[1] ***RUM :*** *La RUM (Réserve Utile Maximale) est la quantité d'eau utilisable par les plantes dans l'épaisseur de sol explorable par les racines. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Figure 74 : *La callune*

Figure 75 : *Le leucobryum glauque*

Figure 76 : *La myrtille*

Source : Préservons-la-nature.fr

Figure 77 : *La molinie bleue*

Figure 78 : *La sphaignes*

Source : Préservons-la-nature.fr

Figure 79 *: La fougère aigle*

Figure 80 : *Le polytric élégant*

Figure 81 : *La laîche à pilules*

Source : Préservons-la-nature.fr

Figure 82 : *La houlque molle*

Figure 83 : *Le millet diffus*

Figure 84 : *La jacinthe des bois*

Source : Préservons-la-nature.fr

4.2.3.3 - Le relevé floristique

Le relevé floristique consiste à annoter toutes les espèces végétales que l'on peut apercevoir sur le point d'observation dans un rayon de 20 m. Attention de ne pas le réaliser en bord de chemin ou de lisière ni dans des jeunes plantations car le relevé pourrait être faussé. La répartition de la flore est influencée par plusieurs caractères écologiques comme le climat, le relief et le sol. Les espèces végétales renseignent sur l'atmosphère climatique de la station, sur l'alimentation en eau et la richesse minérale du sol.

La fiche de relevé de terrain (Annexe 11) est composée, en plus du diagnostic stationnel, du relevé floristique. Cette seconde partie répartie les espèces végétales en groupes écologiques[1] au nombre de 11 dans le guide des stations forestières de Normandie de 2018. Les espèces végétales sont regroupées selon l'humidité, l'acidité du sol mais aussi l'exposition du soleil. En ce qui concerne ce guide, nous allons des milieux très acides et secs aux milieux humides, engorgés en passant par des milieux neutres et même calcaires. Les groupes écologiques rencontrés en majorité lors de la phase de terrain vont être présentés ci-dessous.

Le premier groupe écologique (A) correspond aux plantes de milieux très acides - secs à mésophiles. Elles sont qualifiées de plantes hyperacidiphiles. Ces espèces se développent sur des sols très pauvres en éléments nutritifs, avec un pH bas et un humus épais. On retrouve la callune (*Calluna Vulgaris*), le leucobryum glauque (*Leucobryum Glaucum*) et la myrtille (*Vaccinium Myrtillus*), illustrées par la Figure 74, 75 et 76.

Le deuxième groupe écologique rencontré sur le terrain (B) correspond aux plantes des milieux très acides et engorgés, c'est-à-dire des espèces hygro-hyperacidiphiles. Ces plantes se développent sur les mêmes particularités que le groupe A avec en plus la caractéristique des sols engorgés. On peut rencontrer La molinie bleue (*Molinia Caerulea*) et la sphaignes (*Sphagnum*), Figure 77 et 78.

Le troisième groupe écologique (C) correspond aux plantes des milieux acides - secs à mésophiles. Elles sont qualifiées d'espèces acidiphiles. Ce sont des plantes qui poussent généralement sur des milieux assez pauvres en bases où l'humus est très souvent épais (moder). Néanmoins l'acidité est moins prononcée par rapport au groupe A. Dans ce groupe, on a la présence de la fougère aigle (*Pteridium Aquilinum*), du polytric élégant (*Polytrichum Formosum*) et de la laîche à pilules (*Carex Pilulifera*) illustrées par la Figure 79, 80 et 81.

Le quatrième groupé écologique (D) correspond aux plantes de milieux assez acides-secs à mésophiles. Elles sont qualifiées d'espèces acidiclines à large amplitude. Ici, les plantes se développent sur des sols modérément désaturés, c'est-à-dire des sols qui ont partiellement perdu leurs éléments nutritifs. On retrouve généralement des humus de type mull. Il est caractérisé par des espèces comme l'houlque molle (*Holcus Mollis*), le millet diffus (*Milium Effusum*) et la jacinthe des bois (*Hyacinthoides Non-Scripta*). (Figure 82, 83 et 84).

[1] ***Groupe écologique :*** *Ensemble d'espèces végétales ou animales ayant approximativement la même amplitude par rapport à un ou plusieurs facteurs ou descripteurs écologiques. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Figure 85 : *L'anémone des bois*

Figure 86 : *La laîche des bois*

Figure 87 : *L'euphorbe faux amandier*

Figure 88 : *La Circée de Paris*

Figure 89 : *La laîche pendante*

Source : Préservons-la-nature.fr

Figure 90 : *Exemple d'écogramme d'un milieux sec et acide. (Hugo Fontaine).*

Niveau hydrique							
	XX = Xérophile						
	X = Mésoxérophile						
	M = Mésophile						
	F = Frais						
	H = Hygrocline						
	Hh = Mésohygrophile						
	H = Hygrophile						
		AA = Hyperacidiphile	A = Acidiphiles	Aa = acidiclines	a = neutroacidiclines	n = Neutre	b = Calcaires

Niveau Trophique	Oligotrophe		Mésotrophe		Eutrophe	
	Inférieur	Supérieur	Inférieur	Supérieur	Inférieur	Supérieur

Sol de type xérophile → RUM < 50 mm
Sol de type mésoxérophile → RUM < 90 mm
Sol de type mésophile → RUM de 90 mm à 150 mm
Sol de type frais → RUM > 150 mm

Sol de type hygrocline → pseudogley < 80 cm
Sol de type mésohygrophile → gley > 50 cm
Sol de type hygrophile → gley < 50 cm

Le cinquième groupe écologique (F) est caractérisé par des plantes de milieux peu acides-secs à mésophiles. Elles sont qualifiées d'espèces neutroacidiclines. Généralement ces espèces sont présentes sur une large gamme de sols, mais leur abondance est maximale quand le pH est proche de 7 (neutre). Dans ce groupe, on retrouve des espèces comme l'anémone des bois (*Anemone Nemorosa*), la laîche des bois (*Carex Sylvatica*) ainsi que l'euphorbe faux amandier (*Euphorbia Amygdaloides*) illustrées par la Figure 85, 86 et 87.

Le dernier groupe écologique rencontré majoritairement sur le terrain (G) correspond aux plantes des milieux peu acides et frais. Elles sont qualifiées d'espèces hydro-neutroacidiclines. Ces plantes sont comme pour le groupe précédent présentes sur une large gamme de sols (abondance maximale quand le pH est proche de 7). La seule différence avec le groupe F est que l'on retrouve ces espèces sur des sols frais c'est-à-dire avec une bonne alimentation en eau. Les espèces caractéristiques de ce groupe sont la circée de Paris (Circaea Lutetiana) et la laîche pendante (Carex Pendula) représentées sur la Figure 88 et 89.

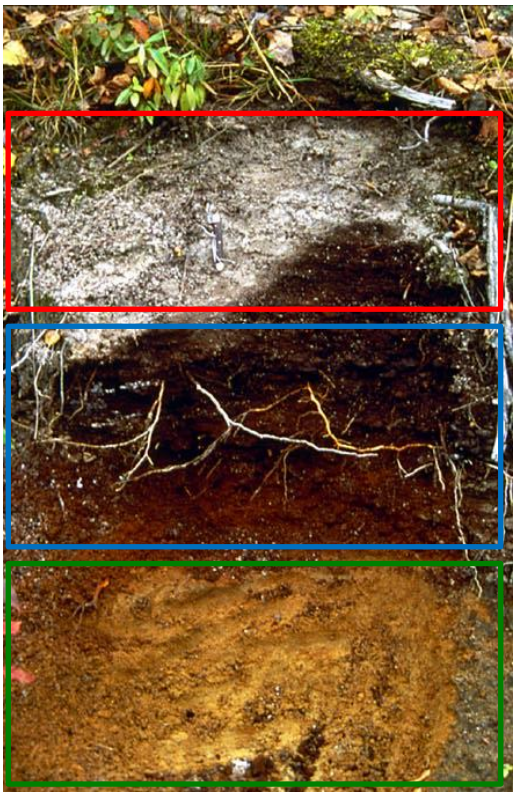
D'autres groupes écologiques sont également présents sur la zone d'étude mais que partiellement. Toutefois ces groupes sont aussi importants que les groupes présentés précédemment car ils servent à trancher entre deux stations lorsque celles-ci sont très proches.
C'est le cas notamment du groupe E correspondant aux plantes des milieux assez acides et frais (hygro-acidiclines à large amplitude) avec notamment le jonc (*Juncus*) ainsi de l'oxalide petite oseille (*Oxalis Acetosella*). On retrouve également le groupe écologique I se référant aux plantes de milieux neutres et frais (hygroneutrophiles) avec l'épiaire des bois (*Stachys Sylvatica*), la scolopendre (*Phyllitis Scolopendrium*) et le lierre terrestre (*Glechoma Hederacea*).

La combinaison du relevé floristique et du calcul de la RUM permet de réaliser un écogramme[1] (Figure 90). Un écogramme donne l'acidité et l'humidité du sol et celui de la Figure 90 montre un sol très sec et très acide. La fusion acidité/humidité permet alors de donner le bilan trophique du sol relatif à la nutrition minérale, élément très important à connaitre pour une essence forestière pour savoir si elle est en station ou pas. Il existe trois types de milieux :

- Oligotrophe : Sol particulièrement pauvre en éléments nutritifs ne permettant qu'une nutrition imparfaite des végétaux ainsi qu'une activité biologique réduite,
- Mésotrophe : Sol moyennement riche en éléments nutritifs permettant une activité biologique moyenne,
- Eutrophe : Sol offrant une grande richesse en éléments nutritifs.

[1] ***Ecogramme :*** *Diagramme coloré représentant les plages d'acidité et d'humidité du sol acceptées par une plante.*

Figure 91 : *Représentation d'un sol podzolisé. (Wikipédia).*



4.2.3.4 - Engorgement et podzolisation

L'engorgement et la podzolisation des sols ne sont pas des éléments à laisser de côté lors d'un diagnostic stationnel car ils permettent d'identifier si un sol est gorgé d'eau (engorgement) ou acide et filtrant (podzolisation) critères qui déterminent également une station forestière. Ces deux analyses s'effectuent au moment du relevé pédologique (*cf. 4.2.3.2 - Le relevé pédologique*) par des observations sur la couleur des horizons du sol.

L'engorgement d'un sol correspond au fait que la porosité est occupée par l'eau, suite à la remontée près de la surface de la nappe phréatique. Pour caractériser cela, on parle le plus souvent d'hydromorphie[1] qui peut soit être temporaire ou permanente. Deux critères sont à prendre en compte pour caractériser l'hydromorphie : la profondeur d'apparition et son intensité qui se détermine à partir de la couleur du sol.
Il y a deux couleurs différentes qui existent pour représenter l'hydromorphie à savoir la couleur « rouille-ocre » qui témoigne d'un sol riche en fer oxydé et la couleur « grise » qui marque un appauvrissement en fer. Voici maintenant une brève présentation des différents types d'hydromorphie que l'on peut retrouver en milieux forestiers :

- Un pseudogley ou rédoxisol → Sol ne présentant que des taches de rouilles aussi appelées taches d'oxydo-réductions dues à l'oxydation du fer dans le sol lors du ressuyage. Ici l'engorgement n'est que temporaire,

- Un gley ou réductisol → Sol où l'engorgement est permanent et où le fer est réduit d'où cette couleur grise typique de ces sols. Il y a 2 possibilités de gley dans un sol :
    - Le gley oxydé → Sol présentant à la fois des taches de décolorations (grise-bleuâtre) et d'oxydo-réductions occasionnées par de courtes périodes de ressuyages
    - Le gley réduit → Sol ne présentant que des taches de décolorations montrant une réduction du fer.

La podzolisation est caractérisée par la présence d'un sol très acide et filtrant. Les eaux pluviales arrivant au contact du sol se chargent d'acidités et solubilisent la matière organique. Cela entraine alors une faible décomposition de la matière organique.
La podzolisation se traduit, tout d'abord, par un appauvrissement du sol en fer, en aluminium et minéraux. Il reste essentiellement du quartz, d'où la présence d'un horizon « cendreux » de couleur gris parfois blanc. On le nomme horizon E (encadré rouge Figure 91).
Ensuite, la podzolisation se traduit par une accumulation en profondeur de matière organique, de fer et d'aluminium que l'on appelle horizon BP. Cet horizon se scinde en deux avec d'abord l'accumulation de la matière organique d'où la présence d'un horizon marron foncé de quelques centimètres (BPh), (encadré bleu Figure 91). Puis l'accumulation de fer et d'aluminium d'où l'horizon ocre (BPs), (encadré vert Figure 91).

[1] ***Hydromorphie :*** *Ensemble de caractères morphologiques présentés par un horizon ou un sol évoluant en conditions réductrices (souvent due à un engorgement de l'eau) de façon périodique ou permanente. (Bastien et Gauberville, 2011).*

4.3 - Changement de stratégie

Au cours des recherches, quelques petits réajustements ont eu lieu concernant la méthodologie et le rafraichissement de la carte des stations.

Lors d'une première rencontre avec l'Office National des Forêts et le Parc Naturel Régional Normandie-Maine (PNRNM), le directeur de l'Agence d'Alençon de l'ONF a expliqué que l'étape 2 de la méthodologie de la carte des stations n'est pas obligatoire. Elle consiste à observer si les stations forestières n'ont pas leurs emprises qui ont été modifiées par une approche empirique (*cf. 4.2.2 - Méthodologie choisie pour la carte des stations*). Le directeur, Samuel Autissier a expliqué que les stations ne peuvent pas avoir leurs emprises qui se soient déplacées en si peu de temps.

Les fosses pédologiques n'ont également pas pu être réalisées comme il était prévu dans la méthodologie (*cf. 4.2.2 - Méthodologie choisie pour la carte des stations)*. Après discussion avec le directeur de l'ONF, il n'était pas contre la réalisation de fosses pédologiques dans la forêt domaniale d'Ecouves. Par contre les moyens n'étaient pas présents, pour cette année, en ce qui concerne leurs réalisations que ce soit pour l'ONF ou le PNR. Aucune fosse pédologique n'a été produite ni aucune analyse en laboratoire (analyses granulométriques et physico-chimiques) n'a été effectuée car aucun échantillon n'a été prélevé.

La réalisation de fosses pédologiques n'étant pas possible, des sondages à la tarière à main ont été réalisés pour faire ce travail de rafraichissement et de vérification des stations. Néanmoins, le travail sur les fosses pédologiques n'est pas perdu. Lors de la phase de terrain, une réflexion aura lieu en même temps pour proposer l'emplacement stratégique de fosses en vue d'une poursuite du travail de recherche (cf pour aller plus loin).

La méthodologie pour le renouvellement de la carte des stations étant faite, on peut passer à la partie analyse des résultats durant laquelle la correspondance entre ancienne et nouvelle typologie, la description des sondages, la carte des stations ainsi que les perspectives de travails sur les stations seront énoncées.

4.4 - Rafraichissement des données sur les stations forestières

4.4.1 - Généralités

Comme l'évoque le titre de cette sous-partie, rafraichir les données stationnelles est important en vue de produire la nouvelle carte des stations nécessaire pour la poursuite des recherches. La méthodologie a été présentée auparavant (*cf. 4.2.2 - Méthodologie choisie pour la carte des stations*) et consiste à faire un lien entre les stations de l'aménagement forestier, typologie de Jabiol et catalogue des stations de 2000, avec le nouveau guide recouvrant l'ensemble de la Normandie intitulé « *Guide de choix des essences de Normandie* » de 2018.

Figure 92 : *Correspondance entre les stations de Jabiol et les stations du catalogue des stations forestières de 2000. (B. Jabiol, 1985 & F. Bercovici, 2000).*

Stations Jabiol (1985)	*Stations du catalogue des stations forestières des Hautes Collines de Normandie (2000)*
J1	N2b1 – N2b2 – N3a – N3b1 – NM2a – NM2b – HN2
J2	M1a – M1b – M2a – M2b – M3a – M3b – A1a – A1b – A2
J31	A2 – A3 – A4 – A6a
J32	A5a – A5b – A6b
J4	A9a
J5	A8a – A8b – A9b
J6	N2a – N3b2 – NM1- Hn3a – HN3b – MH1a – MH1b – MH2a – MH2b – MH3a – MH3b – MH4
J7	A7a1 – A7a2 – A7b – HA1a – HA1b

Figure 93 : *Correspondance entre les stations forestières du catalogue de 2000 et celles du guide de 2018. (CRPF).*

Stations Jabiol	*Stations catalogue de 2000*	*Stations guide de 2018*	*Stations Jabiol*	*Stations catalogue de 2000*	*Stations guide de 2018*
J1	N2b1	US5	J2	M1a	US7 & US9
	N2b2	US5		M1b	US7 & US9
	N3a	US5		M2a	US7
	N3b1	US5		M2b	US7 & US9
	NM2a	US7		M3a	US7 & US9
	NM2b	US7		M3b	US7 & US9
	HN2	US5		A1a	US9
J31	A2	US9		A1b	US9
	A3	US9		A2	US9
	A4	US9	J32	A5a	US11
	A6a	US9		A5b	US 11
J4	A9a	US11		A6b	US9
J5	A8a	US11	J6	N2a	US4
	A8b	US11		N3b2	US4
	A9b	US11		NM1	US6
J7	A7a1	US8		HN3a	US4
	A7a2	US8		HN3b	US4
	A7b	US8		MH1a	US6
	HA1a	US10		MH2a	US6
	HA1b	US10		MH2b	US6

4.4.2 - Principe pour le renouvellement de la donnée stationnelle

La carte des stations (Figure 13) présente une typologie des stations allant de J1 à J7 (typologie Jabiol) pour la zone d'étude ou J8 pour l'ensemble de la forêt. Cette typologie a été élaborée en 1985 par Jabiol. On retrouve la description et les caractéristiques de chaque station dans une étude intitulée « *Les stations forestières en forêt domaniale d'Ecouves (Orne)* » rédigée par B. Jabiol en 1985.

Au cours de la révision de l'aménagement forestier de la forêt d'Ecouves une correspondance a été faite entre la typologie Jabiol et la typologie du guide de 2000 et couvrant la totalité de la forêt domaniale d'Ecouves. Une phase de terrain a notamment été réalisée pour ce travail de correspondance destinée « à scinder le type de station n°3 de Jabiol (appelé J3) en J31 et J32 » (ONF, 2004) pour mieux correspondre au catalogue des stations forestières de 2000.
Voici la correspondance entre les stations de Jabiol et celles du catalogue de 2000 (Figure 92). Elle est basée sur plusieurs critères de correspondance qui ne seront pas expliqués dans ce mémoire. Pour le détail des différentes stations de la typologie de 2000, se référencer au « *Catalogue des stations forestières des Hautes collines de Normandie* ».

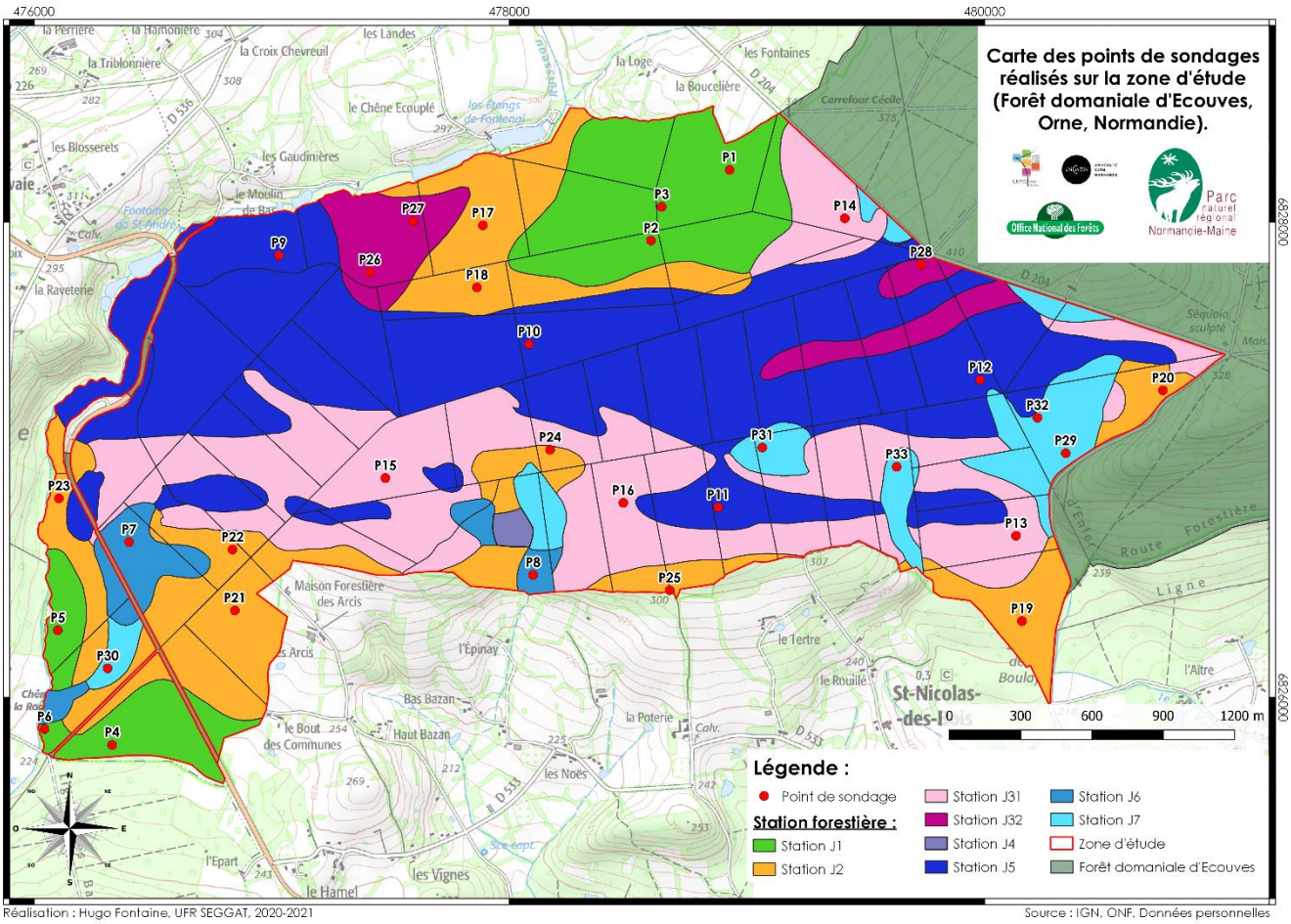
Aujourd'hui l'objectif est de rafraichir ces données stationnelles par des données plus récentes issues du guide des stations de Normandie de 2018 à partir de tableaux de correspondances entre la typologie de 2018 et de 2000.
Prenons l'exemple avec la station J1 (en vert sur la Figure 13) qui a pour correspondance les stations suivantes du catalogue de 2000 : N2b1, N2b2, N3a, N3b1, NM2a, NM2b et HN2 (Figure 93). Quand la correspondance, les stations du guide de 2000 sont réparties dans deux stations du guide de Normandie de 2018 à savoir la station US5 et US7 (Figure 93). Le fait d'avoir une double correspondance se reproduit pour la quasi-totalité des stations Jabiol (*cf.* ***Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.***).

L'objectif sera d'abord de faire les correspondances entre les stations Jabiol et celles du guide de 2018. Puis là où il y a plusieurs stations du guide 2018, comme c'est le cas pour la station J1, il conviendra de faire des sondages à la tarière à main pour vérifier sur quelle station on est (US5 ou US7 pour la station J1).
Pour remettre à jour les données sur les stations forestières, cela ne sert à rien d'aller jusqu'aux variantes au sein d'une même station. L'idée est de faire le lien entre l'ancienne et la nouvelle typologie puisque le sujet de recherche renvoie à une réflexion plus globale sur l'adaptation de la forêt d'Ecouves au changement climatique.

4.4.1 - Correspondance entre le catalogue de 2000 et le guide de 2018

La démarche pour renouveler les données stationnelles étant expliquée, la correspondance entre les stations forestières des deux guides (2000 et 2018) va pouvoir être effectuée. Le tableau de correspondance utilisé est celui présent dans la méthodologie de la carte des stations (Figure 70). La Figure 93 représente la correspondance entre la typologie du catalogue des Hautes collines de Normandie de 2000 et celle du guide de Normandie de 2018.

Figure 94 : *Carte des points de sondages à la tarière à main sur la zone d'étude. (IGN, ONF, Données personnelles).*



Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020-2021

Source : IGN, ONF, Données personnelles

- La station J1 (couleur verte Figure 13) correspond aux stations US5 (*stations sur sol peu acides à neutres et sain*) et US7 (*stations sur sol assez acide et sain*),
- La station J2 (couleur orange Figure 13) correspond aux stations US7 (*stations sur sol assez acide et sain*) et US9 (*stations sur sol acide et sain*) du guide de Normandie,
- La station J31 (couleur rose Figure 13) correspond à la station US9,
- La station J32 (couleur bordeau Figure 13) correspond aux stations US9 (*stations sur sol acide et sain*) et US11 (*stations sur sol très acide et sain*) du guide de Normandie,
- La station J4 (couleur violette Figure 13) correspond à la station US11,
- La station J5 (couleur bleue foncé Figure 13) correspond à la station US11 (*stations sur sol très acide et sain*) du guide de Normandie,
- La station J6 (couleur bleue Figure 13) correspond aux stations US4 (*stations sur sol peu acide à neutre et hydromorphe*) et US6 (*stations sur sol assez acide et hydromorphe*),
- La station J7(couleur bleue ciel Figure 13) correspond aux stations US8 (*stations sur sol acide et hydromorphe*) et US10 (*stations sur sol très acide et hydromorphe*).

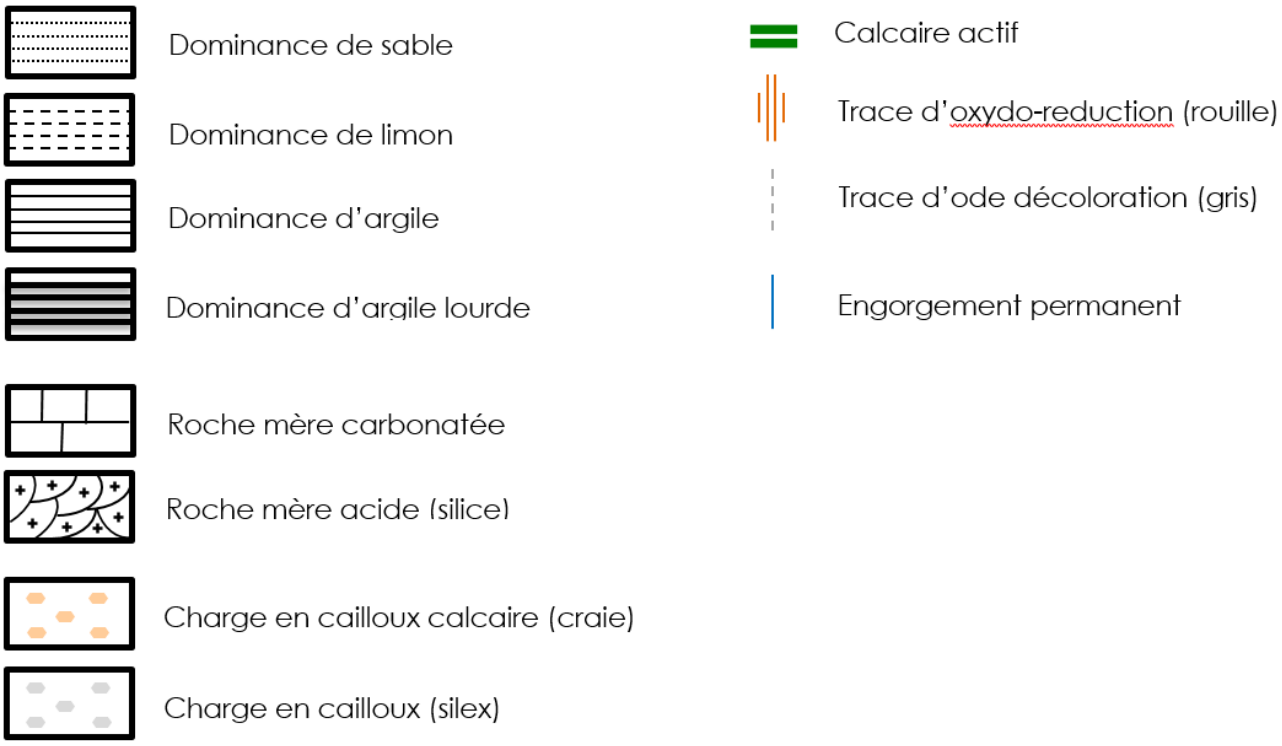
Quand on fait la comparaison entre les diminutifs des stations de Jabiol (1985) et celles du guide de Normandie (2018) on remarque une certaine concordance. La correspondance entre anciennes et nouvelles stations étant faite, la réalisation des sondages va pouvoir se faire pour soit définir sur quelle station on est quand il y en a plusieurs ou pour confirmer quand il y en a qu'une seule.

4.5 - Réalisation des sondages sur la zone d'étude

Les sondages ont pour objectif de rafraichir les données stationnelles et de vérifier si les correspondances entre ancienne et nouvelle typologie sont bonne. Pour ce type de travail, il ne sert à rien de mettre en place un échantillonnage systématique 50 m * 50 m où 100 m * 100 m comme on peut le voir pour une étude stationnelle.
L'emplacement des sondages est un choix personnel réalisé en fonction de la représentativité des stations déjà présentes sur la zone d'étude. Le nombre de sondages par station a été décidé par rapport à la grandeur de l'emprise de la station et du travail à effectuer (Figure 94). Si sur une station Jabiol, une seule station du guide de Normandie de 2018 correspond, le nombre de sondages est moins important que s'il y en a plusieurs. Par exemple pour la station J5, seulement quatre sondages ont été réalisé car il y a seulement la station US11 qui coïncide. Par contre pour la station J2, il y a la station US7 et US9, il y aura plus de sondages réalisés, ici neuf points.

La Figure 94 illustre que 33 sondages ont été réalisés sur la zone d'étude. L'approximation de l'emplacement des points est plus ou moins importante car la prise des coordonnées n'a pas pu se faire à l'aide d'un GPS en raison d'un manque de signal causé par le couvert des arbres. Les coordonnées ont été prises à la main via une lecture sur l'application « Google maps » du téléphone portable grâce à la géolocalisation. Voici la répartition des 33 sondages :

Figure 95 : *Nomenclature des solums pédologiques. (CNPF, Guide des stations de Normandie 2018).*



- Station J1 : 5 points ont été réalisés (P1 à P5),
- Station J2 : 9 points ont été réalisés (P17 à P25),
- Station J31 : 4 points ont été réalisés (P13 à P16),
- Station J32 : 3 points ont été réalisés (P26 à P28),
- Station J5 : 4 points ont été réalisés (P9 à P12),
- Station J6 : 3 points ont été réalisés (P6 à P8),
- Station J7 : 5 points ont été réalisés (P29 à P33).

Une fois l'emplacement du point choisi, il ne reste plus qu'à réaliser un relevé stationnel puis un relevé floristique à partir de la fiche type (Annexe 11). Pour le relevé stationnel, et plus précisément le profil textural, une tarière à main a été utilisée pour effectuer des prospections dans le sol.
Les données récoltées sont les suivantes : coordonnées, exposition, pente, topographie, humus, profil textural, relevé floristique, engorgement en eau et podzolisation. Toutes ces données vont être traitées pour permettre de définir la station et produire la nouvelle carte des stations forestières.

4.6 - Analyse des données récoltées sur le terrain

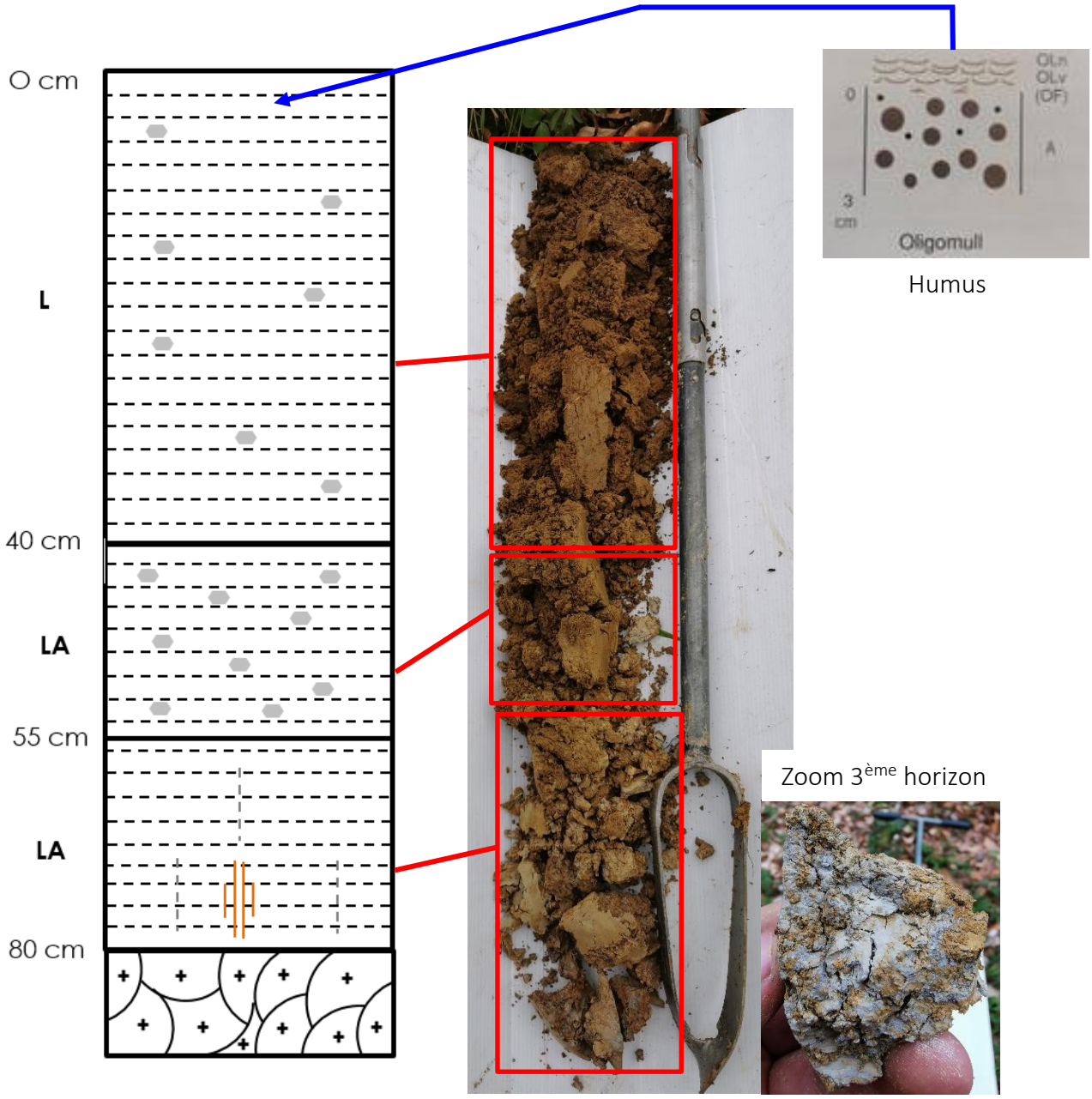
La correspondance entre ancienne et nouvelle typologie étant faite ainsi que la phase de terrain mise en place et réalisée, on peut déterminer quelles stations sont présentes sur la zone d'étude et les cartographier à partir des sondages et du guide de Normandie.

Tous les sondages ne seront pas expliqués dans cette partie. Un condensé sera fait pour chaque station Jabiol. Les schémas des solums vont être établis selon une nomenclature spécifique proposée dans les guides de stations forestières du CNPF (Figure 95).
Pour toutes informations complémentaires sur les stations du guide de Normandie de 2018, se référer à l'ouvrage source : MADROLLES F., REBOUL J-B., 2018, *Guide de choix des essences de Normandie*.

4.6.1 - La station J1

La correspondance entre l'ancienne typologie des stations (2000) et la nouvelle issue du guide de Normandie de 2018 montre que la station J1 coïncide avec les stations US5 et US7. Sur cette station, les sols ne sont pas marqués par de l'hydromorphie d'où le diminutif « sain » dans les appellations (*cf. 4.4.1 - Correspondance entre le catalogue de 2000 et le guide de 2018*). L'analyse des cinq échantillons effectués sur la station J1 montre que l'on est sur la station US5.

Figure 96 : *Profil textural de la station J1 (station US5). (Hugo Fontaine 12/04/2021).*



- La topographie relevée sur les sondages est soit un plateau ou un mi-versant rectiligne où la pente est faible (5 %). C'est une topographie que l'on retrouve sur les deux stations US5 et US7 (Figure 97),

Figure 97 : *Peuplement type de la station J1. (Hugo Fontaine 14/04/2021).*

- L'humus identifié est un oligomull c'est-à-dire un humus dont la succession des horizons est la suivante : OLn – OLv – OF discontinu.
  Cet humus est typique de la station US5 où les humus sont généralement peu épais, de type mull (Figure 96). Alors que pour la station US7, l'humus est plus épais (humus hémimoder) et très rarement peu épais,

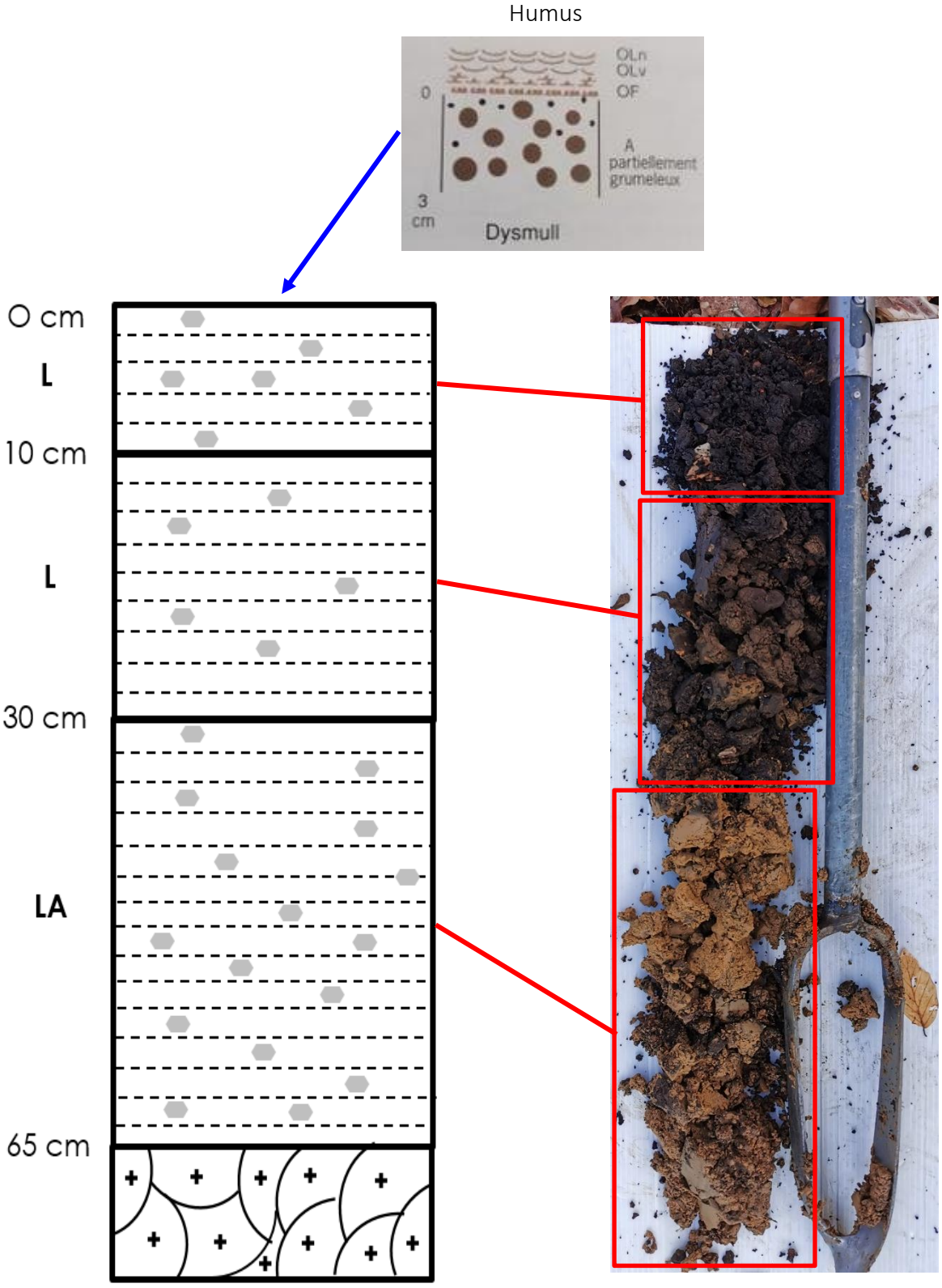
- Le profil textural présente une texture limoneuse sur les 40 premiers centimètres avec une charge en cailloux très faible (5 %). En profondeur, le sol s'enrichit progressivement en argile laissant place à une texture limono-argileuse. De faibles traces d'hydromorphie sont présentes à partir de 55-60 cm de profondeur (traces de décoloration < 20 % et traces d'oxydo-réduction < 5 %), (Figure 96). Cette donnée-là ne permet pas d'identifier la station car que ce soit la station US5 ou US7, le profil textural est le même que celui décrit,

- Le relevé floristique montre la présence en majorité de plantes issues du groupe écologique F (*milieux peu acides et secs*) avec l'anémone des bois, la laîche des bois et le lamier jaune. On retrouve également des plantes de milieux assez acides et secs (D) avec la houlque molle ainsi que des plantes de milieux neutres et frais (I) comme l'épiaire des bois et le lierre terrestre. Ce dernier groupe n'est présent que très partiellement.
  Ce relevé floristique est identique à celui de la station US5 où on retrouve en conséquence des plantes de milieux peu acides ainsi que quelques plantes de milieux plus riches. Pour la station US7, on aurait dû avoir plus d'espèces de milieux assez acides (D) ainsi que des plantes de milieux acides et secs (C) telle que la fougère aigle et la laîche à pilules.

4.6.2 - La station J2

La correspondance des deux typologies a montré que la station J2 coïncide avec la station US7 et US9 du guide Normandie. Suite aux 9 sondages réalisés sur la station J2, on remarque que les deux stations (US7 et US9) sont présentes sur la zone d'étude. Pour la station US7, on la retrouve en exposition nord à l'endroit des points P17 et P18 (Figure 94). Pour la station US9 on la retrouve en versant sud (P19 à P25 Figure 94). Voici les différentes analyses qui permettent de démontrer que l'on est en station US7 en versant nord et US9 en versant sud.

Figure 98 : *Profil textural de la station J2 versant nord (station US7). (Hugo Fontaine 12/04/2021).*



- L'analyse des points P17 et P18 montre que l'on a une topographie de mi-versant rectiligne où la pente reste faible (4 %) typique de la station US7 (Figure 99),

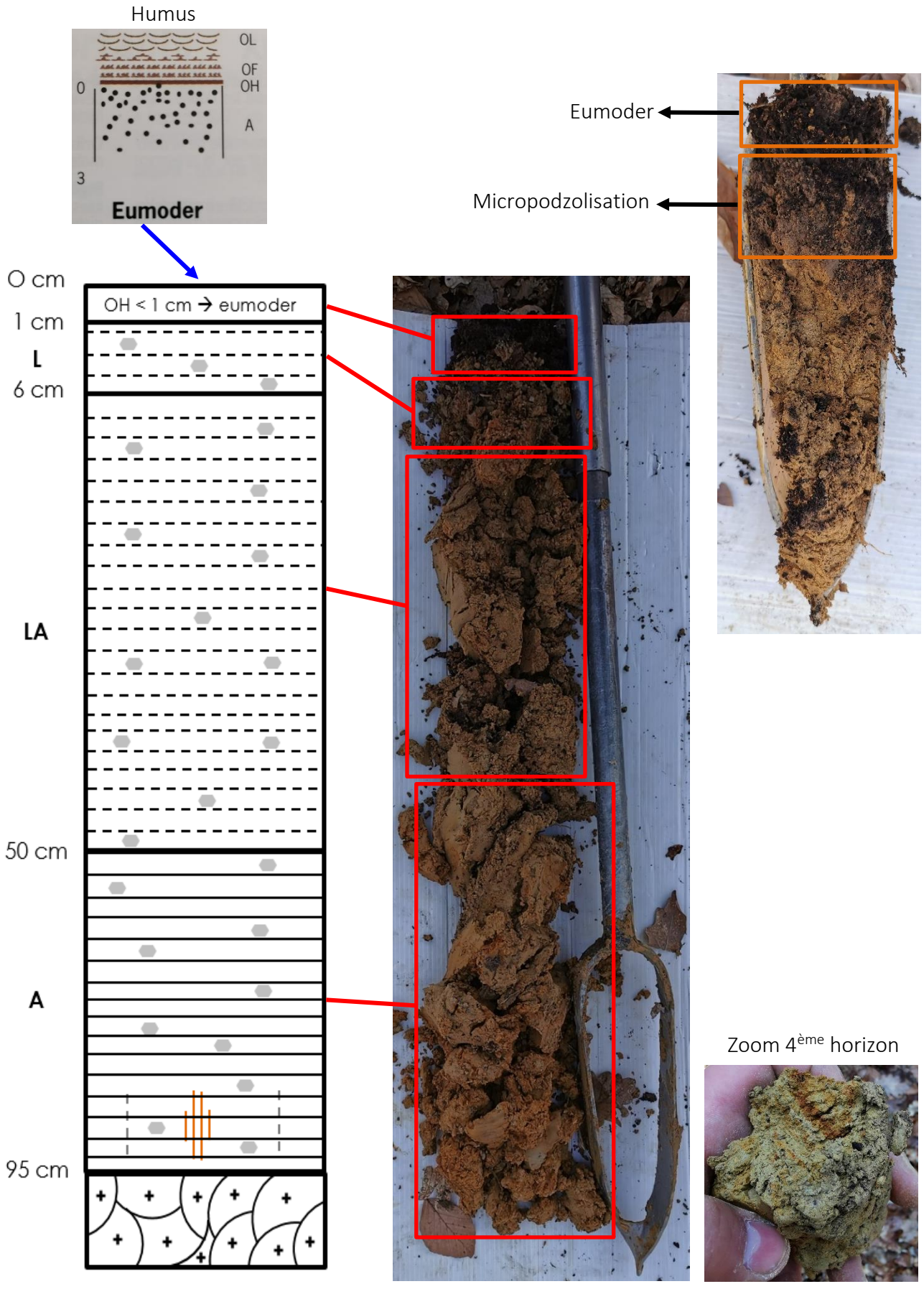
- L'humus identifié sur ces deux sondages est un dysmull où l'organisation des horizons est la suivante : OLn – OLv – OF continu. Ce type d'humus correspond à la station US7 où généralement on est sur des humus assez épais de type dysmull ou hémimoder (Figure 98),

- Le profil textural n'est qu'approximatif car pour les deux sondages un blocage à la tarière a eu lieu en raison d'une charge en cailloux importante. Les horizons de surface ont une texture limoneuse, l'un d'une couleur marron foncé (0-10 cm) et l'autre marron (10-30 cm). La charge en cailloux est assez conséquente, de l'ordre de 20 %. En profondeur on arrive sur une texture limono-argileuse avec une charge en cailloux de 35 %. Le profil textural ressemble à celui de la station US7 à savoir des horizons de surface limoneux et un enrichissement en argile en profondeur (Figure 98),

- Le relevé floristique montre la présence de plantes acides (C) avec la canche flexueuse, la fougère aigle et le polytric élégant. Néanmoins ces plantes ne sont que très peu présentes. On retrouve en conséquence de la houlque molle et la luzule des bois (groupe écologique D) ainsi que de l'anémone des bois (groupé écologique F).
  Ce relevé floristique coïncide avec la station US7. La présence majoritaire du hêtre dans le peuplement témoigne également la présence de sol moins acides de type US7 (image de droite Figure 99).

Figure 99 : *Peuplement type de la station J2. Image de gauche station US9 (dominance chêne) et image de droite station US7 (dominance hêtre). (Hugo Fontaine 14/04/2021).*

Figure 100 *: Profil textural de la station J2 en versant sud et sud-ouest. (Station US9). (Hugo Fontaine 12/04/2021).*



Maintenant, vont être présentés les raisons qui permettent de justifier que l'on est en station US9 sur le versant sud/sud-ouest.

- L'ensemble des sondages réalisés (P19 à P25) montre une topographie de plateau ou de mi-versant rectiligne où la pente est un peu plus prononcée qu'auparavant (8 %). Ces positions et cette pente plus marquée sont typiques de la station US9,

- L'humus est cette fois-ci plus épais et acide où l'activité des micro-organismes (vers) est moins importante. On retrouve également une transition progressive dans la couleur entre les horizons de l'humus (horizon O) et l'horizon minéral (Horizon A). On a là un humus eumoder où la succession des horizons est la suivante : OLn – OLv – OF – OH < 1 cm parfois discontinu. C'est cet humus-là que l'on retrouve quand on est en station US9 (Figure 100),

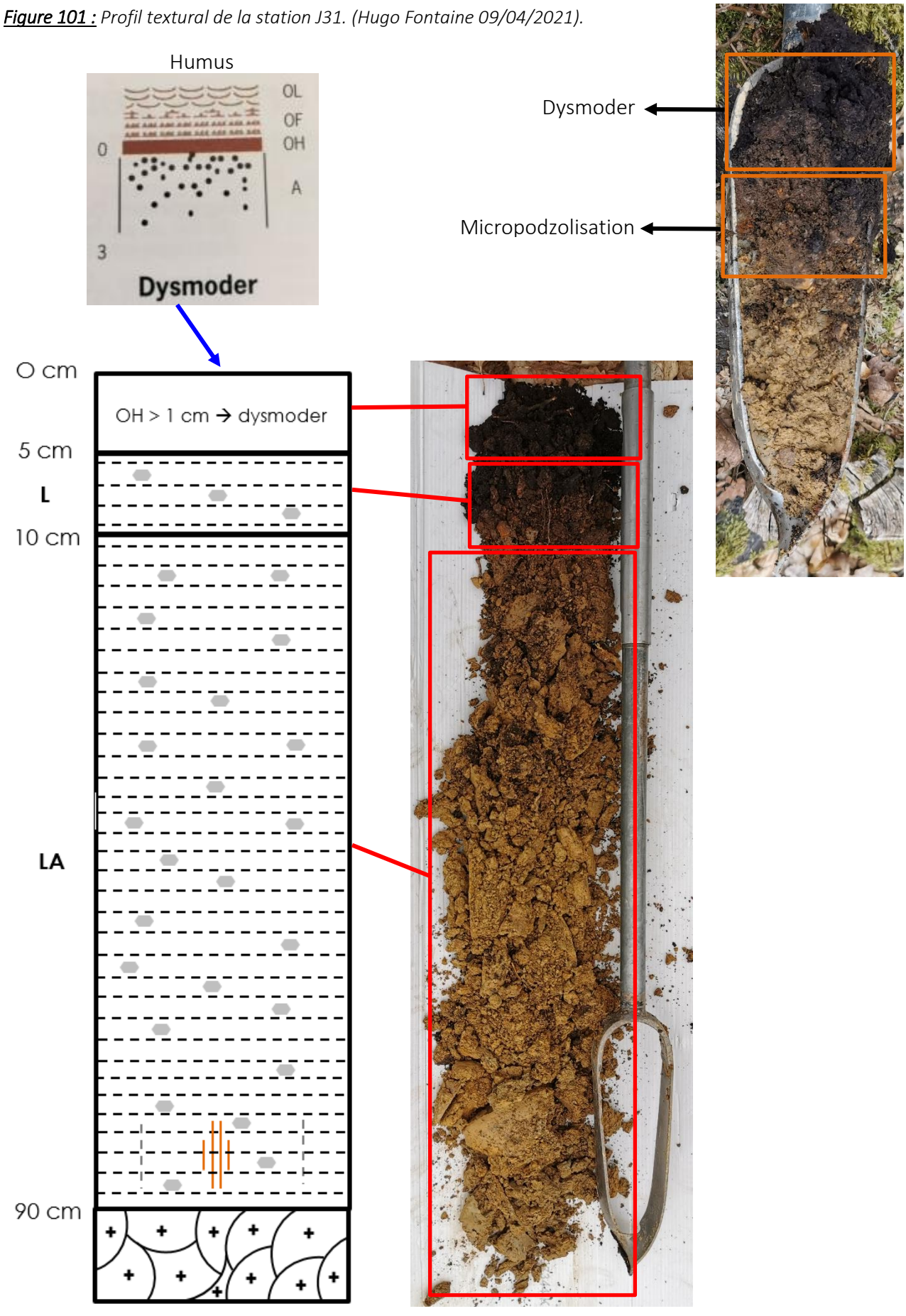
- Le profil textural de l'ensemble des sondages se rapproche fortement de celui décrit pour la station US9. On commence avec l'horizon OH qui fait à peine un 1 cm d'une couleur très foncée et d'un aspect terreau. Ensuite on a 5 cm de limon, d'une couleur marron-gris correspondant à la micropodzolisation de surface que l'on rencontre très fréquemment en station US9. Après cet horizon limoneux, on a un horizon limoneux-argileux jusqu'à 50 cm de profondeur avec une charge en cailloux de 10 %. Puis on termine avec un horizon de profondeur argileux où de très faible traces de décoloration (5 %) et d'oxydo-réduction (5 %) sont présentes témoignant d'une faible hydromorphie (Figure 100),

- Le cortège floristique présente majoritairement des plantes de milieux acides et secs (C) avec la canche flexueuse, la fougère aigle, le polytric élégant, la laîche à pilules ainsi que le sorbier des oiseleurs. A l'inverse des points effectués en versant nord la houlque molle est cette fois-ci remplacé par la myrtille une espèce de milieux très acides et secs (A).
  Ce cortège floristique est identique à celui de la station US9. De plus, la présence du chêne sessile en majorité dans les peuplements témoigne que l'on est bien sur une station plus acide (US9) (image de gauche Figure 99).

4.6.3 - La station J31

La correspondance des guides de stations (2000 et 2018) a permis de voir que la station J31 coïncide avec une seule station du guide de Normandie à savoir la station US9. L'objectif, ici, a été de réaliser des sondages de vérification pour savoir si l'on est bien sur la bonne station. Quatre sondages ont été réalisés et leurs analyses permettent de confirmer qu'aux endroits où il y a la station J31 selon Jabiol, il y a bien la station US9.

Figure 101 : *Profil textural de la station J31. (Hugo Fontaine 09/04/2021).*



- Les quatre sondages ont été réalisés soit sur un haut de versant ou dans une position de mi-versant rectiligne avec une pente marquée (10 %). Ce sont des positions topographiques que l'on retrouve majoritairement, en plus du plateau, en station US9 (Figure 102),

- L'humus rencontré est un humus plus acide, plus épais ou l'activité des micro-organismes est réduite. On est sur un humus de type dysmoder avec une succession des horizons : OLn – OLv – OF – OH épais > 1 cm. En station US9 on retrouve généralement des humus épais de type eumoder ou dysmoder (Figure 101),

- Le profil textural ressemble assez fortement au profil observé sur la station J2 (*cf. 4.6.2 - La station J2*). On a au départ l'humus avec l'horizon OH, très foncé, faisant plusieurs centimètres (4-5 cm). Ensuite on retrouve l'horizon limoneux, de couleur marron clair-gris faisant 5-10 cm marquant la micropodzolisation. Puis un horizon limono-argileux allant jusqu'à 90 cm de profondeur, de couleur marron-camel où la charge en cailloux atteint les 20 %. De très légères traces de décoloration (5 %) et d'oxydo-réduction (5 %) sont présentes en profondeur témoignant d'une faible hydromorphie (Figure 101),

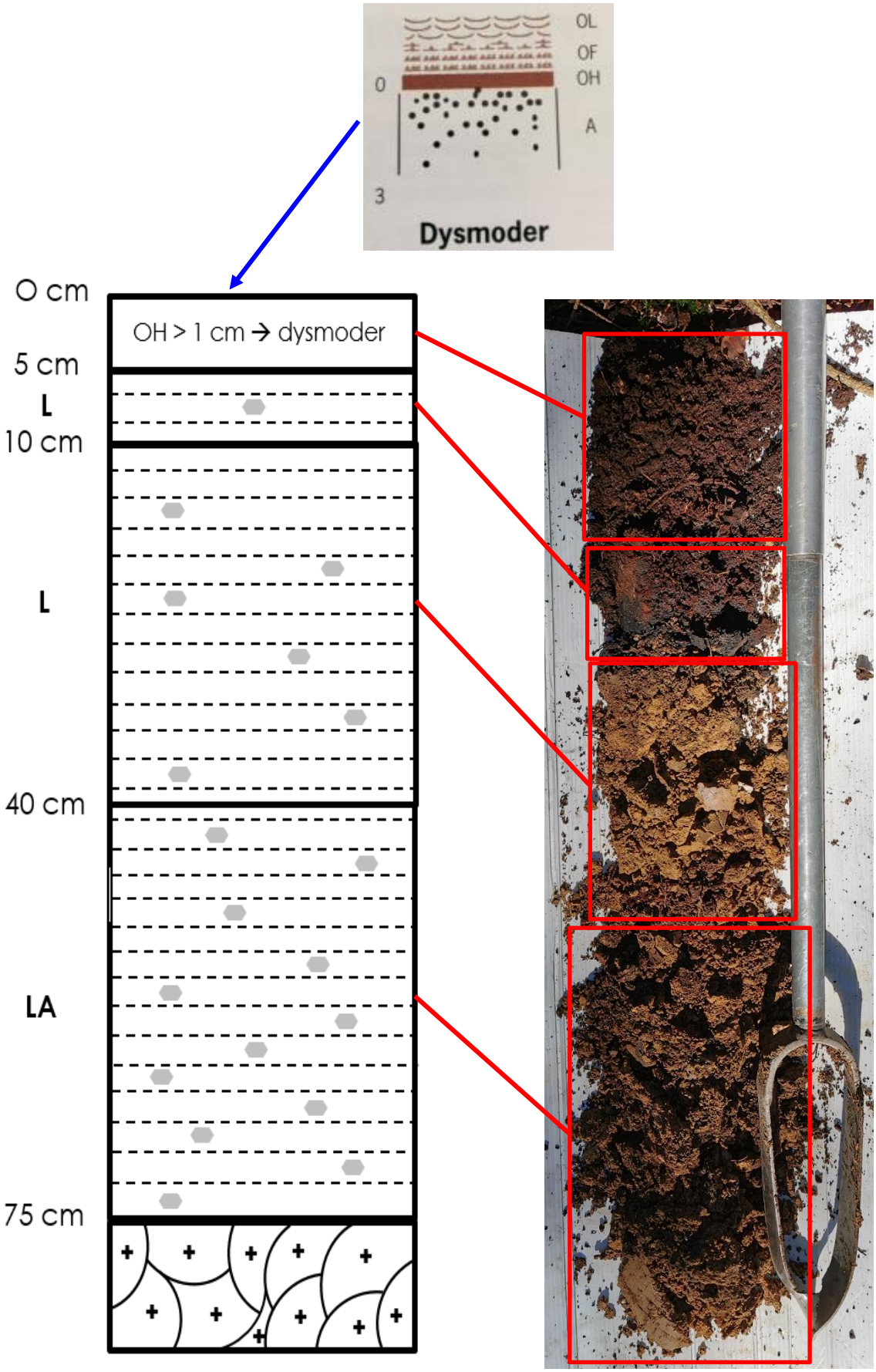
- Le cortège floristique présente des espèces de milieux acides et secs (C) avec la canche flexueuse, la fougère aigle et le polytric élégant ainsi que des espèces de milieux très acides et secs (A) avec la myrtille et le leucobryum glauque. Ce cortège floristique est caractéristique de la station US9 avec un mélange d'espèces de milieux acides et très acides.

Figure 102 : *Peuplements types de la station J31. (Hugo Fontaine 14/04/2021).*

4.6.4 - La station J32

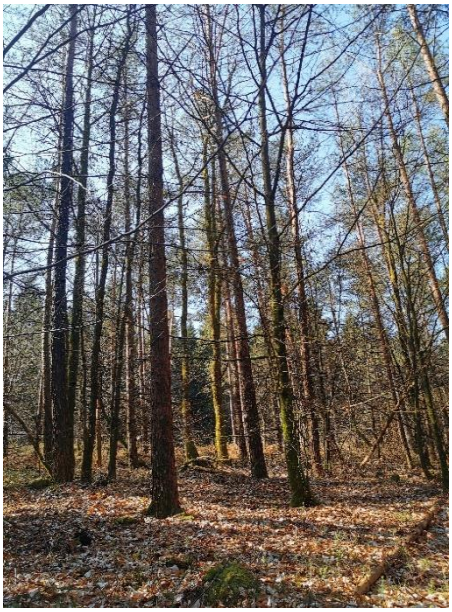
La correspondance entre la typologie du guide des Hautes collines de Normandie (2000) et celle du guide des stations de Normandie (2018) permet de voir que la station J32 concorde avec la station US9 et US11. Trois sondages ont été réalisés sur la station J32 en raison de son emprise assez réduite. Mais ils ont permis de montrer que l'on est en US9 plutôt qu'en US11.

Figure 103 : *Profil textural de la station J32. (Hugo Fontaine 13/04/2021).*



- Les trois sondages ont été réalisés en position de mi-versant rectiligne avec une pente peu marquée (6-7 %) ainsi que sur un sommet en ce qui concerne le point P28. Ces positions topographiques se retrouvent sur les deux stations : US9 ou US11 (Figure 104),

Figure 104 : *Peuplement type de la station J32. (Hugo Fontaine 14/04/2021).*



- L'humus est le premier élément qui permet de montrer que l'on est en US9. L'humus rencontré est épais de type dysmoder (OLn – OLv – OF – OH > 1 cm). Le passage est alors progressif entre les horizons O et A au niveau de la couleur (Figure 103),

- Le profil textural ressemble fortement au profil décrit pour la station US9. Après l'humus de type dysmoder on a un horizon limoneux faisant 5 cm de couleur marron-gris ou noir ressemblant à l'horizon de micropodzolisation. Sur l'ensemble des trois sondages, cet horizon n'est pas toujours présent comme c'est le cas pour le sondage P28.
  Ensuite on a un horizon limoneux faisant 30 cm de profondeur de couleur marron brun dont la charge en cailloux est < 10 %. Puis, plus on va en profondeur plus on a un enrichissement progressif des horizons en argile. En profondeur, on a un horizon limono-argileux de couleur marron-brun avec une charge en cailloux un peu plus conséquente, de l'ordre des 17 %. (Figure 103),

- Le cortège floristique montre la présence de trois groupes écologiques avec le plus abondant les plantes de milieux acides et secs (C) avec la fougère aigle, le polytric élégant ainsi que la canche flexueuse. On retrouve également des plantes de milieux très acides et secs (A) avec la myrtille et la callune ainsi que des plantes de milieux assez acides et secs (D) avec la houlque molle mais en moins grande quantité. Ce relevé floristique est plus proche de la station US9 que pour la station US11. Pour la station US11 il aurait dû y avoir une abondance de plantes de milieux très acides et secs.

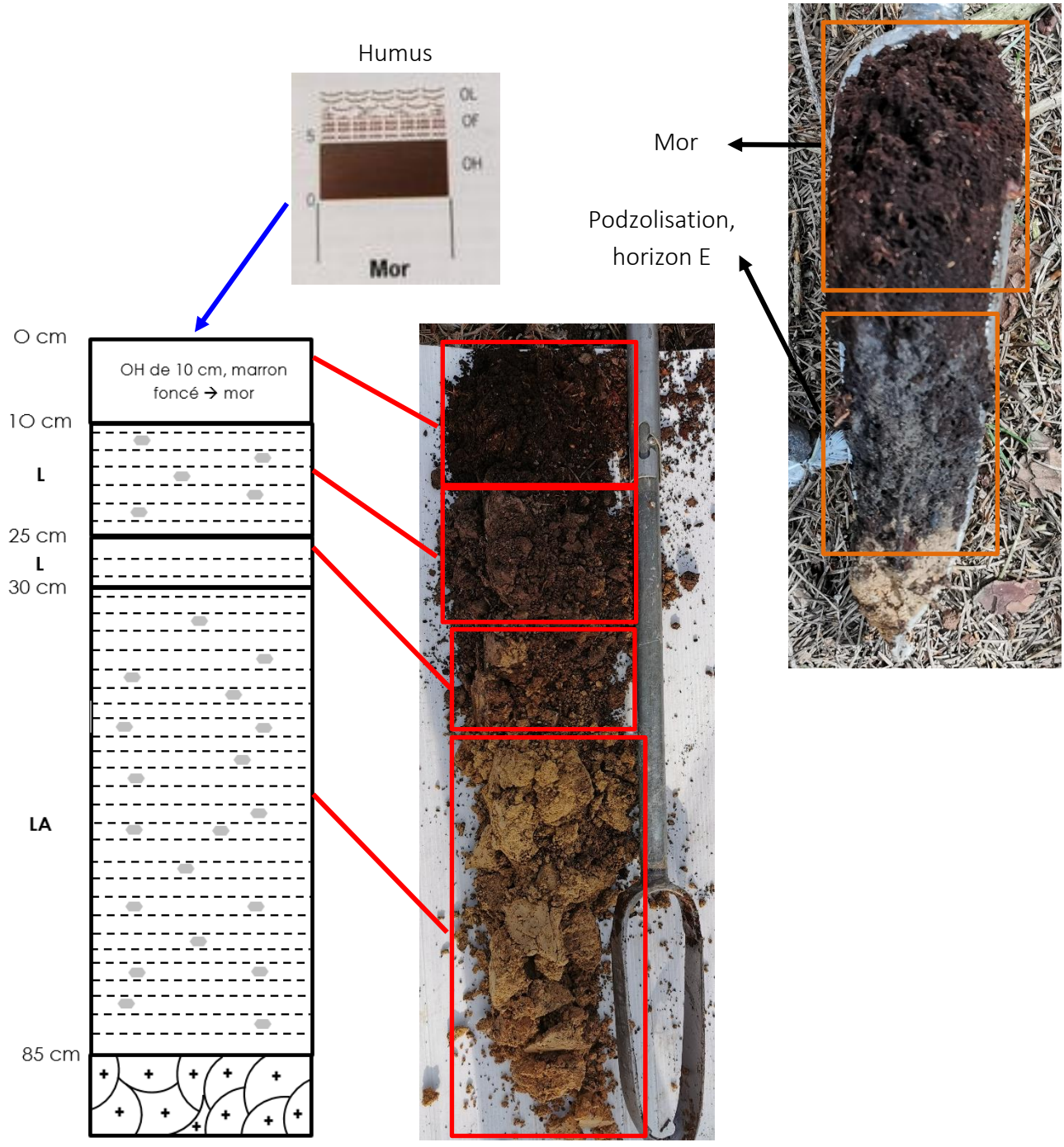
4.6.5 - La station J4

La correspondance a permis de montrer que la station J4 s'accorde avec la station US11. Pour cette station, aucun sondage n'a été réalisé car l'emprise de la station est trop petite pour pourvoir réaliser un sondage. La station n'est présente qu'au sud de la zone d'étude sur la parcelle 348 (Figure 13).

C'est une station que l'on retrouve sur des sols très acides et sains. Le marqueur « très acide » est marqué par la présence d'humus très épais de type mor. Ce sont des humus où l'acidité est forte (pH < 4,5) causée notamment par la présence de résineux (pins, épicéas) où les résidus sont difficilement dégradables et toxiques pour la faune du sol.

Figure 105 : *Peuplements types de la station J5. (Hugo Fontaine 22/03/2021 et 14/04/2021).*

Figure 106 : *Profil textural de la station J5. (Hugo Fontaine 09/04/2021).*



La faune présente sur cette station justifie également l'aspect « très acide » de la station avec la présence en majorité de plantes issues de milieux très acides comme la myrtille, la callune ou encore le leucobryum glauque. Le profil textural de cette station montre une podzolisation dès la surface avec un premier horizon gris-noir et des horizons en profondeur de couleurs ocres révélateur d'un podzol renforçant le caractère « acide ».

4.6.6 - La station J5

La station J5 coïncide avec une seule station du guide Normandie, à savoir la station US11. Comme pour la station J31, une seule station correspond et les sondages effectués sont là pour vérifier si la correspondance faite est bonne. Quatre sondages ont été exécutés dont voici les analyses faites permettant d'admettre que l'on est en station US11.

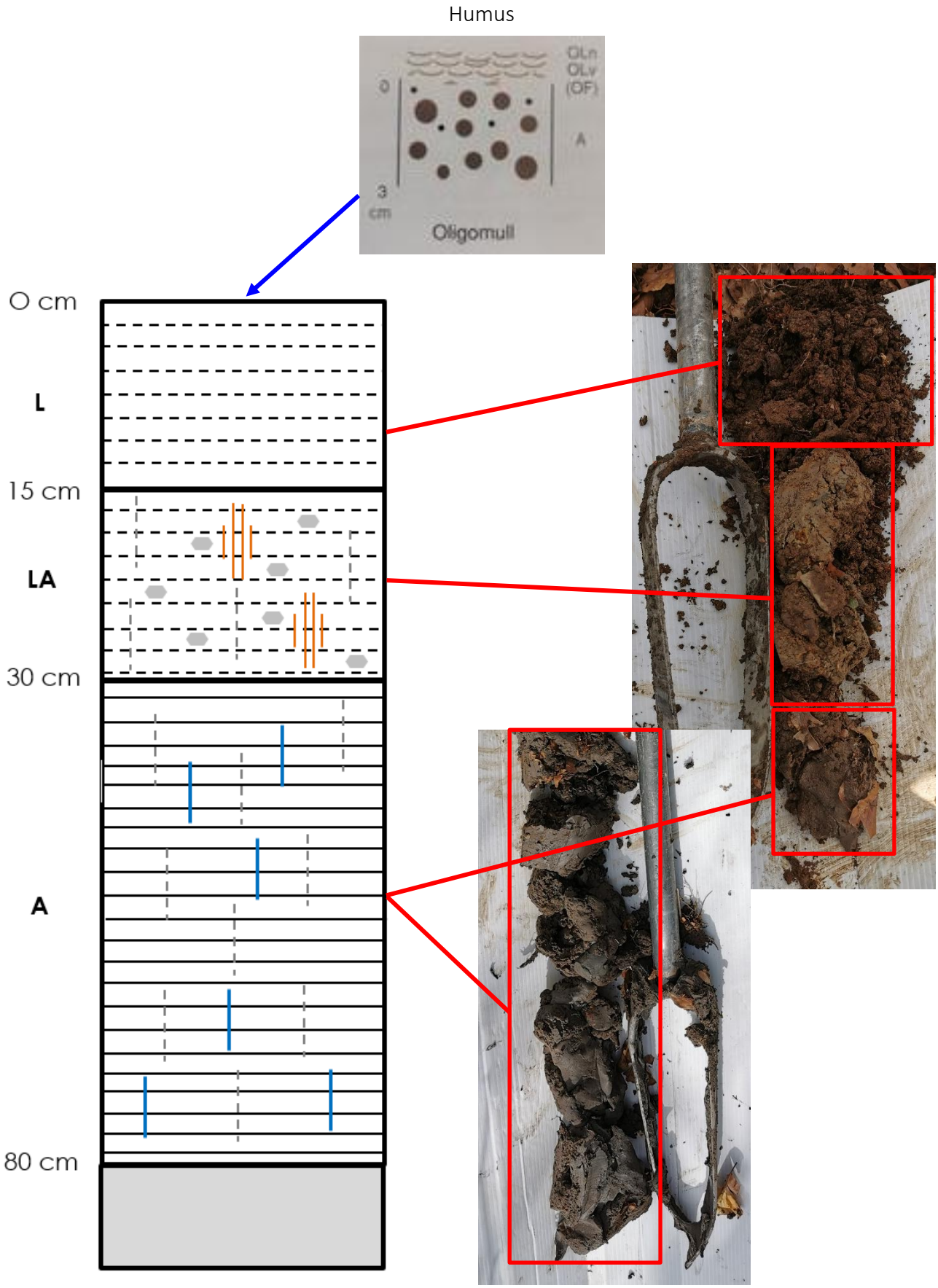
- Les Quatre sondages ont été réalisés en position de mi-versant rectiligne où la pente est assez prononcée (13 %) et en position de haut de versant/sommet. La topographie rencontrée correspond bien à celle de la station US11 où seule la position topographie de « plateau » n'a pas été rencontrée (Figure 105),

- L'humus observé durant la réalisation des sondages (Figure 106) est un humus de type mor dont la transition des horizons est la suivante : OLn – OLv – OF – OH compris entre 5-10 cm. Les particularités d'un humus mor sont la présence d'un horizon OH très épais pouvant dépasser les 10 cm, l'absence d'un horizon A et une transition brutale entre l'horizon OH (marron foncé) et l'horizon minéral (gris-noir). Ce type d'humus est typique de la station US11 où le plus souvent ce sont des humus très épais et acides de type dysmoder-mor,

- Le profil textural montre que l'on est en présence d'un sol podzolisé typique de la station US11. En effet, on retrouve les différentes strates de ce type sol (*cf. 4.2.3.4 - Engorgement et podzolisation*).
  Après un horizon OH massif de 10 cm, on retrouve un premier horizon minéral limoneux gris-noir faisant 15 cm où la charge en cailloux atteint 20 %. On reconnait bien l'horizon E que l'on a sur un sol podzolique. Ensuite on observe un petit horizon limoneux de transition de couleur marron faisant 5 cm correspondant ici à l'horizon BPh d'un podzol. Cette couleur marque une accumulation de la matière organique. Pour terminer, on a un horizon limono-argileux faisant 55 cm de profondeur de couleur ocre marquant, ici, l'horizon BPs d'un podzol témoignant d'une accumulation de fer et d'aluminium. La charge en cailloux est assez conséquente, de l'ordre de 35 % (Figure 106),

- Le relevé floristique ressemble bien à celui de la station US11 à savoir une abondance de plantes de milieux très acides et secs (A) ainsi que la présence assez fréquente de plantes de milieux acides et secs (C). On note comme plante du groupe A, la myrtille, l'hypne de Schreber, la callune et le leucobryum glauque. La fougère aigle, le polytric élégant et la canche flexueuse témoignent de la présence assez fréquente de plantes du groupe C.

Figure 107 : *Profil textural de la station J6. (Hugo Fontaine 08/04/2021).*



4.6.7 - La station J6

La correspondance entre ancienne et nouvelle typologie des stations forestières permet de voir que la station J6 s'accorde avec les stations US4 et US6. Contrairement aux autres stations évoquées auparavant, la station J6 se situe sur des sols hydromorphes, c'est-à-dire des sols marquées par un engorgement en eau soit dès la surface ou en profondeur. En station J6, on est plus sur la station US4 que US6.

- Les trois sondages effectués montrent que la position topographique est soit un plateau ou un bas de versant. Ce sont des positions que l'on a en station US4 mais également en station US6 (Figure 108),

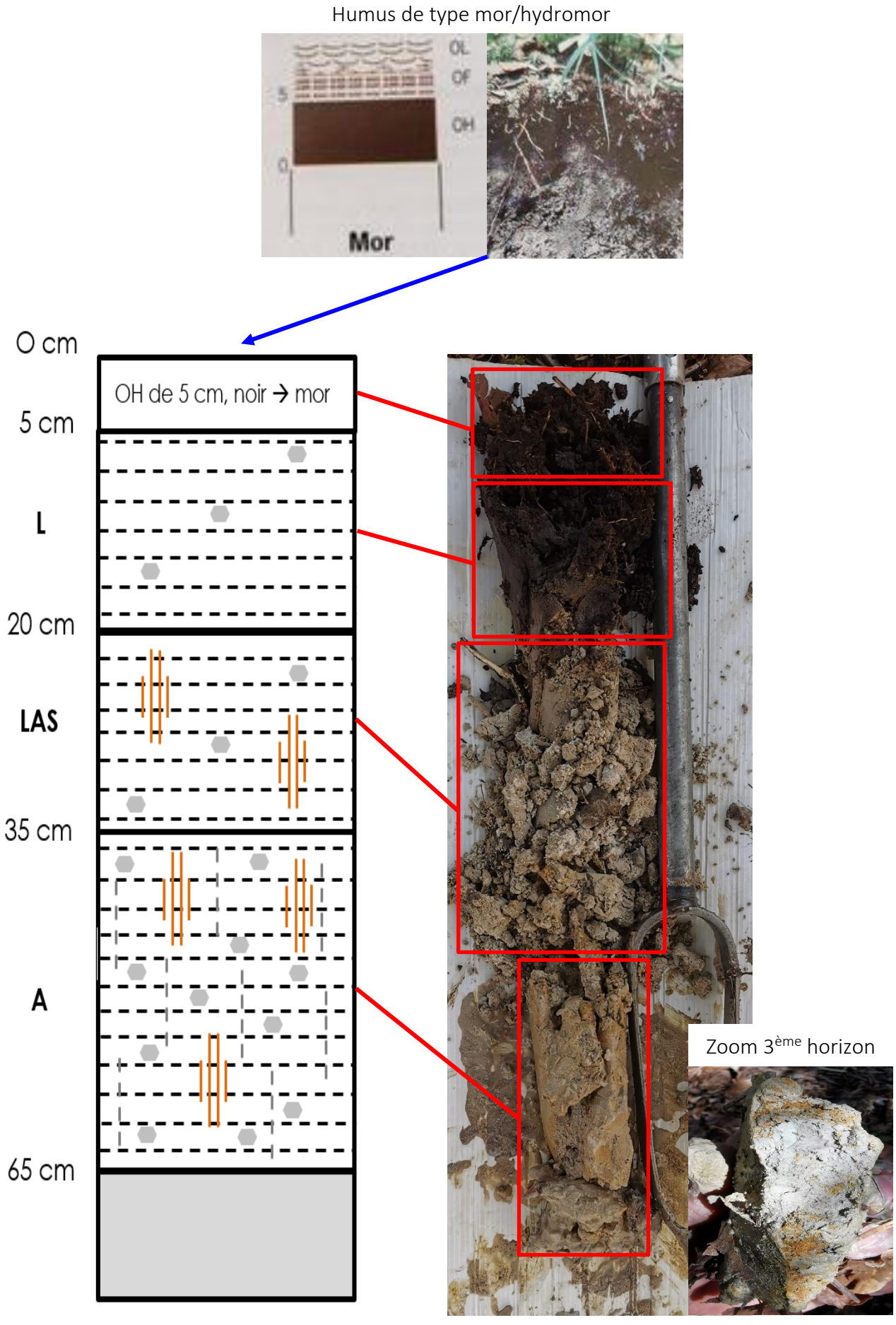
Figure 108 : *Peuplement type de la station J6. (Hugo Fontaine 14/04/2021).*

- On est sur un humus peu épais hydromorphe (Figure 107). Il est de type oligomull dont la succession des horizons O est OLn – OLv – OF discontinu.
  Cet humus est typique de la station US4 car le plus souvent, sur cette station, on retrouve des humus peu épais de type mésomull ou oligomull. Contrairement à la station US6 où les humus sont épais à assez épais (eumoder),

- Le profil textural s'organise de la manière suivante. On trouve un premier horizon de surface faisant 15 cm. La texture est limoneuse, la charge en cailloux est nulle et aucune trace d'hydromorphie n'est présente. Ensuite on a un second horizon limono-argileux faisant 20 cm de profondeur dont la charge en cailloux atteint 30 %. De nombreuses traces d'hydromorphie sont présentes (15 % de traces d'oxydo-réduction et 30 % de traces de décoloration) témoignant la présence d'un gley oxydé où la saturation en eau est alors interrompue périodiquement. Pour terminer, on a un horizon de profondeur argileux composé là uniquement de traces de décoloration témoignant la présence d'un gley réduit (eau en permanence) (Figure 107). Ce profil textural observé sur le terrain se rapproche de celui expliqué pour la station US4 dans le guide des stations de Normandie de 2018,

- Le cortège floristique tend vers les plantes de milieux peu acides et neutres (F) avec le rosier des champs, le fragon et la laîche des bois. L'engorgement se révèle avec des espèces de milieux neutres et frais (G et I) comme la laîche pendante, la circée de Paris ou encore le lierre terrestre. Les plantes de milieux assez acides et frais (E) sont très peu fréquentes avec seules l'oxalide petite oseille et la canche cespiteuse. Ce cortège floristique se rapproche plus de la station US4 que de la station US6 où les plantes de milieux assez acides et acides sont plus fréquentes comme la houlque molle et la molinie.

Figure 109 : *Profil textural de la station J7. (Hugo Fontaine 13/04/2021).*



4.6.8 - La station J7

La station J7 est la dernière station présente sur la zone d'étude et la correspondance des typologies a montré qu'elle concorde avec la station US8 et US10. Comme pour la station J6, la J7 est marquée par l'hydromorphie rendant la gestion un peu différente des autres stations au niveau du choix des essences et de leurs productions ainsi que de la préservation de la ressource en eau. Les sondages effectués sur cette station ont permis de montrer qu'elle coïncide avec la station US10.

- Les cinq sondages ont été réalisés sur des bas de versants ou des zones de replats/plateaux. Les positions topographiques sont les mêmes sur les deux stations (Figure 110),

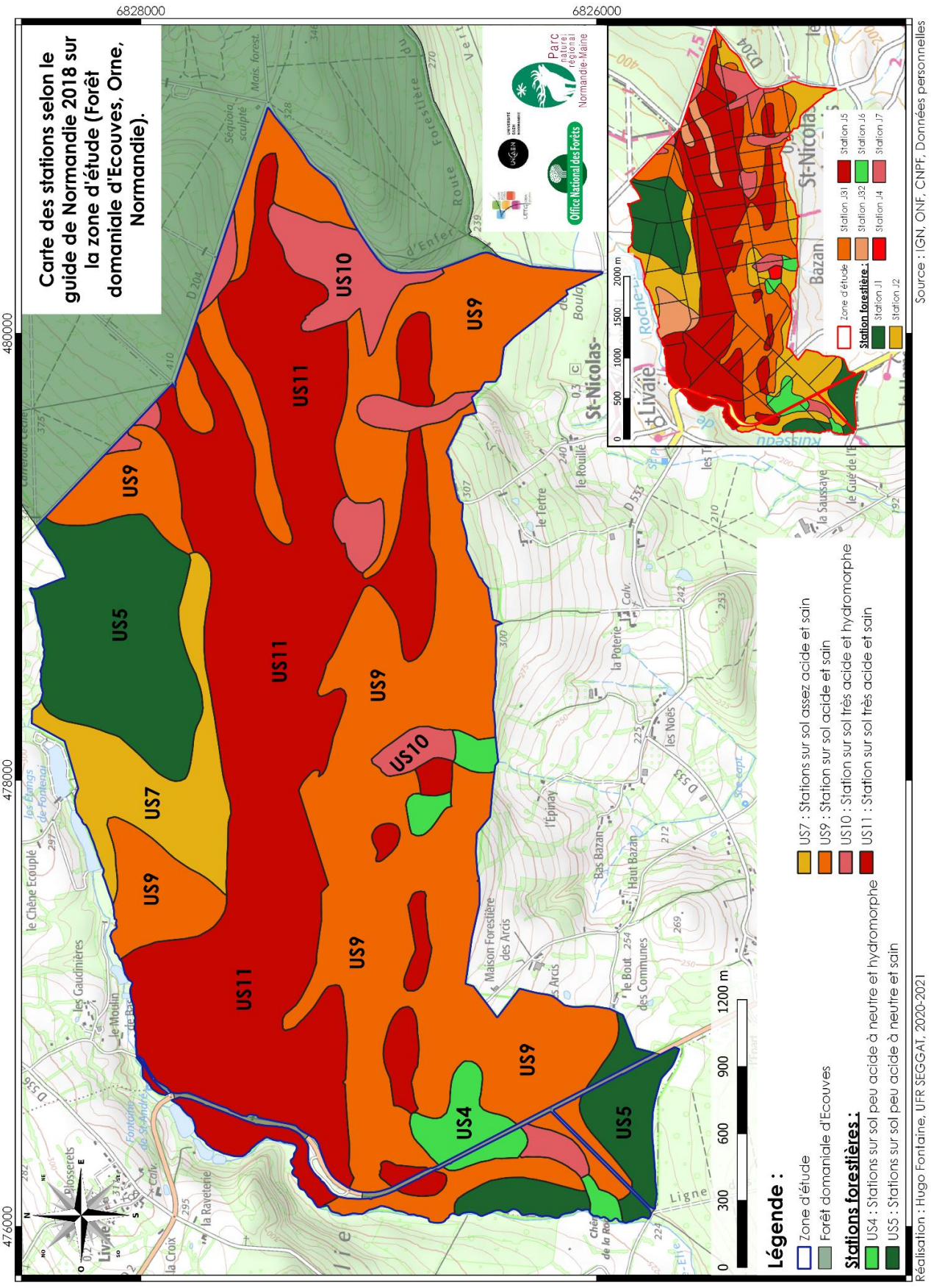
Figure 110 : *Peuplement type de la station J7. (Hugo Fontaine 13/04/2021).*

- L'humus observé est un humus de type mor (OLn – OLv – OF – OH > 3 cm) voir de type hydromor (humus mor en zone hydromorphe). Une transition brutale entre l'horizon holorganique (O) de couleur très foncée presque noire et le premier horizon minéral de couleur gris est observable. Cet humus est typique de la station US10 car on retrouve des humus très épais, très acides de type dysmoder ou mor (Figure 109),

- Le profil textural observé sur le terrain est le suivant. Après l'humus de type mor très épais on a un premier horizon limoneux de couleur gris-noir témoin d'une accumulation de matière organique typique d'un sol podzolique. Cet horizon fait 15 cm de profondeur et a une charge en cailloux de 10 %.
  Ensuite on a un second horizon limono-argilo-sableux à hydromorphie marquée faisant 20 cm de profondeur dont la charge en cailloux est de 10 %. Cet horizon est blanchi à 80 % avec une présence diffuse de tache d'oxydo-réduction (10 %). La particularité de cet horizon est qu'il présente un aspect sec et non mouillé comme on peut observer dans un gley réduit.
  Pour terminer, on a un horizon de profondeur argileux de couleur grise avec une charge en cailloux importante (30 %). Cet horizon représente un gley oxydé car on observe à la fois la présence de traces de décoloration (80 %) et d'oxydo-réduction (20 %), (Figure 109),

- Le relevé floristique montre une présence en majorité de plantes issues de milieux très acides et engorgés (B) avec la molinie, la sphaigne ainsi que le polytric commun. Les plantes de milieux très acides à acides et secs (A et C) sont également présentes avec la myrtille, le blechnum en épi ainsi que la fougère aigle, ici de manière très diffuse. Ce cortège floristique correspond à celui de la station US10 avec une forte présence des espèces des groupes écologiques A, B et C et la petite particularité avec la fougère aigle qui n'est que peu recouvrante.

Figure 111 : *Carte des stations forestières de la zone d'étude selon le guide des stations de Normandie (2018). (IGN, ONF, CNPF, Données personnelles).*



4.7 - Représentation cartographie de la carte des stations

4.7.1 - Choix des couleurs

Initialement les couleurs prévues étaient les suivantes. Pour l'ancienne carte des stations forestières, les couleurs sont celles représentées sur la Figure 13, c'est-à-dire de la couleur verte pour la station J1 à la couleur bleue pour la station J7 en passant par le violet pour la J32. Ce choix de couleur a été élaboré par rapport aux couleurs présentes sur la carte des stations forestières de l'aménagement forestier de 2004. Pour la nouvelle carte des stations (Figure 111), le choix des couleurs s'est fait en fonction de celles attribuées à chaque station dans le guide des stations forestières de Normandie de 2018. On va des couleurs qui tendent vers le vert quand les sols sont peu acides à riches et vers le rouge quand ils sont acides voir très acides.

Pour simplifier la lecture de la carte, une uniformisation des couleurs a eu lieu en ce qui concerne l'ancienne typologie. Au lieu d'avoir des couleurs allant du vert au bleu en passant par le violet, les couleurs choisies sont identiques à celles présentes sur la nouvelle carte des stations forestières.
On a alors un même ensemble de couleur que ce soit sur la nouvelle ou l'ancienne carte des stations. Par exemple, la station J1 correspond à la station US5, la couleur est la même sur les deux cartes, c'est-à-dire vert foncé (Figure 111).
Par contre là où plusieurs anciennes stations Jabiol correspondent maintenant à une seule station du guide, des couleurs assez similaires ont été choisies. C'est le cas notamment pour les stations J4 et J5 qui aujourd'hui coïncident avec la station US11. Il y a alors deux nuances de rouges.
Ce choix est plus parlant que l'ancien choix (couleurs allant du vert au bleu) car le rouge représente sur une carte des sols l'acidité et le vert la richesse dans le sol.

4.7.2 - Résultats

La correspondance entre l'ancienne et la nouvelle typologie des stations forestières, le terrain réalisé et l'analyse des données ont permis de définir pour chaque station Jabiol une nouvelle station du guide de Normandie et de réaliser la cartographie de ces nouvelles stations.

La nouvelle carte des stations forestières rafraichie (Figure 111) montre qu'avec le nouveau catalogue des stations (2018) nous sommes descendus à six stations contre huit auparavant. La correspondance a permis de faire des regroupements de stations et cela permet une meilleure compréhension au niveau de la lecture de la carte.
Lorsque l'on regarde les deux cartes (Jabiol et catalogue de 2018) présentent sur la Figure 111 on remarque quelques modifications.

La station J2 est maintenant découpée en deux nouvelles stations à savoir US7 et US9. La station US9 a connu un regroupement de trois anciennes stations Jabiol à savoir les stations J2, J31 et J32. Tandis que la station US11 a connu une fusion de deux anciennes stations à savoir les stations J4 et J5. En ce qui concerne les autres stations, J1 – J6 – J7, aucune modification ou fusion n'a eu lieu. (Figure 112 & Figure 113).

Figure 112 : *Emprises des anciennes stations forestières. (Hugo Fontaine).*

Station Jabiol	*Correspondance*	*Surface (Ha)*	*Surface (%)*
J1	US5	87,9	11,4
J2	US7 & US9	132,7	17,2
J31	US9	179,5	23,2
J32	US9	33,7	4,4
J4	US11	3,3	0,4
J5	US11	273,4	35,4
J6	US4	19,6	2,5
J7	US10	42,9	5,5
Total		**773**	**100**

Figure 113 : *Emprises des nouvelles stations forestières. (Hugo Fontaine).*

Station catalogue 2018	*Correspondance*	*Surface (Ha)*	*Surface (%)*
US4	J6	19,6	2,5
US5	J1	87,9	11,4
US7	J2	41,6	5,4
US9	J2 & J31 & J32	306,4	39,6
US10	J7	42,9	5,6
US11	J4 & J5	274,6	35,5
Total		**773**	**100**

L'emprise des stations a également changé comme le montre la Figure 112 et la Figure 113 représentant le récapitulatif en hectares de l'emprise des anciennes et nouvelles stations. Concernant les stations Jabiol, on observe une prédominance de trois stations avec la station J2 (17,2%), la station J31 (23,2 %) et la station J5 (35,4 %).
Désormais ce sont deux stations qui ont une emprise dominante avec les stations US9 et US11 avec respectivement 306,4 ha et 274,6 ha. La station US9 occupe 39,6 % de la zone d'étude de par la fusion des stations J2, J31 et J32 tandis que la station US11 couvre 35,5 % avec le regroupement entre les stations J4 et J5. La station J2 était auparavant une station à part entière mais la nouvelle typologie a scindé en deux cette station avec la station US7 (5,2 %) et la station US9 (12 %).

La carte des stations étant élaborée pour savoir si les essences en place sont en stations ou non, on va pouvoir passer aux limites de ce travail effectué sur la carte des stations que ce soit au niveau de la méthodologie, du traitement des données et de leurs analyses.

4.8 - Pour aller plus loin

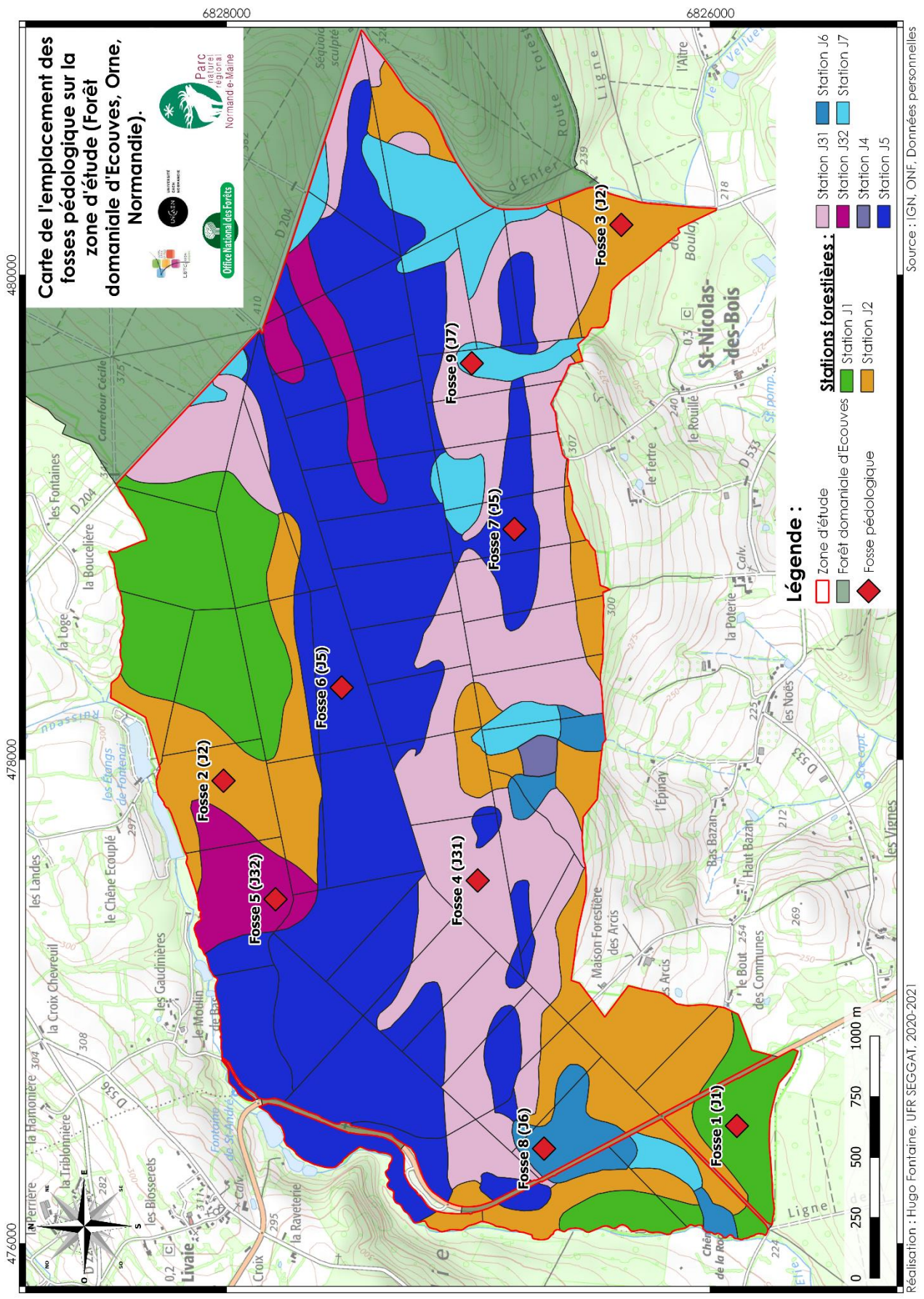
4.8.1 - Les limites de la méthodologie

Le travail sur la carte des stations à partir des sondages à la tarière à main est une bonne première ébauche et a permis de faire des premières hypothèses sur les stations présentes sur la zone d'étude (*cf. 4 - Renouvellement de la carte des stations forestières*). L'ensemble du travail réalisé a montré que des modifications de stations ont eu lieu notamment des fusions de plusieurs anciennes stations en une seule ou la scission d'une station en deux (station J2). Néanmoins ce travail présente quelques limites et des perspectives pour améliorer le travail sont à envisager.

Comme on a pu le voir auparavant (*cf. 4.4 - Rafraichissement des données sur les stations forestières*) la correspondance entre ancienne et nouvelle typologie des stations à quelquefois montrer qu'une ancienne station peut correspondre à plusieurs nouvelles stations. C'est le cas notamment de la station Jabiol J1 correspondant aux stations US5 et US7. Les sondages à la tarière à main ont alors permis d'établir des hypothèses sur la présence de telle ou telle station sur la zone d'étude. Mais ils n'ont pas permis de les confirmer à 100 % et des zones de doutes persistent.

Ces approximations sur la présence de telle ou telle station sont dues en réalité à la prospection des sondages à la tarière à main. La zone d'étude repose sur des sols de type schiste ou grès et la pierrosité peut parfois être importante (*cf. 4 - Géologie de la forêt d'Ecouves*). Les prospections ont donc été compliquées où seuls une dizaine de sondages sur la totalité ont une profondeur de prospection intéressante à 80-90 cm, les autres étant aux alentours des 40-50 cm.
De plus les sondages à la tarière à main ne permettent pas de faire les analyses en laboratoire voulues comme évoquées lors de la méthodologie de la carte des stations (*cf. 4.2.2 - Méthodologie choisie pour la carte des stations*). Ces analyses sont intéressantes à réaliser dans un objectif d'analyser l'impact du changement climatique en milieu forestier. Pour rappel les contraintes sont le déficit hydrique, l'engorgement en eau et le manque d'éléments nutritifs.

Figure 114 : *Carte de l'emplacement des fosses pédologiques. (IGN, ONF, Données personnelles).*



Pour l'engorgement en eau, les sondages à la tarière ont un faible impact quant à l'analyse de cette contrainte. La présence de traces d'hydromorphie se fait à l'œil nu sans analyse en laboratoire et que ce soit à la tarière à main ou par une autre méthode, elle peut être réalisée. Attention tout de même à la profondeur du sondage qui s'il est peu profond, risque de ne pas permettre d'apercevoir des possibles traces d'hydromorphie en profondeur.
Pour les deux autres, (déficit hydrique et manque d'éléments nutritifs) les analyses en laboratoire ne peuvent pas être réalisées pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord, pour réaliser toutes les analyses granulométriques et physico-chimiques il est nécessaire de recueillir une quantité importante de terre dans chaque horizon (20 kg environ). Les sondages à la tarière à main ne peuvent pas permettre de récolter une telle quantité,

- Les blocages à la tarière récurrents ne permettent pas d'observer le sol sur une profondeur convenable, de l'ordre de 2-3 m et ensuite pouvoir réaliser toutes les analyses voulues.

Néanmoins, pour la contrainte du déficit hydrique, des observations à l'œil nu de chaque horizon rencontré ont permis de déterminer la texture et la charge en cailloux. Ces observations ont permis de poursuivre les recherches avec le calcul d'une RUM (Réserve Utile Maximale) moyenne pour le calcul du bilan hydrique. Pour chaque ancienne station Jabiol, une prospection profonde à la tarière à main (80-90 cm) a pu être réalisée. Cela permettra déjà d'avoir une bonne première estimation de la RUM.

4.8.2 - Perspectives envisagées

Pour pouvoir confirmer à 100 % la véracité des hypothèses faites sur la présence des nouvelles stations ainsi que d'approfondir le travail sur les sols par le biais d'analyses, la réalisation de fosses pédologiques est la meilleure solution. La méthodologie de la carte des stations prévoyait initialement la réalisation de fosses mais pour des raisons expliquées auparavant, elles n'ont pas pu être réalisées (*cf. 4.3 - Changement de* stratégie). Néanmoins, des propositions d'emplacements de fosses pédologiques (Figure 114) ainsi que la mise en place d'un devis (Figure 115) ont été réalisés au cours des recherches pour une éventuelle poursuite de ce travail.

La Figure 114 représente l'emplacement des fosses pédologiques souhaitées. Elles sont au nombre de neuf et sont réparties selon plusieurs raisons :

- Une fosse pédologique a été placée sur chaque ancienne station Jabiol pour permettre de confirmer les hypothèses émises avec les sondages à la tarière à main. Aucune fosse ne sera réalisée pour la station J4 en raison de son emprise trop petite alors que deux fosses seront réalisées pour la station J2. Ce choix voulu, en raison des observations faites sur le terrain avec en versant nord la présence de la station US7 et en versant sud la station US9,

Figure 115 : *Devis pour l'ouverture et la fermeture des fosses pédologiques. (ONF).*

Office National des Forêts

ONF - AGENCE TERRITORIALE D'ALENCON
UT ALENÇON
- Maison forestière la Fontaine Maçon.
61250 RADON

DEVIS

Adresse de livraison principale	**Adresse client**
Université de Caen .	Université de Caen . Esplanade de la Paix 14000 CAEN

Objet de la prestation : Ouverture de fosses pédologique puis fermeture	**Coordonnées Client :** SIRET :

DESCRIPTIF DES ACTIONS ET LOCALISATIONS	Qté ou Base	Un.	P.U. ou Taux	TVA	Montant en € HT
AUTRES TRAVAUX					
□ Etudes et analyses sylvicoles diverses Ouverture puis fermeture de fosses pédologiques *(Ref : 05-EDIV-SYLVDIV0)*	9,00	U	153,73	20,00	**1 383,57**

TVA		
Taux	Base	Montant
20,00%	1 383,57	276,71

Total HT	1 383,57 €
Total TVA (1)	276,71 €
Total TTC (1)	1 660,28 €

Pour faire suite à votre demande, nous avons le plaisir de vous transmettre notre meilleure proposition. Cette offre est valable 3 mois Le 27/05/2021 Responsable de l'offre	Devis lu et accepté pour un montant de : 1 383,57 **€ HT** 1 660,28 **€ TTC** (1) Transmis en retour à l'ONF pour exécution : A , le (Signature nom, fonction)

- En signant ce devis vous reconnaissez avoir pris connaissance et accepté les conditions générales de vente de l'ONF. Elles sont disponibles sur www.prestations.onf.fr ou peuvent être adressées sur simple demande à onf-prestations@onf.fr
- Cette prestation sera réalisée conformément aux engagements des Cahiers Nationaux de Prescriptions des Travaux et Services Forestiers (CNPTSF)
- Cette prestation sera réalisée conformément aux engagements des Cahiers Nationaux de Prescriptions d'Exploitations Forestières (CNPEF)
- Ce devis pourra faire l'objet de factures intermédiaires en fonction de l'avancement des prestations.

(1) Taux de TVA appliqué sous réserve de modification législative

- L'emplacement des fosses a été réfléchie de manière à ce qu'elles soient faisables, accessibles pour la mini-pelle et en toute sécurité vis-à-vis des touristes et promeneurs. Si elles sont réalisées, elles seront, bien évidemment, matérialisées par du ruban de balisage pour être visibles à la fois pour les promeneurs et celui qui conduira la mini-pelle. Pour la station J4, la question d'accessibilité a aussi été posée et a montré qu'aucune fosse n'est réalisable en raison de la pente prononcée,

- Les fosses pédologiques ont été réparties équitablement sur la zone d'étude pour permettre d'avoir des orientations du soleil, des versants différents ainsi qu'une topographie différente,

- Les fosses ont été placées uniquement dans des peuplements adultes pour éviter toutes dégradations de la régénération dans les jeunes peuplements et avoir une végétation représentative,

- Le positionnement des fosses a été également réfléchi par rapport au contexte géologique de la zone d'étude (*cf. 4 - Géologie de la forêt d'Ecouves*). Pour rappel on a la présence de trois contextes différents à savoir le contexte schisteux, le contexte gréseux et le contexte de colluvionnement. Pour ce faire l'emplacement des fosses ainsi que leurs réalisations (Figure 114) vont permettre d'étudier ces trois contextes.
  Les fosses 5, 7 et 8 se situent sur des formations schisteuses, les fosses 1, 3, 4, 6 et 8 sont sur des grés tandis que la fosse 2 se trouve sur des colluvions.

En ce qui concerne le devis des fosses pédologiques (Figure 115), il a été élaboré en collaboration avec le technicien forestier qui gère le triage sur lequel est réalisée la recherche, Monsieur Yves Adam. Ce devis prend en compte l'ouverture et la fermeture des fosses pédologiques, d'un montant TTC de 1 660,28 €. Soit deux jours de travail estimé par le technicien.
L'élaboration de ce devis semble intéressant en vue d'une possible poursuite du sujet en collaboration avec le PNR Normandie-Maine ou l'ONF et permet de chiffrer à l'avance le travail.

L'ouverture et la fermeture des fosses a été estimé à deux jours de travail par le technicien forestier. Bien évidemment toutes les analyses, prises d'échantillons et photos ne sont pas prises en compte dans les deux jours et cela est à rajouter.
La réalisation complète d'une fosse (creuser, analyse, prise d'échantillon et rebouchage) est estimée à 2h30–3h de travail ce qui veut dire que pour l'ensemble des neuf fosses cela pourrait prendre 3-4 jours.

Figure 116 : *Tableau récapitulant l'intervalle du déficit hydrique pour les mois concernés. (Hugo Fontaine).*

Mois	*Valeur minimale (mm)*	*Valeur maximale (mm)*
Mai	0	0,4
Juin	4,8	12,9
Juillet	9	21
Août	13,3	28,6

5 - Adéquation des essences forestières par rapport au climat et aux stations forestières

La finalité de ce mémoire de recherche est d'analyser sur la zone d'étude l'adéquation des essences forestières, c'est-à-dire si elles sont en stations ou pas. Il est intéressant d'analyser l'adéquation des espèces face au climat de la normale climatique et actuel ainsi que face aux stations forestières.
Ces deux approches ont été expliquées et réalisées auparavant et correspondent pour l'étude pédologique au renouvellement des données stationnelles et pour l'étude climatique à l'étude du climat à diverses échelles géographiques et notamment la spatialisation à fine résolution du bilan hydrique mensuel sur le terrain d'expérimentation.
Pour voir l'adéquation des essences, il faut en plus de l'étude pédologique associer le guide des stations forestières de Normandie de 2018 qui permet grâce à la connaissance des stations et essences forestières sur le site de déterminer si elles sont en stations ou pas.
Observer l'adéquation des essences permettra au gestionnaire de gérer durablement ces essences sur ce secteur soit en adoptant une sylviculture adaptée à la situation où en la renouvelant par une nouvelle espèce adaptée au milieu et aux conditions climatiques.

5.1 - Cadrage des résultats de la spatialisation du déficit hydrique sur la normale climatique (1981-2010) à fine résolution

Sur la façon de définir si l'essence forestière est en stations ou pas, il n'y a pas eu de méthodologie spécifique mise en place. Cela se fera par la lecture et l'analyse combinée des deux approches (sol et climat) et des contraintes de chaque essence : édaphique, hydrique et du type sol.

C'est ce qui concerne les résultats de la spatialisation du déficit hydrique sur la normale climatique où une démarche méthodologique est nécessaire. Les résultats du bilan hydrique sont exprimés en millimètre ce qui est très intéressant pour chiffrer la carence en eau pour les arbres et plantes de la zone d'étude par exemple. La Figure 116 récapitule l'amplitude du déficit hydrique pour les mois concernés. Ils sont aux nombres de quatre avec le mois d'août comme étant le plus marqué.

Même si les intervalles permettent de chiffrer le manque d'eau, le problème est que l'on ne peut pas estimer l'intensité du déficit hydrique c'est-à-dire plutôt faible, modéré, fort, très fort.
Or pour savoir si l'essence est e adéquation climatique, il faut pouvoir définir l'intensité de celui-ci pour un mois donné. Par exemple, pour le mois d'août l'amplitude va de 13,3 mm à 28,6 mm et il est nécessaire de déterminer son intensité car il n'aura pas le même impact sur les essences forestières s'il est plutôt faible ou fort. En effet, s'il est faible l'ensemble des essences peuvent résister au déficit hydrique mis à part celle qui doivent être dans des milieux frais-hydrophiles comme le frêne, l'aulne ou le saule. Par contre, si le déficit est fort, seuls les espèces dites « xérophiles[1] » pourront résister comme c'est le cas du pin sylvestre ou du pin laricio de Corse.

[1]***Xérophile :*** *Qualifie une espèce ou une communauté tolérant d'une sécheresse de l'atmosphère ou du sol, voire des deux à la fois. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Figure 117 : *Résultats obtenus suite aux calculs des bilans hydriques mensuels pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).*

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
J	69,1	74,7	59,9	134,5	64,6	131,5	28,3	199,8	28,5	80,6
F	46,8	25,9	59,9	39,4	14,4	45,6	42,3	62,0	78,3	126,9
M	105,1	30,8	22,6	36,6	77,7	86,3	40,7	75,2	64,1	-4,1
A	-2,7	-13,5	74,9	-17,4	39,6	42,1	-3,9	6,4	31,7	-2,3
M	114,8	-10,5	61,2	35,6	-0,1	-4,1	-15,0	37,2	-23,8	-29,5
JN	-10,6	0,0	-15,8	-27,6	-1,9	-31,4	0,0	-20,7	-46,4	-8,4
JL	-27,6	-5,0	-16,2	-30,7	-6,0	-42,2	5,1	-4,5	-71,8	-97,2
A	-52,1	-25,6	-42,3	-55,9	0,0	-3,9	-5,3	-31,6	-73,1	-88,7
S	0,0	-1,4	0,0	0,0	-16,6	0,0	-6,9	0,0	-48,8	-41,2
O	113,5	69,6	0,0	30,5	-8,6	23,9	115,1	0,0	0,0	0,0
N	37,6	97,8	0,0	91,8	0,0	70,7	64,8	15,3	0,0	0,5
D	138,1	139,1	56,3	63,5	55,3	123,0	66,5	45,7	65,9	80,5
D	93,0	56,0	74,3	131,6	33,2	81,6	31,1	56,8	263,9	271,4
S	625,0	437,9	334,8	431,9	251,6	523,1	362,8	441,6	268,5	288,5

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
J	121,4	10,3	94,5	144,2	212,6	41,9	22,2	103,2	105,1	30,7
F	17,5	25,2	-0,3	100,3	107,4	107,7	117,1	-0,4	62,5	91,2
M	23,4	44,4	-7,1	19,5	57,8	-0,7	-6,4	-0,3	4,8	18,7
A	0,0	-0,5	0,0	25,1	-2,1	-7,7	-38,7	83,8	48,2	51,8
M	-17,8	-30,5	-1,5	14,8	-12,4	0,0	-18,0	-23,6	-10,9	24,1
JN	0,0	-38,2	-0,4	-22,7	-56,9	-75,6	0,0	-14,9	-31,3	-35,5
JL	-34,6	-65,1	-31,9	-32,0	-39,4	-105,8	-66,8	-33,0	-98,9	0,0
A	-67,5	0,0	-70,5	0,0	-81,3	-71,2	-13,2	-73,7	0,0	-12,4
S	0,0	-4,9	11,8	0,0	0,0	-42,1	-50,8	15,9	10,3	0,0
O	0,0	0,0	66,8	12,3	-3,0	-0,2	0,0	150,3	45,5	129,4
N	35,1	69,5	21,1	98,2	0,0	15,5	0,0	44,5	38,2	168,2
D	35,2	56,3	134,0	104,7	67,2	52,3	88,1	134,2	242,1	124,5
D	119,9	139,2	111,7	54,7	195,1	303,3	193,9	145,9	141,1	47,9
S	232,6	205,7	328,6	519,1	445,0	217,4	227,4	531,9	556,7	638,6

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
J	156,3	63,5	76,2	151,2	57,0	46,8	87,3	108,1	97,8	53,8
F	61,8	101,9	33,3	-0,6	8,0	55,8	103,6	39,3	20,8	70,5
M	159,5	42,3	-1,3	6,2	-0,2	83,5	31,9	85,6	-0,5	26,7
A	48,0	-7,5	-8,7	9,9	-1,2	-6,0	-23,6	7,2	0,0	-17,3
M	-26,6	0,0	0,0	-13,4	-4,9	-3,4	0,0	13,3	-6,6	-26,3
JN	-43,0	-23,5	-31,8	-60,9	-61,9	-55,9	0,0	-26,0	-16,6	-70,9
JL	-12,6	-31,9	-18,7	-27,2	-62,7	-86,8	10,2	-35,8	-27,5	-117,8
A	-30,1	0,0	-97,8	-11,2	-68,8	-38,8	-1,0	-19,0	-66,6	-41,4
S	0,0	0,0	-38,7	-11,7	-43,6	0,0	-12,4	-21,0	-53,2	-29,2
O	0,0	59,9	0,0	0,0	0,0	14,0	-2,2	0,0	0,0	0,0
N	34,2	141,6	39,9	29,0	19,7	99,4	0,0	37,1	28,6	77,1
D	48,4	135,2	88,2	61,8	47,3	100,4	76,3	51,6	124,5	75,5
D	112,3	62,9	197,0	125,0	243,3	190,9	39,2	101,8	171,0	302,9
S	508,2	544,4	237,6	258,1	132,0	399,9	309,3	342,4	271,5	303,6

Figure 118 : *Intervalle entre la valeur minimale et maximale pour les mois concernés par du déficit hydrique. (Hugo Fontaine).*

Mois	*Intervalle (mm)*	*Amplitude (mm)*
Mai	0 à - 30,5	30,5
Juin	0 à - 75,6	75,6
Juillet	0 à - 117,8	117,8
Août	0 à – 97,8	97,8

Figure 119 : *Tableau récapitulant les intervalles selon l'intensité pour les mois concernés par du déficit hydrique. (Hugo Fontaine).*

Mois	*Amplitude*	*Intensité faible (mm)*	*Intensité modérée (mm)*	*Intensité forte (mm)*	*Intensité très forte (mm)*
Mai	30,5	0 à -7,6	-7,6 à -15,3	-15,3 à -22,9	-22,9 à -30,5
Juin	75,6	0 à -18,9	-18,9 à -37,8	-37,8 à -56,7	-56,7 à -75,6
Juillet	117,8	0 à -29,5	-29,5 à -59	-59 à -88,3	-88,3 à -117,8
Août	97,8	0 à -24,5	-24,5 à -49	-49 à -73,3	-73,3 à -97,8

Pour pouvoir déterminer l'intensité du déficit hydrique sur les mois concernés (mai à août), il suffit de calculer le bilan hydrique de chaque année de la normale climatique, c'est-à-dire de 1981 à 2010, puis de prendre la valeur maximale et minimale et ensuite cadrer les résultats issus de la spatialisation à fine échelle (Figure 116) par rapport à ces valeurs.
Pour le calculer chaque année, il faut reprendre le modèle permettant de déterminer le bilan hydrique mensuel par décroissance logarithmique de la réserve utile (Figure 25). Le modèle a été élaboré de tel sorte que les bilans hydriques se calculent les uns à la suite des autres et pas un à un. Il suffit juste de rentrer les données P et ETp et les traitements se font automatiquement.

La Figure 117 reprend les résultats des bilans hydriques mensuels pour chaque année de la normale climatique. Le tableau montre un dégradé du bleu vers le rouge avec la couleur blanche pour la valeur 0. En bleu, ce sont les mois avec du surplus hydrologique tandis qu'en rouge ce sont les mois avec du déficit hydrique. Au bas du tableau, il y a en plus deux lignes, une représentant la somme par mois des déficits (D) et une pour la somme des surplus (S). L'analyse de ce tableau a été faite précédemment (*cf. 2.3.2 - Disparités interannuelles et inter-mensuelles sur la normale*).

Là le but est de déterminer pour les mois de mai, juin, juillet et août, le maximum et le minimum pour ensuite cadrer les résultats spatialisés. La Figure 118 reprend l'intervalle entre la valeur minimale et maximale de l'ensemble des années de la normale, pour les quatre mois concernés ainsi que l'amplitude que représente chaque intervalle.

Pour définir l'intensité du déficit hydrique, il a été convenu de découper l'intervalle en quatre plages égales avec de 0 à 25 % une intensité faible, de 25 à 50 % une intensité modérée, de 50 à 75 % une intensité forte et de 75 à 100 % une intensité très forte. La Figure 119 reprend pour chacun des quatre mois l'intervalle défini en fonction de l'intensité. Quand on fait le lien, on remarque que l'intensité du déficit hydrique est faible pour les mois de mai, juin et juillet et de faible à modéré pour le mois d'août (Figure 120).
Définir de cette manière le déficit hydrique permet de mettre en évidence que les résultats de la spatialisation du déficit hydrique sont définis comme étant de faibles intensités par rapport à l'ensemble des années de la normale climatique. Cela veut dire que l'impact du déficit hydrique sur les essences forestières est moindre mis à part pour des espèces nécessitant de l'eau toute l'année.

Figure 120 : *Lien entre les résultats obtenus lors de la spatialisation et l'intensité préalablement définie. (Hugo Fontaine).*

Mois	*Intervalle (mm)*	*Intensité*
Mai	0 à -0,4	Faible
Juin	-4,8 à -12,9	Faible
Juillet	-9 à -21	Faible
Août	-13,3 à -28,6	De faible à modérée

Figure 121 : *Correspondances entres essences et stations forestières sur la zone d'étude. (Hugo Fontaine).*

Essence forestière	*Station*	*Essence forestière*	*Station*
Hêtre	US4, US5, US7, US9, US10, US11	Douglas	US9, US11, US4, US10 (petite emprise)
Chêne Sessile	US4, US5, US7, US9, US10, US11	Pin Laricio de Corse	US11
Chêne Rouge	US10	Epicéa Commun	US10, US11 (petite emprise)
Bouleau	US10	Sapin de Vancouver	US11
Pin Sylvestre	US9, US11, US5 (petite emprise)	Mélèze du Japon	US11
Sapin Pectiné	US9, US10, US11		

5.2 - Répartition spatiale des essences forestières par rapport aux stations forestières

Avant de pouvoir connaitre l'adéquation des essences forestières avec la station et le climat, il est judicieux de la répartition des essences et des stations forestières pour savoir à quelles stations forestières correspond chaque espèce de la zone d'étude. Pour rappel, on a la présence sur le terrain d'étude de onze essences forestières avec quatre feuillus : le hêtre, le chêne sessile et rouge ainsi que le bouleau et sept résineux : le pin sylvestre, le sapin pectiné, le douglas, le pin laricio de Corse, l'épicéa commun, le sapin de Vancouver et le mélèze du Japon.

Ce travail se réalise à partir de la superposition et la lecture de la nouvelle carte des stations forestières établie à partir du guide de Normandie 2018 (Figure 111) et de la carte des essences forestières actuellement en place (Figure 10). Sur cette dernière, il y a des parcelles qui sont composées de chênes sessiles et de hêtres d'où l'appellation dans la légende « mélange chêne sessile – hêtre ». Pour simplifier la répartition de ce type, c'est l'essence objectif qui a été choisie (Annexe 2). Cela veut dire plusieurs parcelles ont un objectif de produire du hêtre et d'autres du chêne sessile.

La Figure 121 récapitule les correspondances entre les essences et stations forestières. Pour les deux essences feuillues principales, le hêtre et le chêne sessile, on les retrouve sur l'ensemble des six stations de la zone d'étude. En ce qui concerne le chêne rouge, le bouleau, le pin laricio de Corse, le sapin de Vancouver et le mélèze du Japon, leurs emprises est petite (Figure 11) ce qui fait qu'ils ne sont concernés que par une station, bien évidemment différente en fonction de l'espèce. On remarque que pour les essences résineuses, elles sont principalement présentes sur des stations acides notamment la station US9 et US11.
Pour quelques essences, l'emprise sur certaines stations est parfois très petites. C'est le cas du pin sylvestre avec la station US5, du douglas avec les stations US4 et US10 et l'épicéa avec la station US11. Pour le travail sur l'adéquation des essences, cela n'a pas beaucoup d'importance car l'emprise ne concerne qu'un 1 ha ou moins la plupart du temps.

L'optimum serait d'avoir l'emprise de chaque essence sur chaque station. Mais cela n'est pas possible car les données sur les stations forestières de l'époque ont été saisies en Lambert 2 étendu. La nouvelle carte des stations s'est basée sur celle de l'ancienne donc en Lambert 2 étendu. Cela crée un léger décalage avec les couches projetées en Lambert 93 notamment celle des essences forestières.

5.3 - Couplage des données stationnelles et climatiques avec la distribution des essences forestières

La correspondance entre les essences et les stations étant faite, on peut à présent coupler les données stationnelles et climatiques pour observer si les essences sont en stations ou pas.

Figure 122 : *Représentation du pin laricio de Corse (Pinus Nigra) en contexte forestier.*

	US 11 : Variante modale	Zones climatiques : Actuelles en Normandie 1	2	3	Futures possibles 4	5	Précisions sur l'adaptation des essences en fonction des variations de la station
Résineux	*Cèdre de l'Atlas (Expérimentation)*						a ou c : **Hors station**
	Cyprès de Lawson (Expérimentation)						
	Douglas						a ou c : **Limite de station en zones 1, 2 et 3,** a ou c : **Hors station en zone 4**
	Épicéa commun		!				c : **Hors station en zone 2** ! Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Épicéa de Sitka		!				c : **Hors station en zone 2** ! Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Pin laricio de Corse						Attention à la maladie des bandes rouges c : **Limite de station**
	Pin laricio de Calabre						
	Pin maritime						Attention aux gelées tardives
	Pin sylvestre						
	Sapin pectiné						
	Sapin de Vancouver						

Figure 123 : *Adéquation du pin laricio de Corse avec la station US11. (Guide des stations de Normandie, 2018).*

Pour la partie sur les stations, à partir de la correspondance (Figure 121), il suffit de regarder dans le guide des stations de Normandie, l'adéquation entre l'essence et la ou les stations dont elle a une emprise dessus. Si l'essence n'est pas en station, le travail d'adéquation est terminé. Par contre si elle est en station on peut poursuivre le travail en observant l'adéquation de l'essence par rapport au climat.
Un travail préalable a été effectué concernant les mois avec du déficit pour pouvoir exprimé le déficit spatialisé en terme d'intensité (faible, modéré, fort, très fort) par rapport à la normale climatique (*cf. 5.1 - Cadrage des résultats de la spatialisation du déficit hydrique sur la normale climatique (1981-2010) à fine résolution*).

Pour rappel, en forêt d'Ecouves, on se trouve en zone climatique 1 (Figure 68) ce qui veut que pour la lecture dans le guide il faut se référer à la couleur concernée pour la zone 1. Les couleurs vont du gris « essence à ne pas introduire » au vert foncé « essence à son optimum de production » (Figure 67).

5.3.1 - Le Pin Laricio de Corse (Pinus Nigra)

Le pin laricio de Corse (Figure 122) est une essence :

- Supportant mal les très basses températures (- 25 °C),
- De type mésophile voir mésoxérophile au niveau hydrique et mésotrophe large amplitude pour la richesse chimique (Figure 90),
- Présente sur des sols acides granitiques ou sableux et tolère l'hydromorphie de profondeur (40 cm). Elle ne tolère pas les sols calcaires,
- Moyenne annuelle entre 800 et 1200 mm et peut supporter les étés secs.

Le pin laricio de Corse est une essence, pour l'instant en expérimentation sur la forêt domaniale d'Ecouves. Son emprise est 13 ha soit 1,7 % de la surface totale du terrain d'étude. La Figure 121 montre que le peuplement de pin laricio de Corse est situé sur la station US11 du guide de Normandie (station la plus acide de la zone d'étude).
Après observation dans le guide Normandie, le pin est considéré sur la station comme une « essence bien adaptée mais pas en conditions optimales » d'où la couleur vert clair (Figure 123). Cela veut dire qu'il y a soit un facteur limitant la production ou la qualité de l'essence. L'adéquation de l'essence avec la station est valide, on peut passer à l'adéquation climatique.

De mai à août on est dans une face de déficit hydrique (Annexe 9). La parcelle de pin laricio de Corse, se situe en altitude, sur la ligne de crête de la zone d'étude (Figure 10). C'est une essence qui peut supporter les étés secs et l'intensité du déficit hydrique est telle qu'elle peut supporter ces légers déficits hydriques. L'intensité est considérée comme faible car la parcelle se trouve en altitude, là où les déficits sont les moins forts.
Cela veut donc dire que le pin laricio de Corse en adéquation au niveau de la station mais aussi du climat actuel. Bien sûr, des années sèches telle que 2020 fragilise énormément l'adéquation de cette essence comme on a pu le voir en forêt où les pins ont tendance à roussir.

Figure 124 : *Adéquation du sapin de Vancouver avec la station US11. (Guide des stations de Normandie, 2018).*

	US 11 : Variante modale	Zones climatiques					Précisions sur l'adaptation des essences en fonction des variations de la station
		Actuelles en Normandie			Futures possibles		
		1	2	3	4	5	
Résineux	*Cèdre de l'Atlas (Expérimentation)*						a ou c : **Hors station**
	Cyprès de Lawson (Expérimentation)						
	Douglas						a ou c : **Limite de station en zones 1, 2 et 3,** a ou c : **Hors station en zone 4**
	Épicéa commun		!				c : **Hors station en zone 2** ! Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Épicéa de Sitka		!				c : **Hors station en zone 2** ! Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Pin laricio de Corse						Attention à la maladie des bandes rouges c : **Limite de station**
	Pin laricio de Calabre						
	Pin maritime						Attention aux gelées tardives
	Pin sylvestre						
	Sapin pectiné						
	Sapin de Vancouver						

Figure 125 : *Représentation du mélèze du Japon (Larix Kaempferi) en contexte forestier. (Le Peuple d'A Côté).*

5.3.2 - *Le Sapin de Vancouver (Abies Grandis)*

Le sapin de Vancouver est une essence :

- Sciaphile, résistante au froid mais craignant les sécheresses estivales,
- De type mésophile à frais et mésotrophe (Figure 90),
- Qui supporte les sols profonds et frais mais redoute l'excès d'argile.

Le sapin de Vancouver est représenté sur la zone d'étude comme une essence d'ornement d'où son emprise très minime, de 8,2 ha. Comme pour le pin laricio de Corse, le sapin de Vancouver se trouve sur la station US11 (Figure 121).
La Figure 124 montre que le sapin de Vancouver sur la station US11 est « en limite de station ». Cela veut dire que la station est limitante d'un point de vue de la richesse chimique du sol ce qui induit un risque élevé pour la mortalité, la stabilité de l'essence et la présence de défauts rédhibitoires dans le bois.

Le sapin de Vancouver est une essence forestière qui craint les sécheresses estivales. La spatialisation du déficit hydrique montre que sur les mois de juin, juillet et août on est en période de déficits hydriques pouvant provoquer des sécheresses. Les conditions ne sont pas optimales en ce qui concerne l'adéquation de l'essence avec le climat mais actuellement l'intensité est plutôt faible ce qui n'a pas de conséquences majeures. Par contre, si l'intensité du déficit vient à augmenter dans les années à venir, cela peut inverser la balance et les conséquences pourraient être importantes.
Le sapin de Vancouver est en limite d'adéquation avec la station et le climat actuel. L'emprise de l'essence forestière étant petite, cela n'a pas beaucoup d'impacts sur la production ligneuse. De plus, la carte des essences objectifs (Annexe 2) montre que le sapin de Vancouver sera renouvelé sur le long terme par du pin sylvestre.

5.3.3 - *Le Mélèze du Japon (Larix Kaempferi)*

Le Mélèze du Japon (Figure 125) est une essence :

- De type mésophile à frais et mésotrophe large amplitude (Figure 90),
- Plastique avec le sol préférant tout de même qu'il soit filtrant et alimenté en eau,
- Demande un atmosphère sèche et craint l'excès d'eau. En moyenne il a besoin d'une pluviométrie de 600 à 1000 mm par an.

Le mélèze du Japon est une essence dont l'unité de gestion est petite (4,4 ha), se situant en station US11. Néanmoins, le guide de Normandie ne mentionne pas le mélèze dans la description de la station et on ne peut pas savoir si l'essence est en station, en limite ou hors station. La non-présence du mélèze peut soit vouloir dire que l'essence n'est adaptée à cette station ou qu'il n'y a pas encore eu d'expérimentation de faite avec le mélèze. On ne pourra donc pas définir l'adéquation de l'essence forestière avec la station et le climat.

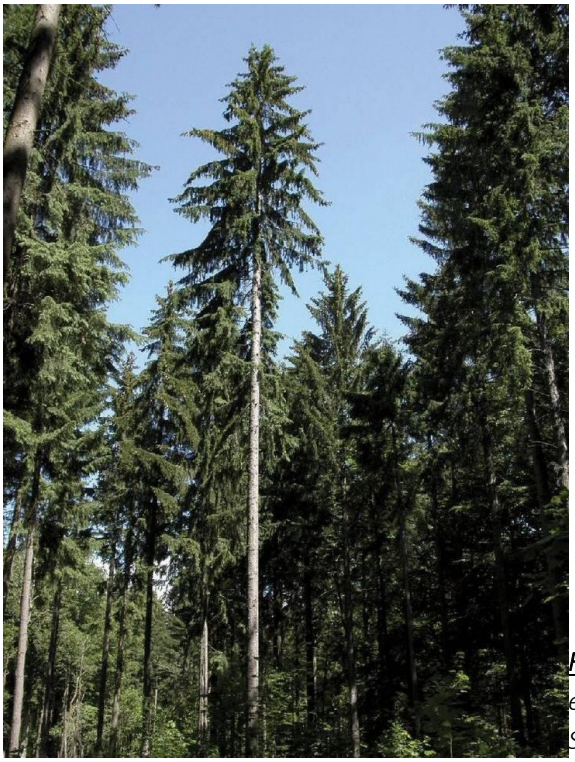


Figure 126 : *Représentation de l'épicéa commun (Picea Abies) en contexte forestier. (Image issue du canton de Vaud en Suisse).*

Figure 127 : *Adéquation de l'épicéa commun avec la station US10. (Guide des stations de Normandie, 2018).*

US 10 : Modale	Zones climatiques : Actuelles en Normandie 1	2	3	Futures possibles 4	5	Précisions sur l'adaptation des essences en fonction des variations de la station
Douglas						b : **Hors station** a : **Limite de station en zones 1 et 2**
Épicéa commun						b : **Hors station** a : **Limite de station en zone 1**
Épicéa de Sitka		!				! Très sensible aux épisodes de sécheresse
Pin laricio de Corse						b : **Hors station** a : **Limite de station**
Pin laricio de Calabre						b ou c : **Hors station**
Pin maritime						b : **Limite de station**
Pin sylvestre					?	
Sapin pectiné						
Thuya plicata (Expérimentation)	?	?				**Hors station** sur les sols les plus pauvres issus de landes

Variation a : Hydromorphie non marquée dans les 30 premiers cm
Variation b : Horizon à dominante argileuse affleurant dans les 40 premiers cm
Variation c : Hydromorphie marquée dès la surface (10 premiers cm) et tapis de Molinie

5.3.4 - L'Epicéa Commun (Picea Abies)

L'épicéa commun (Figure 126), est une essence :

- Résistante au froid, peu sensible aux gelées tardives et exigeante en lumière,
- Peu exigeante vis-à-vis de la richesse chimique (mésotrophe large amplitude). Au niveau hydrique on tend vers des sols mésophiles à frais (Figure 90),
- Qui accepte tous les types de sols, même calciques et hydromorphes mais craint les sols riches en carbonates. Optimum sur des sols acides, profonds et frais,
- Moyenne annuelle évaluée à 1 000 mm dont 300 mm en période estivale, préfère les climats humides et craint la sécheresse.

L'épicéa commun est une essence montagnarde mais que l'on peut retrouver en Normandie de par son climat océanique, idéal pour ce genre d'essence. On le retrouve au sud-est de la zone d'étude, d'une emprise de 12,4 ha soit 1,6 % de la surface totale. La Figure 121 permet de voir que l'épicéa se trouve sur deux stations : la station US10 présente en majorité et la station US11 présente au nord de l'unité de gestion[1].
Après consultation du guide, l'épicéa commun apparait comme une essence en limite de station ou hors station sur la station US11. La surface concernée étant infime, cela n'a pas de répercussion sur la croissance et la production du peuplement.

La Figure 127 montre que l'épicéa est hors station sur la station US10 d'où la couleur rouge attribuée à la zone climatique 1. Or, la variante « a », (Figure 127) affiche une hydromorphie non marquée dans les 30 premiers centimètres. Sur la zone d'étude, la station US10 présente une hydromorphie à partir de 20-30 cm de profondeur ce qui coïncide avec la variante « a ». Etant en zone climatique 1, l'épicéa commun apparait en limite de station sur la variante « a ».

Au niveau climatique, c'est une essence qui craint les sécheresses et préfère les climats humides avec une offre pluviométrique supérieur à 1 000 mm. Sur la zone d'étude, ce n'est pas le cas puisque l'offre spatialisée n'est que de 961 mm. Comme pour le sapin de Vancouver, les conditions climatiques ne sont pas optimales avec la présence de déficits hydriques de juin à août. La parcelle se trouve à basse altitude (270 m) et c'est à ces endroits qu'il est le plus marquée (couleur orange-rouge Annexe 9). Néanmoins, l'intensité est pour le moment faible est n'engendre pas de conséquences trop importantes sur l'épicés commun.

Cette essence est en limite d'adéquation avec la station et le climat actuel. La symbiose des deux éléments ne permet pas à l'essence de produire du bois de qualité.

[1] ***Unité de gestion :*** *Plus petite division géographiques d'une forêt faisant l'objet d'une planification (objectifs, interventions, suivi et contrôle). (Bastien et Gauberville, 2011).*

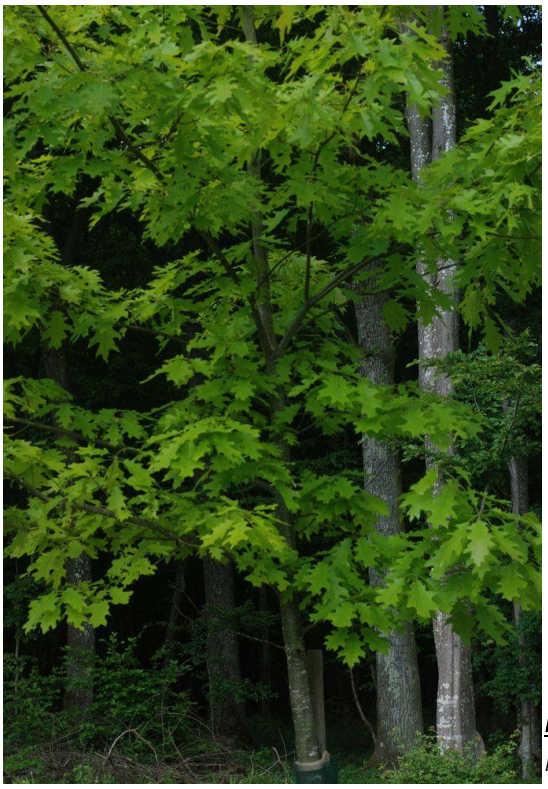


Figure 128 : *Représentation du chêne rouge d'Amérique (Quercus Rubra) en contexte forestier.*

Figure 129 : *Représentation du bouleau verruqueux (Betula Pendula) en contexte forestier. (LeMonde).*

Figure 130 : *Adéquation du bouleau verruqueux avec la station US10. (Guide des stations de Normandie, 2018).*

	US 10 : Modale	Zones climatiques (Actuelles en Normandie 1 2 3 / Futures possibles 4 5)	Précisions sur l'adaptation des essences en fonction des variations de la station
Feuillus	Bouleaux		
	Châtaignier		Absent sur les stations les plus engorgées
	Chêne pédonculé		Gélivure
	Chêne sessile		c : **Hors station** Gélivure, réussite des plantations
	Hêtre		b : **Hors station** a : **Limite de station en zones 1 et 2**
	Tremble		

5.3.5 - *Le Chêne Rouge (Quercus Rubra)*

Le chêne rouge (Figure 128) est une essence :

- De type acidicline à large amplitude. Tolérance mésophile en ce qui concerne le niveau hydrique et oligotrophe à mésotrophe pour le niveau trophique (Figure 90). Optimum en mésotrophe inférieur,
- Qui supporte tous types de sols (limoneux, sableux et argileux),
- Ne tolérant pas les sols carbonatés et supportant mal l'hydromorphie (après 40 cm),
- Précipitation annuelle de l'ordre de 800-1000 mm, pouvant supporter des sécheresses et des phases de déficits hydriques.

La concordance entre les essences et stations a permis de prouver que le chêne rouge se situe en station US10. Il a été mis en place sur cette zone précise de la zone d'étude pour établir des expérimentations en vue du réchauffement de la planète. Cela explique la présence d'une petite unité de gestion de 1,5 ha.
Comme pour le mélèze du Japon, on ne pourra pas établir d'adéquation entre l'essence et la station-climat. Le guide de Normandie ne mentionne pas le chêne rouge dans la description de la station US10.

5.3.6 - *Le Bouleau Verruqueux (Betula Pendula)*

Le bouleau verruqueux (Figure 129) est une essence :

- Héliophile (se développe uniquement en pleine lumière), frugale[1]
- Pionnière, s'adaptant à tous les substrats : des sols secs aux sols engorgés et des acides très acides aux sols très riches voir carbonatés,
- Qui s'adapte à divers matériaux très variés (limons, sables et sols caillouteux),
- Précipitation annuelle de l'ordre de 600-1000 mm.

La Figure 121 met en évidence que le bouleau verruqueux est positionné sur la station US10. La Figure 130 montre, qu'en station US10, le bouleau verruqueux est hors station ce qui veut dire que la production de bois n'est pas possible et que l'essence va dépérir systématiquement. Le bouleau n'est pas en station et cela ne sert à rien de poursuivre le travail sur l'adéquation de l'espèce par rapport au climat.
Néanmoins, sur cette zone on à la présence d'une zone humide jouant un rôle dans la préservation de la ressource en eau. Le bouleau est une essence qui consomme peu d'eau. Une telle présence naturelle à cet endroit a été établie pour permettre de ne pas consommer trop d'eau, de maintenir la zone humide mais aussi pour habiller le milieu en jouant le rôle d'essence d'ornement. D'autres essences comme le chêne sessile ou l'aulne pompent plus d'eau et pourrait mettre en péril la zone humide.

[1] ***Frugale :*** Espèce *qui se nourrit avec peu d'aliments, qui vit d'une manière simple. (Larousse).*

Figure 131 : *Représentation du douglas (Pseudotsuga Menziesii) en contexte forestier. (Hugo Fontaine 14/04/2021).*

Figure 132 : *Adéquation du douglas, du sapin pectiné et du pin sylvestre avec la station US9. (Guide des stations de Normandie, 2018).*

	US 9 : Variante modale	Zones climatiques (Actuelles en Normandie 1 2 3 / Futures possibles 4 5)	Précisions sur l'adaptation des essences en fonction des variations de la station
Résineux	*Cèdre de l'Atlas (Expérimentation)*		Demarrage de la plantation assez lent a : **Hors station**
	Cyprès de Lawson (Expérimentation)		
	Douglas		
	Épicéa commun	!	! Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Épicéa de Sitka	!	! Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Mélèze d'Europe (Sudete ou Pologne) ou Mélèze hybride ou Mélèze du Japon **(! Sanitaire)**		Mélèze du Japon à exclure des zones 3 à 5
	Pin laricio de Corse		
	Pin laricio de Calabre		
	Pin maritime		
	Pin sylvestre		
	Sapin de Vancouver		Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Sapin pectiné		Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Séquoia toujours vert (Expérimentation)	?	Sensibilité aux gelées tardives
	Thuya plicata (Expérimentation)	?	

Figure 133 : *Adéquation du douglas, du sapin pectiné et du pin sylvestre avec la station US11. (Guide des stations de Normandie, 2018).*

	US 11 : Variante modale	Zones climatiques (Actuelles en Normandie 1 2 3 / Futures possibles 4 5)	Précisions sur l'adaptation des essences en fonction des variations de la station
Résineux	*Cèdre de l'Atlas (Expérimentation)*		a ou c : **Hors station**
	Cyprès de Lawson (Expérimentation)		
	Douglas		a ou c : **Limite de station en zones 1, 2 et 3,** a ou c : **Hors station en zone 4**
	Épicéa commun	!	c : **Hors station en zone 2** ! Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Épicéa de Sitka	!	c : **Hors station en zone 2** ! Très sensible aux épisodes de sécheresse
	Pin laricio de Corse		Attention à la maladie des bandes rouges c : **Limite de station**
	Pin laricio de Calabre		
	Pin maritime		Attention aux gelées tardives
	Pin sylvestre		
	Sapin pectiné		
	Sapin de Vancouver		

5.3.7 - Le Douglas (Pseudotsuga Menziesii)

Le douglas (Figure 131) est une essence :

- De demi-lumière, qui résiste au froid et aux gelées tardives mais sensible au vent,
- De type mésophile à frais (hydrique) et oligotrophe supérieur à mésotrophe pour la richesse chimique (Figure 90),
- Présente sur des sols profonds et filtrants de texture limoneuse. Elle ne tolère pas les sols compacts, superficiels, hydromorphes ni trop calcaires,
- Moyenne annuelle entre 800 et 1200 mm, dont 150 et 200 mm en été. Résistance relative à la sécheresse variable selon les provenances.

Le douglas est la première essence résineuse importante dans la production sur la zone d'étude même si elle a l'emprise la plus petite, parmi les trois essences résineuses principales, avec une superficie de 44,7 ha soit 5,8 %. La Figure 121 montre que le douglas se trouve majoritairement sur les stations US9 et US11 mais aussi, de manière très partielle, sur les stations US4 et US10.
Pour les deux dernières stations, le douglas est hors station pour l'US4 tandis qu'il en limite de station sur l'US10. Cela s'explique par le fait que ce sont deux stations marquées par de l'hydromorphie, élément que ne tolère pas le douglas. Du fait de la faible emprise de l'essence sur ces stations, cela n'interfère pas dans la production.

Les Figures 132 & 133 (encadré bleu) représentent l'adéquation du douglas par rapport à la station US9 et US11. A la lecture des tableaux, le douglas est considéré comme une essence à son optimum de production sur la station US9 (couleur vert foncé Figure 132) tandis que sur la station US11, l'essence est bien adaptée mais pas en conditions optimales (couleur vert clair Figure 133). L'adéquation essence-station est optimale sur les deux stations et on peut alors passer à l'analyse de l'impact du climat sur le douglas.
Le douglas résiste plutôt bien aux sécheresses estivales ce qui permet de valider l'adéquation de l'essence avec le climat. L'intensité du déficit hydrique est faible, sauf pour août où il va de faible à modéré. Les peuplements de douglas se trouvent sur le versant sud de la zone d'étude et après observation de l'Annexe 9, on est à cet endroit sur une teinte jaune-orangée, ce qui témoigne d'une intensité plutôt faible. De plus, le douglas a besoin entre 150 et 200 mm d'eau en été. L'offre pluviométrique spatialisée est en été de 199 mm ce qui répond au besoin de l'essence. On peut dire que le douglas est en adéquation au niveau de la station mais aussi du climat actuel.

5.3.8 - Le Sapin Pectiné (Abies Alba)

Le sapin pectiné est une essence :

- Montagnarde qui exige une humidité atmosphérique élevé et constante sur l'année,
- Qui résiste au froid mais qui est sensible aux gelées tardives,
- Craint les sols compacts et hydromorphes,

Figure 134 : *Représentation du pin sylvestre (Pinus Sylvestris) en contexte forestier. (Hugo Fontaine 22/03/2021).*

- Indifférente à la richesse chimique su sol : de oligotrophe à eutrophe mais rares sur des sols carbonatés. Optimum mésophile à frais pour le niveau hydrique (Figure 90),
- Précipitation annuelle moyenne de 900 mm, craignant les sécheresses estivales.

Le sapin pectiné est la deuxième essence résineuse majeure, en terme de production de bois, avec une superficie de 132,6 ha soit 17,2 % de la surface. Les cartes montrent que le sapin pectiné est situé sur les stations US9 et US11 en majorité et US10 partiellement. Comme pour le douglas, le sapin pectiné est hors station sur la station US10 car c'est une essence qui ne supporte pas l'hydromorphie.

Les Figures 132 & 133 (encadré orange) permettent d'observer l'adéquation du sapin pectiné avec les stations US9 et US11. Le sapin pectiné est considéré comme une essence en limite de station sur les deux en raison de leurs pauvretés minérales. En limite de station, il y a des risques de mortalités et de stabilités de l'essence ainsi que des défauts sur le bois néfaste pour la qualité.
L'adéquation essence-station est limitante sur les deux stations mais le climat actuel favorable permet de compenser et de maintenir en place le sapin pectiné. En effet, les déficits sont de faibles intensités et présents sur trois mois. Cela n'engendre pas de conséquences majeures sur le sapin pectiné. Un climat comme celui de l'année 2020 ne peut pas permettre de compenser la pauvreté des sols car les déficits hydriques sont nettement plus conséquents et présents d'avril à septembre. On peut imaginer que dans le futur la place du sapin pectiné soit limitante en forêt d'Ecouves.

C'est pour cela qu'une gestion en futaie irrégulière permettrait de le maintenir sur le long terme. Une gestion futaie irrégulière est une gestion où on a toutes les classes de diamètres présentes, du semis au très gros bois. Cela permet s'il y a une déficience dans l'une des classes (qualité, mortalité) de la compenser avec les autres.

5.3.9 - Le Pin Sylvestre (Pinus Sylvestris)

Le pin sylvestre (Figure 134) est une essence :

- Héliophile et frugale, ne craignant ni le froid, ni les gelées printanières,
- Présente des sols xérophiles (sec) aux sols engorgés. Optimum sur des sols acides voir très acides d'où le niveau trophique : oligotrophe (Figure 90),
- Ne supporte pas les sols compacts mais plutôt les sols profonds,
- Plastique pouvant supporter des sols calcaires ainsi qu'hydromorphes,
- Précipitation annuelle de l'ordre de 700-1300 mm, pouvant s'accommoder d'une pluviométrique faible pendant un temps, principalement l'été.

Le pin sylvestre est l'essence majeure résineuse de la zone d'étude avec une surface totale de 143,4 ha en raison de la présence de nombreux sols acides. La Figure 121 permet de voir qu'il se trouve sur les stations US5, US9 et US11 dont cette dernière en majorité.

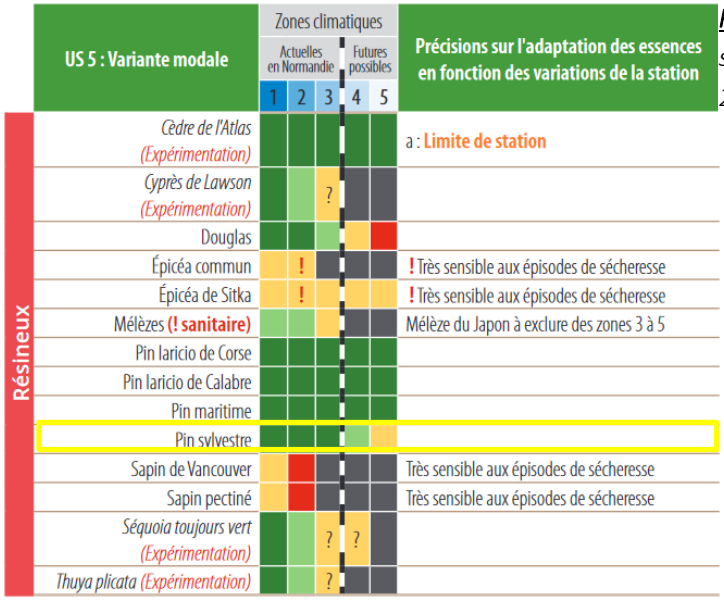


Figure 135 : *Adéquation du pin sylvestre avec la station US5. (Guide des stations de Normandie, 2018).*

Figure 136 : *Adéquation du hêtre avec les stations US5, US7 et US9. (Guide des stations de Normandie, 2018).*

Les Figures 132, 133 et 135 (encadré jaune), montrent l'adéquation du pin sylvestre avec les stations US5, US9 et US11. Il est considéré comme une essence à son optimum de production sur l'ensemble des trois stations car c'est une essence plastique qui s'adapte à tous types de sols avec un niveau hydrique et une richesse minérale quelconque.
Au niveau climatique, le pin sylvestre est une essence qui a besoin de 700 à 1 300 mm d'eau et l'offre pluviométrique de 961 mm répond à ces besoins. Il peut s'accommoder à une pluviométrique faible, principalement l'été. Les déficits hydriques définis d'une faible intensité ne sont alors pas néfastes à la production de pins. Attention tout de même à ce que les déficits dans le futur n'ont pas tendance à augmenter d'intensités comme c'est le cas avec l'année 2020 car cela pourrait altérer la production et la qualité du pin sylvestre.

5.3.10 - Le Hêtre (Fagus Sylvatica)

Le hêtre (Figure 137) est une essence :

- Sciaphile[1], sensible aux gelées tardives,
- De type mésophile-mésotrophe (Figure 90), tolérante aux sols calcaires, ne supportant pas l'hydromorphie,
- Optimum sur des sols limoneux, supporte des sols peu profonds. A exclure des sols sableux et avec une forte charge en cailloux,
- Ne supporte pas les sécheresses (P > 600 mm), optimum à 750 mm annuelle.

Figure 137 : *Représentation du hêtre (Fagus Sylvatica) en contexte forestier. (Les têtards arboricoles).*

Le hêtre est l'essence principale toutes essences confondues (résineux et feuillus) de la zone d'étude avec une emprise de 233,6 ha soit quasiment 1/3 de la zone étudiée (30,1 %). Le hêtre à une emprise sur l'ensemble des six stations répertoriées sur le secteur.

Pour les stations US4, US10 et US11, il est considéré comme une essence en limite de station car le hêtre n'aime pas les sols hydromorphes (US4 et US10) ainsi que les sols très acides (US11). Cela n'est pas dérangeant car l'essence n'est présente que partiellement sur ces stations et ça n'altéra pas sur la production majeure du bois de hêtre qui se fait sur les stations US5, US7 et US9 (Figure 136).

[1]***Sciaphile :*** *Se dit d'un organisme tolérant un ombrage important. (Bastien et Gauberville, 2011).*

Figure 138 : *Représentation du chêne sessile (Quercus Petraea) en contexte forestier. (Image issue du canton de Vaud en Suisse).*

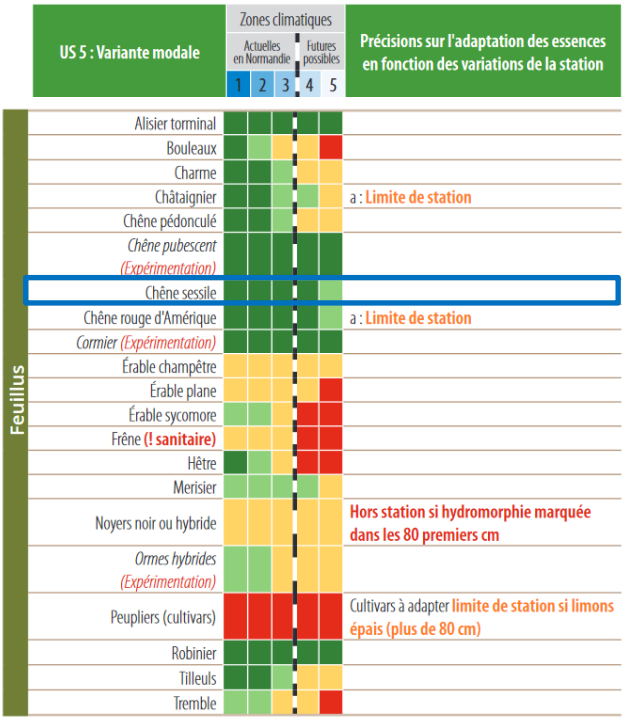
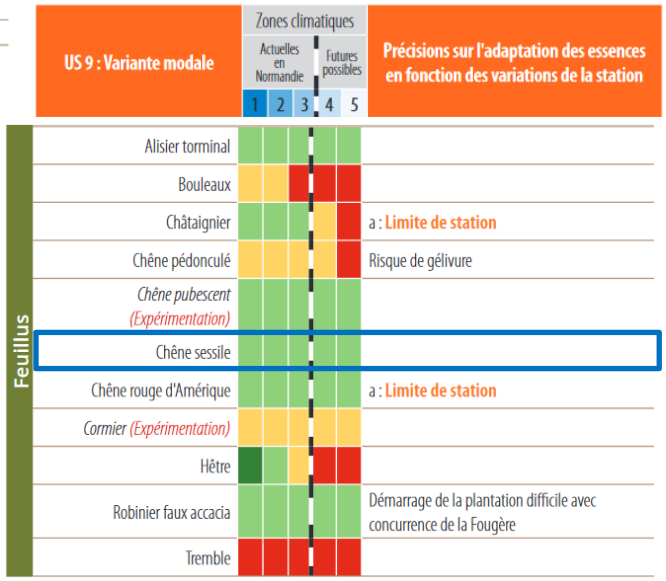


Figure 139 : *Adéquation du chêne sessile avec la station US5 et US9. (Guide des stations de Normandie, 2018).*



Pour ces trois dernières stations, la Figure montre que le hêtre est à l'optimum d'où la couleur vert foncé pour chacune des trois stations au niveau de la zone climatique 1. Ces stations sont plus favorables au hêtre car on est sur des sols plus riches en terme de matières minérales.

Le climat de la normale climatique (1981-2010), en été, avec les déficits hydriques de faibles intensités n'est pas l'optimum pour le hêtre mais supportable ce qui n'altère pas sur la production de bois de hêtre mais aussi sur la qualité.
Mais des années comme 2020 à des conséquences sur le hêtre. En 2020, la période du déficit hydrique a doublé, passant de trois mois sur la normale à six mois en 2020 et l'intensité a également augmenté exponentiellement. Par exemple au mois d'août on a un maximum déficitaire de 28,6 mm sur la normale tandis qu'en 2020 il est de 56,7 mm. Ces augmentations se répercutent sur le hêtre par des dépérissements sur pied et des chablis[1] observables lors des sorties sur le terrain. Si la période et l'intensité du déficit hydrique continue de s'accroitre, le hêtre sera en danger d'existence. Dès à présent, il est important d'établir des moyens de gestions pour permettre de le conserver et de produire du bois sur le long terme.

5.3.11 - Le Chêne Sessile (Quercus Petraea)

Le chêne sessile (Figure 138) est une essence :

- De demi-ombre, de plaine ou de colline,
- De type mésophile-mésotrophe large-amplitude (Figure 90),
- Supporte tous types de sols (limoneux, sableux et argileux) avec une charge en cailloux plus ou moins conséquentes (essence plastique)
- Tolérant les sols carbonatés ainsi que l'hydromorphie temporaire,
- Précipitation annuelle nécessaire : de 600 à 1 400 mm, supportant les sécheresses.

Le chêne sessile est la seconde essence feuillue en terme de production et de surface, dont cette dernière est de 180,7 ha. Comme le hêtre, le chêne sessile à une emprise les six stations dont l'US5 et l'US9 sont majoritaires.
En ce qui concerne la station US7, le chêne est à son optimum car on sur les sols qu'il préfère c'est-à-dire des sols assez acides avec un niveau hydrique sain (mésophile). Pour la station US4, l'essence est bien adaptée mais pas en conditions optimales car le chêne n'apprécie par les hydromorphies quasi permanentes comme c'est le cas sur cette station. Tandis que pour les stations US10 et US11, il est en limite de stations car il ne tolère pas les sols trop acides.

On retrouve majoritairement le chêne sessile sur la station US5 et US9 (Figure 139). Pour la première, il est à l'optimum en terme de production. Alors qu'en station US9, le chêne est bien adapté à la station mais pas en conditions optimales.
L'adéquation essence-station est optimale tout comme celle avec le climat. Le chêne sessile est une essence qui supporte bien les sécheresses et le climat de la normale climatique ne présente pas de fortes périodes de déficits. Cela permet alors la bonne production de bois de chêne sessile.

[1] ***Chablis:*** *Au sens strict, arbre ou ensemble d'arbres renversés, déracinés ou cassés le plus souvent par suite d'un accident climatique (vent, neige, réchauffement climatique). (Bastien et Gauberville, 2011).*

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1 - Conclusion

La recherche a eu pour but de prendre en compte la question du changement climatique dans les milieux forestiers français avec le cas de la forêt domaniale d'Ecouves. Elle s'est organisée autour d'un certain nombre de questionnements dont la principale est : Quelles sont les conséquences du changement climatique sur les essences présentes en forêt domaniale d'Ecouves et quelles solutions peut-on apporter pour lutter contre celui-ci ou le contrer ?

Plus précisément, l'objectif a été d'observer si les essences forestières sont en adéquation avec le sol, notamment la station forestière, et le climat actuel. Afin de mettre en évidence la question du changement climatique, il a été préférable de l'étudier à fine échelle pour comprendre le climat actuel et ces effets sur les essences. C'est pour cela qu'un terrain d'expérimentation a été établie sur la forêt d'Ecouves, d'une surface de 770 ha.

C'est un mémoire qui a été essentiellement centré sur l'élaboration d'une méthodologie générale de la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle ainsi que du renouvellement de la carte des stations. C'est une méthodologie simple qui a pour but d'être appliquée sur d'autre massifs forestiers et notamment ceux du PNR Normandie-Maine. De plus, la méthode pour la spatialisation du bilan hydrique peut servir pour faire des projections éventuelles du climat afin d'observer dans le futur l'adéquation des essences.

En plus de la méthodologie établie durant ce mémoire de recherche, l'adéquation des essences forestières avec la station et le climat s'est organisée en trois parties :

- Approche climatique à trois échelles :
    - Etude des paramètres climatiques principaux (P, T et ETP) sur la normale climatique à l'échelle régionale pour observer les disparités interannuelles et inter-mensuelles ainsi que la saisonnalité,
    - Elaboration d'un bilan hydrique à décroissance logarithmique de la réserve utile sur la forêt domaniale d'Ecouves,
    - Spatialisation du bilan hydrique à fine résolution (terrain d'expérimentation) sur la normale climatique et l'année 2020 comme étude de cas,

- Approche pédologique avec le renouvellement de la carte des stations forestières présente dans l'aménagement forestier de la forêt d'Ecouves de 2004 et élaborée à partir de la typologie de Jabiol de 1985. Cela a consisté à établir une correspondance entre l'ancienne et la nouvelle typologie (guide des stations de Normandie 2018) puis de faire un travail de vérifications sur le terrain par le biais de sondages à la tarière à main,

- Symbiose des deux approches pour observer l'adéquation des essences forestières.

De ces analyses sont ressortis quelques informations importantes à prendre en compte. De la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle sur la normale climatique (1981-2010), l'information importante et la période et l'intensité du déficit hydrique. La période est très courte sur l'année avec trois mois sont concernés (juin, juillet et août) plus le mois de mai où il y a à la fois du surplus hydrologique et du déficit hydrique. De plus l'intensité a été qualifiée comme étant faible pour les mois de mai, juin et juillet et de faible à modéré pour le mois d'août.
A l'inverse, le bilan hydrique de l'année 2020 a montré que le déficit hydrique s'étend désormais sur six mois. Cela montre la tendance actuelle mais également futur.

L'ancienne carte des stations, du terrain d'expérimentation, élaborée selon la typologie Jabiol recensée 8 stations allant de la station J1 à la station J7. Après la correspondance et le terrain effectués, se sont maintenant 6 stations avec la station US4 (sol riche et hydromorphe), la station US5 (sol riche et sain), la station US7 (sol assez acide et sain), la station US9 (sol acide et sain), la station US10 (sol acide et hydromorphe) et la station US11 (sol très acide et sain). Les différentes stations montrent que l'on a tous types de sols avec des sols riches, moyennement acides, acides et hydromorphes.
Des fusions ainsi que des dissolutions de plusieurs anciennes stations (typologie Jabiol) ont eu lieu notamment la fusion des stations J2, J31 et J32 pour donner la station US9, les stations J4 et J5 pour donner la station US11 et la dissolution de la station J2 en US7 (versant nord) et US9 (versant sud).

L'adéquation des essences forestières avec la station et le climat a révélé que les principales essences, le hêtre, le chêne sessile, le pin sylvestre et le douglas, sont actuellement en stations. Attention, tout de même, avec le hêtre qui pourrait connaitre quelques complications si le climat de 2020 devient le climat futur. Comme essence majeure, seul le sapin pectiné connait quelques difficultés que ce soit avec la station (en limite) et avec le climat (essence qui ne supporte pas les sécheresses).
Pour les essences secondaires (épicéa, pin laricio, bouleau, chêne rouge, etc) ont alterne entre des essences en adéquation comme c'est le cas pour le pin laricio de Corse, en limite d'adéquation pour l'épicéa commun et le sapin de Vancouver et pas en adéquation pour le bouleau. Pour le mélèze du Japon et le chêne rouge, l'adéquation n'a pas pu se faire car le guide des stations ne mentionne par ces essences dans le descriptif des stations, ici US10 pour le chêne et US11 pour le mélèze.

2 - Perspectives

Néanmoins toutes les idées n'ont pas pu être réalisées soit par manque de temps ou soit les moyens n'étaient pas réunis. En ce qui concerne l'approche climatique, certaines perspectives ont déjà été évoquées dans le mémoire notamment sur un travail plus approfondi sur les données du rayonnement solaire global pour avoir plus de précision ainsi que sur le calcul de l'ETp avec la spatialisation des températures sur la zone d'étude. A cela on peut rajouter le travail sur la projection de la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle à l'horizon 2050 et 2100 avec les données DRIAS. Pour l'approche pédologique, la perspective a été évoquée au cours de ce mémoire et consiste à réaliser des fosses pédologiques pour confirmer la véracité des sondages à la tarière et pouvoir réaliser des analyses en laboratoire qui apporteront des réponses sur l'impact du changement climatique sur les essences forestières.

Figure 140 : *Emplacement des abris météo dans les peuplements de chêne sessile – hêtre. A gauche abris météo en versant sud et à droite en versant nord. (Hugo Fontaine 27/05/2021).*

Figure 141 : *Emplacement de l'abri météo de référence à la maison forestière des Arcis. (Hugo Fontaine 22/03/2021).*

Bien évidemment, tout ce travail peut être spatialisé à l'ensemble de la forêt domaniale d'Ecouves mais également des autres forêts publiques présentes dans le territoire du parc à savoir la forêt de Perseigne, d'Andaine, du Perche et de Sillé.

Au cours de cette recherche, un deuxième axe de recherche a été établi avec le PNR Normandie-Maine sur la préservation de la ressource en eau. L'objectif est dans un contexte de changement climatique, étudier la gestion de la ressource en eau au profit de la forêt mais aussi des milieux aquatiques et des différents usages par l'homme (alimentation et agriculture). Outre le choix d'essences objectifs plus résistantes à la sécheresse, le but est de rechercher des espèces peu exigeantes en eau et un mode de sylviculture qui permet de préserver cette ressource ainsi que de conserver un microclimat plus frais limitant les phénomènes d'évaporation.
Les perspectives sur cet axe sont d'analyser sur la zone d'étude la circulation de l'eau à partir de données LIDAR pour d'abord voir le sens de circulation mais aussi pouvoir quantifier. Cela peut être accompagné du travail sur la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle où dans le calcul, l'écoulement superficiel est déterminé. Il peut venir compléter l'étude avec les données LIDAR.

Pour terminer, des mesures sur le terrain ont été effectuées à partir d'abris météo pouvant mesurer la température et le taux d'humidité. Pour cette campagne de mesures, deux types de données ont été récoltées.

Des données au pas de temps 30 minutes du mois de mars au mois de juillet dans des milieux forestiers identiques. Deux abris météo ont été placés dans des jeunes peuplements de chêne sessile – hêtre l'un en versant sud (adret) et l'un en versant nord (ubac). Une station de référence a été placée dans une pâture en face de la maison forestière des Arcis.
L'objectif été d'observer la présence de possibles variations du climat dans un même milieu mais avec deux positions topographiques différentes et sur une longue période. Puis de cadrer ces mesures avec la station de référence à découvert.
Par manque de temps les données n'ont pas été traitées mais cela pourrait se réaliser dans une possible poursuite du sujet de recherche. Il faudrait en même temps positionner des abris dans d'autres types de peuplements notamment des parcelles en régénération ou des résineux et sur une période plus longue pour observer les différences adret-ubac.

Une seconde campagne de données a été réalisée et consiste à prendre des mesures instantanées. L'objectif est de prendre des mesures dans des milieux identiques en versant nord et sud pendant 15 minutes avec un pas de temps de 10 secondes. Le travail a été réalisé sur deux demi-journées dans des conditions climatiques identiques avec une alternance de temps nuageux et découvert et la présence d'une légère brise. L'intérêt de ce travail est d'observer des différences de températures et d'humidités dans des conditions identiques (milieux et climat) instantanément.
Les différents milieux sont représentés en Annexe 12 : un peuplement résineux dense, un peuplement feuillus dense, un espace ouvert le long de la route, un peuplement en régénération et un jeune peuplement feuillu.
Par manque de temps, les données n'ont pas été analysées mais pourront l'être dans une possible poursuite de la recherche avec d'autres prises de données dans des conditions et milieux différents.

BIBLIOGRAPHIE

BASTIEN Y., GAUBERVILLE C., 2011, *VOCABULAIRE FORESTIER, Ecologie, gestion et conservation des espaces boisés. Institut pour le Développement Forestier (IDF), 608p.*

BAZIN N., GAUDIN S., 2004, *La cartographie des stations : méthodes et conseils.* CRPF (Centre Nationale de la Propriété Forestière), version 1.6, 22p.

BERCOVICI F., 2000, *Catalogue des stations forestières des Hautes collines de Normandie.* Avec la participation de l'Office National des Forêts, 364p.

BLANCHARD N., MOURALIS D., TODISCO D., 2020, *Géohistoire du massif forestier d'Ecouves (Orne, Normandie). Premiers résultats de recherche fondés sur les information biogéographiques et archéologiques issue des sources historiques.* Projets de paysage, Revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace, 23p.

BONNET M., DELAROZIERE-BOULLIN O., JUSSERAND CI., ROUX P., 1970, *Calcul automatique des « bilans d'eau » mensuels et annuels par les méthodes de Thornthwaite et Turc*. Bureau de Recherche Géologiques et Minières (BRGM), 20p.

CANTAT O., LE GOUEE P., BENSAID A., 2009, *Le rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des bilans hydrique*. Journées de Climatologie – Besançon, Climat et société : Climat et relief, 20p.

CHASSEGUET J-M., 2005, *Les milieux forestiers du parc naturel régional Normandie-Maine. Guide pour l'identification des stations et le choix des essences.* Avec la participation du PNR Normandie-Maine, 52p.

DELANGLE L., 2010/2011, *La prise en compte du réchauffement climatique dans la gestion des milieux forestiers. Le massif forestier de Moussonvilliers.* Mémoire de recherche sous la tutelle de Patrick Le Gouée et d'Olivier Cantat, rattaché au laboratoire GEOPHEN, 91p.

FICHOT C., 2015, *Le Parc naturel régional Normandie-Maine : un territoire à deux visages.* INSEE, Analyses Basse-Normandie, n°8, 4p.

FORRECAST., 2020, *Application mobile « FORRECAST BY BIOCLIMSOL ».* Rédacteurs : PNR du Hauts-Languedoc, CRPF, Coopérative forestière Alliance Forêts Bois.

FU P., RICH P-M., 2002, *A geometric solar radiation model with application in agriculture and forestry*. Computers and Electronics in Agriculture, 37, pp. 25-35.

GAUDIN S., 2008, *La prise en compte des changements climatiques dans les guides de stations.* Revue Forêt-entreprise, n°180, pp. 34-39.

GIEC., 2013, *Glossaire [Planton, S. (coord.)]* In « Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ». [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir. publ.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique, 20p.

GIEC., 2014, *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

GRANNIER A., *L'eau et la forêt, une alliance indissociable*. UMR Ecologie et écophysiologie forestières, INRA Centre de Nancy, 30p. https://www.plantes-et-eau.fr/documentation/agronomie-de-l-eau/34-l-eau-et-la-foret/83-l-eau-et-la-foret-une-alliance-indissociable

JABIOL B., BRETHES A., PONGE J-F., TOUTAIN F., BRUN J-J., 2007, *L'humus sous toutes ses formes, 2ème édition.* AgroParisTech, ENGREEF (Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 68p.

JABIOL B., 1985, *Les stations forestières en forêt domaniale d'Ecouves (Orne)*. Revue Forestières Française, XXXVII, pp. 33-44.

LANDMANN G., BREDA N., HOULLIER F., DREYER E., FLOT J-L., 2003, *Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ?*. Revue Forestière Française, LV, pp. 299-308.

LEGAY M., CORDONNIER T., DHOTE J-F., 2008, *Des forêts mélangées pour composer avec les changements climatiques.* Revue Forestières Française, LX, pp. 181-190.

LE GOUEE P., CANTAT O., BENSAID A., SAVOURET E., 2010, *Evaluation et cartographie de la sécheresse des sols forestiers normands à l'horizon 2100.* Poster, 21éme Festival international de la géographie : « La forêt, or vert des Hommes ? Gestion – Protection – Exploitation durable ».

LEMAIRE J., 2014, *Numéro spécial, BioClimSol : un outil d'aide à la décision face au changement climatique*. Revue Forêt-entreprise, N°218, rédactrice : MARECHAL N., pp. 4-17.

MADROLLES F., REBOUL J-B., 2018, *Guide de choix des essences de Normandie*. Coordinateur : REBOUL J-B, CRPF, 212p.

MANUEL N., 2020, *Réchauffement climatique : quels enjeux pour la forêt ?.* Entretien avec Manuel Nicolas, responsable du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (Renecofor), à l'occasion du salon international de l'agriculture 2020.

OFFICE NATIONAL DES FORETS., 2004, *Révision d'aménagement forestier 2004 – 2023 de la forêt domaniale d'Ecouves*. Rédactrice : ETIENNE V., 325p.

OFFICE NATIONAL DES FORETS., 2015, *Vous avez dit « sylviculture » ?*. Vidéo, Produit par la Direction de la Communication – ONF, Réalisé par AHSTUDIO, Durée : 5 minutes 13 secondes.

PIEDALLU C., PEREZ V., GEGOUT J-C., LEBOURGEOIS F., BERTRAND R., 2009, *Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France*. Revue Forestière Française, Ecole nationale du génie rural, LXI (6), pp. 567-593.

RICH P-M., DUBAYAH R., HETRICK W-A., SAVING S-C., 1994, *Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology*. American Society for Photogrammetric and Remote Sensing, Technical papers, pp. 524-529.

RIOU-NIVERT P., MOUSSU C., 2007, *Réchauffement climatique. Le changement climatique et la forêt : une réalité.* Revue ForêtsdeFRANCE, N°509, pp 17-22.

ROSSI M., VALLAURI D., 2013, *Evaluer la naturalité. Guide pratique version 1.2*. World Wide Fund for Nature (WWF), Marseille, 154p.

Second Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe., 1993, *RESOLUTION H1, General Guidelines for the Sustainable Management of Forests in Europe.* Helsinki/Finland, 5p.

NATIONS UNIES., 1992, *CONVENTION-CADRE DES NATIONS UNIES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES.* FCCC/INFORMAL/84, GE.05-62221 (F), 25p.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Le cycle sylvigénétique en 5 phases (mosaïque de taches unitaires > 200 m²). (Rossi et Vallauri, 2013).
Figure 2 : Carte de localisation de la forêt domaniale d'Ecouves et de la zone d'étude. (IGN, BD Topo, Carmen ONF).
Figure 3 : Récapitulatif des données démographiques par commune. (Insee Recensement population 2017).
Figure 4 : Carte des reliefs sur la forêt domaniale d'Ecouves. (IGN, Carmen ONF, BD Alti).
Figure 5 : Profil altimétrique de la zone d'étude du nord au sud. (Géoportail).
Figure 6 : Carte géologique du terrain d'étude avec vue d'ensemble sur la forêt. (InfoTerre BRGM, Carmen ONF).
Figure 7 : Diagramme ombrothermique de Gaussen de la commune de Sées selon les moyennes de 1981 à 2010. (Météociel).
Figure 8 : Mise en perspective du massif d'Ecouves. (IGN, Carmen ONF, GéoNormandie).
Figure 9 : Récapitulatif des bois privés sur le massif forestier d'Ecouves. (GéoNormandie).
Figure 10 : Répartition des essences forestières sur la zone d'étude. (ONF, IGN).
Figure 11 : Proportion des essences présentes sur la zone d'étude. (Hugo Fontaine).
Figure 12 : Proportion des essences objectifs sur la zone d'étude. (Hugo Fontaine).
Figure 13 : Carte des stations forestières du terrain d'étude. (ONF, IGN).
Figure 14 : Proportion des stations forestières sur la zone d'étude. (Hugo Fontaine).
Figure 15 : Carte de localisation du PNR Normandie-Maine. (Carmen ONF, PNR Normandie-Maine, GéoNormandie, IGN, BD Topo 2020).
Figure 16 : Organisation de la recherche pour répondre à l'objectif final. (Hugo Fontaine).
Figure 17 : Tableau récapitulatif des précipitations moyennes sur la normale 1981-2010. (Hugo Fontaine).
Figure 18 : Précipitations mensuelles pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).
Figure 19 : Tableau récapitulatif des températures moyennes sur la normale 1981-2010. (Hugo Fontaine).
Figure 20 : Températures mensuelles pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).
Figure 21 : Tableau récapitulatif de la demande évapotranspiratoire sur la normale 1981-2010. (Hugo Fontaine)
Figure 22 : ETP mensuels pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).
Figure 23 : Schéma simplifié du bilan hydrique en milieu forestier avec flux entrants et sortants. (Site web BILJOU).
Figure 24 : Equilibre hydrique entre les disponibilités et les besoins. (Cantat et al, 2009).
Figure 25 : Modèle pour le calcul du bilan hydrique à décroissance logarithmique. (GEOPHEN, 2011).
Figure 26 : Descriptif des calculs réalisés sur chaque ligne du modèle. (GEOPHEN, 2011).
Figure 27 : Exemple de bilan hydrique sur une année. (Hugo Fontaine).
Figure 28 : Emplacement des 66 points de grille sur le PNR Normandie-Maine. (Météo-France, 2021).
Figure 29 : Points ISBA couvrant la forêt domaniale d'Ecouves. (ONF, IGN, Météo-France/ISBA).
Figure 30 : Moyenne des précipitations, de l'ETP et de la température par mois de l'année 2020. (Hugo Fontaine).
Figure 31 : Bilan hydrique de la forêt domaniale d'Ecouves sur la normale 1981-2010. (ISBA, GEOPHEN).
Figure 32 : Résultats du bilan hydrique mensuel pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).
Figure 33 : Bilan hydrique de la forêt domaniale d'Ecouves pour l'année 2020. (ISBA, GEOPHEN).
Figure 34 : Bilan hydrique de la forêt d'Ecouves sur l'année à partir d'une RUM minimale. (ISBA, GEOPHEN).
Figure 35 : Bilan hydrique de la forêt d'Ecouves sur l'année à partir d'une RUM maximale. (ISBA, GEOPHEN).
Figure 36 : Variation de la quantité d'énergie solaire disponible au niveau du sol par rapport à la topographie et l'exposition du terrain en fonction du soleil. (Cantat et al, 2009).
Figure 37 : Outil "Jeu de données raster". (ArcGis).
Figure 38 : Outil "Mosaïque". (ArcGis).
Figure 39 : Outil « Rayonnement solaire global ». (ArcGis).
Figure 40 : Principe de l'outil "Extraction par masque". (ArcGis).
Figure 41 : Tableau des mesures « vraies » du rayonnement solaire à la station d'Alençon. (Météo France)
Figure 42 : Problème de la valeur mesurée d'Alençon ne s'inscrivant pas dans l'intervalle du raster. (ArcGis).

Figure 43 : Tableau récapitulant pour chaque mois la transmittance utilisée et le cadrage de la valeur mesurée. (ArcGis).
Figure 44 : Tableau récapitulatif des températures mensuelles (2020) des points ISBA. (Hugo Fontaine).
Figure 45 : Cheminement pour convertir un raster de type "float" en fichier vectoriel. (ArcGis).
Figure 46 : Exemple avec le mois de juillet pour le calcul de l'ETp. (ArcGis).
Figure 47 : Type de résultat obtenu après la rastérisation des calculs de l'ETp (exemple avec le mois de juillet). (ArcGis).
Figure 48 : Outil "Polygones vers raster". (ArcGis).
Figure 49 : Tableau récapitulatif des précipitations mensuelles (2020) des points ISBA. (Hugo Fontaine).
Figure 50 : Fichier « Excel » type pour les calculs de précipitations en fonction de l'altitude. Exemple avec le mois de janvier. (Hugo Fontaine).
Figure 51 : Type de résultat obtenu après la rastérisation des calculs des précipitations (exemple avec le mois de juillet). (ArcGis).
Figure 52 : Outil « Intersecter ». (ArcGis).
Figure 53 : Type de résultat obtenu après la rastérisation des calculs de P-ETp (exemple avec le mois de juillet). (ArcGis).
Figure 54 : Outil "Fusionner". (ArcGis).
Figure 55 : Récapitulatif des formules utilisées pour le calcul du bilan hydrique à fine échelle. (GEOPHEN, 2011).
Figure 56 : Fichier « Excel » type des calculs du bilan hydrique en fonction de l'altitude. (Hugo Fontaine).
Figure 57 : Type de résultat obtenu après la rastérisation des calculs du bilan hydrique (exemple avec le mois de juillet). (ArcGis).
Figure 58 : Tableau récapitulatifs des données nécessaires pour la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle selon la normale climatique. (Météo France).
Figure 59 : Tableau récapitulatifs pour chaque la transmittance utilisée et le cadrage de la valeur mesurée pour la normale climatique 1981-2010. (ArcGis).
Figure 60 : Carte du rayonnement solaire global pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).
Figure 61 : Carte de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETp) pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).
Figure 62 : Carte de l'offre pluviométrique pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).
Figure 63 : Carte du bilan hydrique climatique pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).
Figure 64 : Carte du bilan hydrique à décroissance métrique pour le mois de juillet sur la normale 1981 - 2010. (ArcGis, Météo France, ISBA).
Figure 65 : Carte du bilan hydrique à décroissance métrique pour le mois de juillet 2020. (ArcGis, Météo France, ISBA).
Figure 66 : Les intérêts de la cartographie des stations forestières. (La cartographie des stations : méthodes et conseils, CRPF, 2004).
Figure 67 : Clé "adéquation essence-station" présente dans les nouveaux guides de stations. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 68 : Zonage climatique de la Normandie. (Guide des stations forestières de Normandie, 2018).
Figure 69 : Exemple d'utilisation du guide sur la question du changement climatique. (Guide des stations de Normandie).
Figure 70 : Tableau de correspondance entre le guide de 2018 et celui de 2000. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 71 : Situations topographiques rencontrées sur le terrain. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 72 : Clé de détermination des principaux humus forestiers. (Jabiol et al : L'humus sous toutes, 2007).
Figure 73 : Tableau du coefficient "k" pour chaque classe texturale. (Cours BTS GF).

Figure 74 : La callune
Figure 75 : Le leucobryum glauque
Figure 76 : La myrtille
Figure 77 : La molinie bleue
Figure 78 : La sphaignes
Figure 79 : La fougère aigle
Figure 80 : Le polytric élégant
Figure 81 : Le laîche à pilules
Figure 82 : La houlque molle
Figure 83 : Le millet diffus
Figure 84 : La jacinthe des bois
Figure 85 : L'anémone des bois
Figure 86 : La laîche des bois
Figure 87 : L'euphorbe faux amandier
Figure 88 : La Circée de Paris
Figure 89 : La laîche pendante
Figure 90 : Exemple d'écogramme d'un milieux sec et acide. (Hugo Fontaine).
Figure 91 : Représentation d'un sol podzolisé. (Wikipédia).
Figure 92 : Correspondance entre les stations de Jabiol et les stations du catalogue des stations forestières de 2000. (B. Jabiol, 1985 & F. Bercovici, 2000).
Figure 93 : Correspondance entre les stations forestières du catalogue de 2000 et celles du guide de 2018. (CRPF).
Figure 94 : Carte des points de sondages à la tarière à main sur la zone d'étude. (IGN, ONF, Données personnelles).
Figure 95 : Nomenclature des solums pédologiques. (CNPF, Guides des stations de Normandie de 2018).
Figure 96 : Profil textural de la station J1 (station US5). (Hugo Fontine 12/04/2021).
Figure 97 : Peuplement type de la station J1. (Hugo Fontaine 14/04/2021).
Figure 98 : Profil textural de la station J2 versant nord (stations US7). (Hugo Fontaine 12/04/2021).
Figure 99 : Peuplement type de la station J2. Image de gauche station US9 (dominance chêne) et image de droite station US7 (dominance hêtre). (Hugo Fontaine 14/04/2021).
Figure 100 : Profil textural de la station J2 en versant sud et sud-ouest. (Station US9). (Hugo Fontaine 12/04/2021).
Figure 101 : Profil textural de la station J31. (Hugo Fontaine 09/04/2021).
Figure 102 : Peuplements types de la station J31. (Hugo Fontaine 14/05/2021).
Figure 103 : Profil textural de la station J32. (Hugo Fontaine 13/04/2021).
Figure 104 : Peuplement type de la station J32. (Hugo Fontaine 14/04/2021).
Figure 105 : Peuplements types de la station J5. (Hugo Fontaine 22/03/2021 et 14/04/2021).
Figure 106 : Profil textural de la station J5. (Hugo Fontaine 09/04/2021).
Figure 107 : Profil textural de la station J6. (Hugo Fontaine 08/04/2021).
Figure 108 : Peuplement type de la station J6. (Hugo Fontaine 14/04/2021).
Figure 109 : Profil textural de la station J7. (Hugo Fontaine 13/04/2021).
Figure 110 : Peuplement type de la station J7. (Hugo Fontaine 13/04/2021).
Figure 111 : Carte des stations forestières de la zone d'étude selon le guide des stations de Normandie (2018). (IGN, ONF, CNPF, Données personnelles).
Figure 112 : Emprises des anciennes stations forestières. (Hugo Fontaine).
Figure 113 : Emprises des nouvelles stations forestières. (Hugo Fontaine).
Figure 114 : Carte de l'emplacement des fosses pédologiques. (IGN, ONF, Données personnelles).
Figure 115 : Devis pour l'ouverte et la fermeture des fosses pédologiques. (ONF).
Figure 116 : Tableau récapitulant l'intervalle du déficit hydrique pour les mois concernés. (Hugo Fontaine).

Figure 117 : Résultat obtenus suite aux calculs des bilans hydriques mensuels pour chaque année de la normale climatique. (GEOPHEN, Excel).
Figure 118 : Intervalle entre la valeur minimale et maximale pour les mois concernés par du déficit hydrique. (Hugo Fontaine).
Figure 119 : Tableau récapitulant les intervalles selon l'intensité pour les mois concernés par du déficit hydrique. (Hugo Fontaine).
Figure 120 : Lien entre les résultats obtenus lors de la spatialisation et l'intensité préalablement définie. (Hugo Fontaine).
Figure 121 : Correspondance entre essences et stations forestières sur la zone d'étude. (Hugo Fontaine).
Figure 122 : Représentation du pin laricio de Corse (Pinus Nigra) en contexte forestier.
Figure 123 : Adéquation du pin laricio de Corse avec la station US11. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 124 : Adéquation du sapin de Vancouver avec la stations US11. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 125 : Représentation du mélèze du Japon (Larix Kaempferi) en contexte forestier. (Le Peuple d'A Côté).
Figure 126 : Représentation de l'épicéa commun (Picea Abies) en contexte forestier. (Image issue du Vaud en Suisse).
Figure 127 : Adéquation de l'épicéa commun avec la station US10. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 128 : Représentation du chêne rouge d'Amérique (Quercus Rubra) en contexte forestier.
Figure 129 : Représentation du bouleau verruqueux (Betula Pendula) en contexte forestier. (LeMonde).
Figure 130 : Adéquation du bouleau verruqueux avec la station US10. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 131 : Représentation du douglas (Pseudotsuga Menziesii) en contexte forestier. (Hugo Fontaine 14/04/2021).
Figure 132 : Adéquation du douglas, du sapin pectiné et du pin sylvestre avec la stations US9. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 133 : Adéquation du douglas, du sapin pectiné et du pin sylvestre avec la stations US11. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 134 : Représentation du pin sylvestre (Pinus Sylvestris) en contexte forestier. (Hugo Fontaine 22/03/2021).
Figure 135 : Adéquation du pin sylvestre avec la station US5. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 136 : Adéquation du hêtre avec les stations US5, US7 et US9. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 137 : Représentation du hêtre (Fagus Sylvatica) en contexte forestier. (Les têtards arboricoles).
Figure 138 : Représentation du chêne (Quercus Petraea) en contexte forestier. (Image issue du canton de Vaud en Suisse).
Figure 139 : Adéquation du chêne sessile avec la station US5 et US9. (Guide des stations de Normandie, 2018).
Figure 140 : Emplacement des abris météo dans les peuplements de chêne sessile – hêtre. A gauche abris météo en versant sud et à droite en versant nord. (Hugo Fontaine 27/05/2021).
Figure 141 : Emplacement de l’abri météo de référence à la maison forestière des Arcis. (Hugo Fontaine 22/03/2021).

Table des matières :

INTRODUCTION GENERALE 1
PREMIERE PARTIE : ETAT DE L'ART DE LA RECHERCHE 4
1 - La forêt et le changement climatique : des thématiques actuelles liées entre elles 4
1.1 - La forêt : un écosystème, aujourd'hui, cultivé durablement 4
1.2 - Caractérisation du changement climatique 5
1.2.1 - Définitions 5
2 - Les connaissances actuelles sur le changement climatique en forêt 6
2.1 - Caractérisation du changement climatique 6
2.2 - Les conséquences sur la forêt et la biocénose 7
2.3 - La gestion durable face au changement climatique 8
3 - Insertion de la recherche dans le monde scientifique 9
3.1 - BioClimSol : un outil d'aide pour les gestionnaires forestiers 9
3.1.1 - Présentation de l'application 9
3.1.2 - Application « FORECCAsT by BioClimSol » 10
3.1.3 - Discussions / Limites de l'outil 10
3.2 - Avancée de la recherche sur le changement climatique sur les forêts normandes . 11
3.2.1 - Evaluation de la sécheresse des sols forestiers du Calvados 11
3.2.2 - Etude du réchauffement climatique sur le massif de Moussonvilliers 12
3.2.3 - Discussions 12
DEUXIEME PARTIE : CONTEXTUALISATION 13
1 - Localisation du terrain d'étude 13
1.1 - Renseignements généraux 13
1.2 - L'Office National des Forêts 13
1.3 - La zone d'étude 14
2 - Contexte social 14
3 - Une forêt marquée par le relief 15
4 - Géologie de la forêt d'Ecouves 16
5 - Un climat favorable à la végétation forestière 17
6 - Approche forestière de la forêt d'Ecouves et de la zone d'étude 17
6.1 - Mise en perspective du massif forestier 17
6.2 - Répartition des essences sur la zone d'étude 18
6.3 - Essences objectifs à long terme sur la zone d'étude 19

6.4 - Contexte édaphique – pédologique de la forêt d'Ecouves 19
6.5 - Gestion antérieure de la forêt domaniale d'Ecouves 20
6.5.1 - Généralités 20
6.5.2 - L'aménagement passé : 1984-2003 21
6.5.3 - Etude de l'aménagement en cours d'application : 2004-2023 21
7 - Une forêt s'inscrivant au sein du PNR Normandie-Maine 22
7.1 - Renseignements généraux 22
7.2 - Le Parc Naturel Régional Normandie-Maine 22
7.3 - Un PNR marqué par la forêt 23
TROISIEME PARTIE : PRESENTATION GENERALE DU SUJET DE RECHERCHE 24
QUATRIEME PARTIE : ADEQUATION DES ESSENCES FORESTIERES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE 25
1 - Particularités du climat régional sur la normale climatique 25
1.1 - Présentations des paramètres climatiques (P, T et Etp) 25
1.1.1 - L'offre pluviométrique 25
1.1.2 - Quelles variations pour les températures ? 26
1.1.3 - La demande évapotranspiratoire 27
1.2 - Conclusion 28
2 - Prise en compte du bilan hydrique dans les impacts du changement climatique en forêt domaniale d'Ecouves 29
2.1 - Le bilan hydrique en milieux forestier : un bon indicateur pour comprendre l'impact des sécheresses 29
2.2 - Méthodologie du calcul du bilan hydrique ponctuel 31
2.2.1 - Méthodologie générale pour calculer un bilan hydrique ponctuel 31
2.2.2 - Bilan hydrique à l'échelle de la forêt domaniale d'Ecouves 32
2.3 - Le bilan hydrique de la forêt domaniale d'Ecouves 34
2.3.1 - Bilan hydrique ponctuel de la forêt domaniale d'Ecouves 34
2.3.2 - Disparités interannuelles et inter-mensuelles sur la normale 34
2.3.3 - 2020 : une année aux deux extrêmes 35
2.4 - Etude sur les correctifs imposés à la réserve utile des sols 36
3 - Spatialisation du bilan hydrique à fine résolution 37
3.1 - Généralités 37
3.2 - Méthodologie du bilan hydrique spatialisé à fine échelle 38
3.2.1 - Le rayonnement solaire global sous ArcGis 38

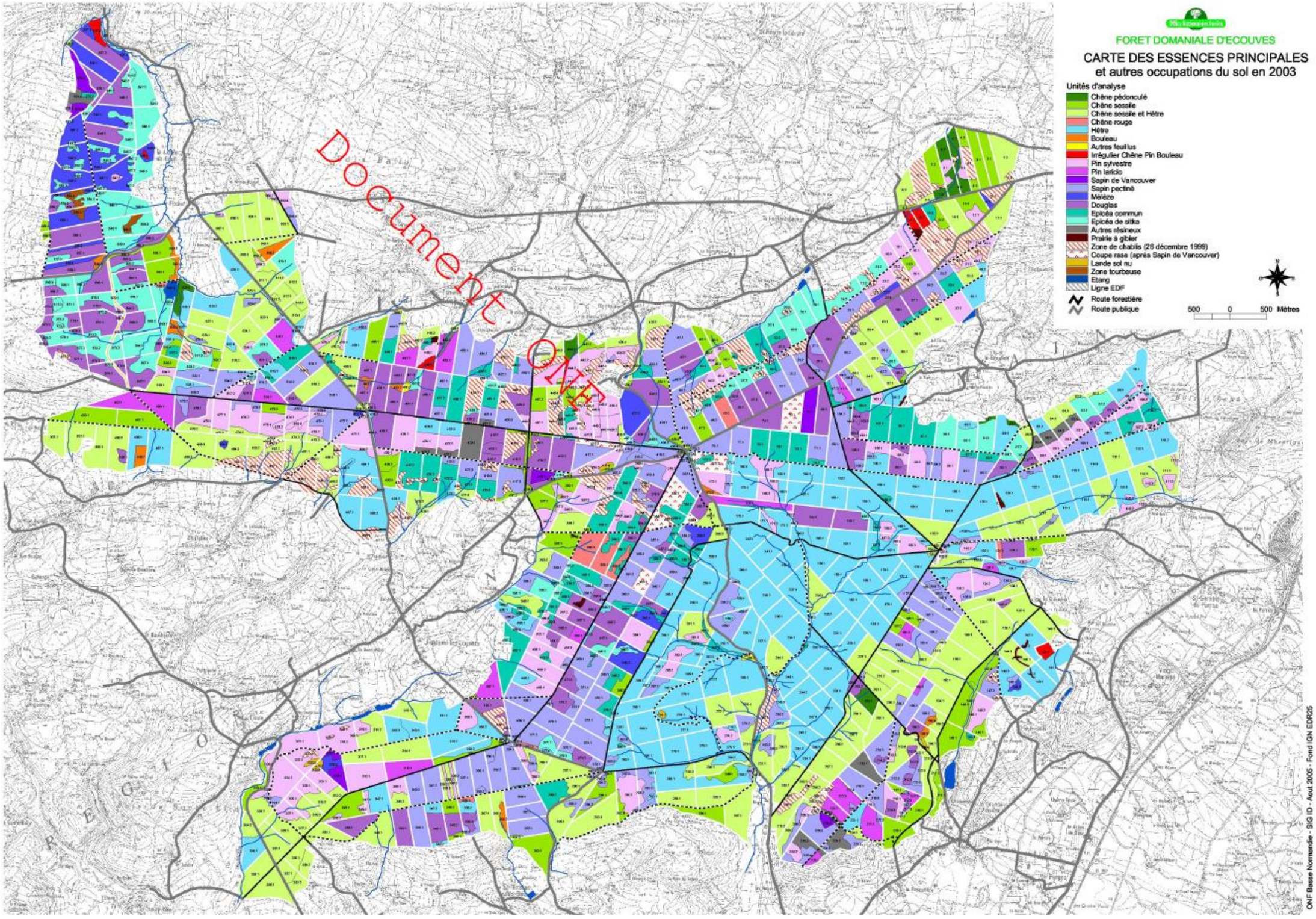
3.2.2 - Calcul de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETp) 41
3.2.2.1- Définition/Formule 41
3.2.2.2- Données utilisées pour le calcul 41
3.2.2.3- Méthodologie pour le calcul de l'ETp sous ArcGis 42
3.2.2.4- Perspective 43
3.2.3 - Spatialisation des données sur les précipitations 44
3.2.3.1- Loi de pluviosité 44
3.2.3.2- Données utilisées pour la spatialisation 44
3.2.3.3- Automatisation sous ArcGis 45
3.2.4 - Spatialisation et rastérisation du bilan hydrique à fine échelle 47
3.2.4.1- Calcul du bilan climatique à fine échelle 47
3.2.4.2- Calcul du bilan hydrique à fine échelle 48
3.2.5 - Spatialisation du bilan hydrique à partir de la normale climatique (1981–2010) 50
3.2.6 - Limite de la spatialisation du bilan hydrique 51
3.3 - Quelles sont les impacts du climat à fine résolution ? 51
3.3.1 - Le rayonnement solaire global : Quelles impacts sur la zone d'étude ? 51
3.3.2 - Quelle répartition pour la demande évapotranspiratoire ? 53
3.3.3 - L'offre pluviométrique : Comment s'organise-t-elle sur la zone d'étude à partir de la loi de pluviosité ? 54
3.3.4 - Le bilan climatique : une première appréciation du bilan hydrique 55
3.3.5 - Le bilan hydrique mensuel spatialisé de la zone d'étude 56
3.4 - Etude de cas de l'année 2020 : Quelles spécificités par rapport à la normale climatique (1981-2010) 57
4 - Renouvellement de la carte des stations forestières 59
4.1 - La cartographie des stations : un outil essentiel pour anticiper le réchauffement climatique 59
4.1.1 - Utilités de la carte des stations forestières 59
4.1.2 - Le guide des stations forestières 60
4.1.3 - Le changement climatique : une notion très récente dans les guides 60
4.2 - Méthodologie de la carte des stations forestières 61
4.2.1 - Première méthodologie 61
4.2.2 - Méthodologie choisie pour la carte des stations 62
4.2.3 - La fiche de diagnostic stationnel 64
4.2.3.1- Détermination de l'habitat, de la variante et de la station 64
4.2.3.2- Le relevé pédologique 65
4.2.3.3- Le relevé floristique 66
4.2.3.4- Engorgement et podzolisation 68

4.3 - Changement de stratégie 69
4.4 - Rafraichissement des données sur les stations forestières 69
4.4.1 - Généralités 69
4.4.2 - Principe pour le renouvellement de la donnée stationnelle 70
4.4.1 - Correspondance entre le catalogue de 2000 et le guide de 2018 70
4.5 - Réalisation des sondages sur la zone d'étude 71
4.6 - Analyse des données récoltées sur le terrain 72
4.6.1 - La station J1 72
4.6.2 - La station J2 73
4.6.3 - La station J31 75
4.6.4 - La station J32 76
4.6.5 - La station J4 77
4.6.6 - La station J5 78
4.6.7 - La station J6 79
4.6.8 - La station J7 80
4.7 - Représentation cartographie de la carte des stations 81
4.7.1 - Choix des couleurs 81
4.7.2 - Résultats 81
4.8 - Pour aller plus loin 82
4.8.1 - Les limites de la méthodologie 82
4.8.2 - Perspectives envisagées 83
5 - Adéquation des essences forestières par rapport au climat et aux stations forestières ... 85
5.1 - Cadrage des résultats de la spatialisation du déficit hydrique sur la normale climatique (1981-2010) à fine résolution 85
5.2 - Répartition spatiale des essences forestières par rapport aux stations forestières . 87
5.3 - Couplage des données stationnelles et climatiques avec la distribution des essences forestières 87
5.3.1 - Le Pin Laricio de Corse (Pinus Nigra) 88
5.3.2 - Le Sapin de Vancouver (Abies Grandis) 89
5.3.3 - Le Mélèze du Japon (Larix Kaempferi) 89
5.3.4 - L'Epicéa Commun (Picea Abies) 90
5.3.5 - Le Chêne Rouge (Quercus Rubra) 91
5.3.6 - Le Bouleau Verruqueux (Betula Pendula) 91
5.3.7 - Le Douglas (Pseudotsuga Menziesii) 92

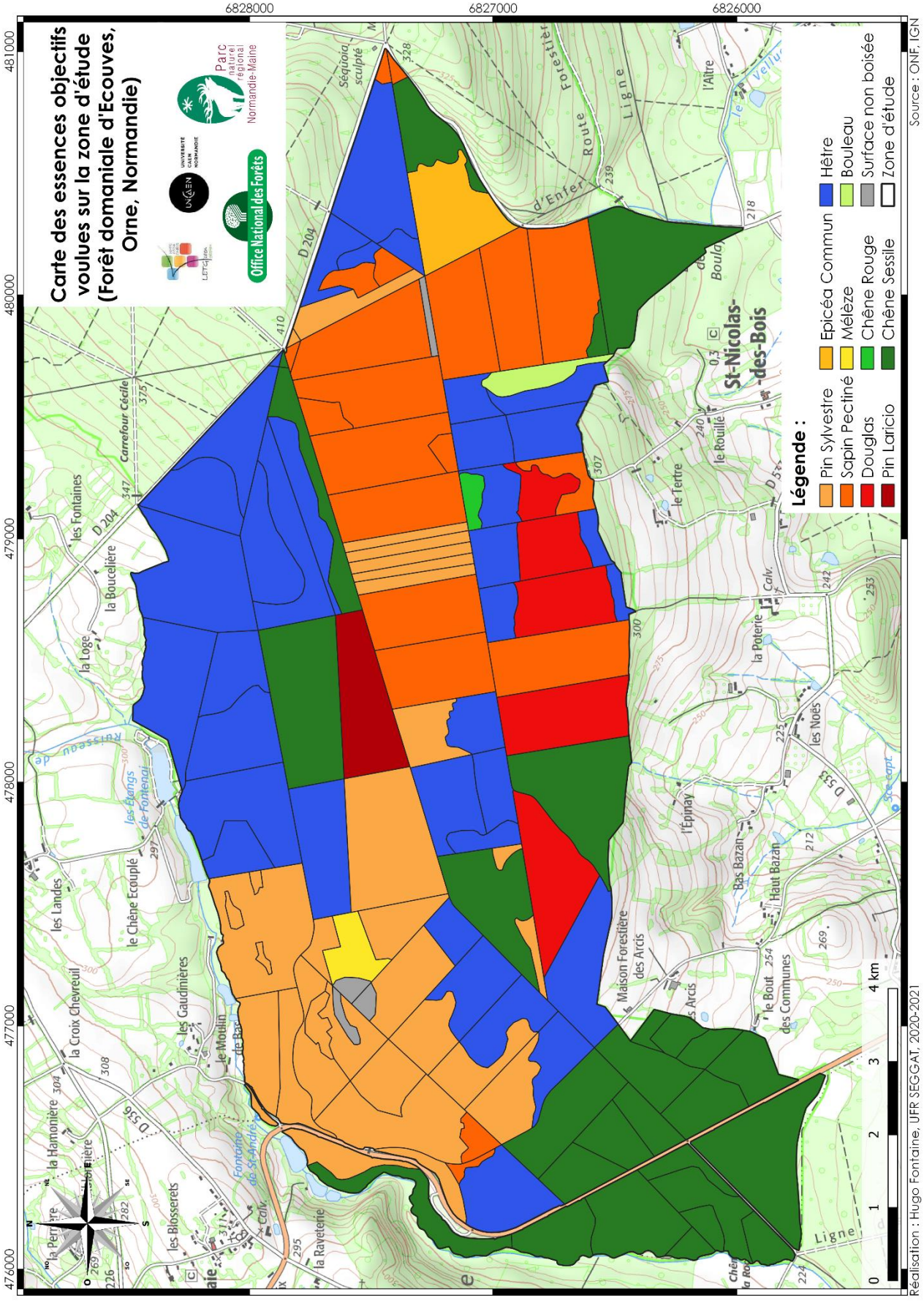
5.3.8 - Le Sapin Pectiné (Abies Alba) 92
5.3.9 - Le Pin Sylvestre (Pinus Sylvestris) 93
5.3.10 - Le Hêtre (Fagus Sylvatica) 94
5.3.11 - Le Chêne Sessile (Quercus Petraea) 95
CONCLUSION ET PERSPECTIVES 96
1 - Conclusion 96
2 - Perspectives 97
BIBLIOGRAPHIE 99
LISTE DES FIGURES 102

ANNEXES

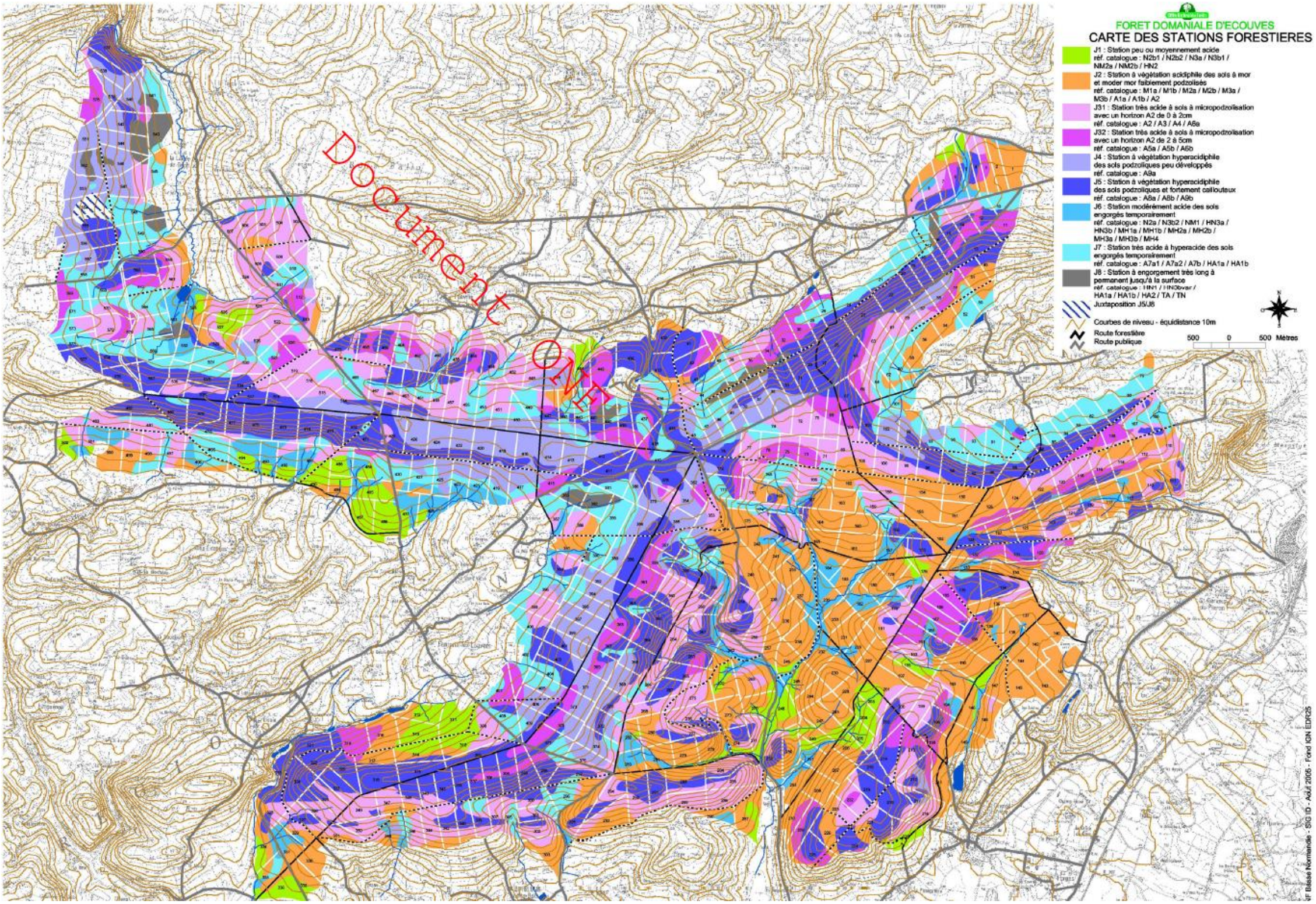
Annexe 1 : Carte des essences forestières et autres occupations du sol sur la forêt domaniale d'Ecouves. (ONF 2004).



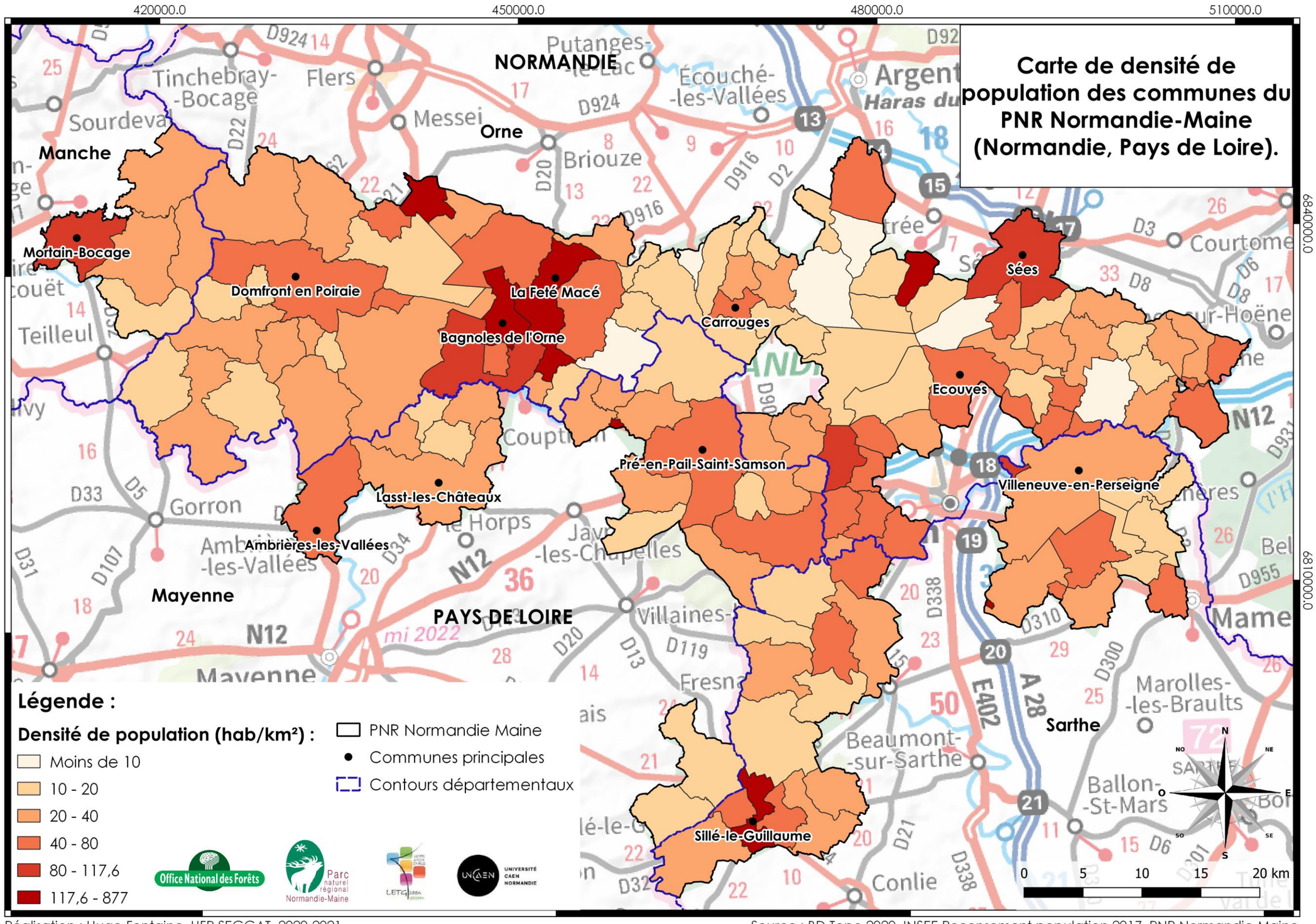
Annexe 2 : Carte des essences objectifs sur la zone d'étude.



Annexe 3 : Carte des essences forestières sur la forêt domaniale d'Ecouves. (ONF 2004).



Annexe 4 : Carte de densité de population des communes du PNR Normandie-Maine (Normandie, Pays de Loire).



Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020-2021

Source : BD Topo 2020, INSEE Recensement population 2017, PNR Normandie-Maine

Le Parc Naturel Régional Normandie-Maine est composé à 95 % de communes rurales. Avec une population de plus de 93 000 habitants, en 2017, il est le plus peuplé des trois PNR bas-normands mais aussi le moins dense en raison de son vaste territoire. Avec 44 hab/km² il est très légèrement inférieur à la moyenne départementale qui est de 46,4 hab/km² en 2017.

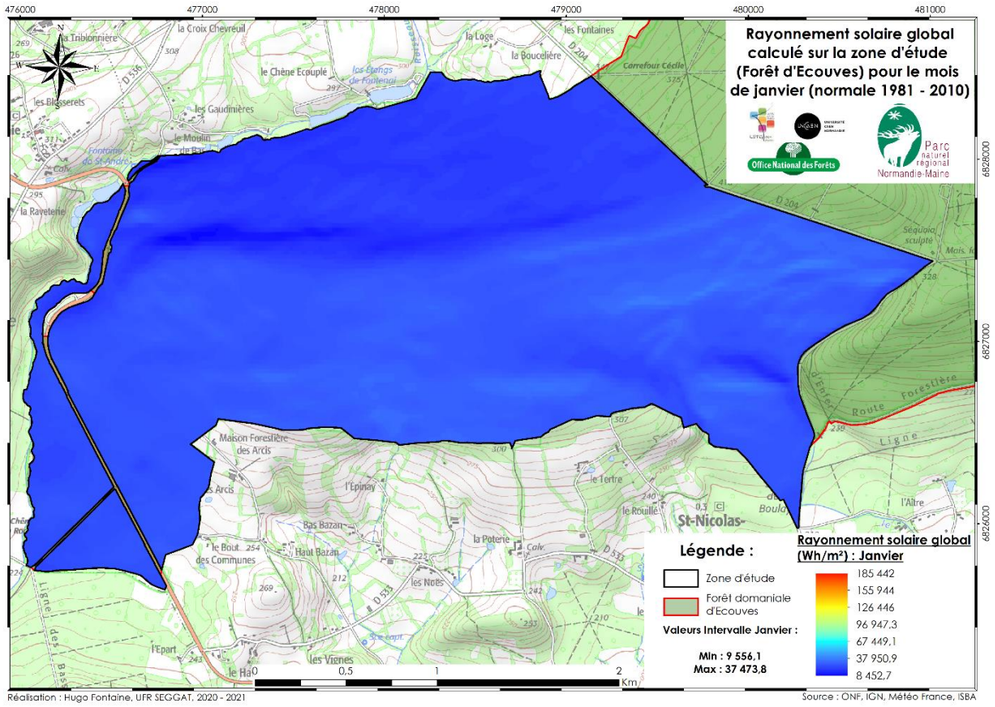
Le PNR Normandie-Maine présente sur son territoire deux visages complétement différents l'un de l'autre. L'ouest est marqué par un « caractère rural très prononcé avec quelques signes de dévitalisation » (FICHOT, 2015) tandis qu'à l'est le PNR montre « des caractéristiques plus périurbaines […] sous l'influence d'Alençon ». (FICHOT, 2015).

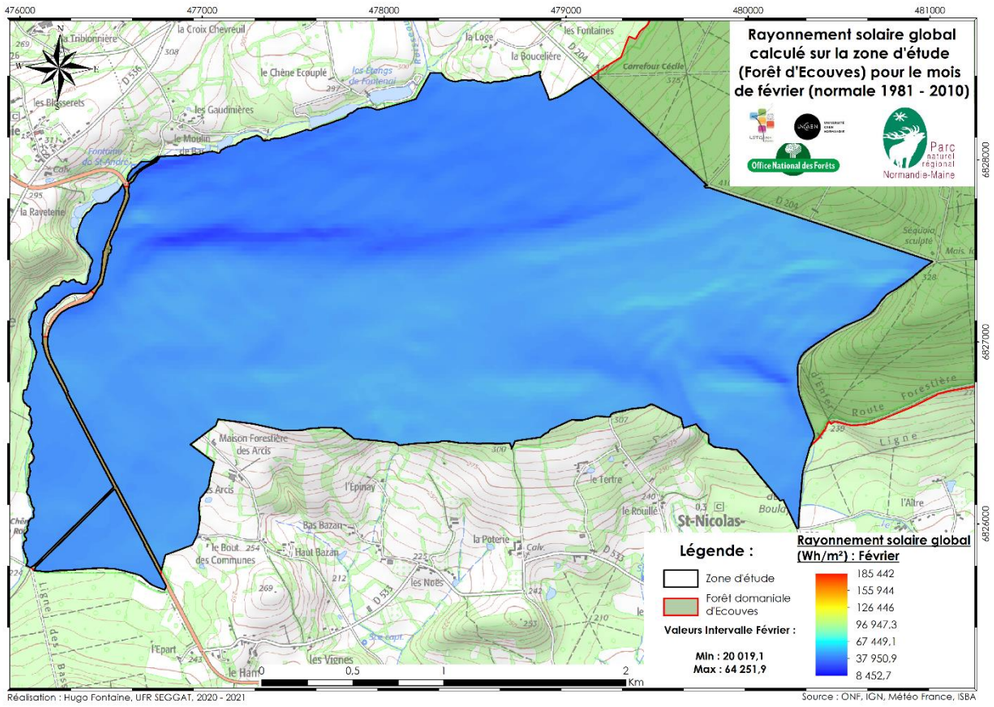
L'Annexe 4 met en éveil ce phénomène-là avec à l'ouest des densités de population relativement basse où la moyenne tombe à 25 hab/km² mis à part pour certaines communes comme Mortain-Bocage (109 hab/km²) ou Domfront-en-Poiraie (65 hab/km²). Le nord du PNR, au niveau de Carrouges présente les mêmes caractéristiques que l'ouest. La densité est même inférieure par rapport aux communes de l'ouest car ici elle oscille à 10 hab/km².
On remarque tout de même une concentration des populations aux alentours de la commune de la Ferté-Macé (163 hab/km²) et de Sillé-le-Guillaume (177 hab/km²) qui deviennent, aujourd'hui, des pôles de plus en plus attractif pour les populations jeunes et pour le travail.

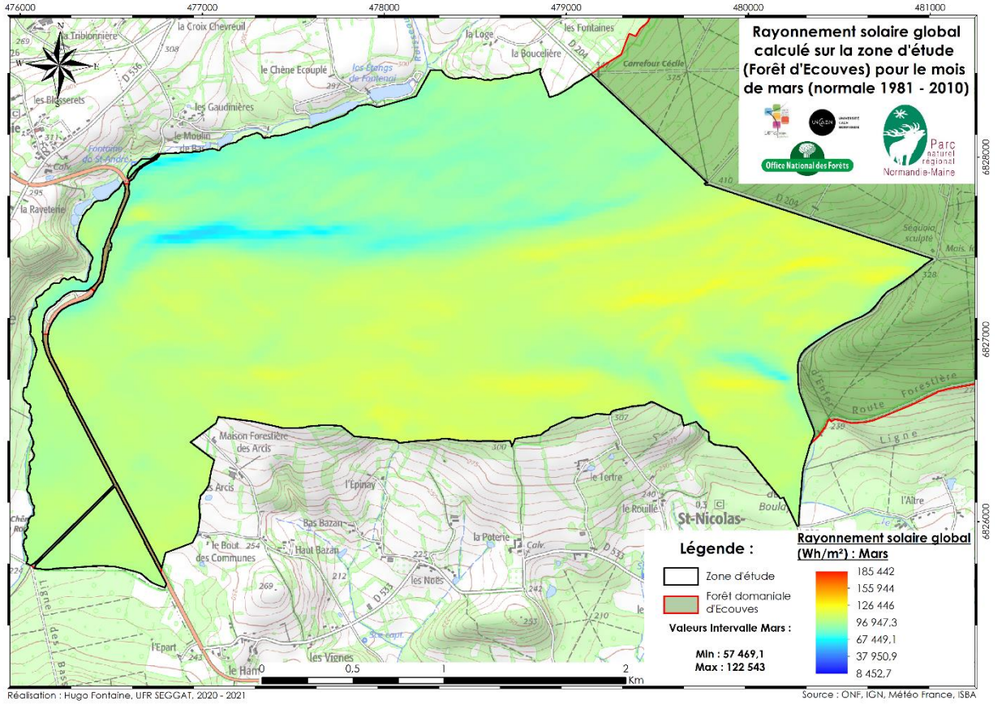
Les caractéristiques plus périurbaines sous l'influence d'Alençon à l'est du PNR se répercutent également dans les densités de population. En effet, la carte montre que la couronne d'Alençon présente des densités plus élevées par rapport au nord et l'ouest du parc avec une moyenne à 60 hab/km², supérieure à la moyenne de l'Orne. Mais l'étalement de ces caractéristiques plus périurbaines sont limité et se cantonne juste aux communes limitrophes d'Alençon.

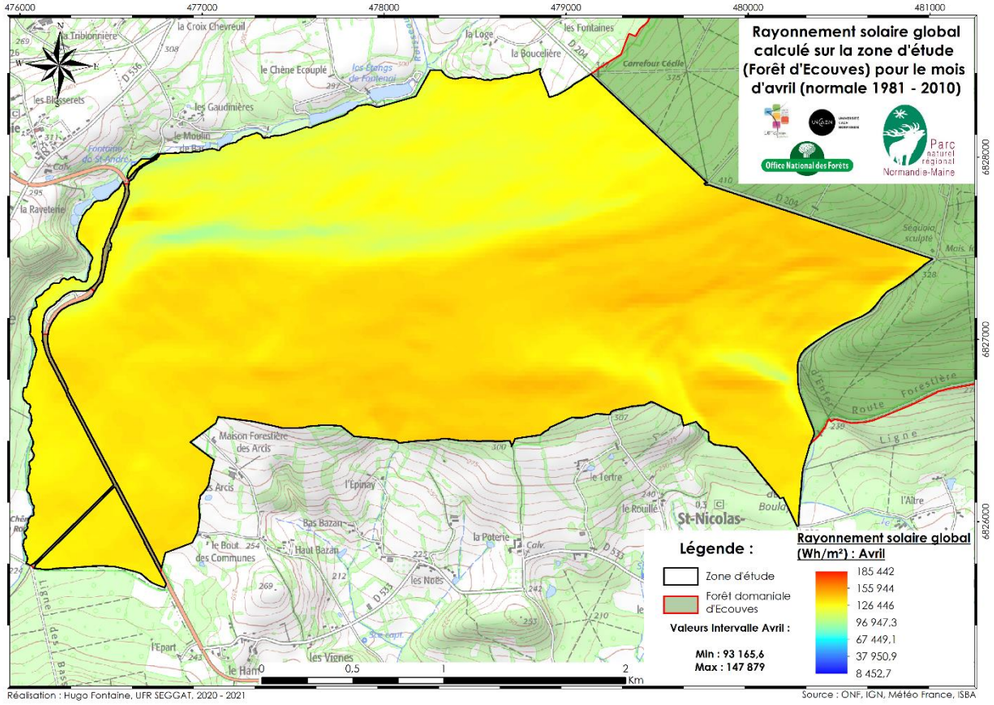
A l'instar de la région et de la forêt d'Ecouves, « le Parc Normandie-Maine n'échappe pas au vieillissement de sa population : en 20 ans l'âge médian des habitants s'y est accru de 8 ans en passant de 37 à 45 ans. « (FICHOT, 2015). La croissance démographique du territoire est en adéquation avec les densités observées sur la carte. Elle a tendance à augmenter à l'est du PNR en raison de sa proximité avec l'air urbaine parisienne et la périurbanisation croissante autour d'Alençon. A l'inverse le nord et le sud-ouest présente des densités plus faibles tout comme la croissance démographique qui diminue à cause de nombreux départs vers Caen et Le Mans de la part des jeunes pour étudier ou travailler.
Il est à noter que la tranche des 15-24 ans et la plus déficitaire sur le plan migratoire pour le PNR alors que celui-ci a tendance à gagner des habitants dans toutes les autres tranches d'âges surtout dans celle des 55-64 ans d'où le vieillissement de 8 ans de l'âge médian.

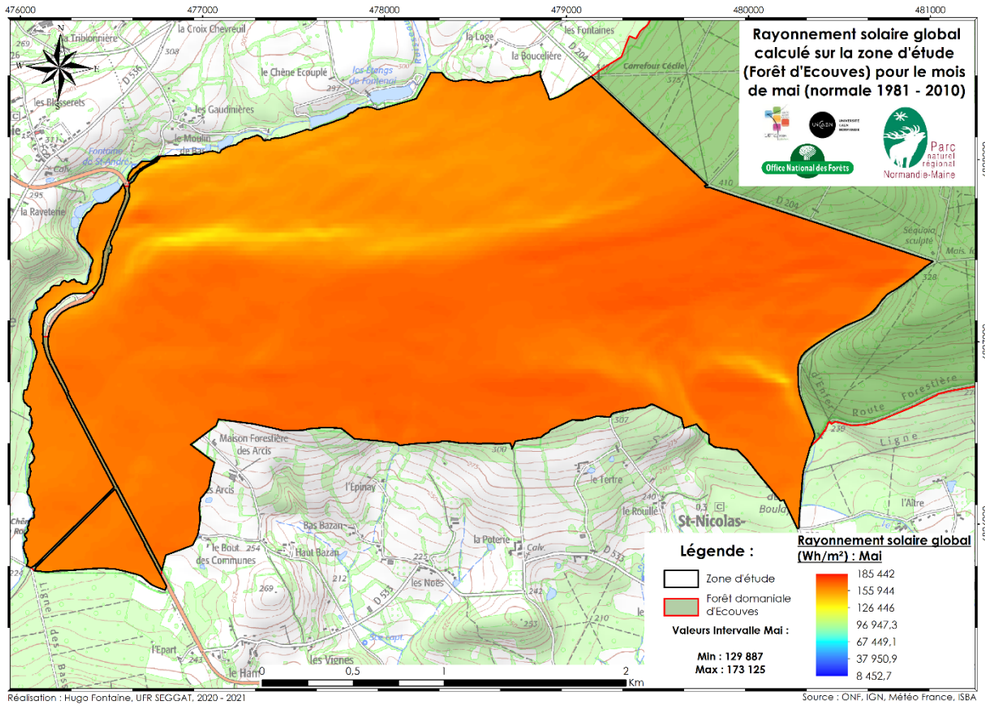
Annexe 5 : Cartes du rayonnement solaire global pour les 12 mois de l'année (normale 1981 – 2010) sur la zone d'étude.

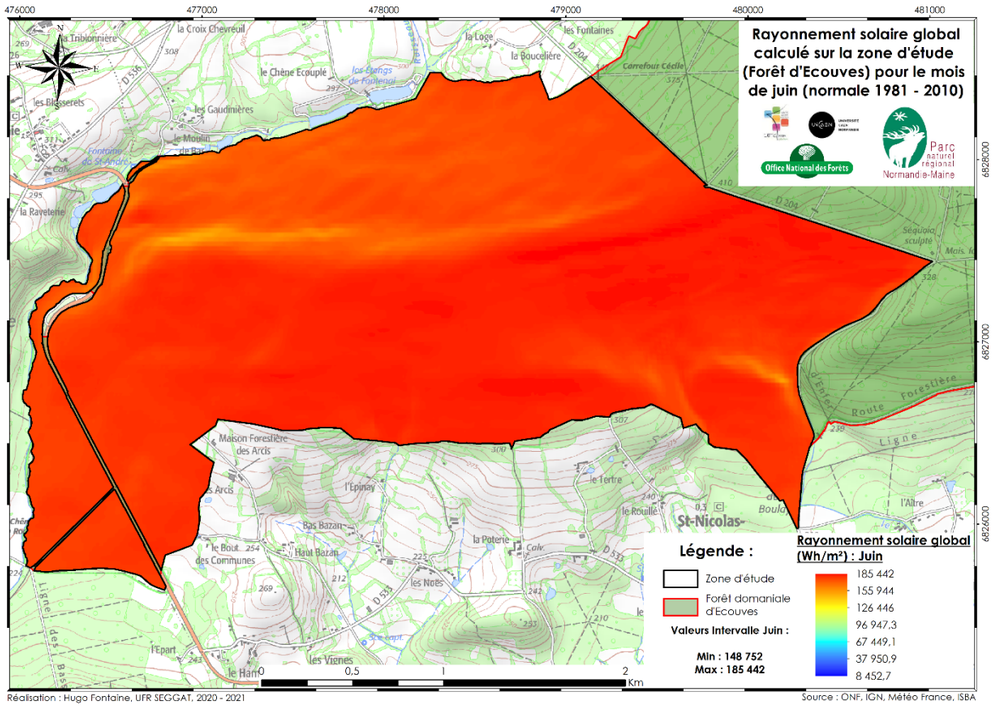


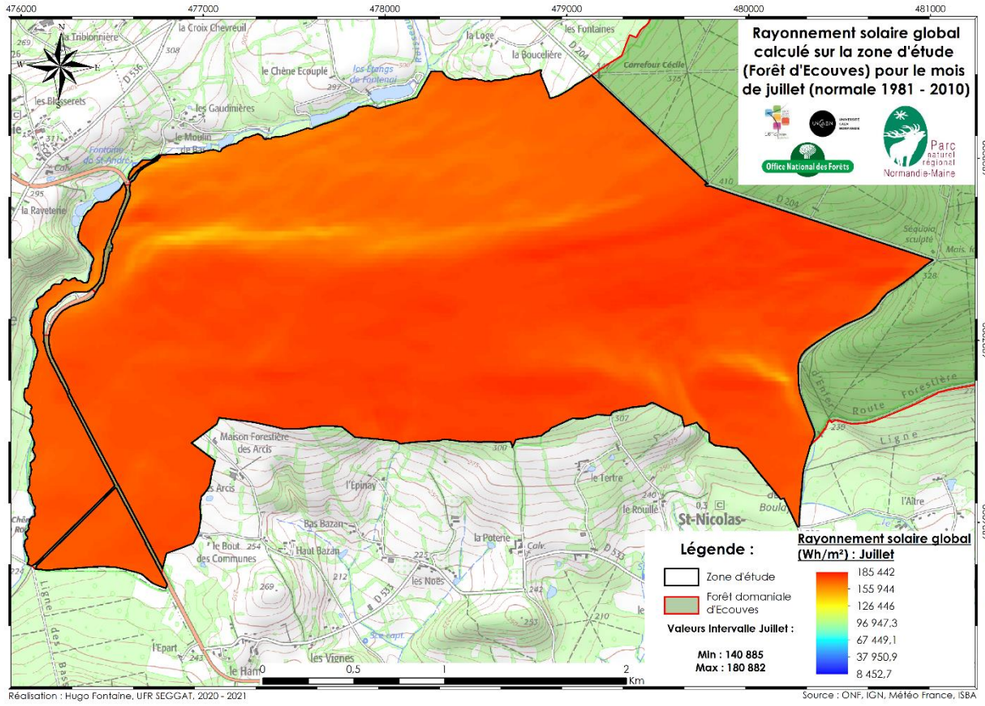


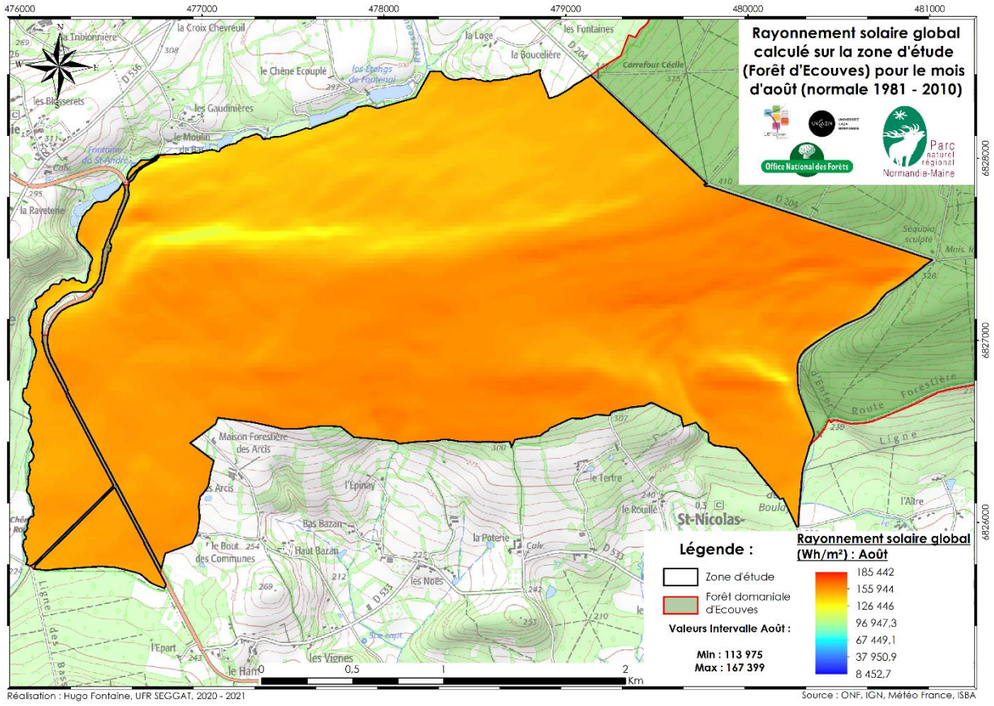


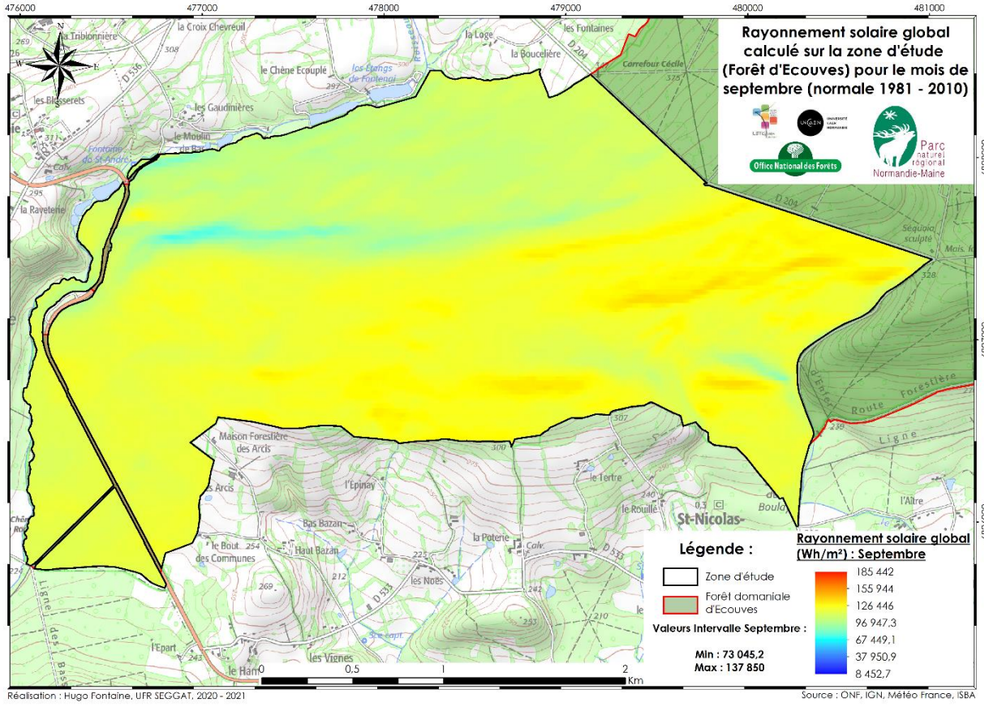


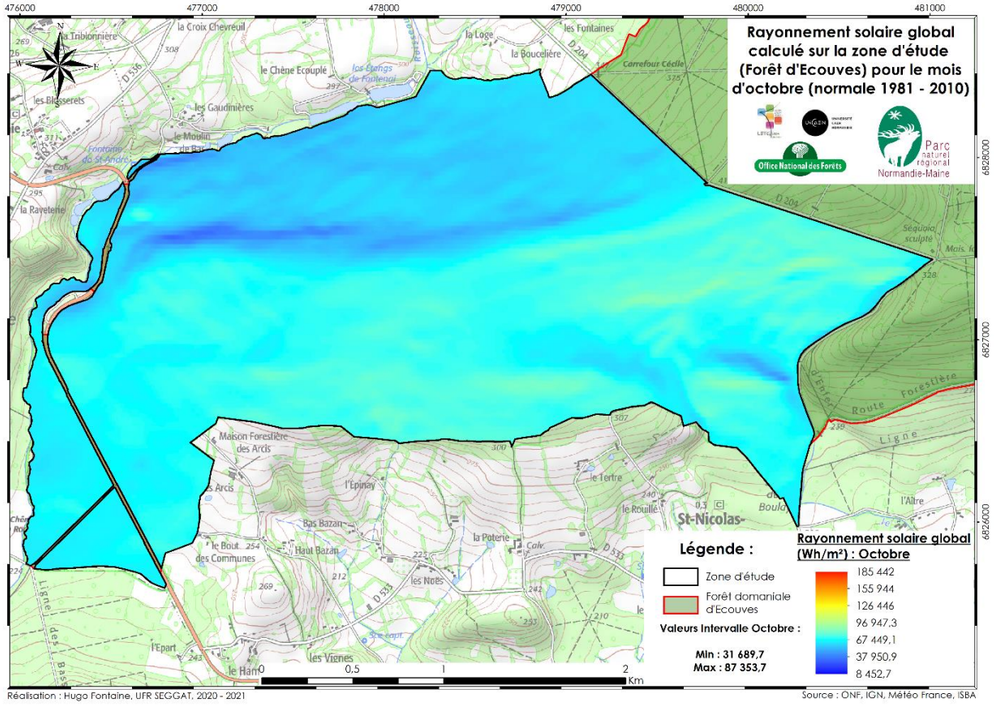

Rayonnement solaire global calculé sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de mai (normale 1981 - 1980)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeurs Intervalle Mai :
Min : 129 887
Max : 173 125
Rayonnement solaire global (Wh/m²) : Mai
185 442
155 944
126 446
96 947,3
67 449,1
37 950,9
8 452,7
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0,5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

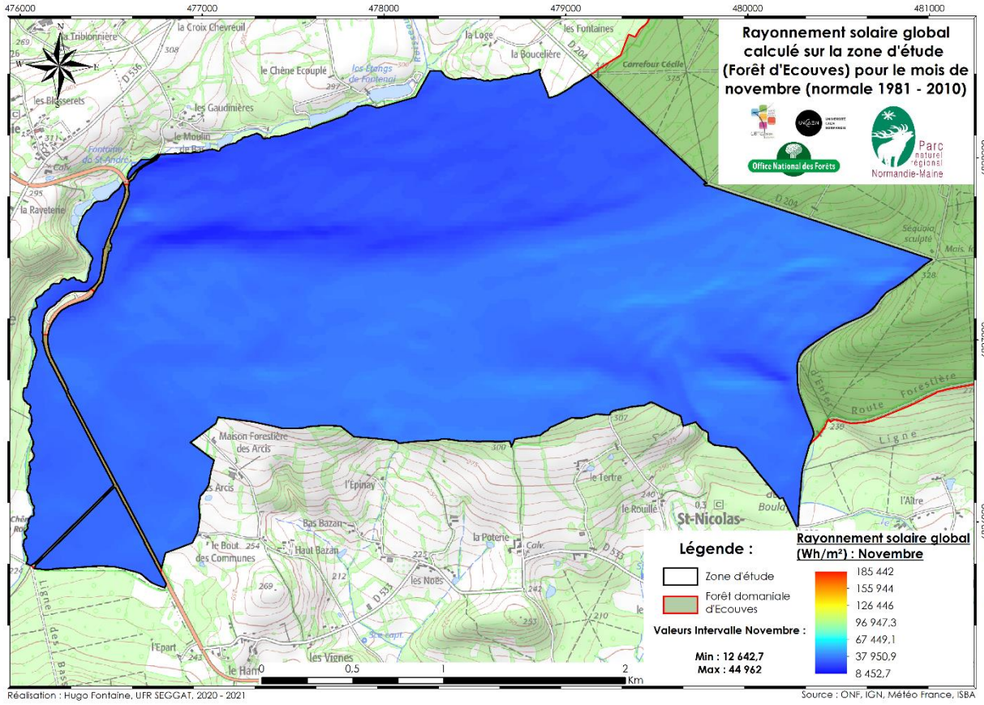

Rayonnement solaire global calculé sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de juin (normale 1981 - 1980)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeurs Intervalle Juin :
Min : 148 752
Max : 185 442
Rayonnement solaire global (Wh/m²) : Juin
185 442
155 944
126 446
96 947,3
67 449,1
37 950,9
8 452,7
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0,5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

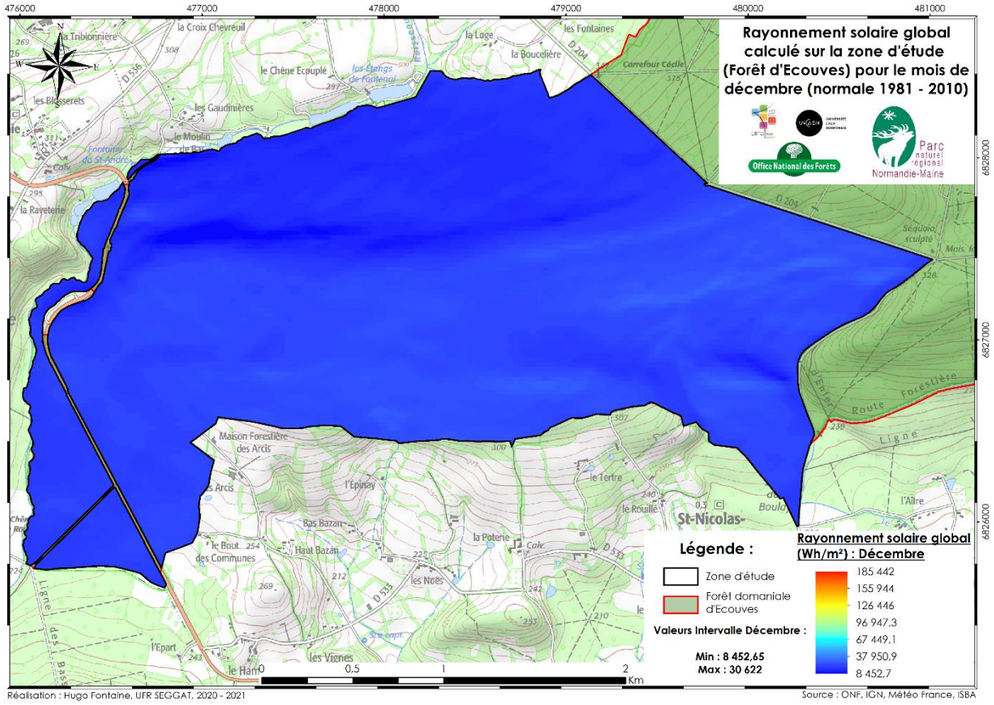

Rayonnement solaire global calculé sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de juillet (normale 1981 - 1980)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeurs Intervalle Juillet :
Min : 140 885
Max : 180 882
Rayonnement solaire global (Wh/m²) : Juillet
185 442
155 944
126 446
96 947,3
67 449,1
37 950,9
8 452,7
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0,5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA


Rayonnement solaire global calculé sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois d'août (normale 1981 - 1980)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeurs Intervalle Août :
Min : 113 975
Max : 167 399
Rayonnement solaire global (Wh/m²) : Août
185 442
155 944
126 446
96 947,3
67 449,1
37 950,9
8 452,7
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0,5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

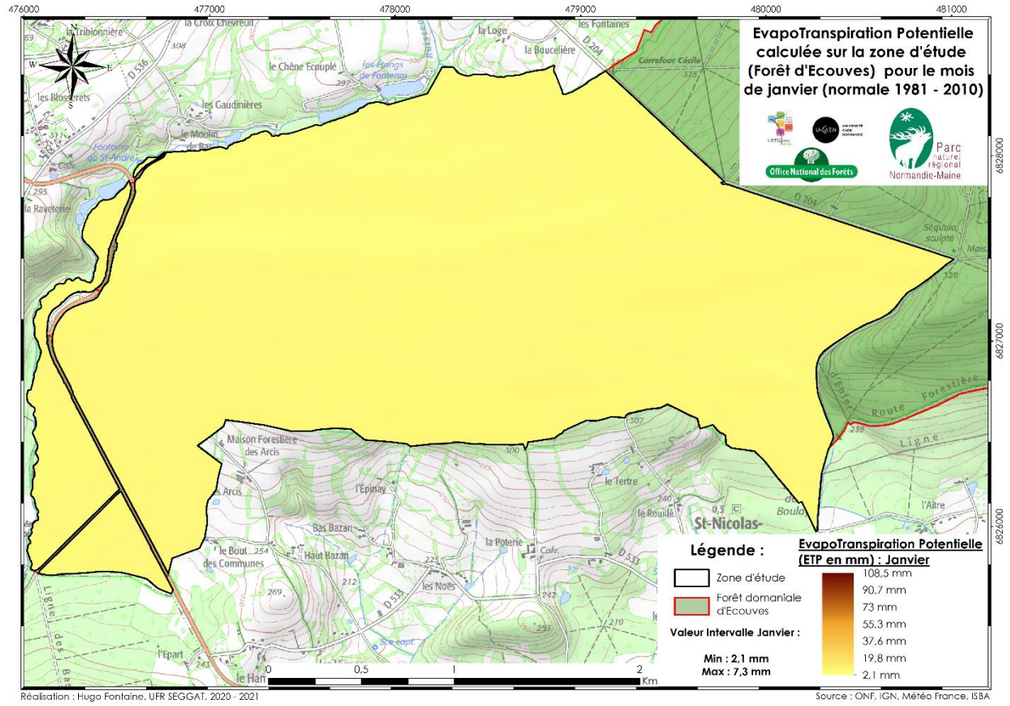

Rayonnement solaire global calculé sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de septembre (normale 1981 - 2010)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeurs Intervalle Septembre :
Min : 73 045,2
Max : 137 850
Rayonnement solaire global (Wh/m²) : Septembre
185 442
155 944
126 446
96 947,3
67 449,1
37 950,9
8 452,7
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0.5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

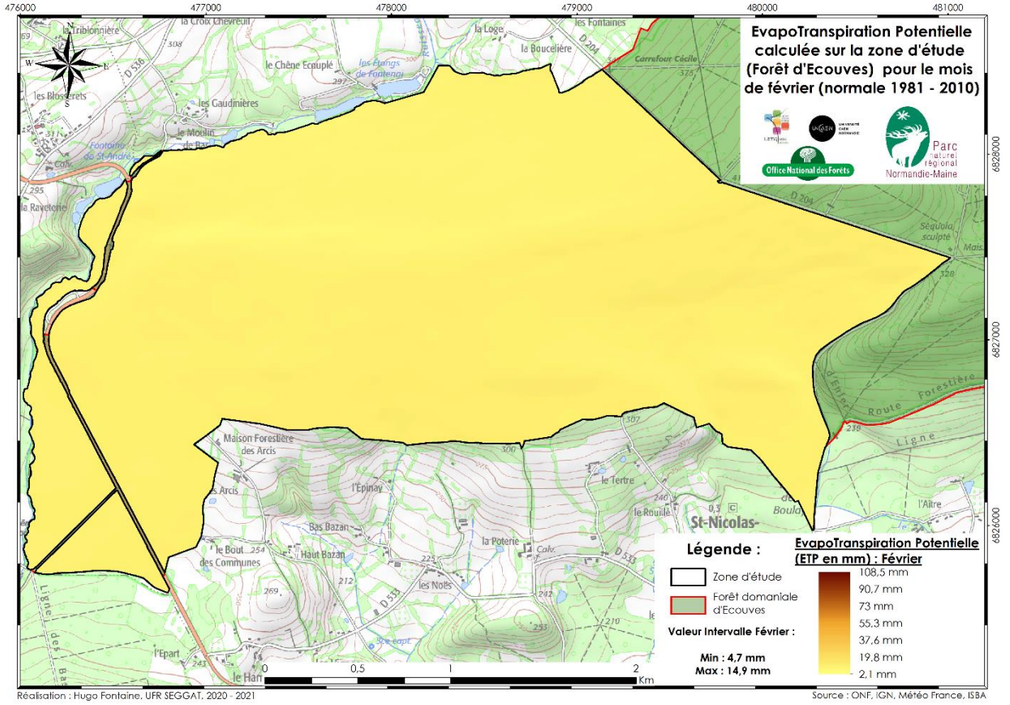

Rayonnement solaire global calculé sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois d'octobre (normale 1981 - 2010)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeurs Intervalle Octobre :
Min : 31 689,7
Max : 87 353,7
Rayonnement solaire global (Wh/m²) : Octobre
185 442
155 944
126 446
96 947,3
67 449,1
37 950,9
8 452,7
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0.5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

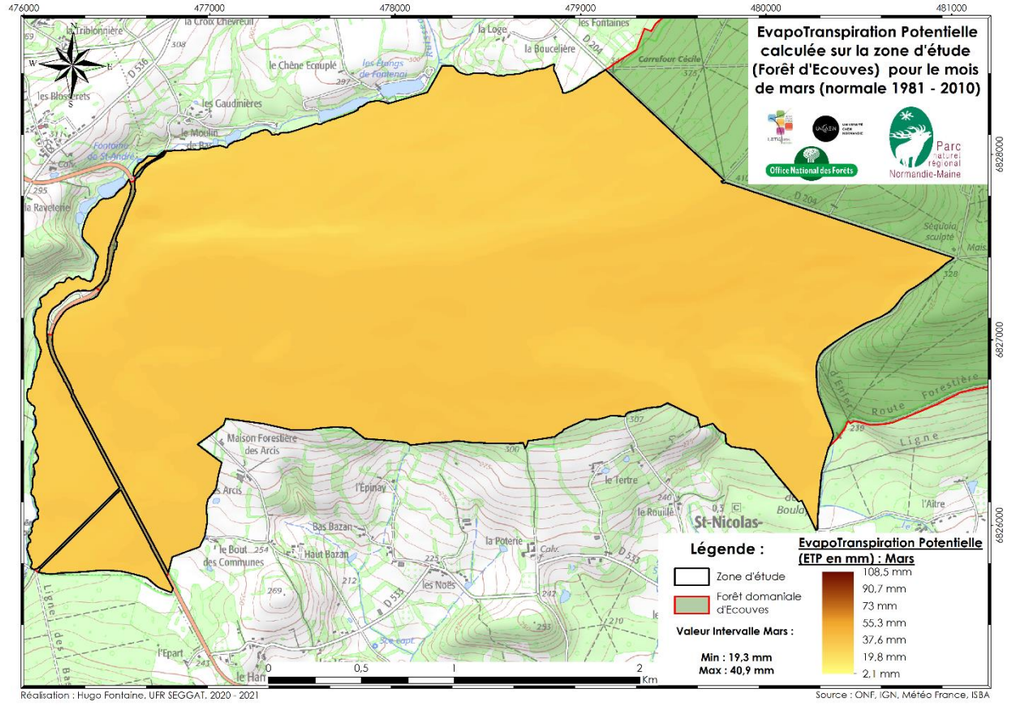

Rayonnement solaire global calculé sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de novembre (normale 1981 - 2010)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeurs Intervalle Novembre :
Min : 12 642,7
Max : 44 962
Rayonnement solaire global (Wh/m²) : Novembre
185 442
155 944
126 446
96 947,3
67 449,1
37 950,9
8 452,7
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0.5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

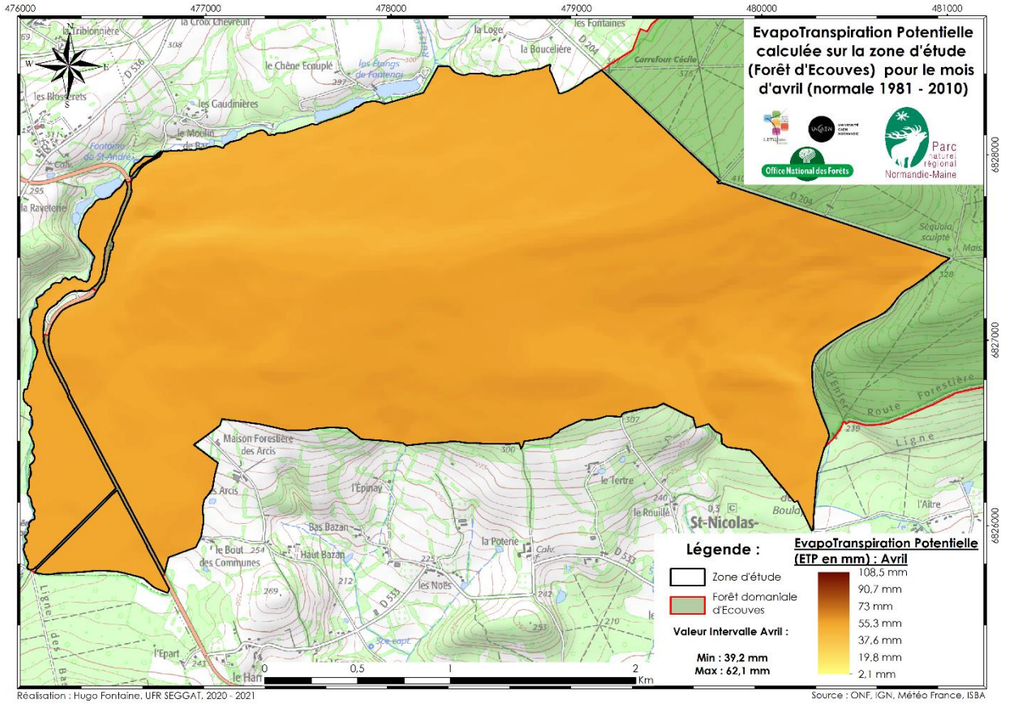

Rayonnement solaire global calculé sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de décembre (normale 1981 - 2010)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeurs Intervalle Décembre :
Min : 8 452,65
Max : 30 622
Rayonnement solaire global (Wh/m²) : Décembre
185 442
155 944
126 446
96 947,3
67 449,1
37 950,9
8 452,7
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0.5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

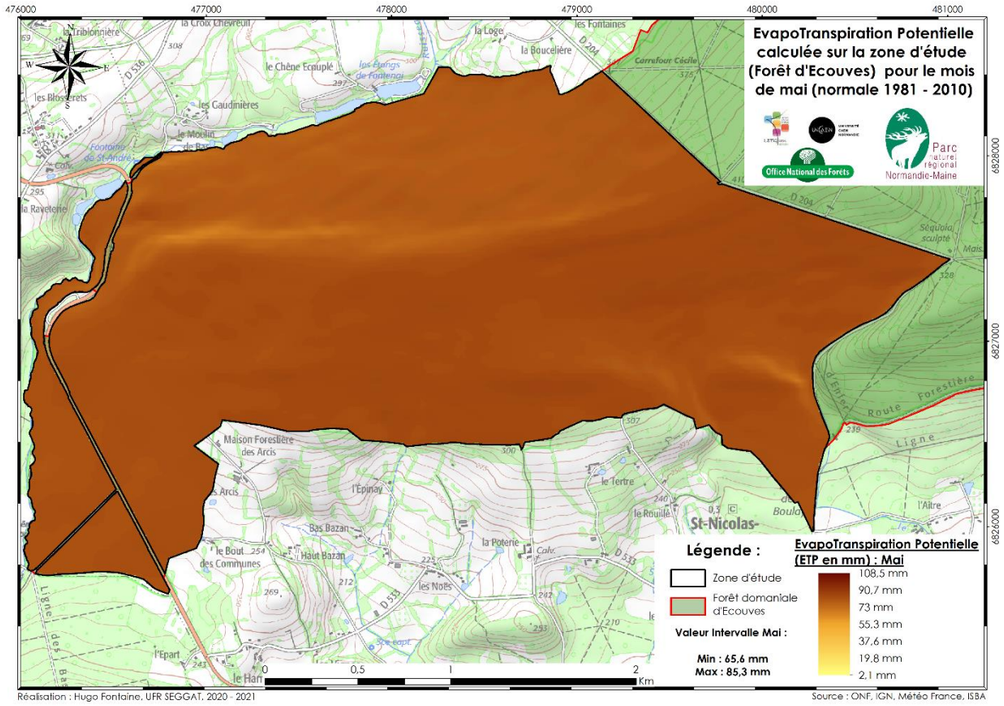
Annexe 6 : Cartes de l'EvapoTranspiration Potentielle pour les 12 mois de l'année (normale 1981 – 2010) sur la zone d'étude.

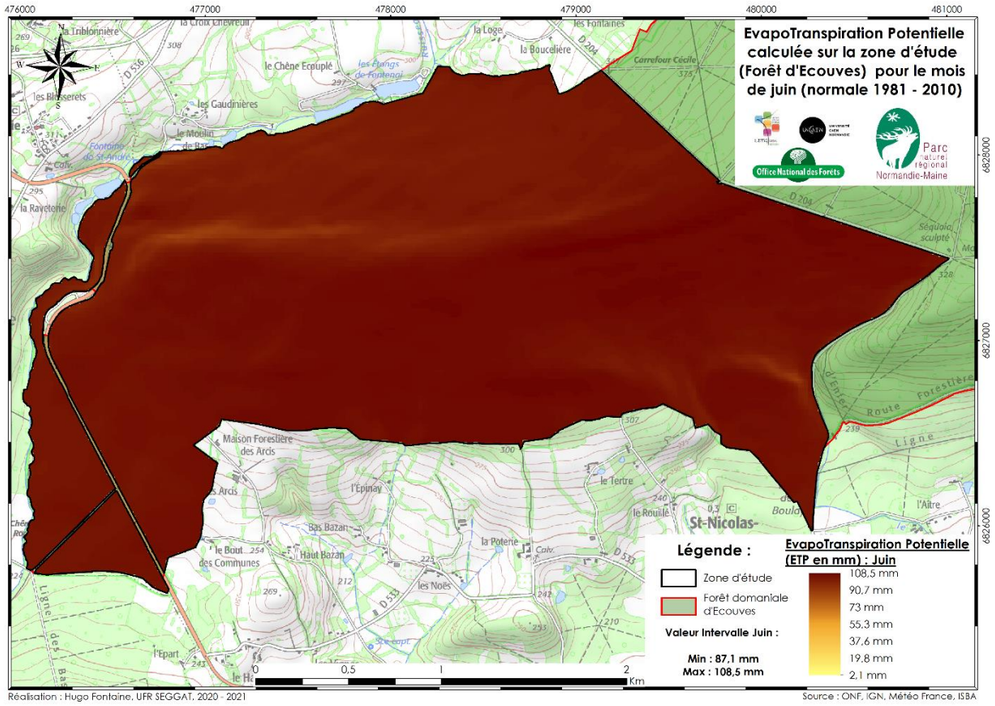


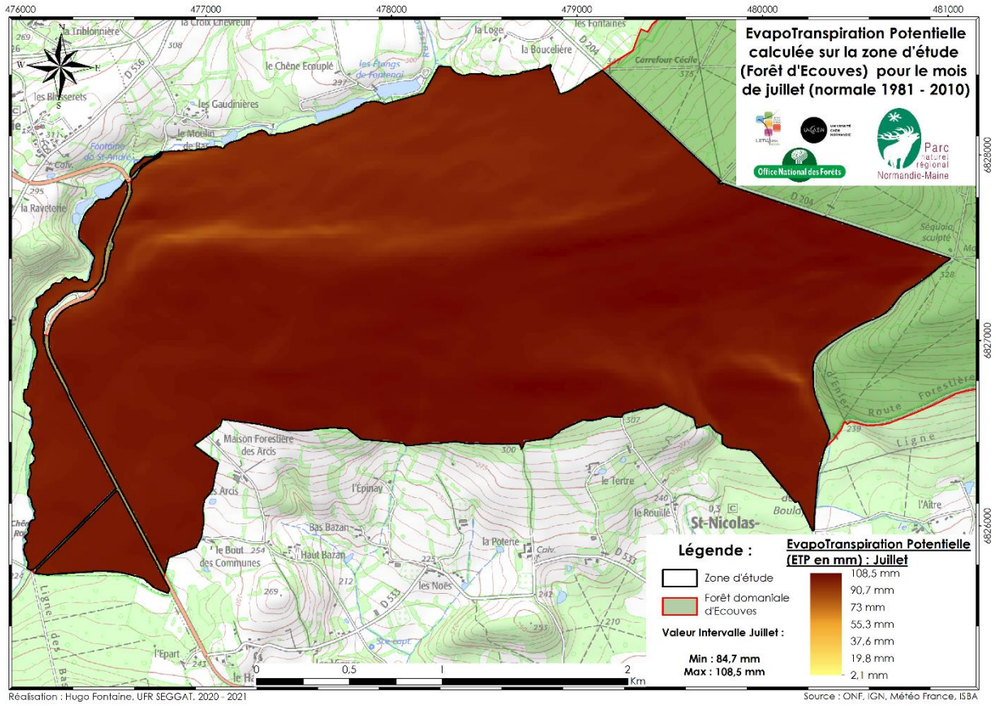


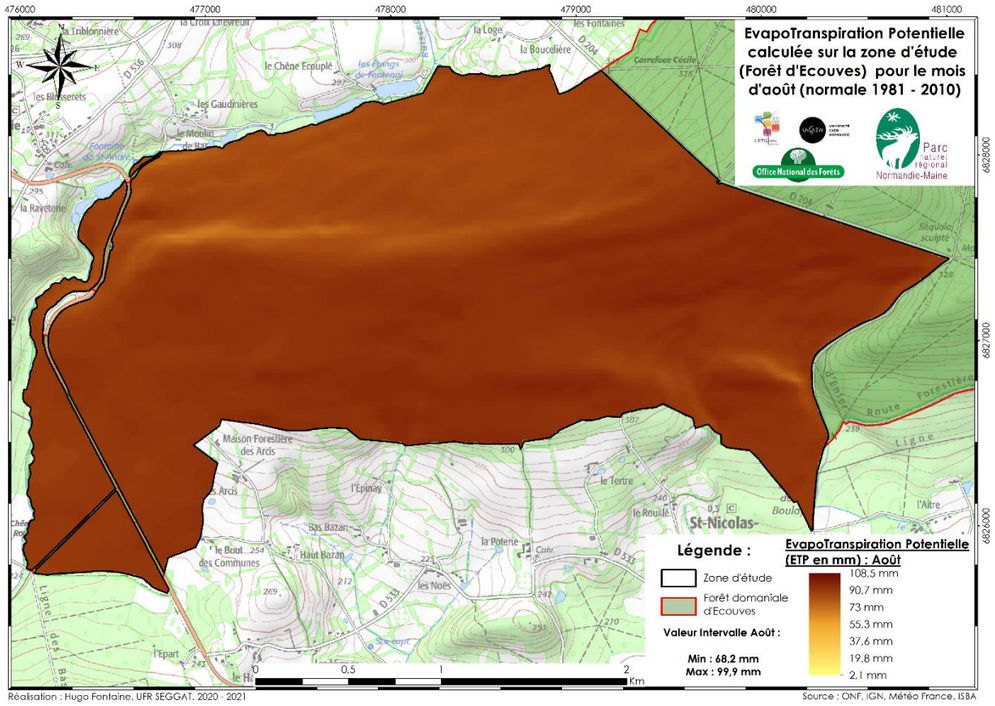


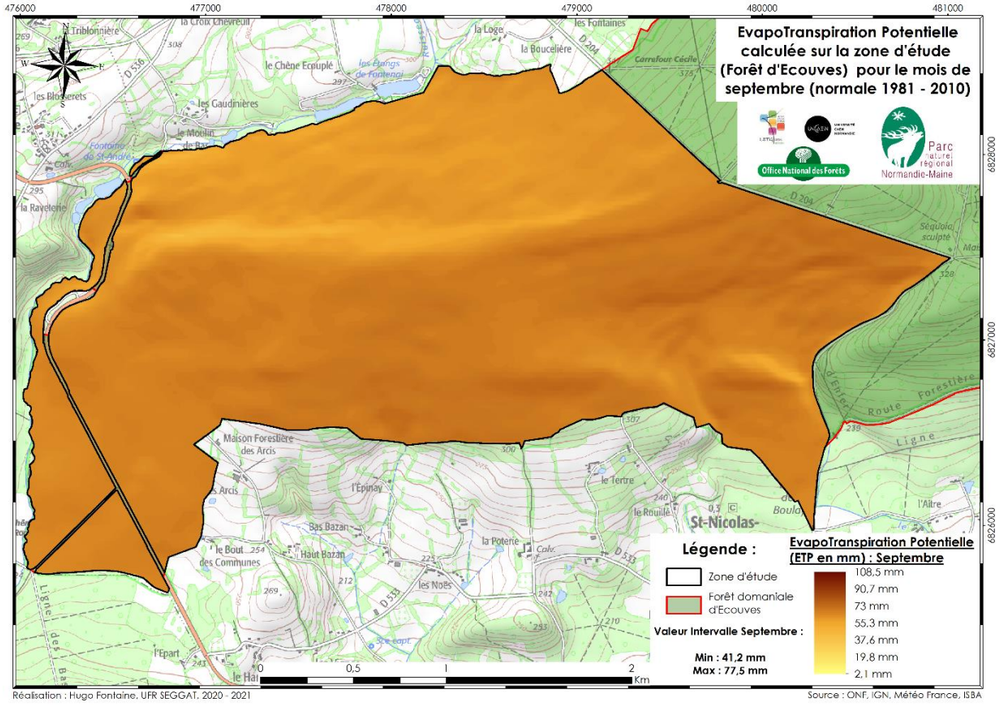



EvapoTranspiration Potentielle calculée sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de mai (normale 1981 - 2010)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeur Intervalle Mai :
Min : 65,6 mm
Max : 85,3 mm
EvapoTranspiration Potentielle (ETP en mm) : Mai
108,5 mm
90,7 mm
73 mm
55,3 mm
37,6 mm
19,8 mm
2,1 mm
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0,5
1
2
Km
St-Nicolas-
la Triblonnière
la Croix Chevreuil
la Loge
les Fontaines
la Boucelière
le Chêne Ecuplé
les Gaudinières
les Blosserets
le Moulin de Bas
la Ravetonne
Carrefour Cécile
Séquoia sculpté
Maison Forestière des Arcis
l'Epinay
le Tertre
le Rouillé
l'Aître
Bas Bazan
Haut Bazan
la Poterie
le Bout des Communes
les Noës
l'Epart
le Haut
Route Forestière
Ligne
D 536
D 204
D 535
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA


EvapoTranspiration Potentielle calculée sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de juin (normale 1981 - 2010)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeur Intervalle Juin :
Min : 87,1 mm
Max : 108,5 mm
EvapoTranspiration Potentielle (ETP en mm) : Juin
108,5 mm
90,7 mm
73 mm
55,3 mm
37,6 mm
19,8 mm
2,1 mm
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0,5
1
2
Km
St-Nicolas-
la Triblonnière
la Croix Chevreuil
la Loge
les Fontaines
la Boucelière
le Chêne Ecuplé
les Gaudinières
les Blosserets
le Moulin de Bas
la Ravetonne
Carrefour Cécile
Séquoia sculpté
Maison Forestière des Arcis
l'Epinay
le Tertre
le Rouillé
l'Aître
Bas Bazan
Haut Bazan
la Poterie
le Bout des Communes
les Noës
l'Epart
le Haut
Route Forestière
Ligne
D 536
D 204
D 535
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

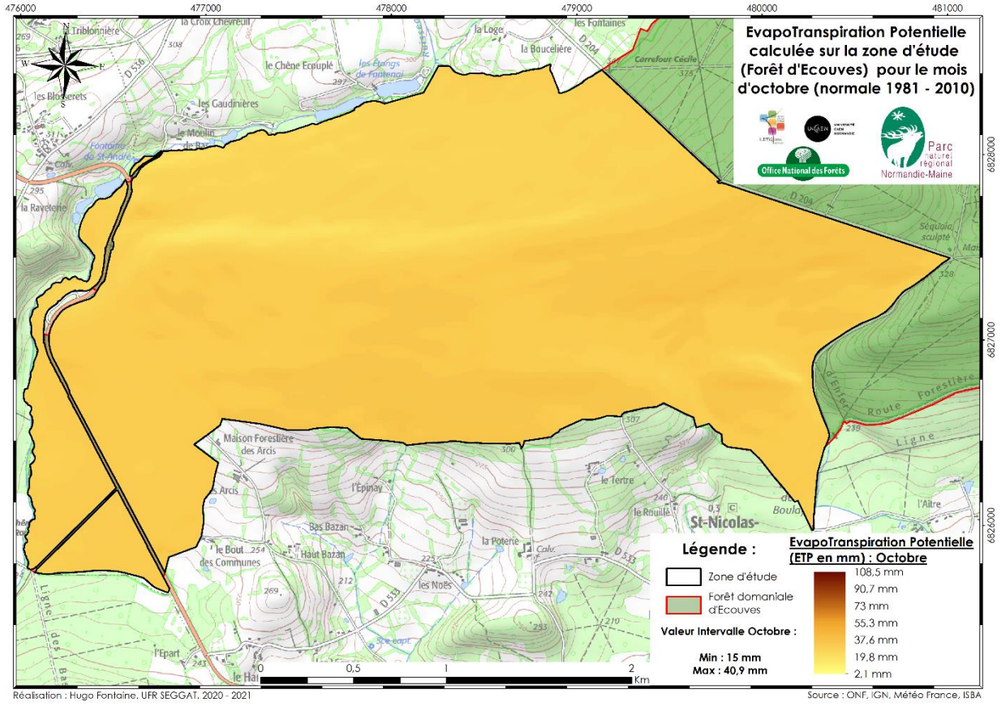

EvapoTranspiration Potentielle calculée sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de juillet (normale 1981 - 2010)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeur Intervalle Juillet :
Min : 84,7 mm
Max : 108,5 mm
EvapoTranspiration Potentielle (ETP en mm) : Juillet
108,5 mm
90,7 mm
73 mm
55,3 mm
37,6 mm
19,8 mm
2,1 mm
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0,5
1
2
Km
St-Nicolas-
la Triblonnière
la Croix Chevreuil
la Loge
les Fontaines
la Boucelière
le Chêne Ecuplé
les Gaudinières
les Blosserets
le Moulin de Bas
la Ravetonne
Carrefour Cécile
Séquoia sculpté
Maison Forestière des Arcis
l'Epinay
le Tertre
le Rouillé
l'Aître
Bas Bazan
Haut Bazan
la Poterie
le Bout des Communes
les Noës
l'Epart
le Haut
Route Forestière
Ligne
D 536
D 204
D 535
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA


EvapoTranspiration Potentielle calculée sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois d'août (normale 1981 - 2010)
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Valeur Intervalle Août :
Min : 68,2 mm
Max : 99,9 mm
EvapoTranspiration Potentielle (ETP en mm) : Août
108,5 mm
90,7 mm
73 mm
55,3 mm
37,6 mm
19,8 mm
2,1 mm
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
0
0,5
1
2
Km
St-Nicolas-
la Triblonnière
la Croix Chevreuil
la Loge
les Fontaines
la Boucelière
le Chêne Ecuplé
les Gaudinières
les Blosserets
le Moulin de Bas
la Ravetonne
Carrefour Cécile
Séquoia sculpté
Maison Forestière des Arcis
l'Epinay
le Tertre
le Rouillé
l'Aître
Bas Bazan
Haut Bazan
la Poterie
le Bout des Communes
les Noës
l'Epart
le Haut
Route Forestière
Ligne
D 536
D 204
D 535
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



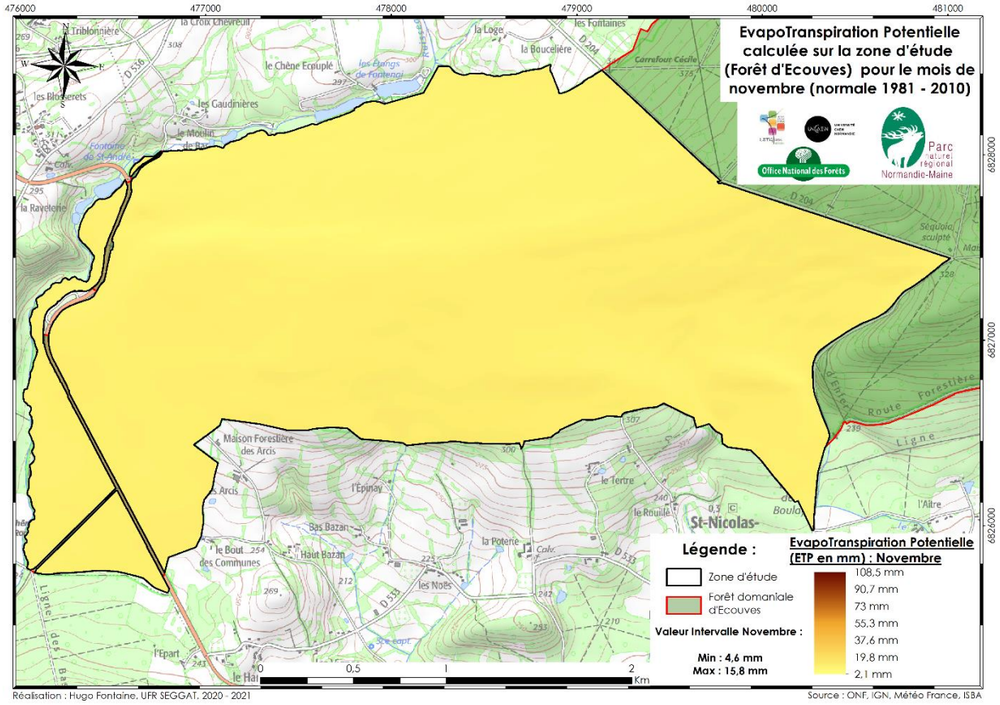
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



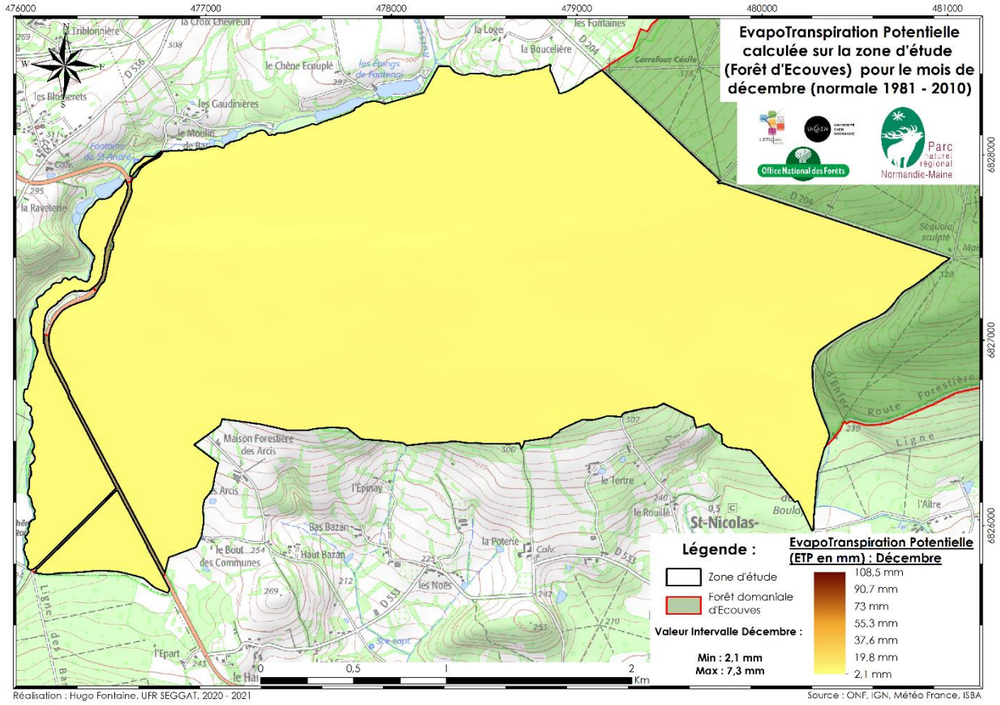
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

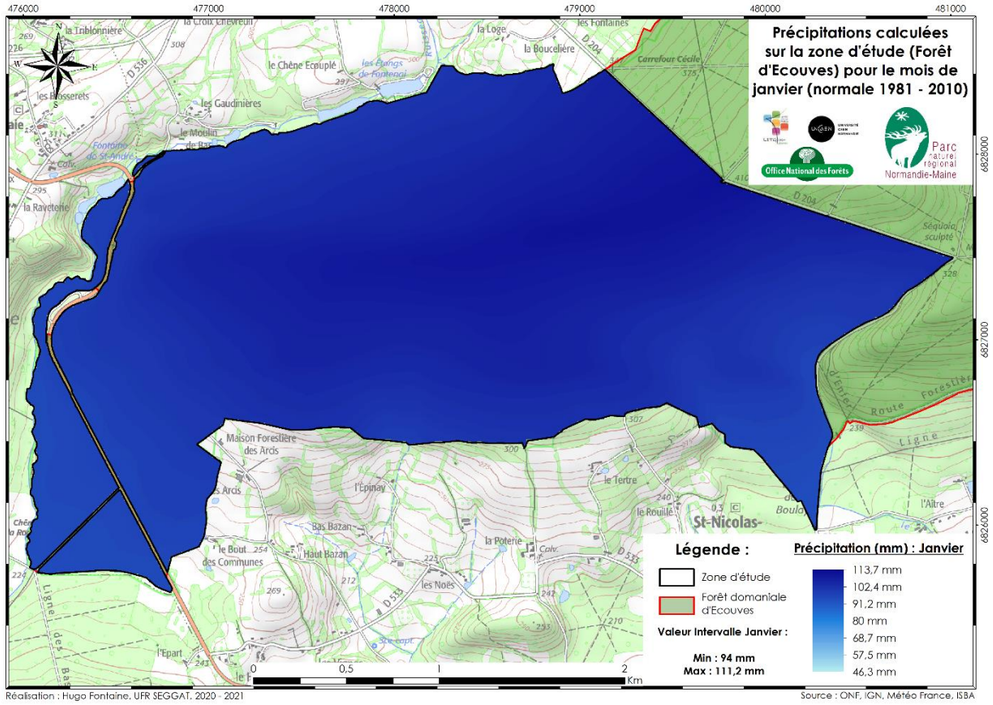
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

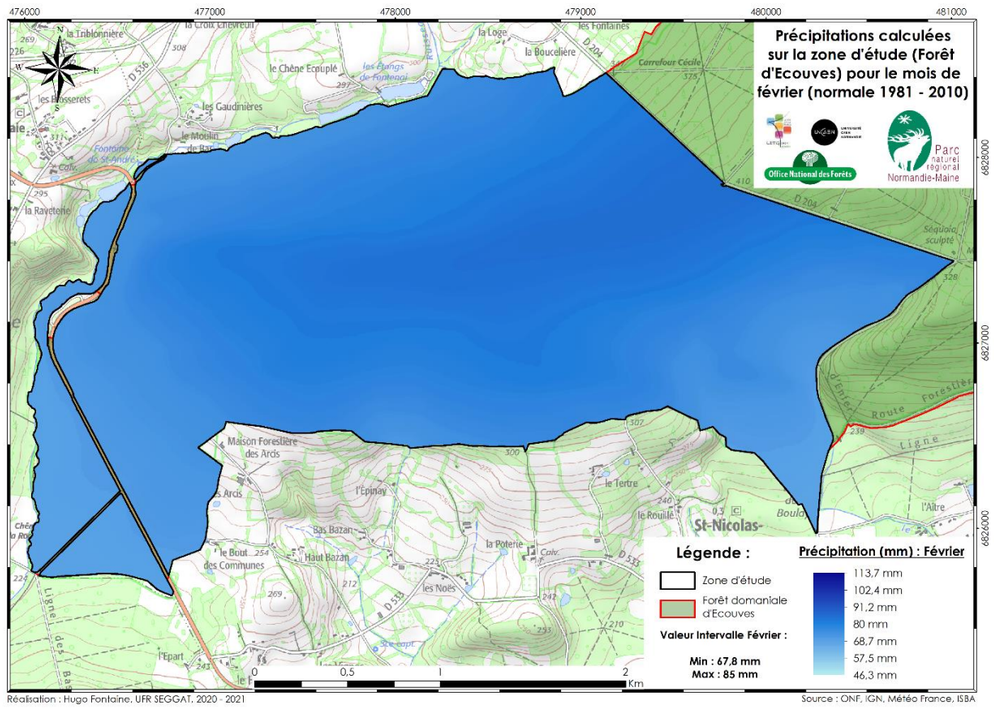


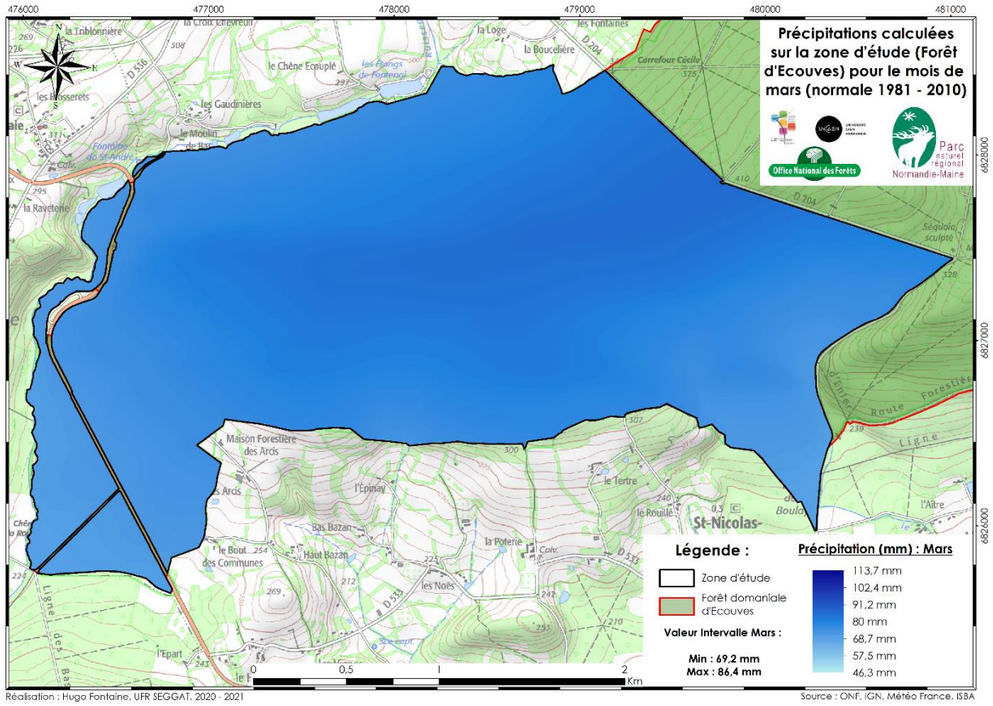
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

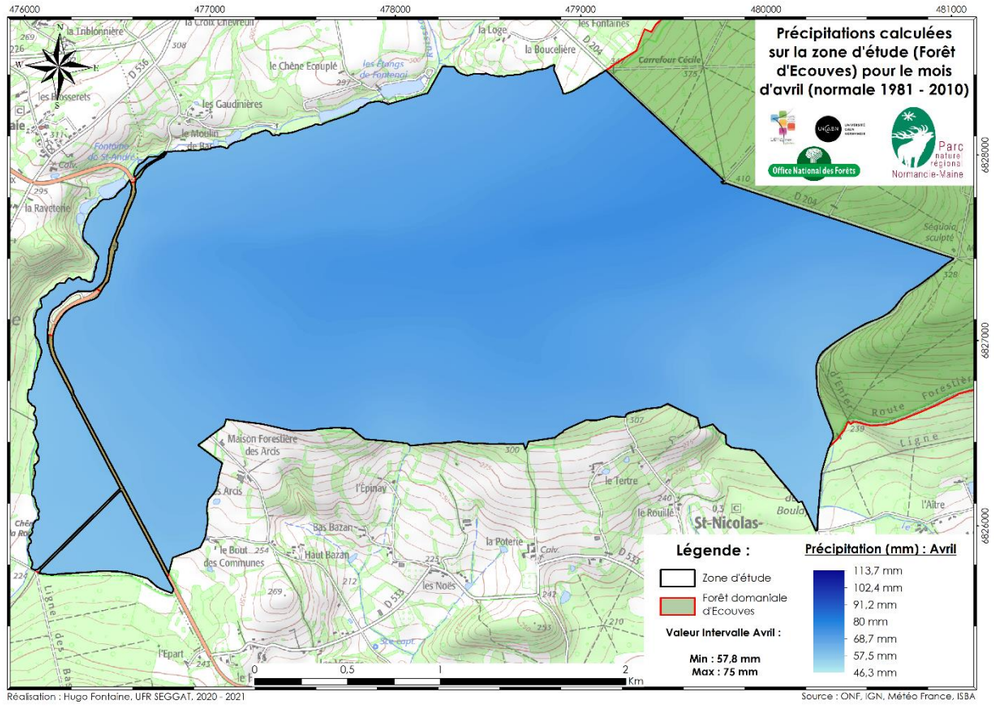
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

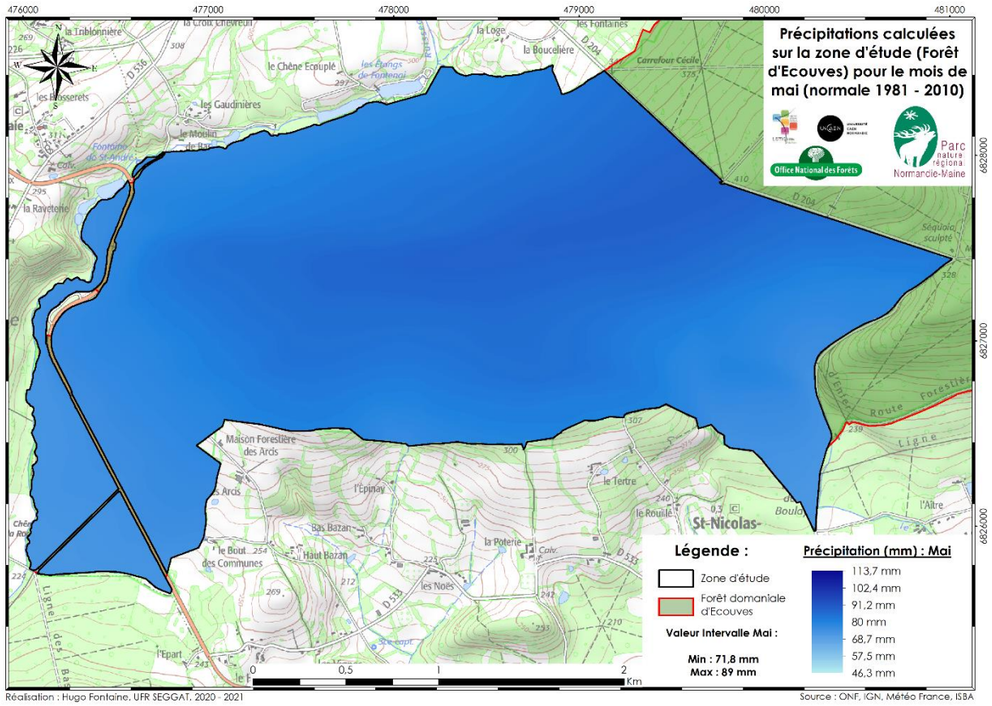
Annexe 7 : Cartes des précipitations pour les 12 mois de l'année (normale 1981 – 2010) sur la zone d'étude.





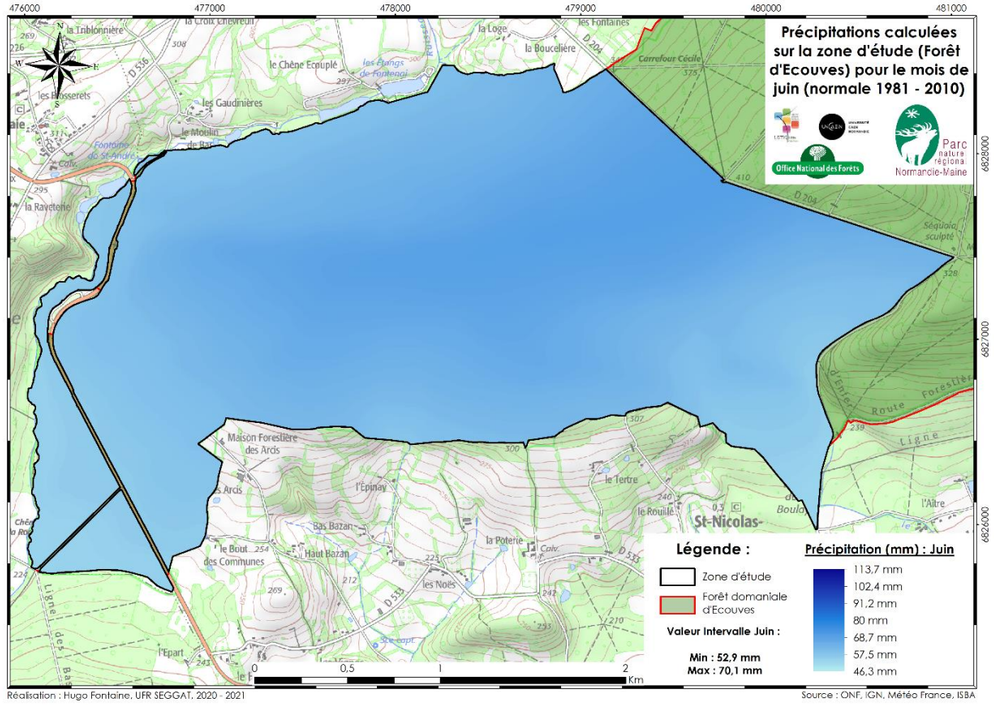






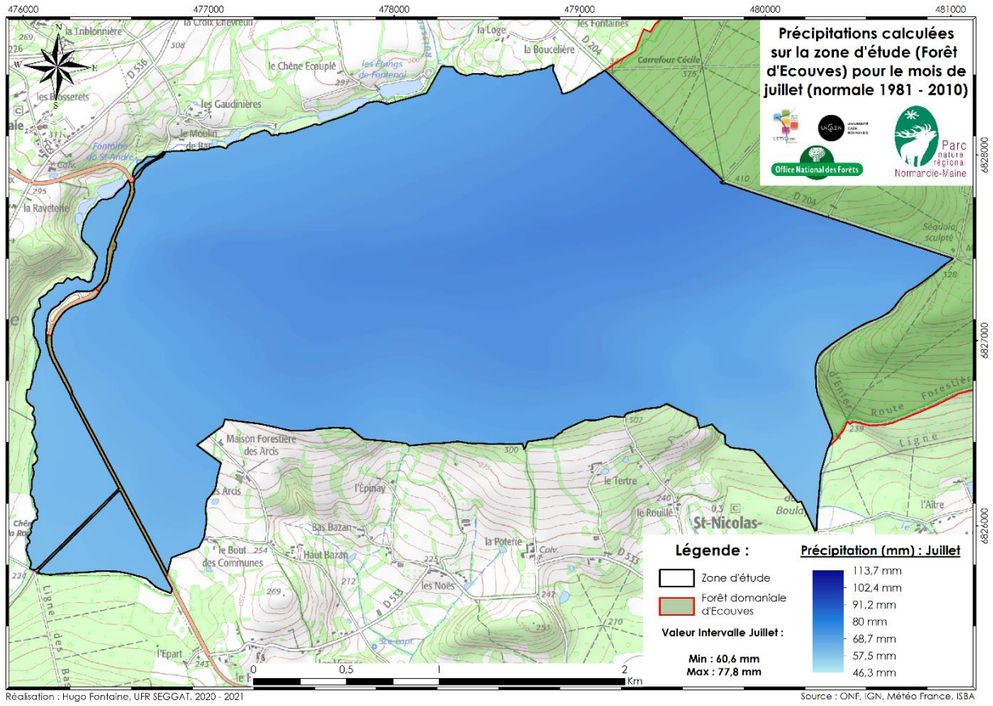
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



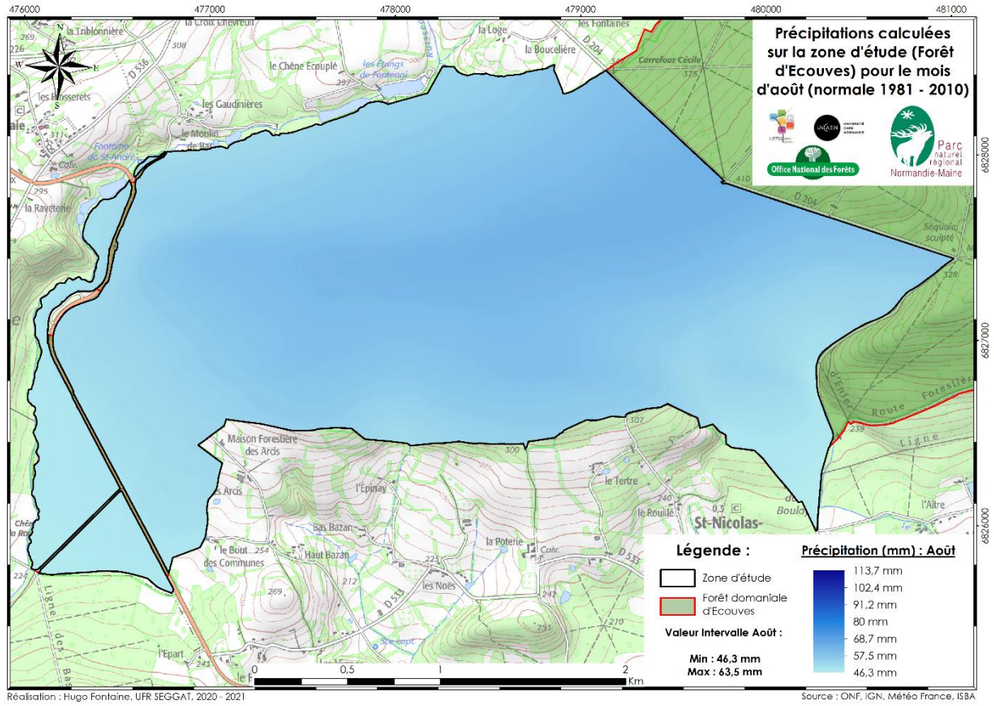
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



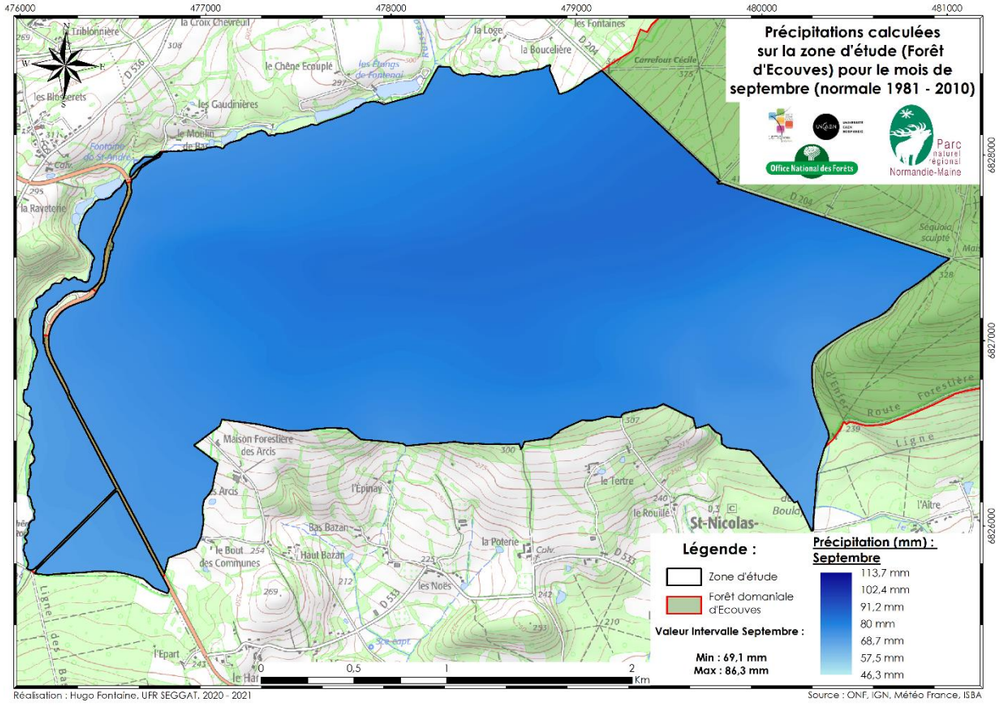
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



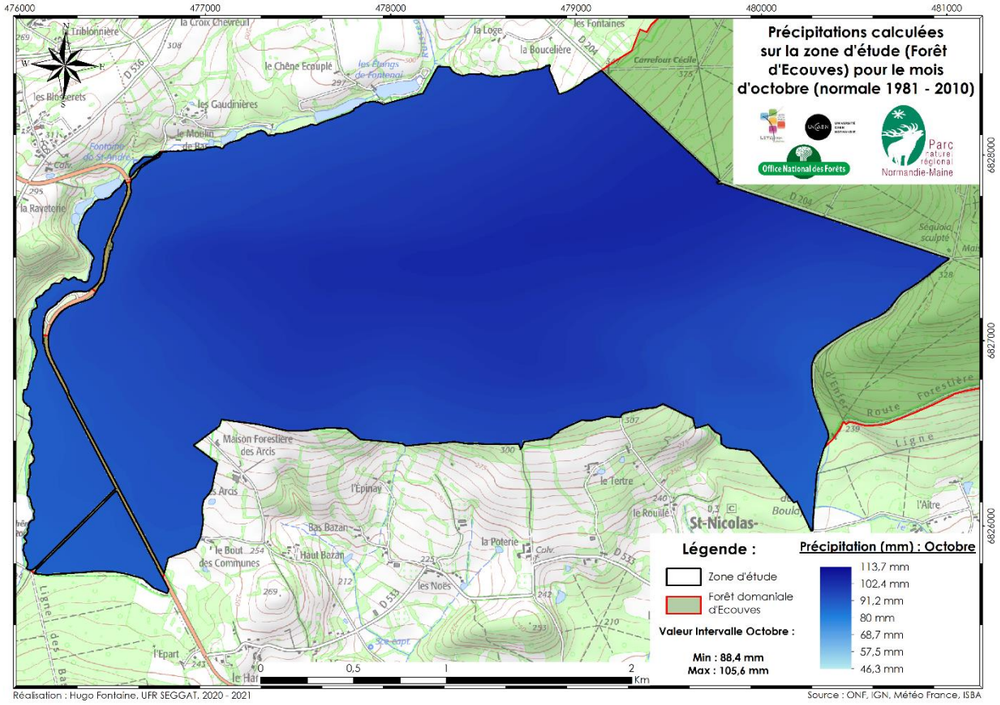
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



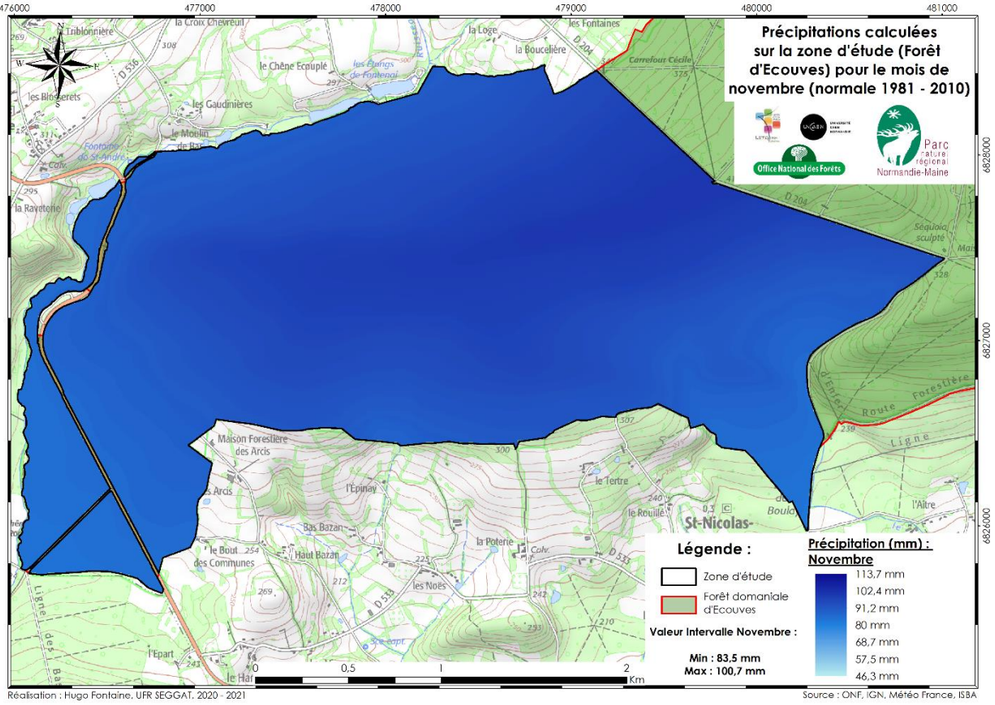
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



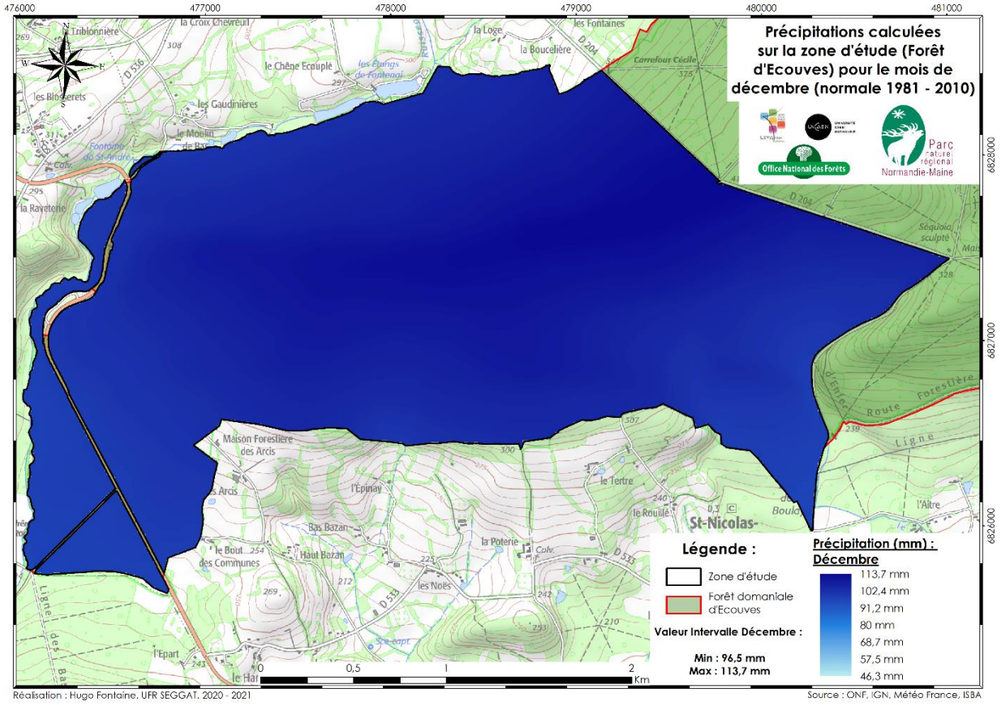
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

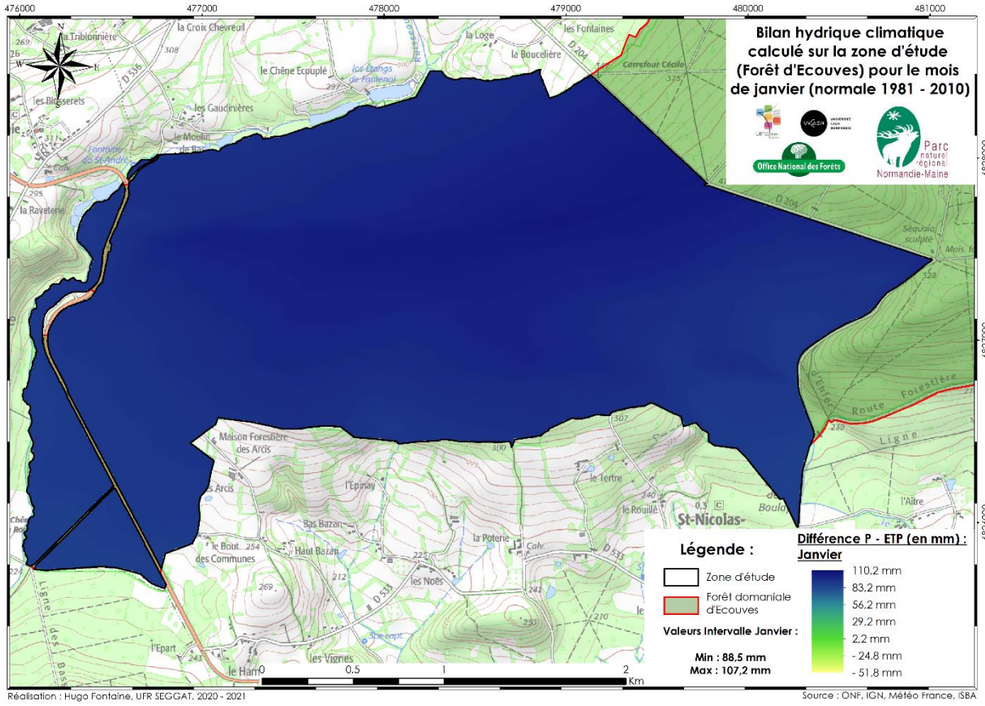
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

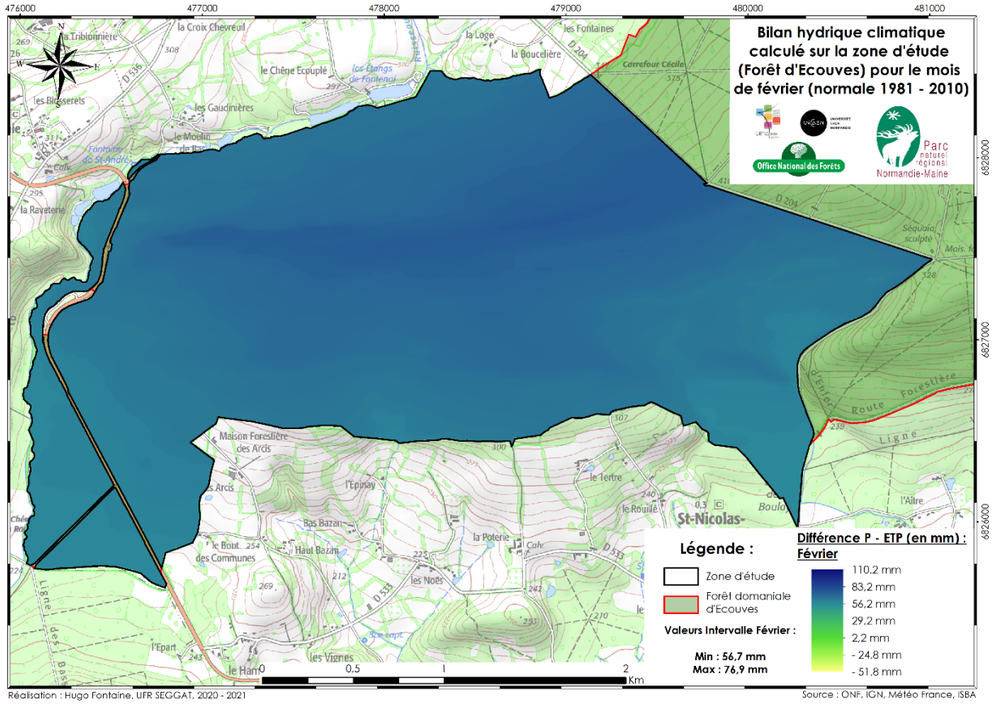


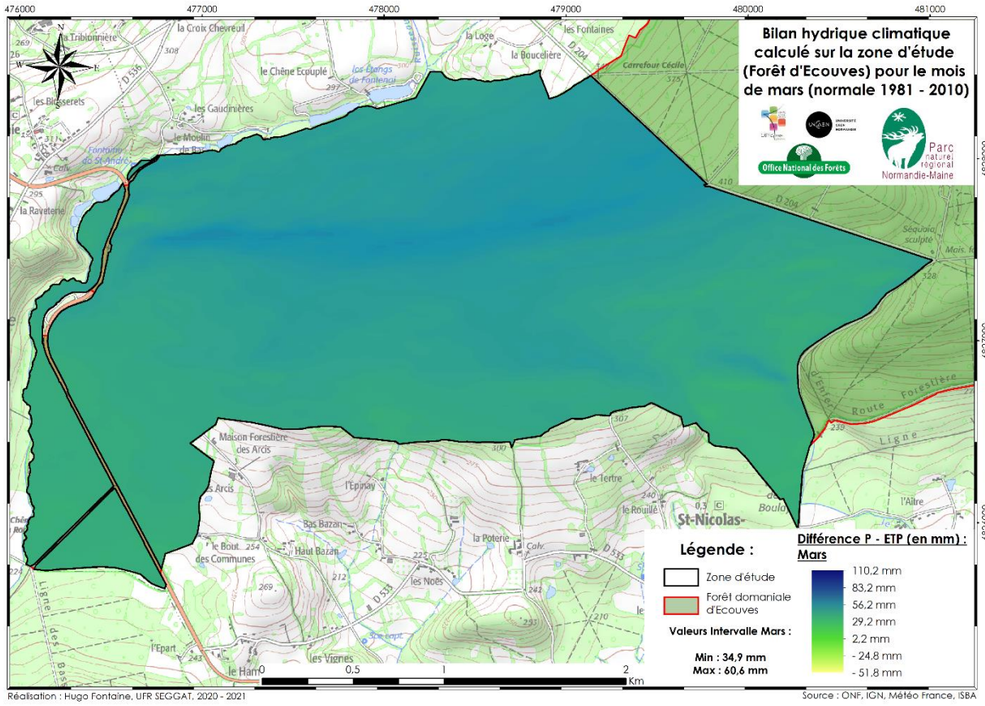
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

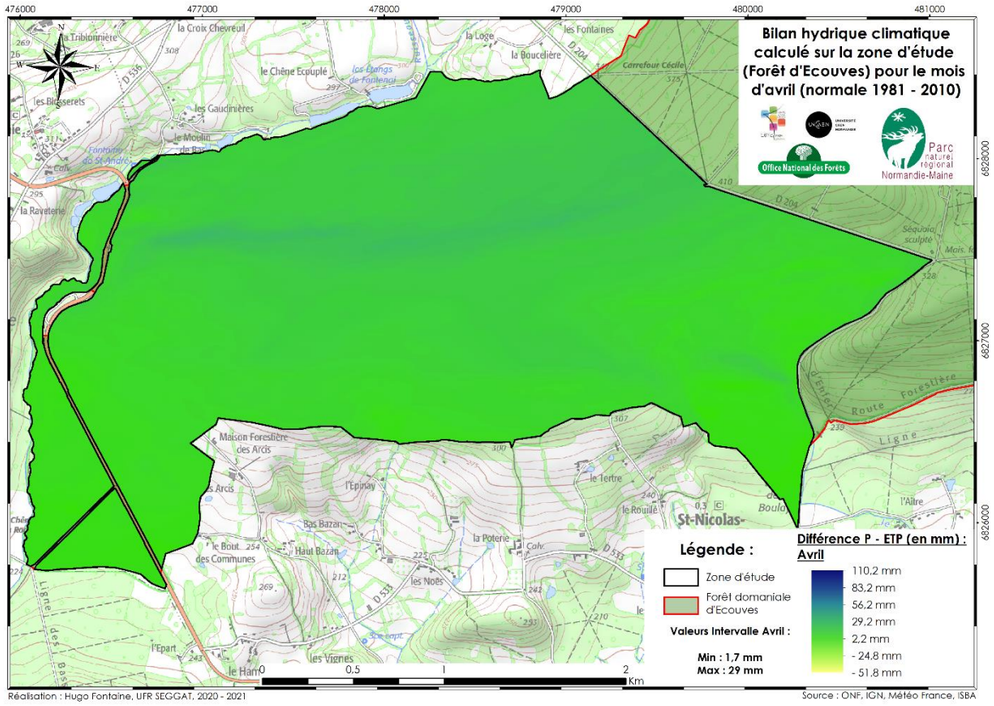
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

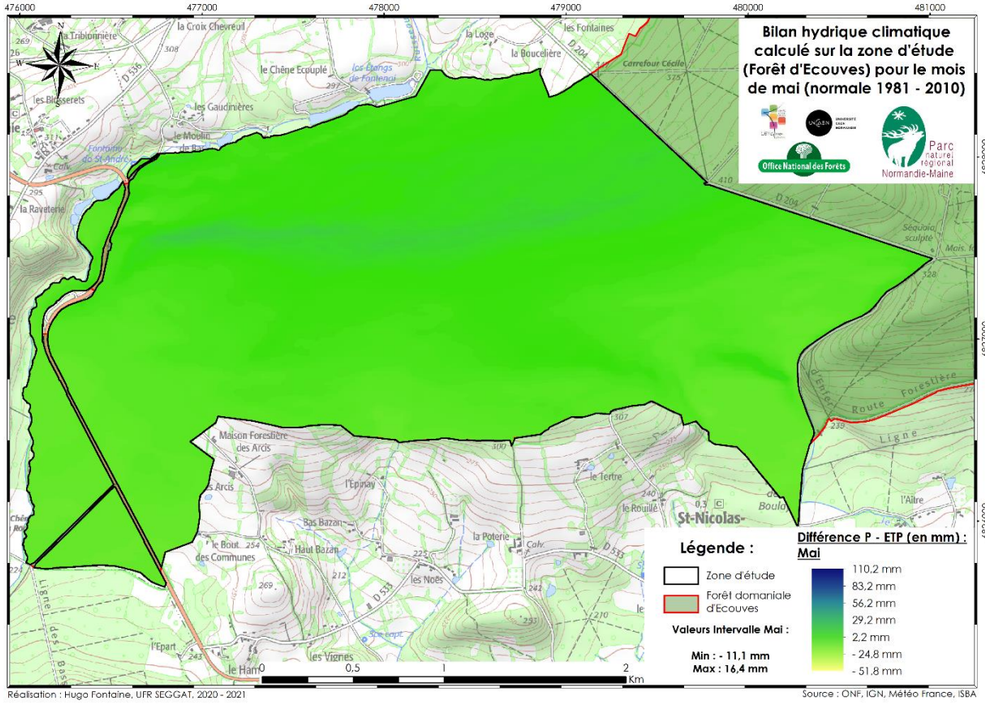
Annexe 8 : Cartes du bilan hydrique climatique pour les 12 mois de l'année (normale 1981 – 2010) sur la zone d'étude.





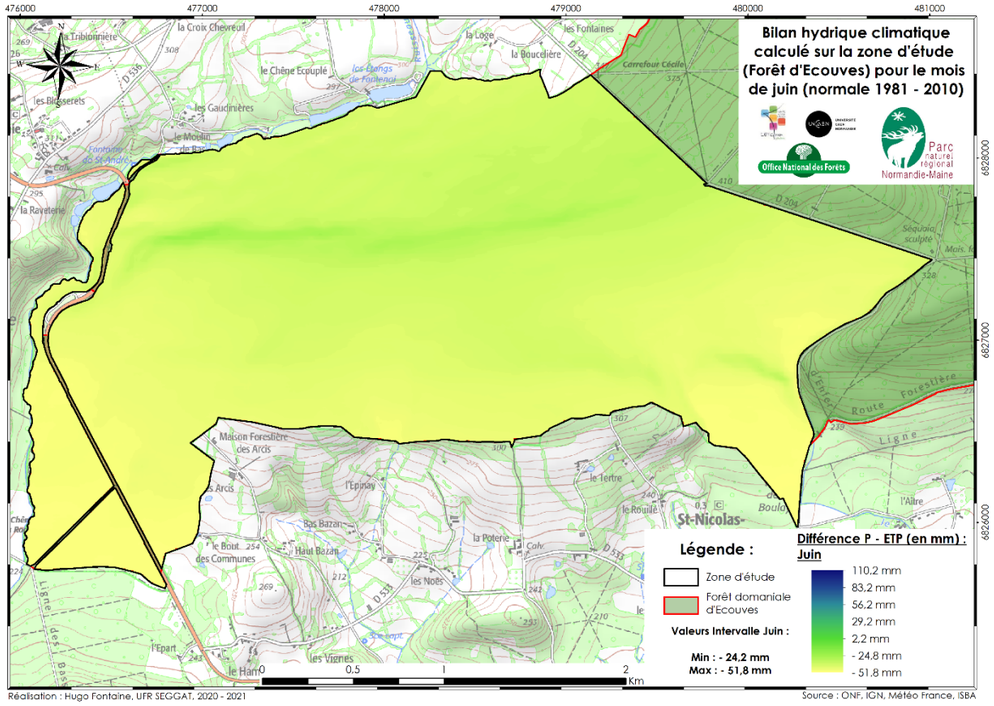






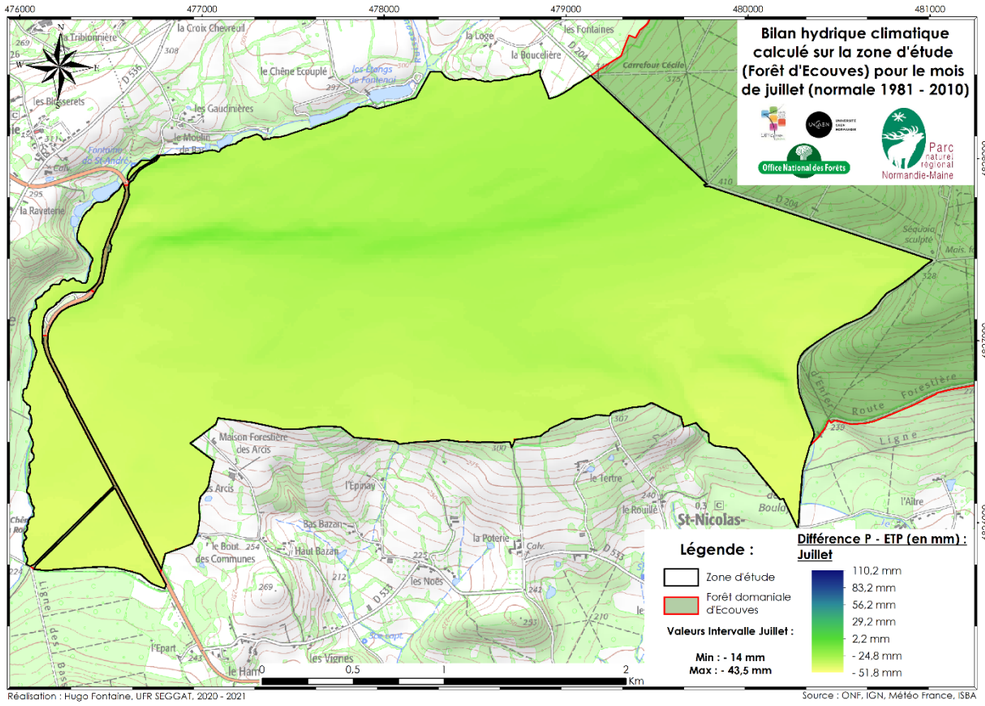
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



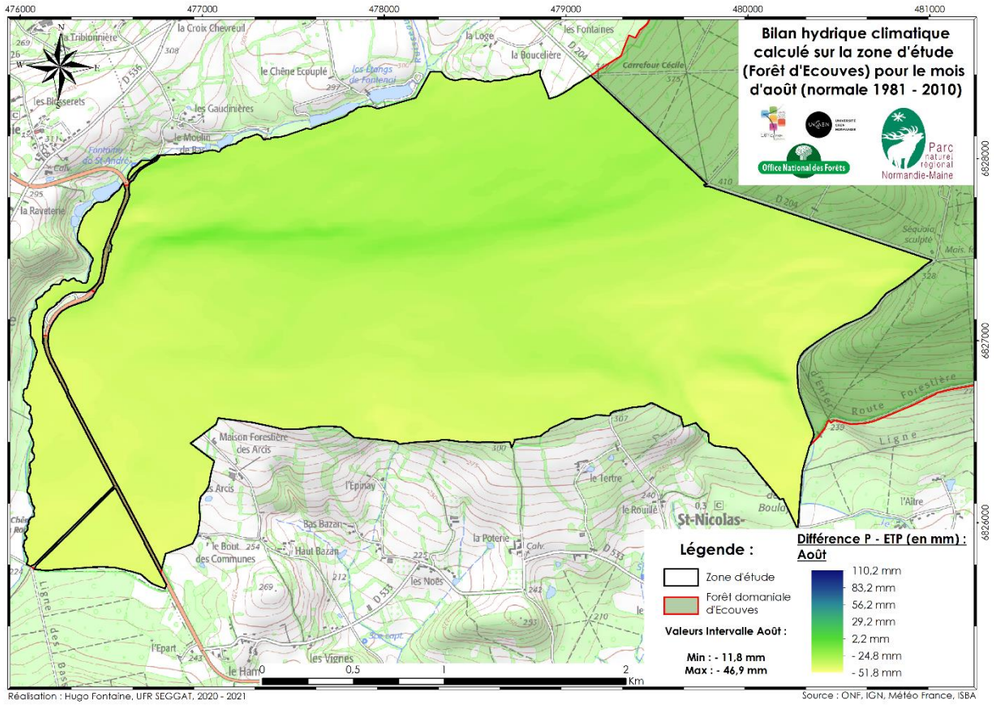
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



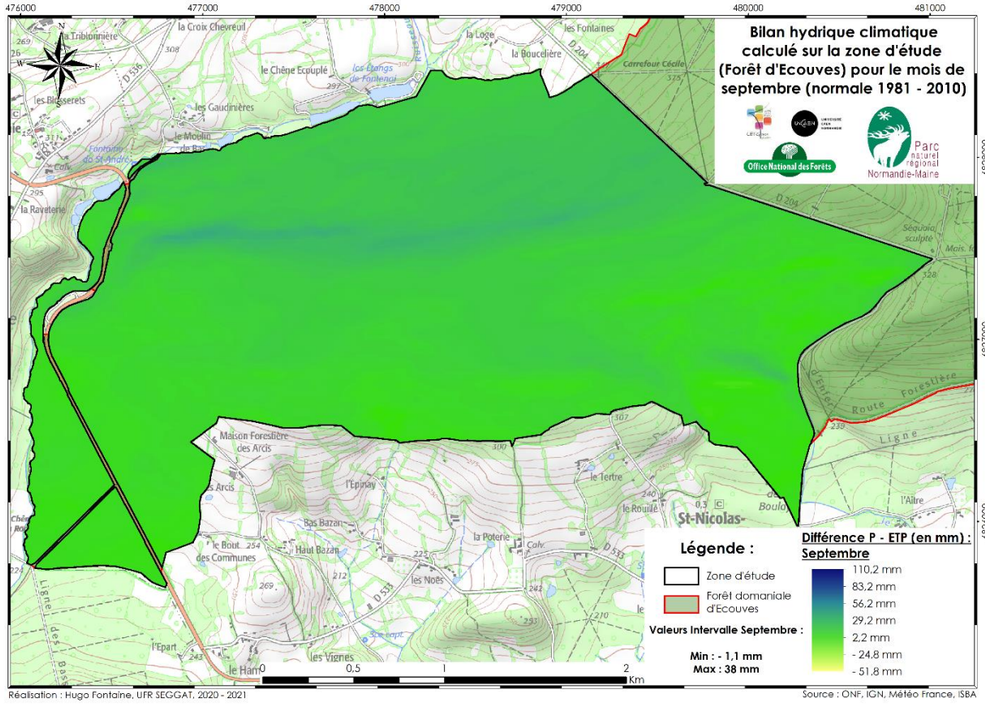
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



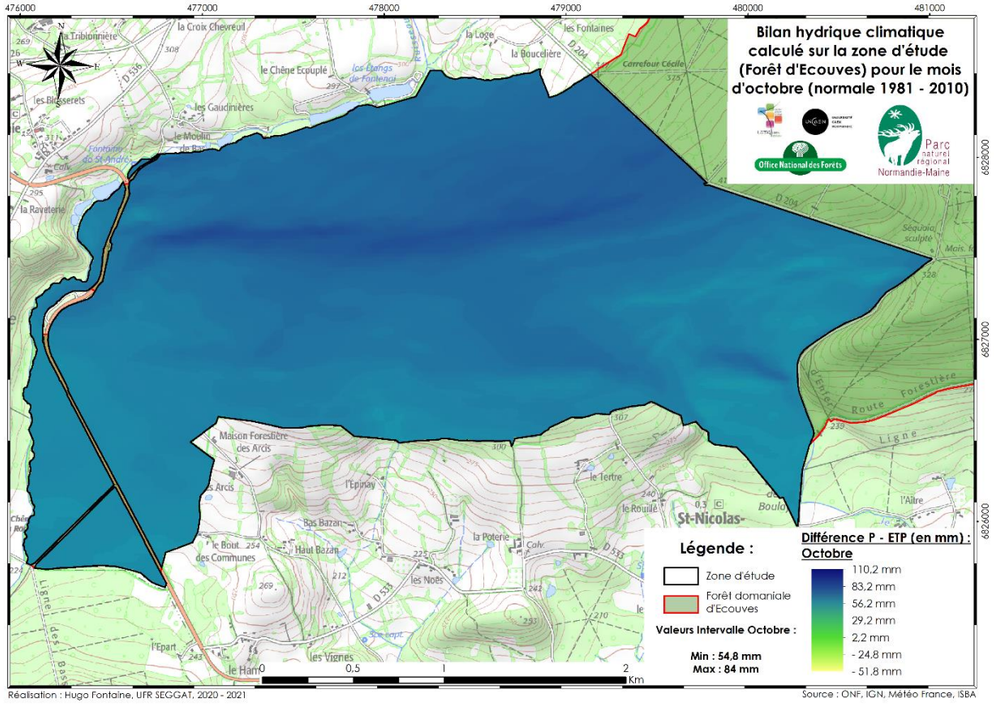
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



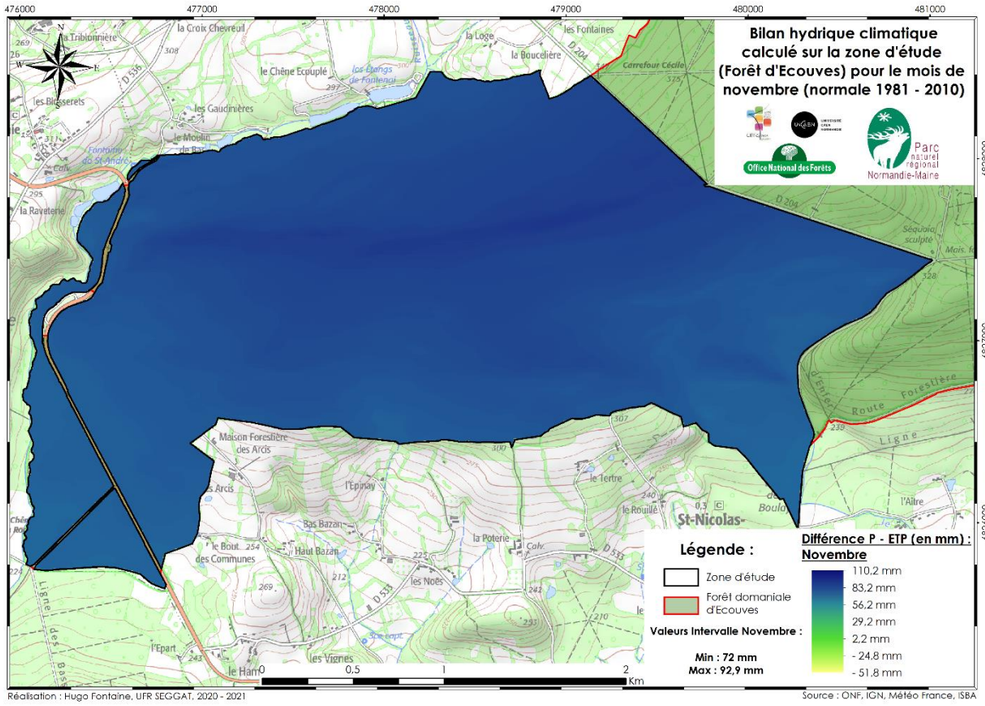
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



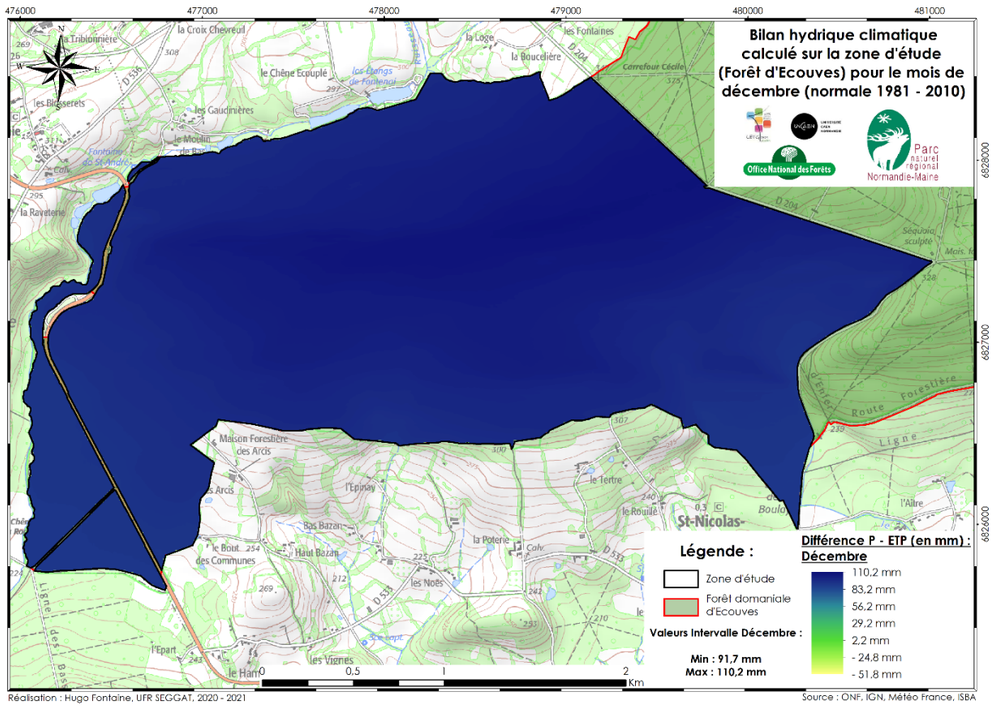
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

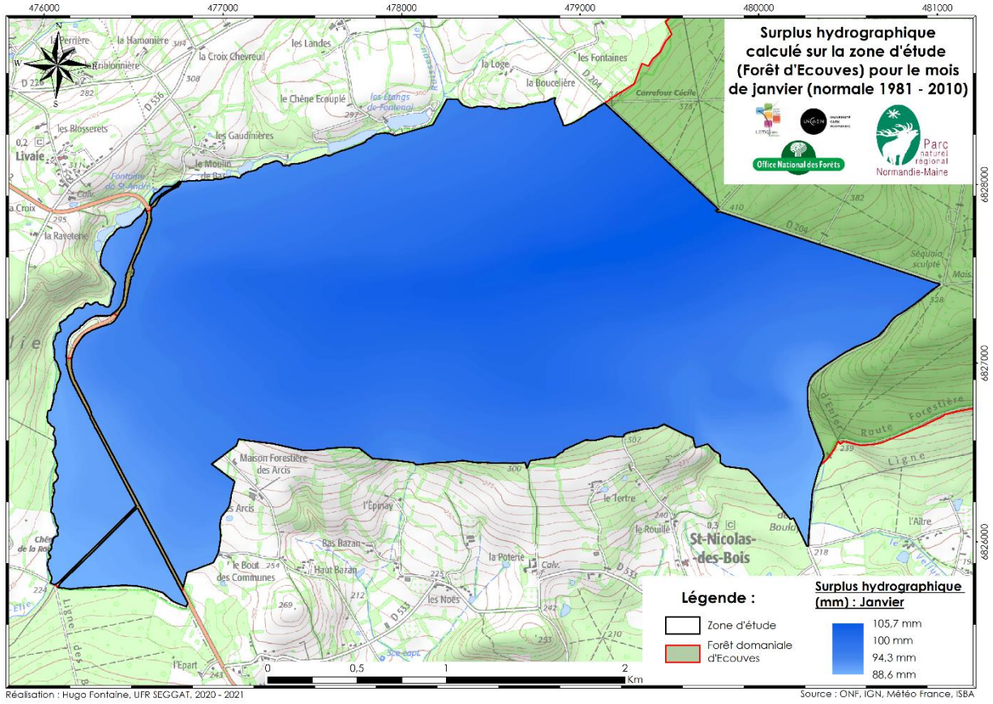
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

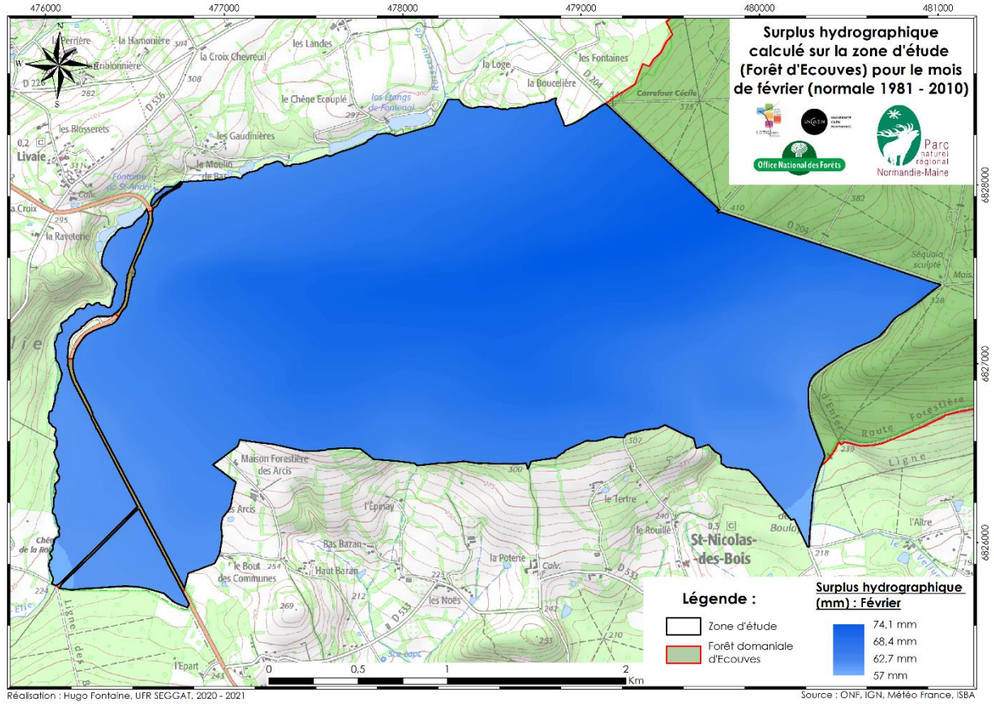


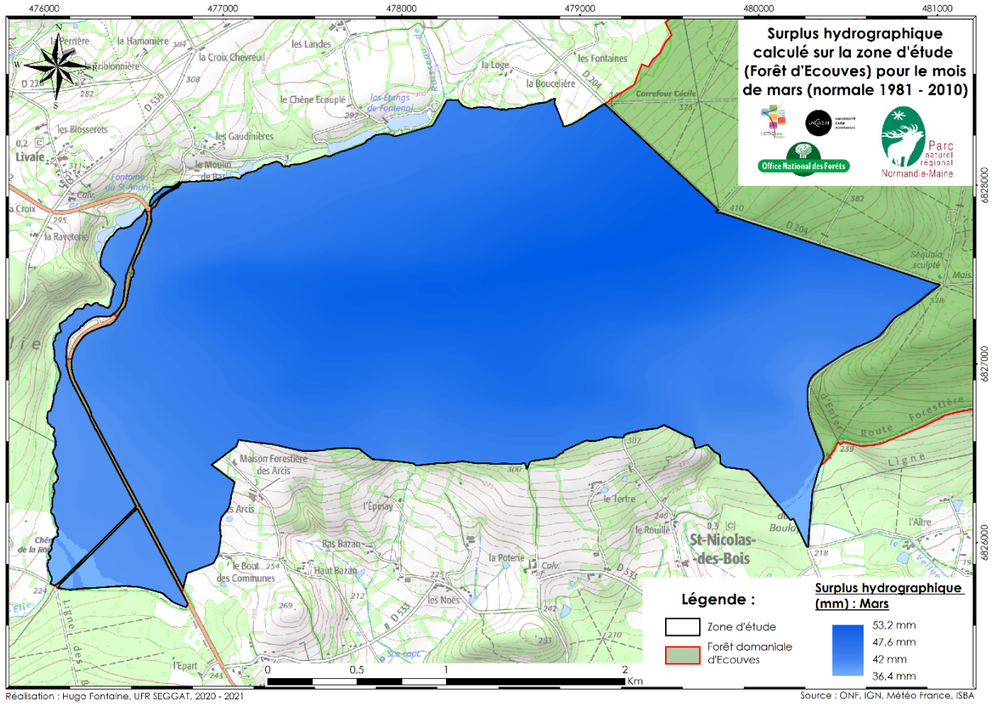
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

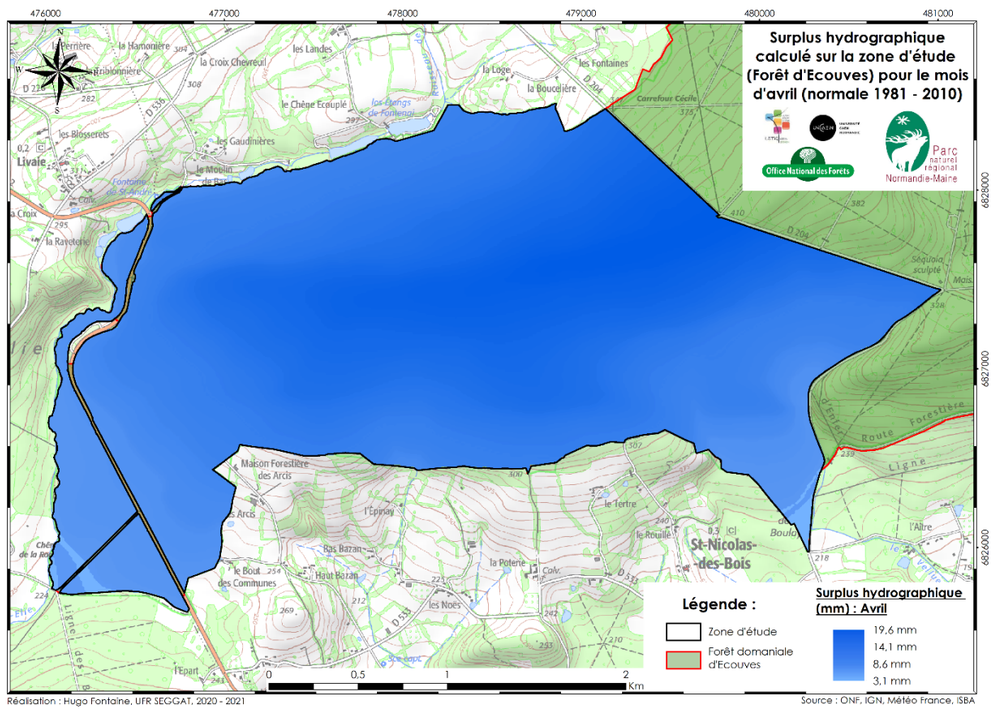
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

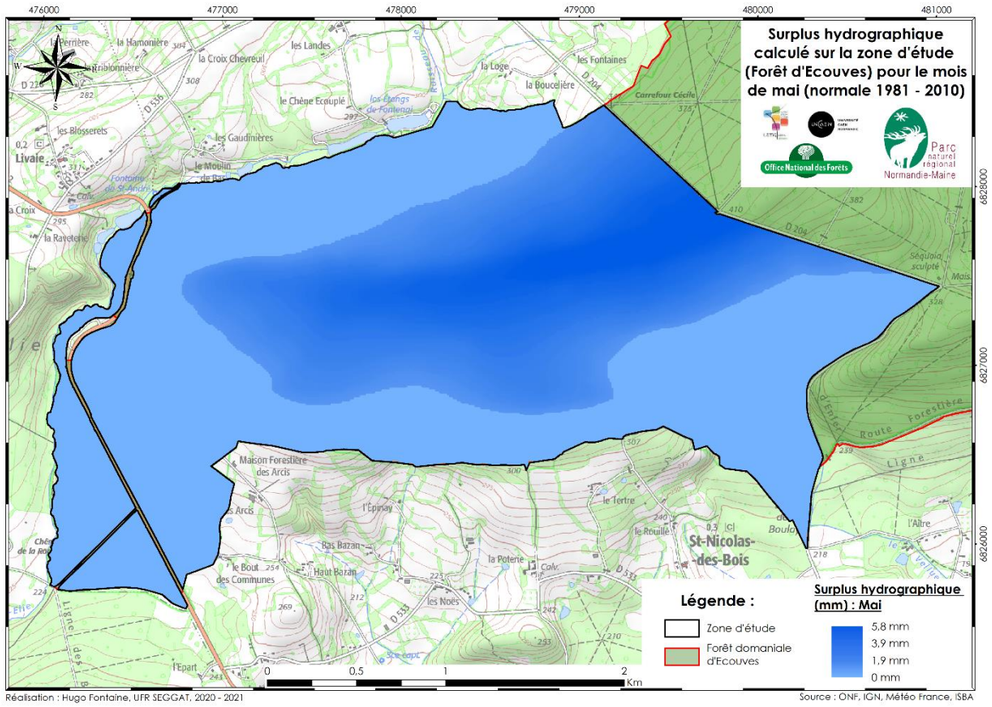
Annexe 9 : Cartes du bilan hydrique mensuel à décroissance logarithmique pour les 12 mois de l'année (normale 1981 – 2010) sur la zone d'étude.





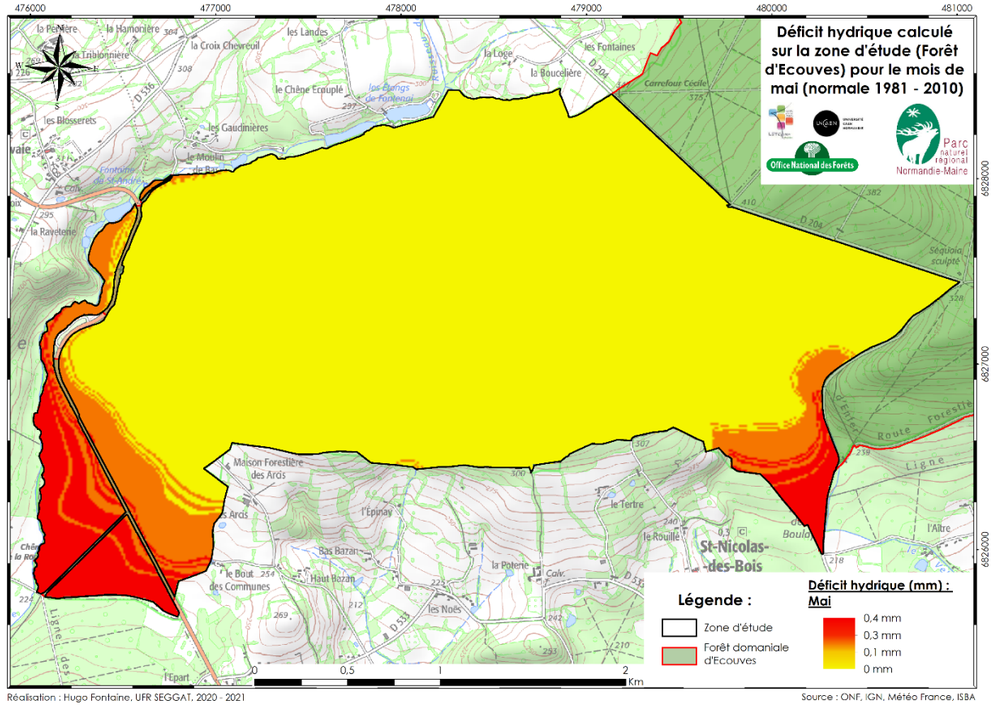






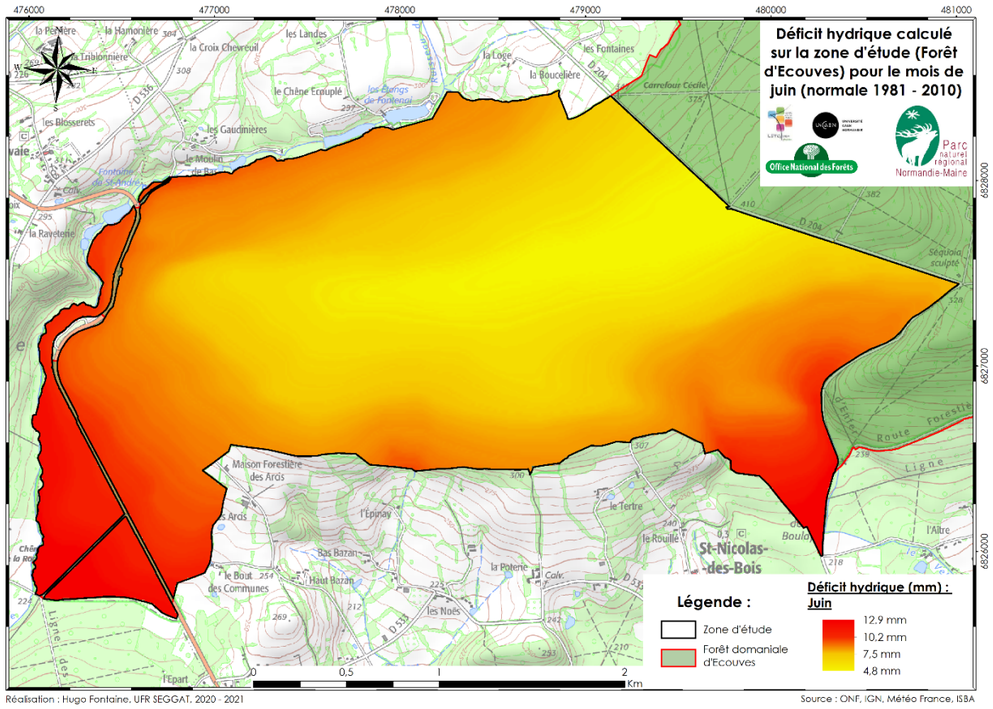
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



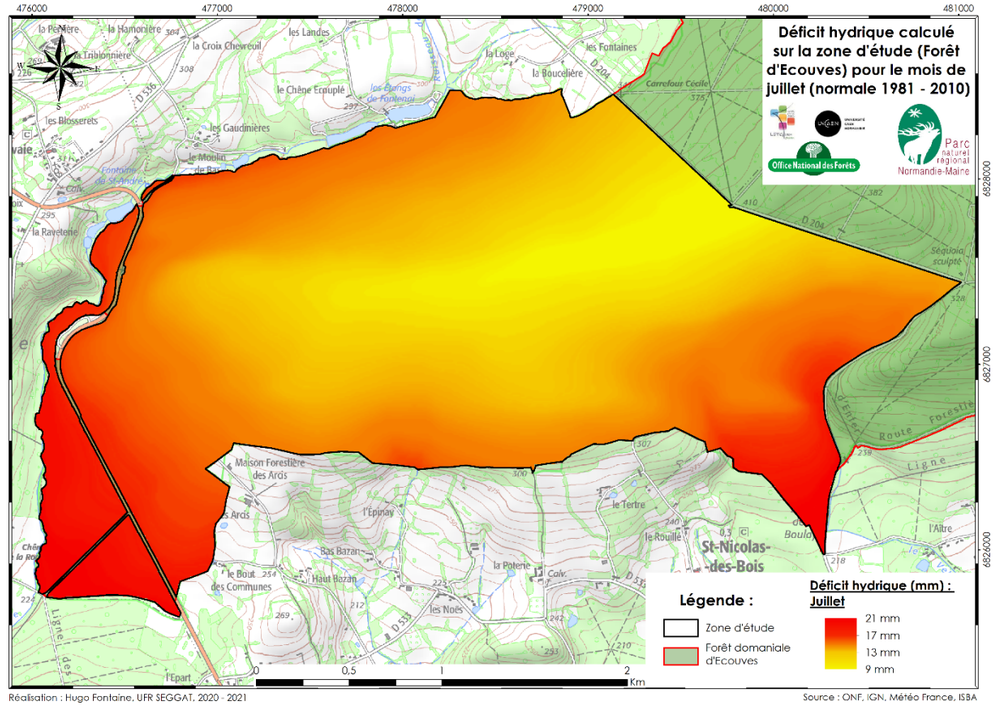
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



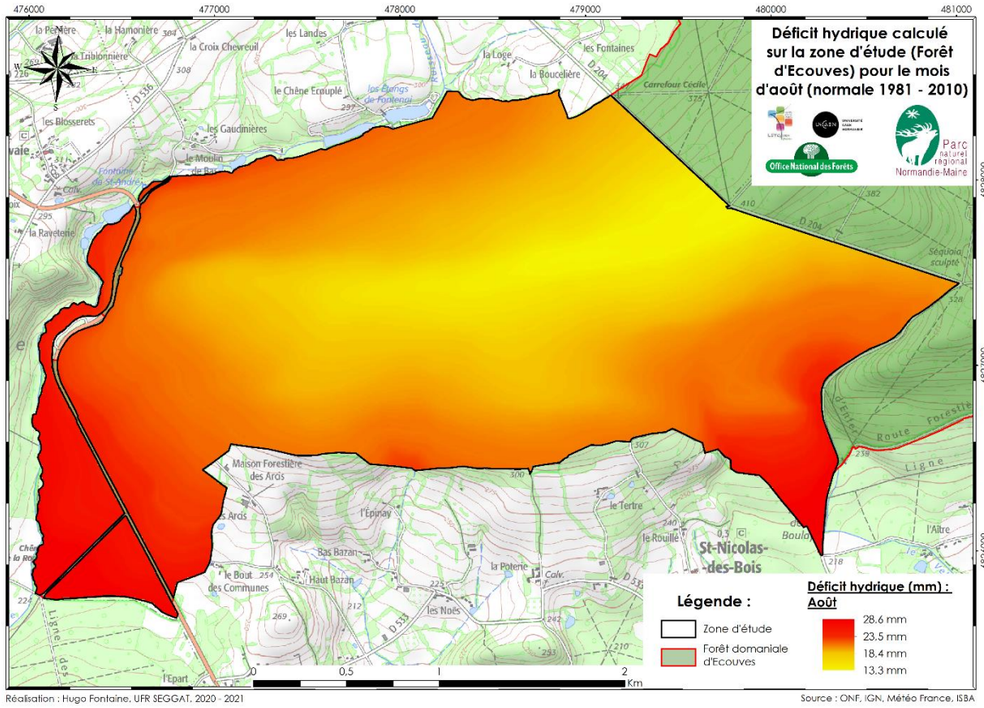
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



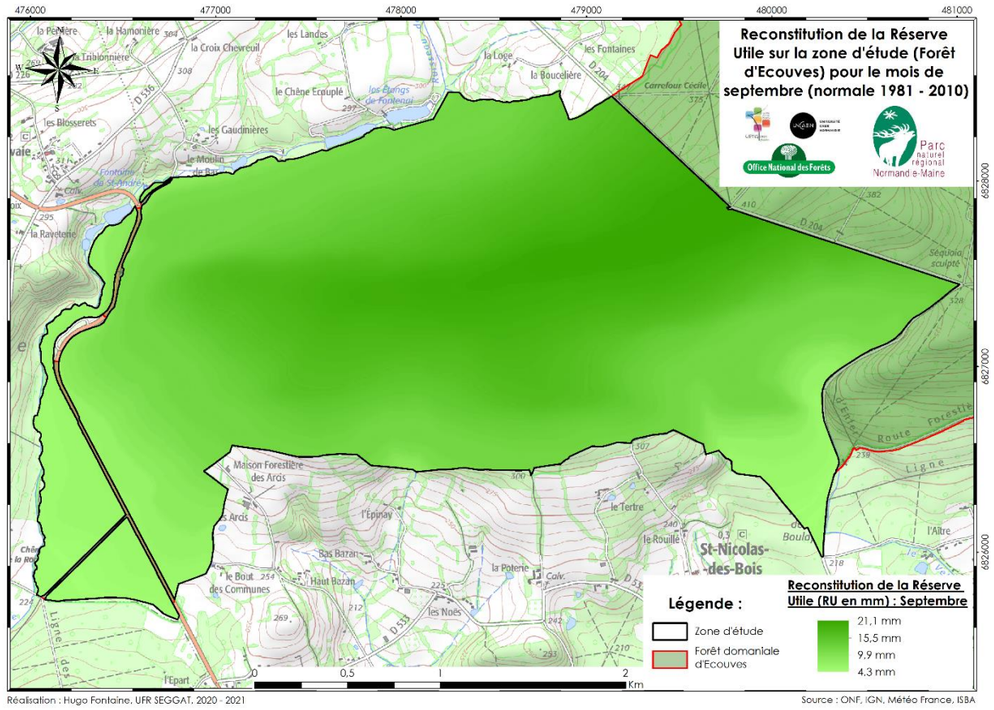
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



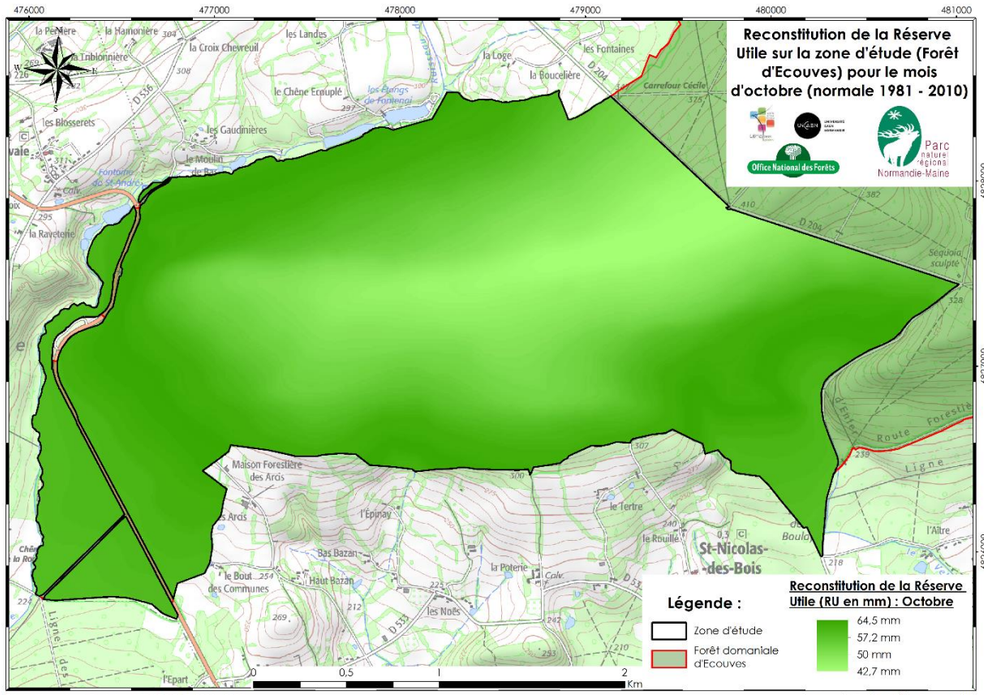
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



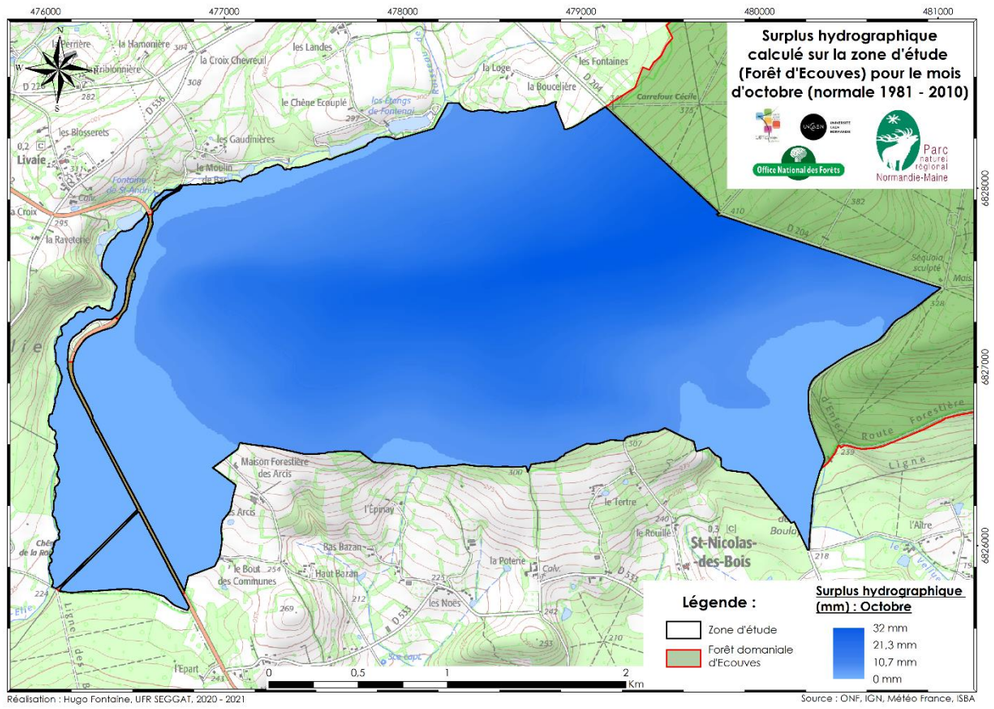
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



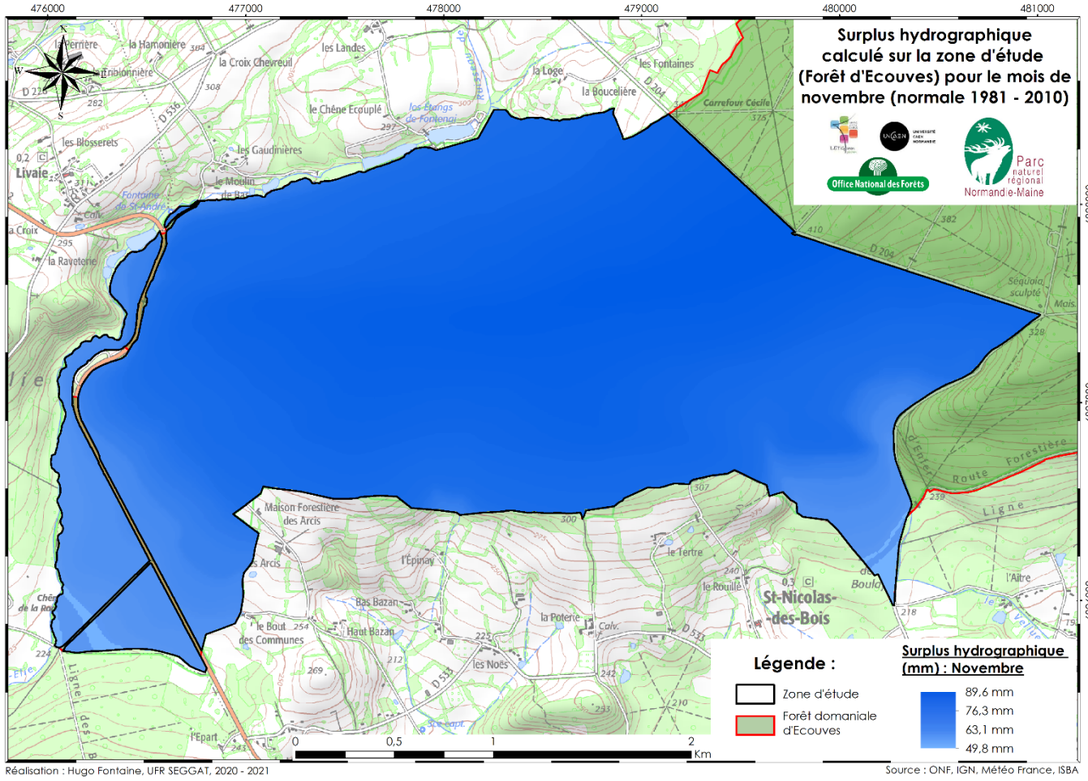
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



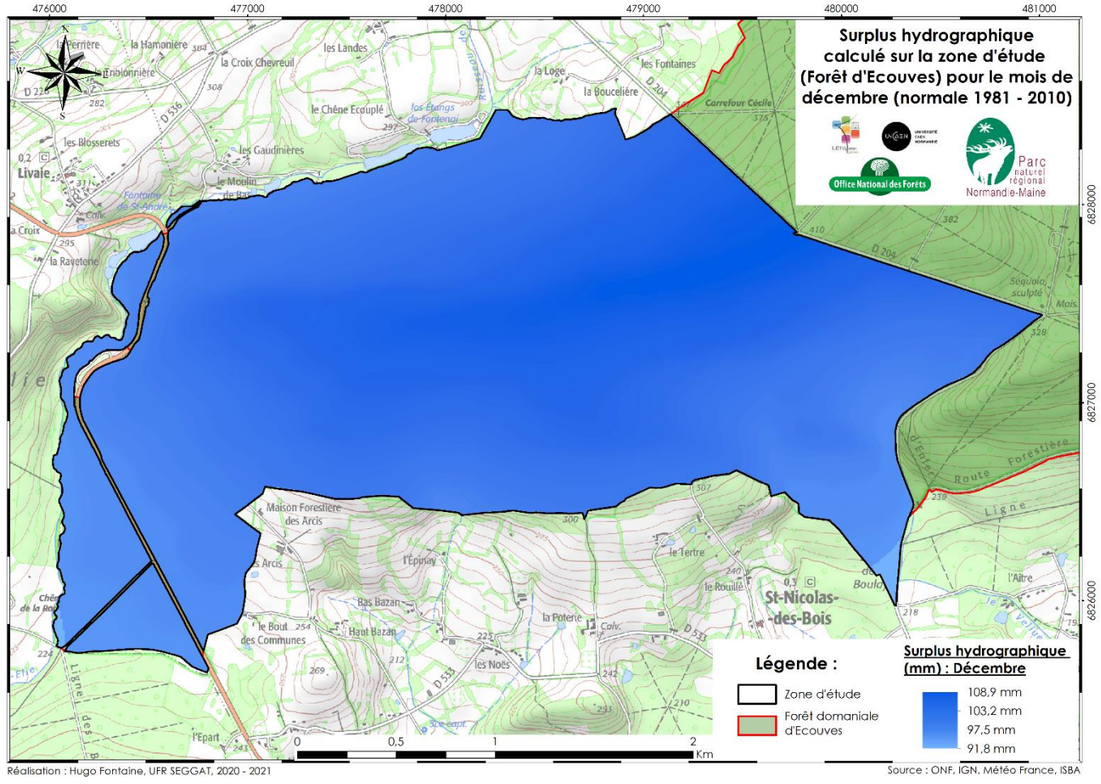
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

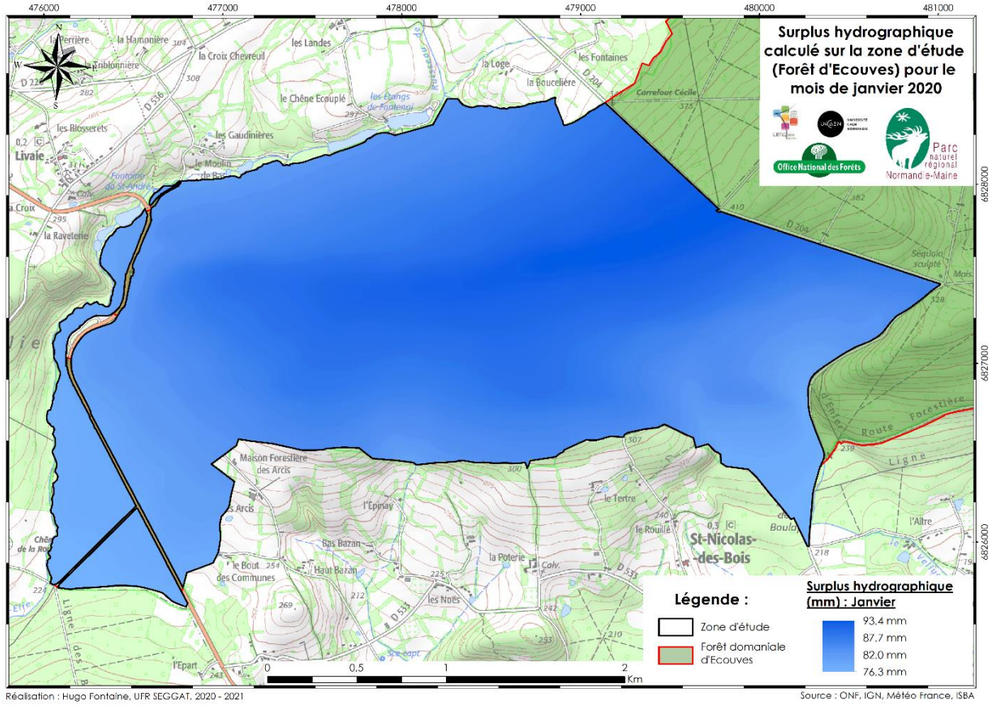
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

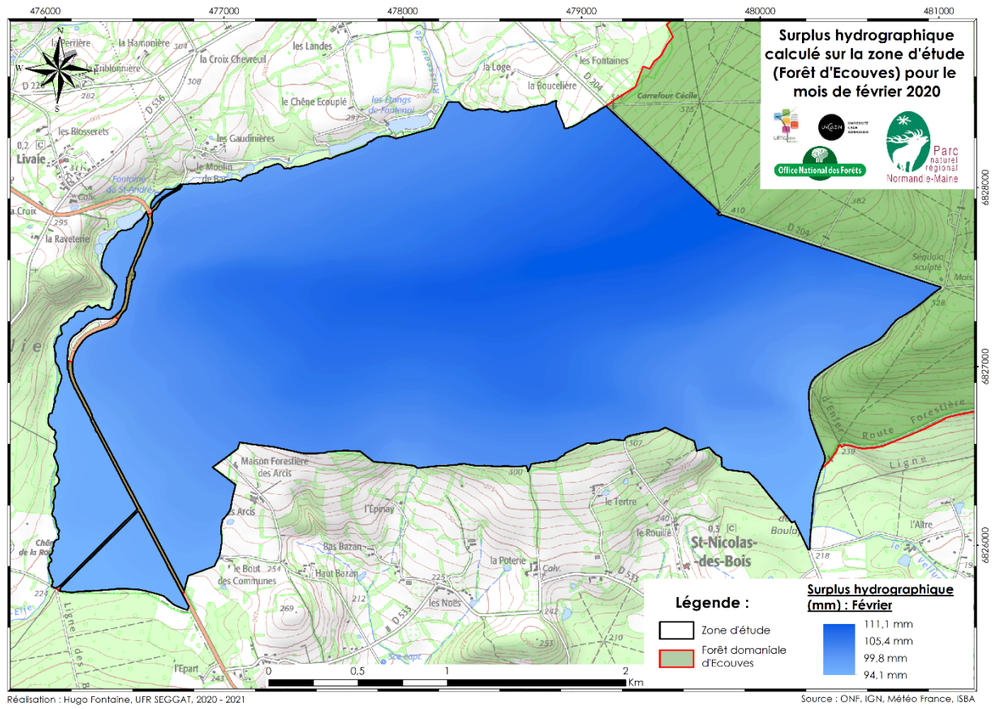
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

Annexe 10 : Cartes du bilan hydrique mensuel à décroissance logarithmique pour les 12 mois de l'année 2020 sur la zone d'étude.



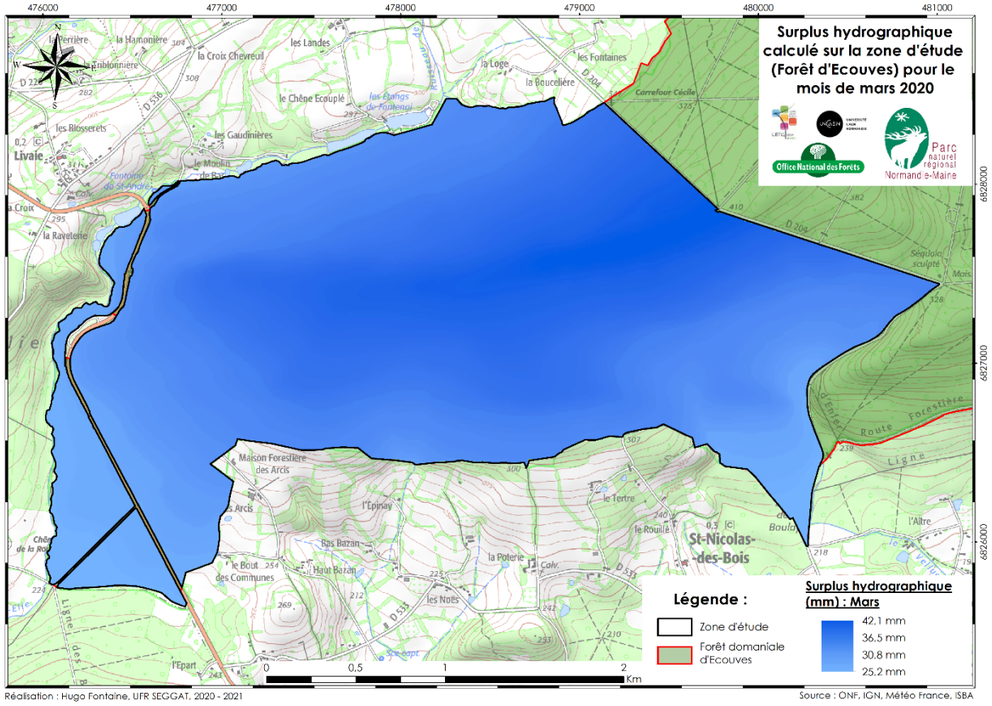
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



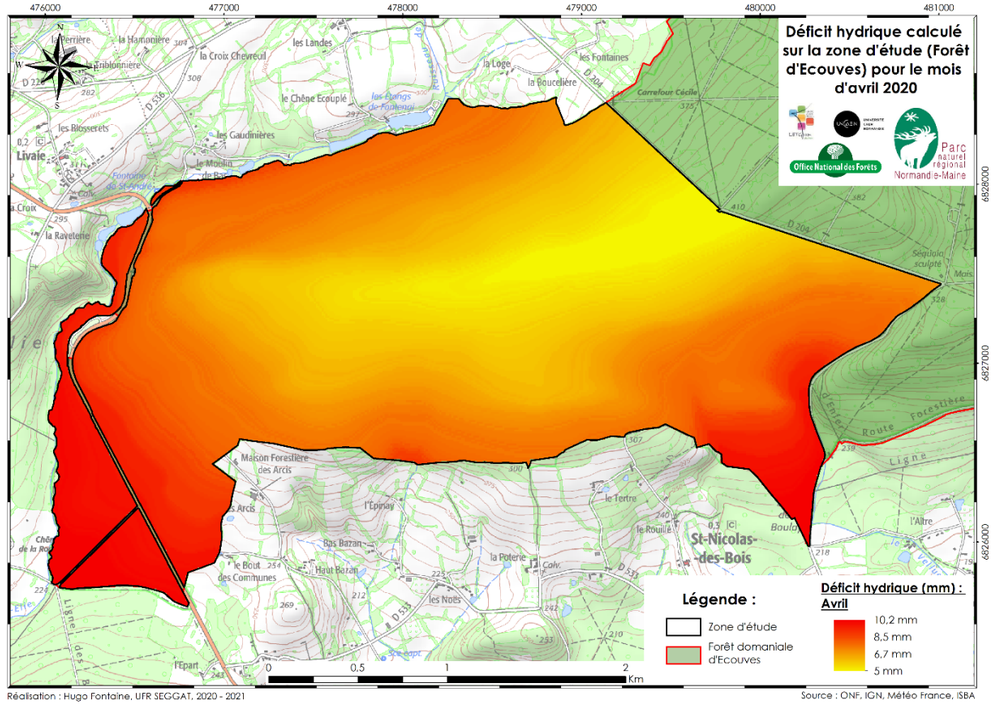
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



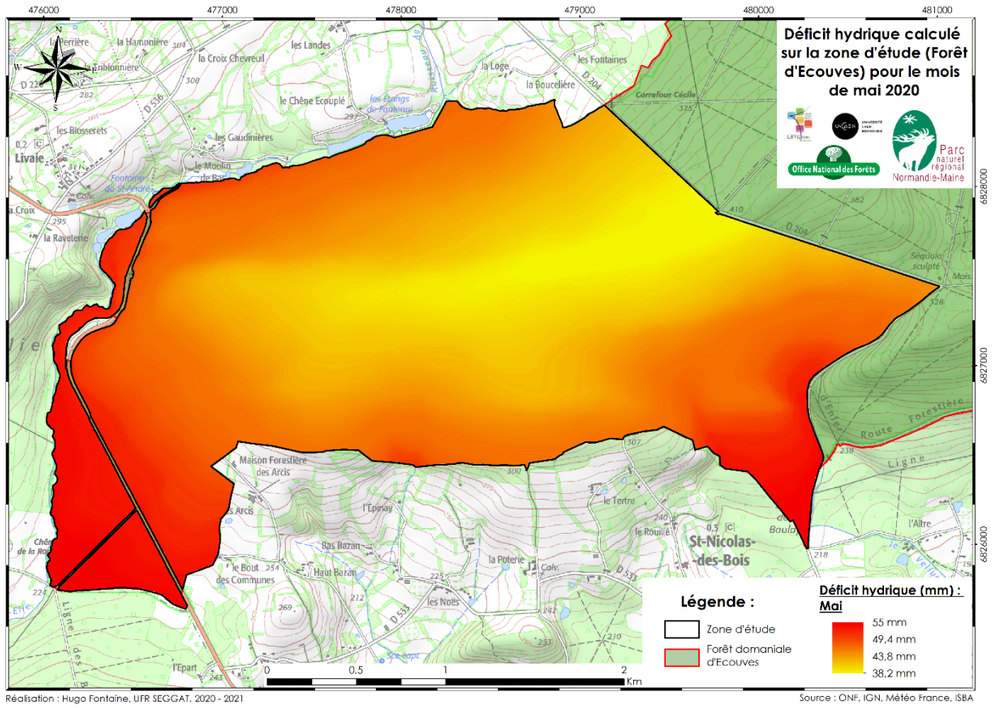
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



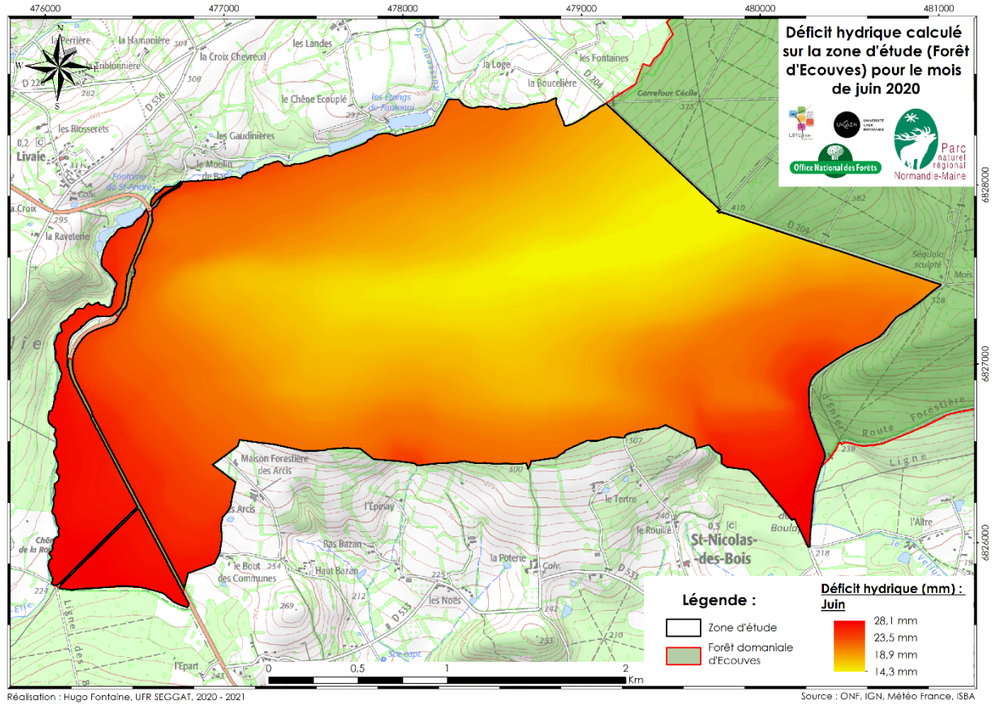
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



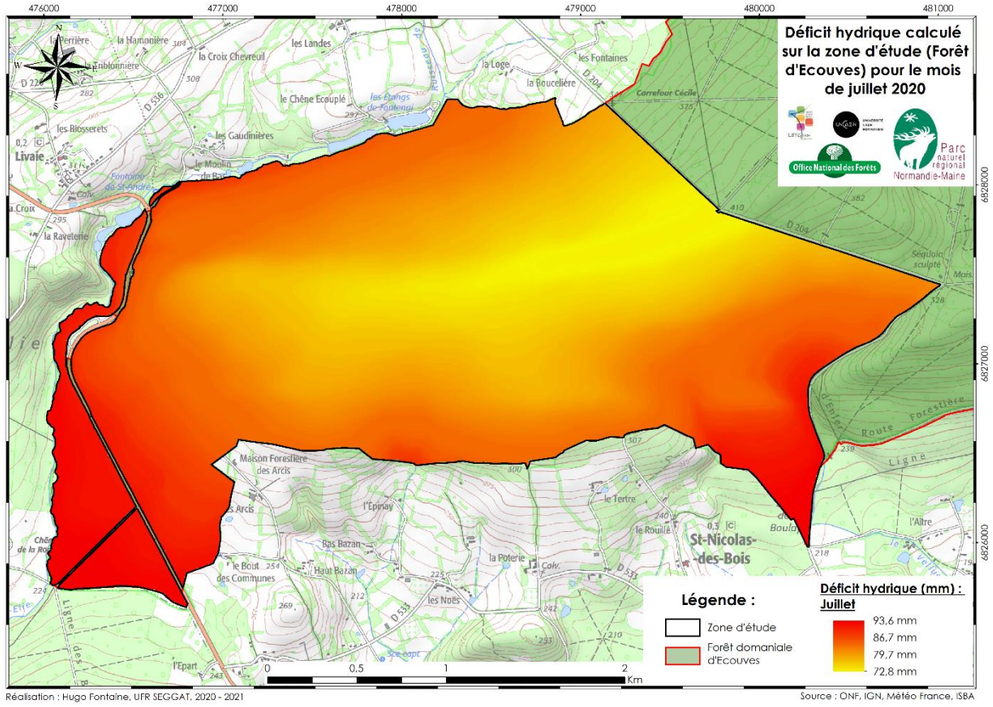
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



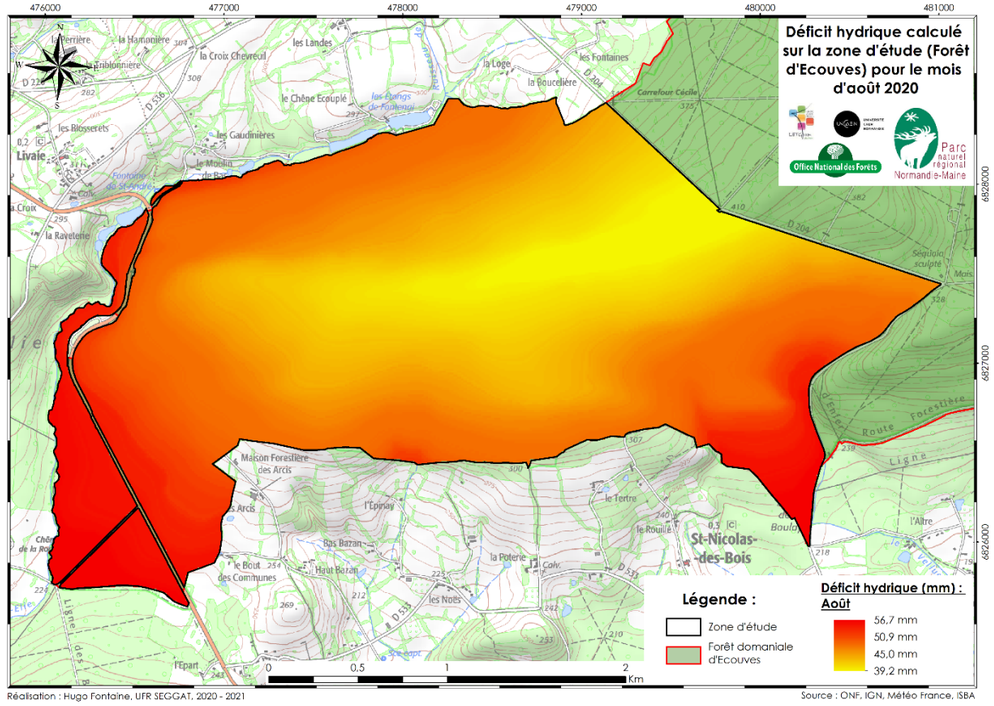
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



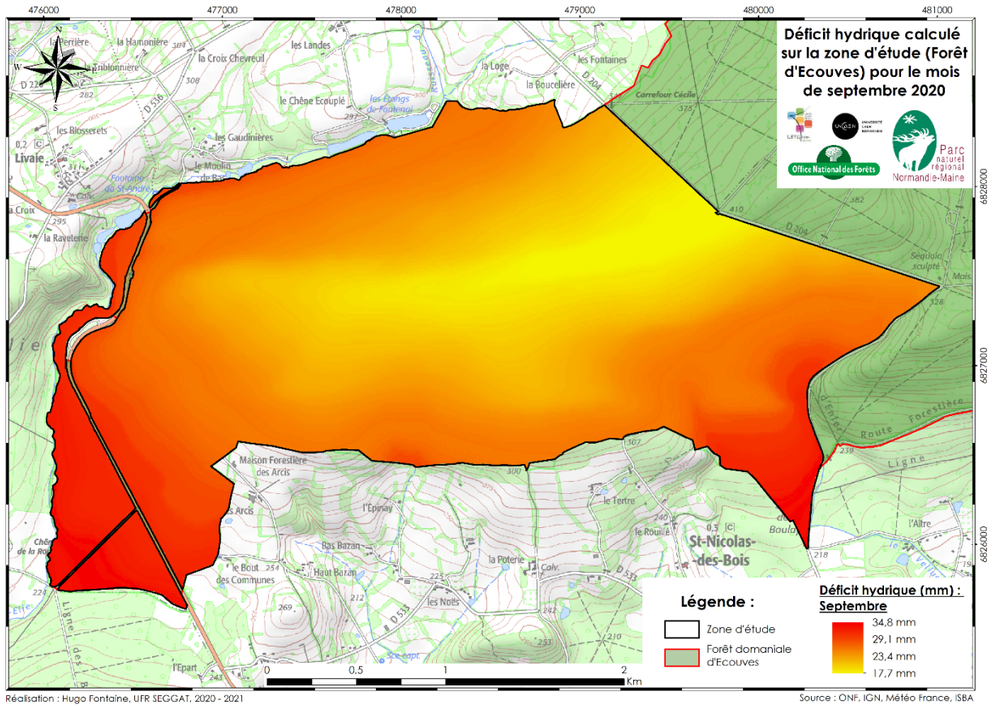
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



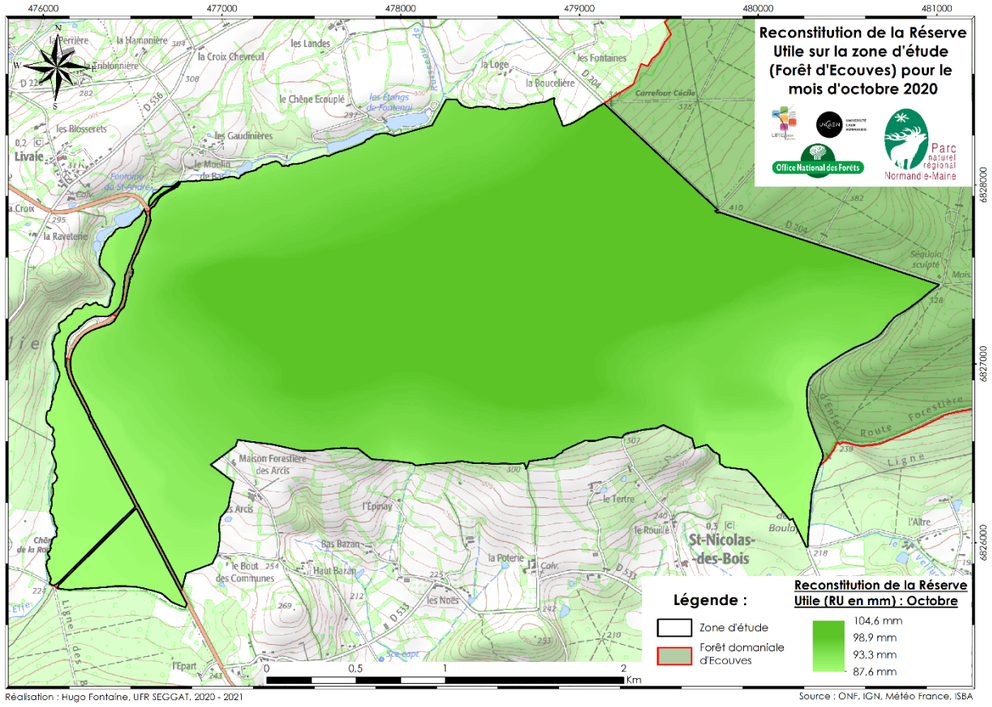
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



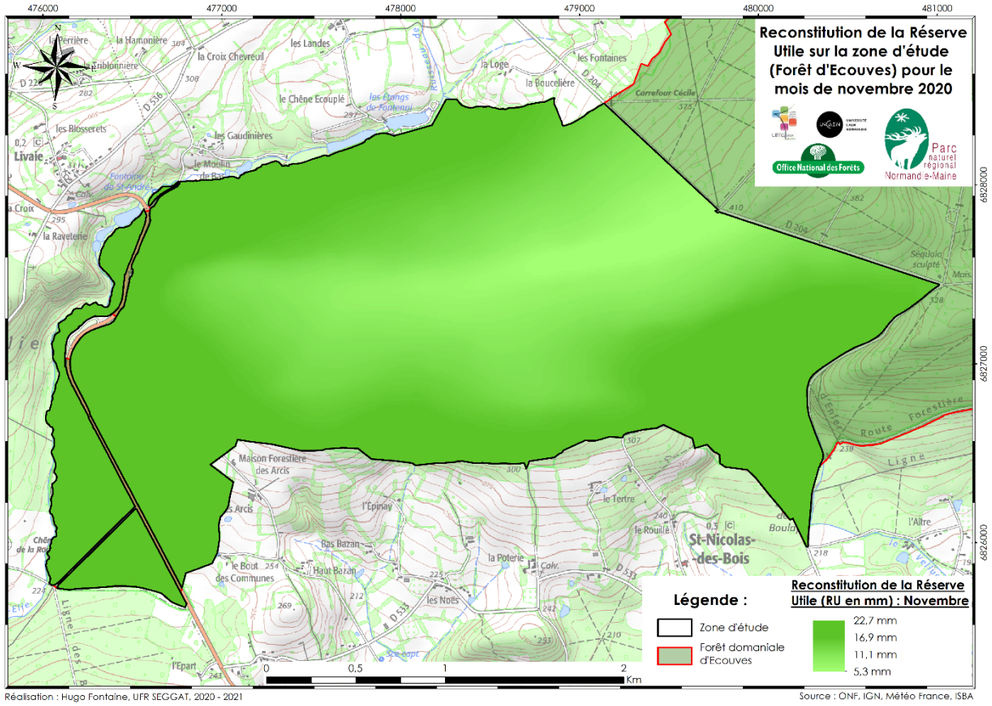
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



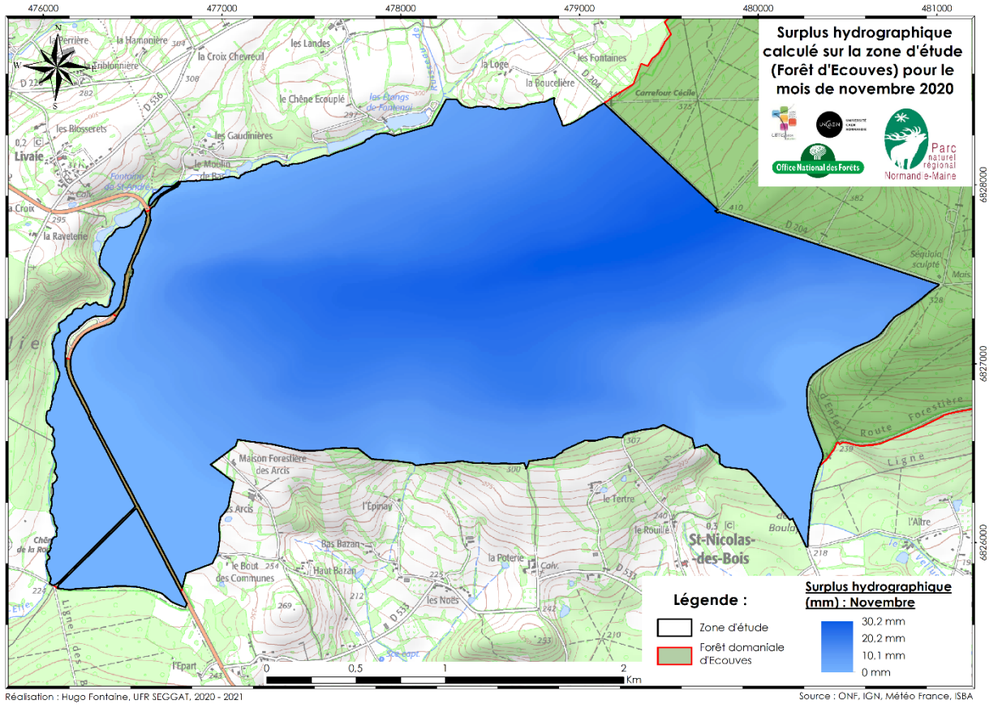
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



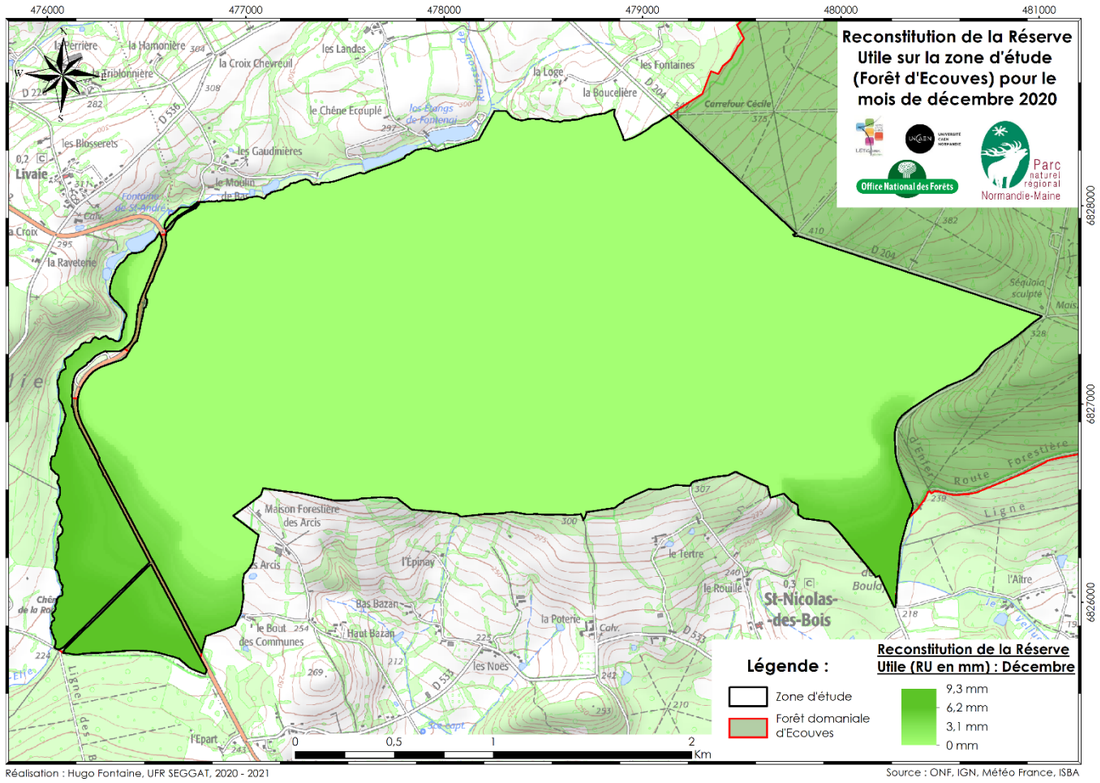
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

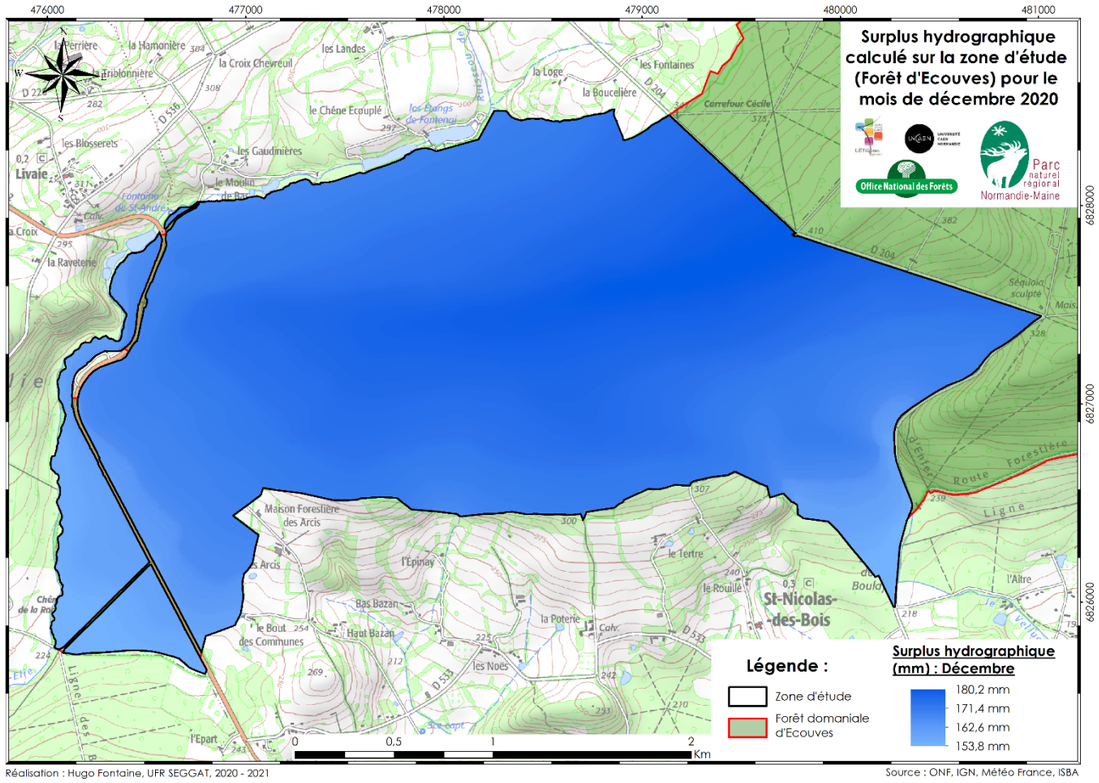
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA



Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021

Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA


Reconstitution de la Réserve Utile sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de décembre 2020
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Reconstitution de la Réserve Utile (RU en mm) : Décembre
9,3 mm
6,2 mm
3,1 mm
0 mm
0
0.5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA


Surplus hydrographique calculé sur la zone d'étude (Forêt d'Ecouves) pour le mois de décembre 2020
476000
477000
478000
479000
480000
481000
6828000
6827000
6826000
Légende :
Zone d'étude
Forêt domaniale d'Ecouves
Surplus hydrographique (mm) : Décembre
180,2 mm
171,4 mm
162,6 mm
153,8 mm
0
0.5
1
2
Km
Réalisation : Hugo Fontaine, UFR SEGGAT, 2020 - 2021
Source : ONF, IGN, Météo France, ISBA

Fiche de Diagnostic Stationnel – Fiche type

N° du relevé : .....

Date : .....

Auteur : .....

Localisation : .....

Coord X : .....

Coord Y : .....

Climat et topographie :

Zone climatique : .....

Exposition (N, NE, E, NO, O, SO, S, SE) :

.....

Pente (%) : .....

Position Topographique :

- ☐ 0 Plateau
- ☐ 1 Sommet
- ☐ 2 Haut de versant
- ☐ 3 Mi-versant concave
- ☐ 4 Mi-versant rectiligne
- ☐ 5 Mi-versant convexe
- ☐ 6 Replat
- ☐ 7 Bas de versant
- ☐ 8 Vallée ou fond de vallée large
- ☐ 9 Dépression ou fond de vallée étroit

Humus :

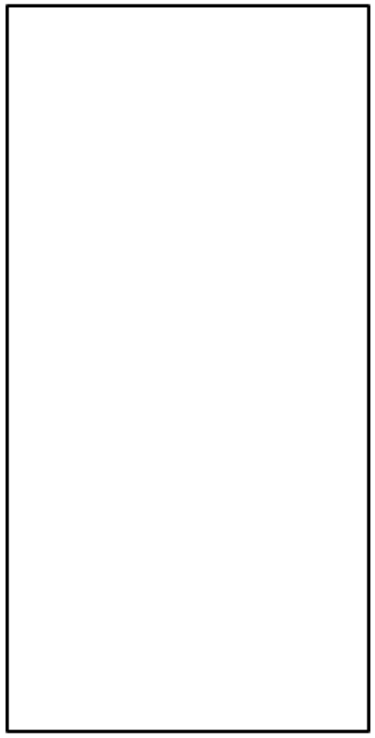
Type d'humus : .....

Horizons : .....

Profil texturale :

Profondeur prospectée :

Schéma du sol et horizons :



Texture :

L = Limon
A = Argile
S = Sableux
SA = Sablo-argileux
SL = Sablo-limoneux
LA = Limono-argileux
AS = Argilo-sableux, etc...

Trace d'oxydo-réduction (rouille)

Trace de décoloration (gris)

Charge en cailloux (silex)

Relevé floristique :

(Voir page suivante)

Bilan floristique : .....

.....

Bilan hydrique :

(Après analyse granulo)

RUM (mm) : .....

.....

Ecogramme :

XX						
X						
m						
f						
h						
hh						
H						
	AA	A	aa	a	n	b

Bilan trophique : .....

Engorgement en eau :

Profondeur d'apparition de l'hydromorphie (minimum 5 % de tache de rouilles/décoloration : .....cm

Profondeur d'apparition d'un hydromorphie marquée (plus de 40 % de tache de rouilles/décoloration : .....cm

Profondeur d'apparition de la tourbe : .....cm

Profondeur d'apparition d'un pseudogley: .....cm

Profondeur d'apparition d'un gley oxydé : .....cm

Profondeur d'apparition d'un gley réduit : .....cm

Podzolisation :

Epaisseur E (couleur claire, blanchâtre) : .....cm

Epaisseur BP d'accumulation de matière organique (couleur

Brin chocolat ou noir ou gris foncé) : .....cm

Epaisseur BP (couleur brin-ocre à rouille) : .....cm

Annexe 11 : Fiche de terrain pour les relevés stationnels et floristiques.

Fiche de Relevé Floristique – Fiche type

A – Plantes des milieux très acides – secs et mésophiles (hyperacidiphiles)	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Bruyère cendrée	
Callune	
Dicrane élevé	
Dicrane en balais	
Hypne cyprès	
Hypne des bruyères	
Hypne de Schreber	
Leucobryum glauque	
Lophocolée à deux dents	
Myrtille	

B – Plantes des milieux très acides et engorgés (hygro-hyperacidiphiles)	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Ajonc nain	
Bourdaine	
Bruyère à quatre angles	
Laîche lisse	
Molinie bleue	
Polytric commun	
Osmonde royale	
Sphaignes	

C – Plantes des milieux acides – secs et mésophiles (acidiphiles)	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Ajonc d'Europe	
Blechnum en épi	
Canche flexueuse	
Dicranelle plurilatérale	
Digitale pourpre	
Epervière vulgaire	
Fougère aigle	
Gaillet de Harz	
Genêt à balais	
Germandrée scorodoine	
Laîche à pilules	
Mélampyre des prés	
Néflier	
Polytric élégant	
Sorbier des oiseleurs	

D – Plantes des milieux assez acides – secs et mésophiles (acidiclines large amplitude)	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Atrichie ondulée	
Eurhynchie striée	
Fétuque à feuilles de deux sortes	
Fougère mâle	
Groseillier à maquereau	
Houlque molle	
Jacinthe des bois	
Luzule de Forster	
Luzule poilue	
Mélique uniflore	
Millet diffus	
Millepertuis commun	
Pâturin des bois	
Stellaire holostée	
Véronique officinale	

E – Plantes des milieux assez acides et frais (hygro-acidiclines large amplitude)	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Canche cespiteuse	
Epilobe en épi	
Fougère femelle	
Galeopsis tétrahit	
Jonc aggloméré	
Jonc épars	
Laîche espacée	
Luzule des champs	
Lysimaque des bois	
Moehringie à trois nervures	
Oxalide petite oseille	

F – Plantes des milieux peu acides – secs et mésophiles (neutroacidiclines)			
Intitulé	**Coeff Ab-dom**	**Intitulé**	**Coeff Ab-dom**
Anémone des bois		Petite pervenche	
Aspérule odorante		Rosier des champs	
Euphorbe faux amandier		Sceau de Salomon multiflore	
Faux fraisier		Véronique petit-chêne	
Fragon		Violette de Rivin	
Laîche des bois		Violette de chien	
Lamier jaune			
Mnie ondulée			

G – Plantes des milieux peu acides et frais (hygro-neutroacidiclines)	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Bugle rampante	
Cardamine flexueuse	
Circée de Paris	
Conopode dénudé	
Dactyle aggloméré	
Douce-amère	
Dryoptéris écailleux	
Epilobe des montagnes	
Fétuque géante	
Laîche maigre	
Laîche pendante	
Pâturin commun	
Scrofulaire noueuse	
Véronique des montagnes	

I – Plantes des milieux neutres et frais (hygroneutrophiles)	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Ail des ours	
Alliaire	
Aspidium à cils raides	
Berce sphondyle	
Cirse des champs	
Cirse maraîcher	
Epiaire des bois	
Eupatoire chanvrine	
Ficaire fausse renoncule	
Gaillet gratteron	
Géranium herbe à Robert	
Groseillier rouge	
Lierre terrestre	
Moschatelline	
Ortie dioïque	
Oseille	
Patience à feuilles obtuses	
Oseille sanguine	
Renoncule à tête d'or	
Scolopendre	
Silène dioïque	

H – Plantes des milieux neutres – secs à mésophiles (neutrophiles)	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Benoîte commune	
Brachypode des bois	
Fissident à feuilles d'If	
Fraisier sauvage	
Gouet tacheté	
Listère ovale	
Parisette	
Primevère acaule	
Primevère élevée	
Sanicle	
Vesce des haies	
Violette des bois	
Violette odorante	

J – Plantes des milieux calcaire – secs et mésophiles (calcicoles)	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Ancolie vulgaire	
Brachypode penné	
Brome rude	
Camérisier à balais	
Clématite vigne blanche	
Dompte-venin	
Garance voyageuse	
Hellébore fétide	
Iris fétide	
Laîche glauque	
Lauréole	
Mercuriale pérenne	
Nerprun purgatif	
Orchis mâle	
Orchis pourpre	
Rosier des chiens	
Tamier commun	
Thamnie queue de renard	

K – Plantes des milieux humides et engorgés – mésohygrophile/hygrophile	
Intitulé	**Coeff Ab-dom**
Angélique sauvage	
Cardamine des prés	
Cirse des marais	
Consoude officinale	
Dorine à feuilles opposées	
Epilobe hérissé	
Gaillet des marais	
Houblon	
Iris faux acore	
Laîche des marais	
Laîche des rives	
Lotier des fanges	
Lycope d'Europe	
Lysimaque commune	
Menthe aquatique	
Podagraire	
Populage des marais	
Prêle des champs	
Reine des prés	
Renoncule rampante	
Salicaire	
Scutellaire casquée	
Valériane officinale rampante	

Légende pour le coefficient Ab-dom :

+ : présence rare de la plante

1 : présence < 5 %

2 : présence entre 5-25 %

3 : présence entre 25-50 %

4 : présence entre 50-75 %

5 : Présence > 75 %

Essences forestières			
Intitulé	**Strate A**	**Strate a**	**Strate r**
Alizier torminal			
Aubépine épineuse			
Aubépine monogyne			
Aulne glutineux			
Bouleau pubescent			
Bouleau verruqueux			
Charme			
Châtaigner			
Chêne pédonculé			
Chêne pubescent			
Chêne rouge			
Chêne sessile			
Chêne vert			
Cormier			
Cornouiller mâle			
Cornouiller sanguin			
Douglas			
Epicéa commun			
Epicéa de Sitka			
Erable champêtre			
Erable plane			
Erable sycomore			
Frêne commun			
Fusain d'Europe			
Hêtre			
Houx			
Mélèze			
Merisier			
Noisetier			
Noyer commun			
Orme			
Peuplier			
Pin d'Alep			
Pin laricio de Calabre			
Pin maritime			
Pin noir d'Autriche			
Pin sylvestre			
Prunellier			

Essences forestières			
Intitulé	**Strate A**	**Strate a**	**Strate r**
Robinier faux-acacia			
Saule blanc			
Saule marsault			
Sapin pectiné			
Sapin de Nordmann			
Sapin de Vancouver			
Sorbier des oiseleurs			
Tilleul grandes feuilles			
Tilleul petite feuilles			
Troène			
Tsuga			
Viorne obier			
Viorne lantane			
Autres :			

Annexe 12 : Milieux forestiers étudiés lors de la campagne de données.

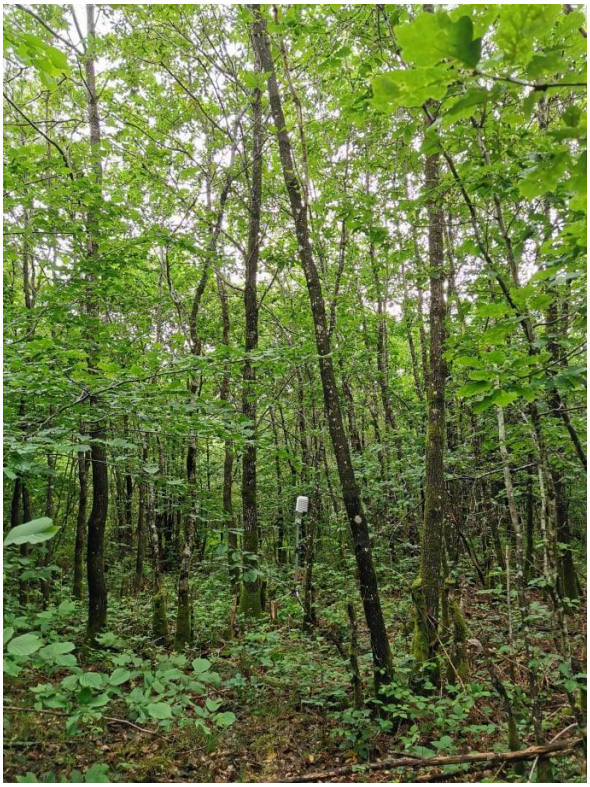
Emplacement de l'abris météo dans les peuplements denses de résineux. A gauche versant nord (ubac) et à droite versant sud (adret).

Emplacement de l'abris météo dans les peuplements denses de feuillus. A gauche versant nord (ubac) et à droite versant sud (adret).

Emplacement de l'abris météo dans des espaces ouverts. A gauche versant nord (ubac) et à droite versant sud (adret).

Emplacement de l'abris météo dans les peuplements en régénération. A gauche versant nord (ubac) et à droite versant sud (adret).

Emplacement de l'abris météo dans les peuplements en régénération. A gauche versant nord (ubac) et à droite versant sud (adret).



Résumé

La planète connait depuis 1950, un réchauffement climatique sans équivoque se traduisant par un réchauffement de l'atmosphère et des océans, une fonte des glaciers et par une élévation du niveau de la mer. Selon le dernier rapport du GIEC, en 2014, les températures ont augmenté de + 0,85 °C sur la période 1880-2012 de manière linéaire.
Aujourd'hui, ce réchauffement climatique est de plus en plus néfaste pour nos forêts et la croissance des arbres. Ces dernières années, on peut observer des dépérissements chez certaines essences comme le frêne avec l'apparition de la chalarose, l'épicéa avec le scolyte mais aussi le hêtre qui subit depuis quelques étés, des coups de chauds importants. Ce ne sont pas seulement les arbres qui sont impactés, mais également l'ensemble de l'écosystème de la forêt dont la gestion et la préservation de la ressource en eau au profit des forêts, des milieux aquatiques (maintien des zones humides) et des différents usages par l'homme (alimentation et agriculture). Cela démontre l'importance aujourd'hui de ces questions et des réponses doivent être apportées pour permettre aux gestionnaires et techniciens de continuer à gérer durablement la forêt.

Cette initiation à la recherche, de six mois, a eu pour objectif de prendre en considération le changement climatique dans la gestion forestière durable à court terme avec l'analyse de l'adéquation des essences forestières, actuellement en place, avec la station forestière et le climat. Cette recherche a été effectuée en forêt domaniale d'Ecouves, sur un terrain d'expérimentation faisant 750 ha. Pour analyser l'adéquation de l'essence forestière avec la station et le climat, plusieurs études ont été menées :

- Approche climatique → spatialisation du bilan hydrique à fine résolution (zone d'étude) sur la normale climatique pour permettre de comprendre le climat local et ces particularités,
- Approche pédologique → renouvellement de la carte des stations de la forêt d'Ecouves,
- Adéquation des essences forestières avec la station et le climat.

De ces analyses sont ressortis quelques informations importantes à prendre en compte par le monde forestier. De la spatialisation du bilan hydrique à fine échelle sur la normale climatique (1981-2010), l'information importante et la période et l'intensité du déficit hydrique, très courte sur l'année. Seulement trois mois sont concernés (juin, juillet et août) avec en plus le mois de mai où il y a à la fois du surplus hydrologique et du déficit hydrique.
L'ancienne carte des stations, du terrain d'expérimentation, élaborée selon la typologie Jabiol recensée 8 stations présentes contre 6 aujourd'hui. Des fusions mais également des dissolutions de stations ont eu lieu.
L'adéquation des essences forestières avec la station et le climat a révélé que les principales essences, sont actuellement en stations. Attention, tout de même, avec le hêtre qui pourrait connaitre quelques complications si le climat de 2020 devient le climat futur. Comme essence majeure, seul le sapin pectiné connait quelques difficultés que ce soit avec la station (en limite) et avec le climat (essence qui ne supporte pas les sécheresses).

Mots clés : Changement climatique, forêt domaniale d'Ecouves, bilan hydrique, station, adéquation.