AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR	**Compte-rendu de fin de projet**	IMPRINT ANR-19-CE32 0005

Projet ANR-19-CE32-0005

IMpacts des PROcessus mICroclimatiques sur la redistributioN de la biodiversiTé forestière en contexte de réchauffement du macroclimat – IMPRINT

Programme JCJC 2019

A IDENTIFICATION 2
B RESUME CONSOLIDE PUBLIC 2
B.1 Instructions pour les résumés consolidés publics 2
B.2 Résumé consolidé public en français 3
B.3 Résumé consolidé public en anglais 6
C MEMOIRE SCIENTIFIQUE 8
C.1 Résumé du mémoire 8
C.2 Enjeux et problématique, état de l'art 9
C.3 Approche scientifique et technique 10
C.4 Résultats obtenus 14
C.5 Discussion 19
C.6 Conclusions 20
C.7 Références 21
D LISTE DES LIVRABLES 22
E IMPACT DU PROJET 26
E.1 Indicateurs d'impact 26
E.2 Liste des publications et communications 27
E.3 Liste des éléments de valorisation 35
E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) 36

Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.

Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	IMPRINT
Titre du projet	IMpacts des PRocessus mIcroclimatiques sur la redistributioN de la biodiversiTé forestière en contexte de réchauffement du macroclimat
Coordinateur du projet (société/organisme)	UMR CNRS 7058 « Ecologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés » (EDYSAN), Université de Picardie Jules Verne (UPJV), 1 Rue des Louvels, 80037 Amiens Cedex 1, France
Période du projet	Du 1er Octobre 2019 au 31 Mars 2024
Site web du projet, le cas échéant	https://microclimat.cnrs.fr/

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mr Jonathan Lenoir
Téléphone	07 62 82 94 40
Adresse électronique	Jonathan.lenoir@u-picardie.fr
Date de rédaction	Mars 2024

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	Projet ANR Jeunes chercheuses et jeunes chercheurs (JCJC) et donc mono-partenaire (EDYSAN)

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.

B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.

Titre d'accroche du projet *(environ 80 caractères espaces compris)*
Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.

Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.

Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique *(150 caractères max espaces compris)*

Paragraphe 1 : *(environ 1200 caractères espaces compris)*
Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal

Titre 2 : précise les méthodes ou technologies utilisées *(150 caractères max espaces compris)*

Paragraphe 2 : *(environ 1200 caractères espaces compris)*
Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).

Résultats majeurs du projet *(environ 600 caractères espaces compris)*
Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ.
Préciser aussi toute autre retombée = partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet *(environ 500 caractères espaces compris)*
Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

Illustration
Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

Informations factuelles
Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

Importance des microclimats forestiers en contexte de changements climatiques

Modélisation des microclimats forestiers et conséquences sur la biodiversité du sous-bois en contexte de réchauffement global des températures

Les températures en sous-bois, telles que ressenties par les espèces du sous-bois, sont différentes des températures mesurées pas les postes météo, généralement situés en milieu ouvert et exposés aux vents dominants (p. ex. aérodromes). La frondaison des arbres lisse les extrêmes (journaliers et mensuels) avec des maximums plus frais et des minimums plus chauds à l'intérieur des forêts denses. Les modèles de distribution d'espèce, couramment utilisés pour prédire la redistribution du vivant en contexte de réchauffement climatique, sont habituellement calibrés sur les températures issues des postes météo, ce qui est problématique pour les espèces du sous-bois puisque ces modèles ignorent l'effet lissage ou tampon de la canopée sur les températures. L'objectif du projet IMPRINT est d'intégrer ces processus microclimatiques dans les modèles de distribution des espèces de la sous-trame boisée et d'en étudier les conséquences potentielles sur la redistribution en contexte de réchauffement global. Les retombées au niveau sociétal impliquent une potentielle remise en

question des stratégies de gestion forestière pour assurer le maintien de la fonctionnalité des microclimats forestiers.

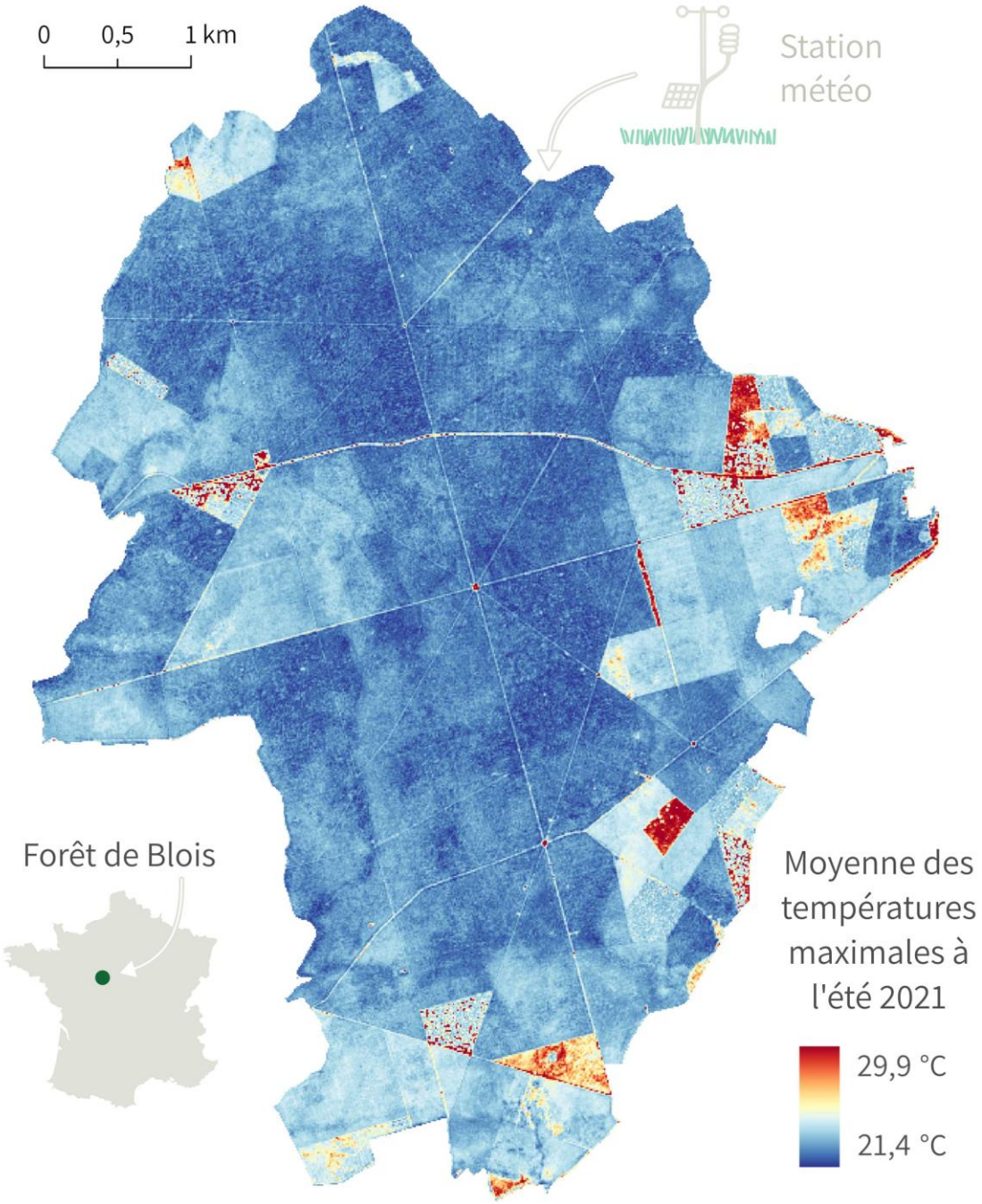
Mise au point d'une fonction de transfert combinée à la technologie lidar pour spatialiser les microclimats forestiers à partir des données météo

Afin de lever ce verrou scientifique, nous avons utilisé : (i) des micro-capteurs de température qui ont mesuré en continu le microclimat sous la canopée forestière ; (ii) des données de températures issues d'un réseau national de postes météo permanents pour pouvoir les coupler aux données issues des micro-capteurs ; et (iii) des images 3D à très haute définition acquises par la technologie lidar dans le but de spatialiser finement les microclimats forestiers. Par des approches statistiques corrélatives, nous avons développé une méthode simple et parcimonieuse qui consiste à modéliser deux paramètres clés. Le premier quantifie l'effet « tampon » ou « amplificateur » du couvert végétal et peut-être modélisé en fonction de variables, obtenues à l'aide du lidar, qui décrivent la structure 3D du couvert. Le second dépend uniquement des conditions climatiques régionales. Une fois ces deux paramètres connus en tout point de l'espace et connaissant la température mesurée heure par heure au sein des postes météo, on injecte ces trois informations dans une équation de transfert pour spatialiser les températures du sous-bois à fine résolution spatiotemporelle (p. ex. à 10 m de résolution et au pas de temps horaire).

Résultats majeurs du projet : A partir de séries de températures de l'air et d'inventaires botaniques sur 157 placettes disposées dans 3 forêts (Aigoual, Blois, Mormal), nous avons montré que l'on ne peut pas prédire la température du sous-bois par bio-indication. Nous avons donc utilisé notre méthode de modélisation de l'effet tampon du couvert pour spatialiser la température du sous-bois à une résolution de 10 m en forêt de Blois, à l'aide de données lidar. Enfin, nous avons exploré le lien entre distribution des espèces et effet tampon du couvert, nous permettant de classer les espèces depuis celles qui affectionnent des couverts denses et stables thermiquement à celles qui affectionnent des milieux ouverts soumis à de fortes variations thermiques.

Production scientifique du projet : Plus de 20 articles en lien avec le projet ont été publiés dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture, dont 4 qui présentent les résultats majeurs du projet évoqués ci-dessus (*Journal of Vegetation Science*, *Methods in Ecology and Evolution*, *Remote Sensing of Environment* et *Ecology Letters*). Nous avons présenté les résultats du projet à de nombreuses reprises dans des colloques nationaux et internationaux mais aussi et surtout auprès du grand public au travers de nombreuses actions de médiation, dont la réalisation d'une vidéo de 8 min réalisée par Pierre de Parscau en partenariat avec CNRS Images et le journal *Le Monde* : https://images.cnrs.fr/video/7757.

Illustration : Carte, à 10 m de résolution, de la température microclimatique maximale de l'air à 1 m au-dessus du sol pendant l'été 2021 (juin à septembre), sur l'ensemble de la forêt domaniale de Blois. La température d'une station météo proche de la bordure de la forêt (macroclimat) donne une moyenne des températures maximales de 24°C, alors que la température maximale microclimatique varie de 21 à 30°C. Crédit : Eva Gril.



Informations factuelles : Le projet IMPRINT est coordonné par Jonathan Lenoir. Il implique une jeune équipe de 9 membres de l'Unité mixte de recherche (UMR) « Ecologie et dynamique des systèmes anthropisés » (EDYSAN, UMR CNRS 7058), dont le porteur, une doctorante (Eva Gril), quatre enseignants-chercheurs (Boris Brasseur, Marianne Laslier, Vincent Le Roux, Ronan Marrec), deux ingénieurs d'études (Emilie Gallet-Moron, Fabien Spicher) et un gestionnaire administratif (Franck Krawczyk). Le projet a commencé en octobre 2019 et a duré 54 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 299 948 € pour un coût global de l'ordre de 804 454 €.

B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

Forest microclimates matter under anthropogenic climate change

Modelling forest microclimates and their consequences for understory biodiversity under global warming

Sub-canopy temperatures, as experienced by forest understory species, are very different from temperatures as measured by weather stations, usually located in open landscapes exposed to prevailing winds, like close to airfields. Tree canopy buffers the understory from extreme (daily and monthly) fluctuations with cooler maximums and warmer minimums inside forest interiors. Species distribution models, often used to predict species redistribution in response to climate change, are usually fitted on macroclimatic temperatures from weather stations, which is problematic for understory species because those models do not account for the buffering effect of the canopy. The chief objective of the IMPRINT project is to incorporate microclimatic processes in species distribution models, especially so for understory species, so as to study the potential consequences for species redistribution in response to global warming. The outcomes of the IMPRINT project for the society will potentially question and reshape forest management practices to ensure that microclimatic processes in the forest understory remain sustainable and functional.

Tuning a transfer function to be combined with lidar data to map sub-canopy temperature from weather station temperature data

To achieve the project aims, we used: (i) miniature data loggers recording sub-canopy temperatures every hour; (ii) temperature time series from a network of weather stations to be paired with sub-canopy temperature time series; and (iii) 3D point clouds acquired at very high density from airborne lidar in order to map sub-canopy temperatures at fine spatial resolution. Using correlative approaches, we developed a simple and parsimonious method that consists in fitting two key parameters. The first one captures the buffering or amplifying effect of vegetation cover on temperature and can be fitted against spatially-explicit variables that describe the 3D structure of the vegetation, using lidar-derived variables as predictors for instance. The second one strictly depends on the macroclimatic context. Once the two parameters are known for any spatial position, one can use the hourly temperature records from a neighbouring weather station to inject all three components into a transfer function to map sub-canopy temperatures at fine spatiotemporal resolution, at 10-m resolution and every hour, for instance.

Key findings. Using air temperature time series and vegetation surveys from a total of 157 plots across three state forests in France (Aigoual, Blois, Mormal), we showed that we cannot predict sub-canopy temperature from species indicator values and plant community composition. Hence, we used our method to fit the buffering effect of the canopy against lidar-derived variables mapped at 10 m resolution across the forest of Blois and used that spatially-explicit information together with hourly temperature records from the local

weather station to then predict sub-canopy temperature at 10 m resolution and every hour. Finally, we generated species response curve against the buffering effect of the canopy to rank species from the ones that prefer buffered microclimates to the ones that prefer amplified microclimates.

Scientific production. More than 20 scientific papers related to the project have been published in peer-reviewed journals. The key findings summarized above have been published in 4 journals (*Journal of Vegetation Science*, *Methods in Ecology and Evolution*, *Remote Sensing of Environment* et *Ecology Letters*). We also advertised those key findings in several international and national conferences. Most important, we participated to several outreach activities to disseminate the main findings of the project, of which a 8-min movie filmed by Pierre de Parscau in collaboration with CNRS Images and the journal Le Monde: https://images.cnrs.fr/video/7757

Illustration. Map of maximum air temperature in the understory during summer 2021 (from June to September): at 1 m height and at 10 m resolution across the forest of Blois. Maximum air temperature from a neighbouring weather station (macroclimate) during the same period is 24°C while the maximum air temperature in the understory varies from 210C to 30°C. Source: Eva Gril.

Project facts. The IMPRINT project is coordinated by Jonathan Lenoir. It involves a young team of 9 members belonging to the research unit « Ecologie et dynamique des systèmes anthropisés » (EDYSAN, UMR CNRS 7058), including the PI, one PhD student (Eva Gril), four lecturers (Boris Brasseur, Marianne Laslier, Vincent Le Roux, Ronan Marrec), two research engineers (Emilie Gallet-Moron, Fabien Spicher) and one administrative manager (Franck Krawczyk). The project started in October 2019 and lasted 54 months. It was funded by the ANR: 299 948 € for a total cost of 804 454 €.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

***Maximum 5 pages**. On donne ci-dessous des indications sur le contenu possible du mémoire. Ce mémoire peut être accompagné de rapports annexes plus détaillés.*

Le mémoire scientifique couvre la totalité de la durée du projet. Il doit présenter une synthèse auto-suffisante rappelant les objectifs, le travail réalisé et les résultats obtenus mis en perspective avec les attentes initiales et l'état de l'art. C'est un document d'un format semblable à celui des articles scientifiques ou des monographies. Il doit refléter le caractère collectif de l'effort fait par les partenaires au cours du projet. Le coordinateur prépare ce rapport sur la base des contributions de tous les partenaires. Une version préliminaire en est soumise à l'ANR pour la revue de fin de projet.

Un mémoire scientifique signalé comme confidentiel ne sera pas diffusé. Justifier brièvement la raison de la confidentialité demandée. Les mémoires non confidentiels seront susceptibles d'être diffusés par l'ANR, notamment via les archives ouvertes http://hal.archives-ouvertes.fr.

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public.

Les températures en sous-bois, telles que ressenties par les espèces du sous-bois, sont différentes des températures mesurées pas les postes météo, généralement situés en milieu ouvert et exposés aux vents dominants (p. ex. aérodromes). La frondaison des arbres lisse les extrêmes (journaliers et mensuels) avec des maximums plus frais et des minimums plus chauds à l'intérieur des forêts denses. Les modèles de distribution d'espèce, couramment utilisés pour prédire la redistribution du vivant en contexte de réchauffement climatique, sont habituellement calibrés sur les températures issues des postes météo, ce qui est problématique pour les espèces du sous-bois puisque ces modèles ignorent l'effet lissage ou tampon de la canopée sur les températures. L'objectif du projet IMPRINT est d'intégrer ces processus microclimatiques dans les modèles de distribution des espèces de la sous-trame boisée et d'en étudier les conséquences potentielles sur la redistribution en contexte de réchauffement global. Les retombées au niveau sociétal impliquent une potentielle remise en question des stratégies de gestion forestière pour assurer le maintien de la fonctionnalité des microclimats forestiers. Afin de lever ce verrou scientifique, nous avons utilisé : (i) des micro-capteurs de température qui ont mesuré en continu le microclimat sous la canopée forestière ; (ii) des données de températures issues d'un réseau national de postes météo permanents pour pouvoir les coupler aux données issues des micro-capteurs ; et (iii) des images 3D à très haute définition acquises par la technologie lidar dans le but de spatialiser finement les microclimats forestiers. Par des approches statistiques corrélatives, nous avons développé une méthode simple et parcimonieuse qui consiste à modéliser deux paramètres clés. Le premier quantifie l'effet « tampon » ou « amplificateur » du couvert végétal et peut-être modélisé en fonction de variables, obtenues à l'aide du lidar, qui décrivent la structure 3D du couvert. Le second dépend uniquement des conditions climatiques régionales. Une fois ces deux paramètres connus en tout point de l'espace et connaissant la température mesurée heure par heure au sein des postes météo, on injecte ces trois informations dans une équation de transfert pour spatialiser les températures du sous-bois à fine résolution

spatiotemporelle (p. ex. à 10 m de résolution et au pas de temps horaire). A partir de séries de températures de l'air et d'inventaires botaniques sur 157 placettes disposées dans 3 forêts (Aigoual, Blois, Mormal), nous avons montré que l'on ne peut pas prédire la température du sous-bois par bio-indication. Nous avons donc utilisé notre méthode de modélisation de l'effet tampon du couvert pour spatialiser la température du sous-bois à une résolution de 10 m en forêt de Blois, à l'aide de données lidar. Enfin, nous avons exploré le lien entre distribution des espèces et effet tampon du couvert, nous permettant de classer les espèces depuis celles qui affectionnent des couverts denses et stables thermiquement à celles qui affectionnent des milieux ouverts soumis à de fortes variations thermiques. Plus de 20 articles en lien avec le projet ont été publiés dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture, dont 4 qui présentent les résultats majeurs du projet évoqués ci-dessus (*Journal of Vegetation Science*, *Methods in Ecology and Evolution*, *Remote Sensing of Environment* et *Ecology Letters*). Nous avons présenté les résultats du projet à de nombreuses reprises dans des colloques nationaux et internationaux mais aussi et surtout auprès du grand public au travers de nombreuses actions de médiation, dont la réalisation d'une vidéo de 8 min réalisée par Pierre de Parscau en partenariat avec CNRS Images et le journal *Le Monde* : https://images.cnrs.fr/video/7757. Le projet IMPRINT est un projet de recherche fondamentale coordonné par Jonathan Lenoir, Chargé de recherche (CR) au Centre national de la recherche scientifique (CNRS), impliquant une jeune équipe de 9 membres de l'Unité mixte de recherche (UMR) « Ecologie et dynamique des systèmes anthropisés » (EDYSAN, UMR CNRS 7058). Le projet a commencé en octobre 2019 et a duré 54 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 299 948 € pour un coût global de l'ordre de 804 454 €.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE

Présenter les enjeux initiaux du projet, la problématique formulée par le projet, et l'état de l'art sur lequel il s'appuie. Présenter leurs éventuelles évolutions pendant la durée du projet (les apports propres au projet sont présentés en C.4).

Les conditions climatiques sont plus clémentes en forêt qu'à découvert. C'est bien connu : « *il y fait plus frais la journée mais plus chaud la nuit !* ». Les fluctuations de températures sont lissées sous le couvert forestier, avec des températures maximales qui sont réduites de 4°C, en moyenne, tandis que les températures minimales sont augmentées de 1°C, en moyenne (De Frenne *et al.* 2019). Au niveau mondial, la température terrestre est obtenue à partir de stations météorologiques, ou postes météo, standardisées et mesurant la température à une hauteur de 1,5 à 2 m au-dessus du sol, en milieu ouvert et généralement dans des zones soumises aux vents dominants (De Frenne & Verheyen 2016). Cette température est ensuite interpolée pour produire des grilles climatiques à grande échelle, avec une maille ou résolution de 1 km² ou plus (Abatzoglou *et al.* 2018, Fick & Hijmans 2017, Karger *et al.* 2017). Cependant, les conditions thermiques telles que ressenties par les êtres vivants au sein de leurs habitats sont très hétérogènes sur une surface de 1 km² du fait, justement, de l'hétérogénéité spatiale dans la distribution de ces habitats (Lenoir *et al.* 2013). En outre, les postes météo ne mesurent pas les conditions climatiques près du sol ou sous les arbres, où réside la majorité de la biodiversité terrestre. Nous appelons cette température mesurée par les postes météo, ou interpolée sur des grilles climatiques à large échelle, la température « macroclimatique », par opposition à la température « microclimatique » locale dans un habitat d'intérêt.

Le microclimat englobe tous les paramètres climatiques tels que le vent, le rayonnement solaire, ou l'humidité relative (Bramer *et al.* 2018). Cependant, dans le cadre du projet IMPRINT, nous nous sommes uniquement concentrés sur un paramètre essentiel pour la distribution du vivant : la température. Initialement, nous avions prévu de nous intéresser à la fois à la température et à l'humidité relative. Néanmoins, le coût très élevé des sondes microclimatiques mesurant à la fois la température et l'humidité relative, ainsi que la faible fiabilité des mesures de l'humidité de l'air et du sol, nous a amené à concentrer nos moyens et nos efforts sur la température de l'air et du sol. Sur la base de cet état de l'art, l'enjeu du projet IMPRINT est de modéliser à fine résolution spatiale et temporelle les conditions thermiques qui règnent sous la frondaison des forêts.

Cet enjeu de modélisation des températures sous le couvert forestier est lié à une problématique majeure dans le contexte actuel des changements climatiques, qui est d'améliorer et d'affiner les prédictions issues des modèles de redistribution du vivant en réponse à ces changements globaux. Les modèles de distribution d'espèces ou modèles de niche (Guisan & Zimmermann 2000), couramment utilisés pour prédire la redistribution du vivant en contexte de changements climatiques, sont habituellement calibrés sur les températures macroclimatiques mais ignorent les températures microclimatiques réellement ressenties au sein de l'habitat de l'espèce (Lembrechts *et al.* 2019, Lenoir *et al.* 2017). Pourtant, comme évoqué dans le paragraphe précédent, le microclimat ressenti par de nombreux organismes peut être très différent du macroclimat régional, surtout au sein des habitats forestiers dont la sylviculture peut servir de médiateur entre microclimat et macroclimat. L'objectif ultime du projet IMPRINT est de montrer comment le microclimat forestier affecte les prédictions de redistribution de la biodiversité de la sous-trame boisée en contexte de réchauffement global et ce par rapport aux modèles de niche classiques basés sur le macroclimat uniquement.

C.3 MATERIELS ET METHODES

Pour satisfaire l'objectif principal du projet IMPRINT, l'une des tâches principales du projet a été de modéliser les microclimats forestiers. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des séries temporelles de températures macroclimatiques issues de postes météo standardisés situés hors forêts (cf. macroclimat) et sur des séries temporelles de températures microclimatiques enregistrées à l'aide de micro-capteurs disposés sous le couvert forestier et à proximité des postes météo normés pour pouvoir s'y raccorder facilement. Il s'agit de l'une des originalités ou innovations méthodologiques du projet qui a consisté à faire un appariement, au pas de temps horaire, entre des séries temporelles microclimatiques et des séries temporelles macroclimatiques qui répondent au standard international de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Cet appariement permet de s'appuyer sur la haute résolution temporelle des données fournies par les postes météo du réseau Météo France. La seconde innovation méthodologique du projet a été de combiner cet appariement à fine résolution temporelle entre microclimat et macroclimat avec des données issues de la technologie lidar, une technique de télédétection par laser, qui permet de scanner l'environnement 3D des forêts en Ultra haute définition (UHD) spatiale.

Le projet se concentre sur les forêts tempérées feuillues du territoire français. Ces forêts présentent une forte saisonnalité dans le couvert arboré et donc une forte saisonnalité dans la dynamique d'évolution des conditions microclimatiques sous couvert. Deux niveaux (Niveaux I & II) d'échantillonnage ont été réalisés sur la durée du projet. Le premier niveau (Niveau I) s'appuie sur le Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR) créé en 1992 par l'Office national des forêts (ONF) (**Fig. 1**). Ce réseau permet d'accéder à un large panel de conditions macroclimatiques et de types de forêts de production en France, ainsi qu'à de nombreuses données accumulées au cours des dernières décennies sur un total de 102 placettes permanentes, dont 13 sont équipées de postes météo standardisés situés hors couvert forestier mais à proximité des massifs forestiers. Sur les 102 placettes du réseau, 50 sont situées dans des forêts feuillues et ont été équipées de capteurs TMS4 de la marque TOMST®. Chacune des 50 placettes a été équipée de deux capteurs TMS4 suivant un dispositif apparié avec un capteur TMS4 situé sous le couvert forestier et au sein de la placette RENECOFOR et un autre capteur TMS4 situé à proximité mais hors couvert forestier. Les capteurs TMS4 ont été achetés dès mars 2020 sur le budget IMPRINT et envoyés par voie postale aux différents agents de l'ONF, le tout accompagné d'un protocole d'installation sur le terrain (voir document PDF joint au rapport final et intitulé « Protocole_IMPRINT_Niveau_I.pdf »). A l'automne 2023, nous avons demandé aux agents de l'ONF de nous renvoyer par voie postale l'ensemble des 100 capteurs TMS4. Les données ont été téléchargées et sont désormais sauvegardées sur un serveur local ainsi que sur la plateforme MyCore du CNRS.

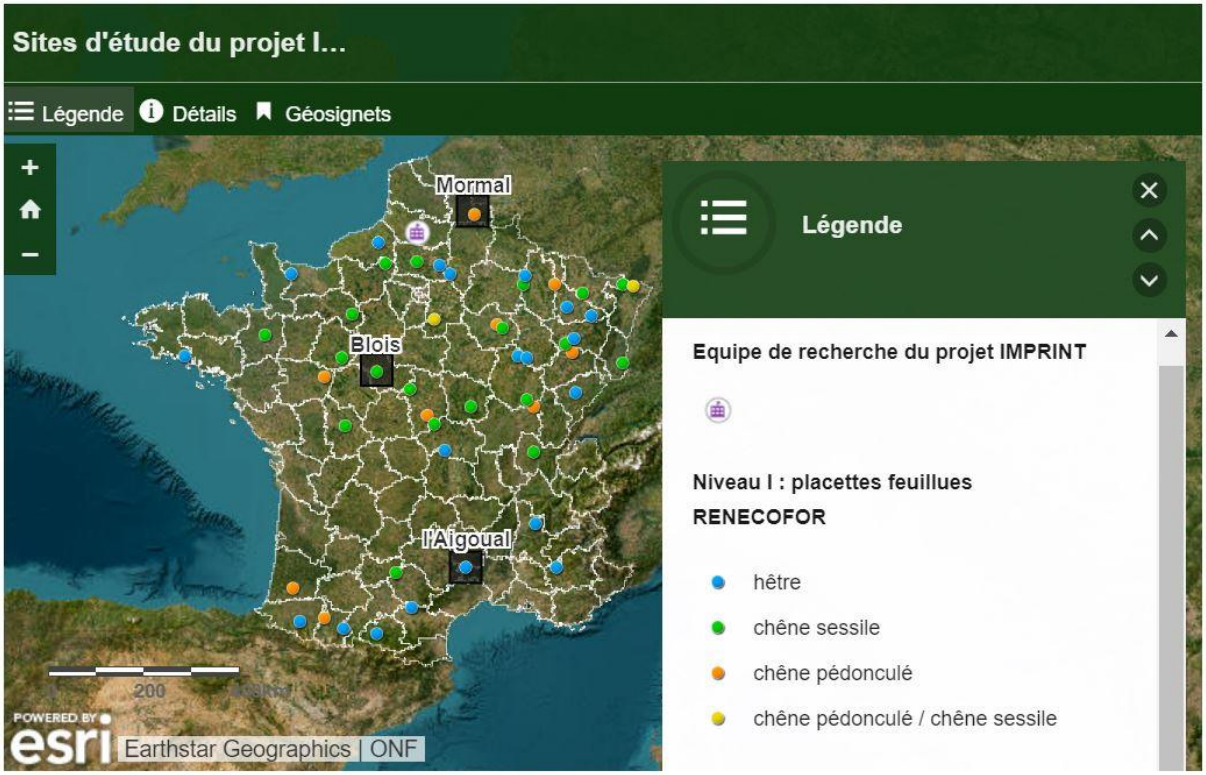


Figure 1 : Zone d'étude du projet IMPRINT (https://microclimat.cnrs.fr/zones-detude/) avec les deux niveaux de suivi du microclimat : les placettes permanentes feuillues du dispositif RENECOFOR (Niveau I) et les trois forêts domaniales de Mormal, Blois et l'Aigoual (Niveau II).

Le second niveau d'échantillonnage (Niveau II) consiste en un zoom (**Fig. 2**) sur trois forêts domaniales équipées d'une placette RENECOFOR (cf. Niveau I) : Mormal, Blois et l'Aigoual. Ces trois forêts domaniales, dont deux forêts de plaine (Mormal et Blois) et une forêt de montagne (l'Aigoual), ont été choisies pour leurs différentes influences biogéographiques : respectivement continentale, océanique et méditerranéenne. De plus, ces forêts ont une station météorologique à leur abord (répondant au standard Météo France, en zone ouverte mais à proximité immédiate de la forêt) enregistrant les conditions climatiques depuis 1995. Sur chacune des trois forêts domaniales, nous avons initialement installé 60 placettes de suivi le long d'un gradient de lumière, depuis des parcelles de peuplements denses et âgés jusqu'à des parcelles de stades plus jeunes (semis, perchis, gaulis) voire complètement ouvertes, par exemple des clairières ou des coupes d'ensemencement. Chacune des 180 placettes a été équipée de deux capteurs de la marque HOBO®, dont un capteur air adossé au tronc d'un arbre, face Nord, à 1 m au-dessus du sol et un capteur sol situé à environ 8 cm dans le sol et au pied de l'arbre porteur du capteur air. Les capteurs ont été achetés dès décembre 2019 et ont été installés, avec des abris en PVC blanc que nous avons nous-mêmes fabriqués pour les capteurs airs, lors de la première campagne de terrain réalisée à l'été 2020. Avant la mise en place des capteurs (Niveaux I et II), ils ont tous été inter-calibrés en janvier 2020, sur une gamme de température allant de –20°C à +50°C, dans l'optique de corriger d'éventuelles déviations. A noter que nous avons subit des pertes de capteurs (vandalisme et dégâts de sangliers) faisant chuter le nombre de placettes à 157 en fin de projet (**Fig. 2**).

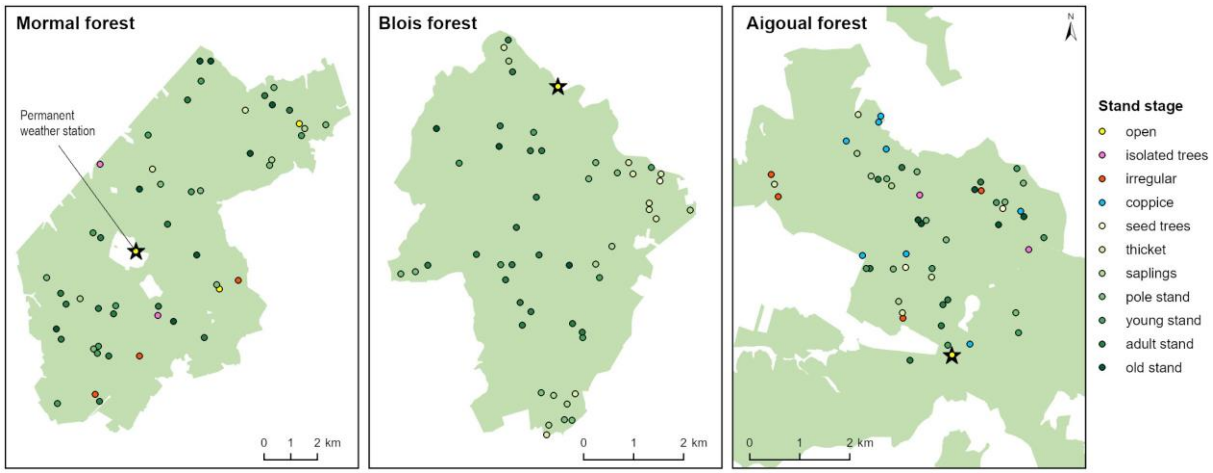


Figure 2 : Zoom sur les trois forêts domaniales étudiées (Mormal, Blois, Aigoual) et localisation des 157 placettes de suivi des microclimats forestiers sur lesquelles ont été installées des capteurs de températures (air et sol) de la marque HOBO®. Les couleurs indiquent les différents stades de peuplements, depuis des stades jeunes et très ouverts à des stades âgés, denses et matures, ceci afin de couvrir un gradient de lumière au sein des trois forêts étudiées.

Pour ce qui est de la collecte des données sur les 180 placettes initialement installées dans le second niveau d'échantillonnage (voir document PDF joint au rapport final et intitulé « Protocole_IMPRINT_Niveau_II.pdf »), elle s'est étalée de 2020 à 2023 avec plusieurs campagnes de terrain financées sur le budget IMPRINT. En plus de la pose des capteurs air et sol de la marque HOBO®, à l'été 2020 lors de la mise en place des placettes, nous avons réalisé des inventaires dendrométriques (diamètre, hauteur, surface terrière), des estimations de couverture de la canopée (photos hémisphériques et mesures au densiomètre) et des

prélèvements des dix premiers centimètres de sol pour calculer le pH du sol en laboratoire. La seconde campagne de collecte de données a eu lieu du printemps à l'été 2021 et a consisté à réaliser des inventaires floristiques complets des espèces végétales vasculaires mais aussi des espèces de bryophytes (mousses et hépatiques, non prévues initialement) présentent dans un rayon de 11,3 m autour du capteur central, c'est-à-dire sur une surface de 400 m^2. Pendant ces 10 semaines de terrain, nous en avons profité pour télécharger les données de températures déjà enregistrées par les capteurs mais nous avons fait face à un problème de piles défectueuses sur une grande majorité de capteurs, ce qui a conduit à d'importantes pertes de données. Au cours de cette seconde campagne, 2 semaines de missions supplémentaires ont été consacrées à la pose et à la dépose de pots pièges sur les 60 placettes de la forêt domaniale de Mormal, dans le but de réaliser l'inventaire des arthropodes du sol. La troisième campagne de collecte de données a eu lieu du printemps à l'été 2022 et a essentiellement consisté en la collecte des données de températures, campagne de collecte plus fructueuse cette fois-ci, mais aussi à la pose et à la dépose de pots pièges sur les 60 placettes de la forêt domaniale de Blois. A noter que nous n'avons pas réalisé le piégeage des arthropodes du sol en forêt domaniale de l'Aigoual par manque de temps et de moyen mais aussi du fait de complications administratives pour obtenir des autorisations de piégeage dans le Parc national des Cévennes (PNC) couvert par notre zone d'étude. Les identifications des arthropodes du sol, au niveau espèce pour les carabes, les scarabées bousiers, les araignées, les opilions et les cloportes et au niveau de la famille pour d'autres groupes, ont été effectuées en laboratoire entre 2021 et 2023. Enfin, la quatrième et dernière campagne de collecte sur le terrain a eu lieu entre l'été et l'automne 2023 pour désinstaller et récupérer l'ensemble des capteurs de température (air et sol), ainsi que leurs abris pour les capteurs de température de l'air. Nous en avons profité pour réaliser des descriptions d'humus, non prévues initialement, sur chaque placette encore équipée de capteurs de températures à la fin du projet. L'ensemble des données collectées sur le second niveau d'échantillonnage sont actuellement organisées dans une base de données géoréférencée PostgreSQL et sauvegardée sur les serveurs de l'UPJV (client NextCloud). Nous sommes actuellement en train de préparer des extractions à téléverser sur l'entrepôt de données InDoRES. Pour ce qui est des données de températures, elles sont également sauvegardées dans la base de données internationale SoilTemp (Lembrechts *et al.* 2020, 2022).

Entre octobre 2020 et mars 2021, nous avons également rédigé un cahier des charges et lancé un appel d'offre, via la plateforme PUMA du CNRS (voir le document PDF du cahier des clauses techniques joint au rapport final et intitulé « CCT_LiDAR_IMPRINT.pdf »), pour sous-traiter le survol et l'acquisition des données lidar sur les 3 forêts domaniales du projet (Mormal, Blois et l'Aigoual). A l'issue de la procédure d'évaluation des 6 offres reçues suite à notre appel d'offre, nous avons sélectionné la société ALTOA qui a réalisé le survol lidar des 3 forêts domaniales au cours de l'été 2021 (voir le rapport de mission au format PDF joint au rapport final et intitulé « Rapport_mission_ALTOA.pdf »). Les données ont été prétraitées par la société ALTOA et la livraison des données a été effectuée en Octobre 2021 (voir livrables N°2 et 3 dans la liste des livrables en section D). Ces données lidar financées sur le budget IMPRINT sont actuellement stockées sur un serveur local avec une sauvegarde supplémentaire sur la plateforme Nextcloud de l'UPJV. Nous avons également sécurisé les données brutes de nos acquisitions lidar en les partageants avec l'équipe de Tommaso Jucker qui est en train de monter une base de données globale : *The Global Canopy Atlas*.

Pour plus d'informations concernant l'inter-calibration des capteurs et la collecte des données, voir le site Internet du projet : https://microclimat.cnrs.fr/collecte-de-donnees/

Pour des illustrations des campagnes de terrain (**Fig. 3**), voir la rubrique « Galerie de photos » du site Internet du projet : https://microclimat.cnrs.fr/galerie-photo/

Figure 3 : Exemples de spécimens d'espèces de mousses identifiées sur le terrain.

C.4 RESULTATS OBTENUS

Positionner les résultats par rapports aux livrables du projet et aux publications, brevets etc. Revisiter l'état de l'art et les enjeux à la fin du projet.

Le projet ayant débuté avec la pandémie de COVID19, l'ensemble de notre calendrier de livrables (voir tableau en section D) a été décalé de 4 mois. Nous avions initialement prévu de débuter l'installation des placettes et la pose des capteurs de température sur nos trois sites (Niveau II) dès mars 2020, date de début de la période de confinement. L'installation des placettes a donc démarré à la sortie du premier confinement, en juillet 2020. Malgré un retard de 4 mois, nous avons réalisé l'ensemble des inventaires de biodiversité sur les trois forêts domaniales (Aigoual, Blois, Mormal), excepté pour les inventaires d'arthropodes du sol en forêt domaniale de l'Aigoual. L'éloignement géographique du site de l'Aigoual et la présence de la majorité de nos placettes de l'Aigoual dans le périmètre du Parc national des Cévennes, nécessitant des autorisations spéciales de prélèvement de matériel vivant, ont rendu difficile la réalisation du piégeage des arthropodes du sol dans ce secteur.

Avant de préciser les résultats les plus marquants du projet, en terme d'avancées scientifiques majeures, il est important de noter que l'ensemble des campagnes de terrain qui se sont étalées entre l'été 2020 et l'automne 2023 ont généré d'importantes quantités de données biotiques, via des inventaires faunistiques (livrable N°4) et floristiques (livrable N°5), mais aussi abiotiques avec la production de séries temporelles des températures de l'air et du sol dans le sous-bois, des mesures de pH du sol et des descriptions des humus forestiers (livrable N°22). En quelques chiffres, sur les 180 placettes du projet (Niveau II), nous avons répertorié 387 taxons de plantes vasculaires et 170 taxons de bryophytes (mousses et hépatiques) avec un total de 69273 données d'abondance/dominance pour les plantes vasculaires et 30 430 données de présence/absence pour les bryophytes. Pour ce qui est des arthropodes du sol, nous avons collecté un total de 41304 individus, dont 18279 individus identifiés à l'espèce, répartis dans 125 familles et dans 21 ordres taxonomiques différents. Parmi les ordres les plus représentés, celui des coléoptères avec 15108 individus collectés. L'ensemble des ces données sont aujourd'hui stockées dans une base géo-référencée et relationnelle, de type PostgreSQL, enregistrée sur le serveur de l'Université de Picardie Jules Verne. Après vérification de la qualité des données, un export de l'ensemble des données est prévu pour stockage sur le portail InDoRES, un entrepôt de données publiques et accessibles en libre accès.

Sur la base de ces données et au stade de la fin administrative du projet, c'est-à-dire au 31 mars 2024, nous avons publié un total de 21 articles dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture, dont 9 articles en tant que porteur, c'est-à-dire impliquant l'un des membres du projet IMPRINT en tant que premier ou dernier auteur de la publication (voir section E2 pour la liste complète des publications). En plus des ces 21 articles, 1 article commentaire, sur invitation éditoriale, a été publié dans la revue *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* (PNAS). Sur l'ensemble de cette production d'articles scientifiques, 5 articles correspondent à des livrables initialement prévus dans la proposition détaillée du projet IMPRINT (voir les livrables N°6, 8, 11, 15 et 16 dans la liste des livrables en section D).

Le premier résultat marquant du projet IMPRINT est la mise au point d'une nouvelle méthode parcimonieuse et flexible, basée sur des approches statistiques corrélatives, qui permet de modéliser les microclimats forestiers à partir de données issues de postes météo classiques et de variables descriptives de la structure du peuplement forestier (livrable N°6) (Gril *et al.* 2023b). Cette méthode de modélisation des microclimats forestiers, publiée dans la revue *Methods in Ecology and Evolution*, s'appuie sur une partie des données du premier niveau d'échantillonnage (Niveau I) et notamment sur les 13 placettes du réseau RENECOFOR qui disposent d'un poste météo à proximité de la forêt mais en zone hors couvert forestier. Il s'agit du premier article en premier auteur publié par Eva Gril, dans le cadre de sa thèse, et qui implique une majeure partie des membres du projet IMPRINT ainsi que plusieurs collaborateurs extérieurs au projet (Montpellier, Suède, Australie).

Le second résultat marquant est la production de cartes à fine résolution spatiotemporelle des températures telles que ressenties dans le sous-bois, obtenues en combinant la méthode de modélisation présentée dans l'article précédent avec la technologie lidar. Très concrètement, nous avons spatialisé les températures du sous-bois à très fine résolutions

spatiales (10 m par 10 m) et temporelles (au pas de temps horaire) (livrables N°7 & N°8) (Gril *et al.* 2023a). Il s'agit d'une véritable preuve de concept, réalisée avec les données acquises sur la forêt domaniale de Blois (Niveau II), qui répond parfaitement à l'enjeu initial du projet IMPRINT, à savoir de modéliser les microclimats forestiers en ultra haute définition (UHD). Ces travaux publiés dans la revue *Remote Sensing of Environment* impliquent des collaborateurs de Montpellier et de Belgique, ainsi que l'ensemble des membres du projet IMPRINT et ont été relayés sur le site Internet du CNRS Ecologie & Environnement, dans la rubrique Actu : https://www.inee.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/microclimat-la-temperature-de-la-foret-en-ultra-hd. A la suite de la publication de cette actualité scientifique, Eva Gril a été interviewée par Alexandra Delbot dans une émission radio de France Culture diffusée le 28 novembre 2023.

Le troisième résultat marquant met à profit la modélisation des microclimats forestiers à fine résolution spatiale pour en appréhender l'impact sur les modèles de distribution des espèces de la sous-trame boisée. Nous avons ainsi mis en évidence que la prise en compte des processus microclimatiques du sous-bois dans les modèles de niche implique non seulement un décalage de l'optimum thermique des espèces de la sous-trame boisée vers des conditions plus fraiches mais aussi une tolérance thermique plus étroite pour ces espèces par rapport à un modèle de niche plus classique basé sur des données de températures issues des postes météo. Cette altération des paramètres d'optimum et de la tolérance thermique dans la niche climatique des espèces entraîne de profondes modifications dans les prédictions de distribution, et donc de redistribution, des espèces du sous-bois (livrables N°15 & N°16) (Haesen *et al.* 2023). Ces résultats ont été publiés dans la revue *Ecology Letters* et font suite à une collaboration très étroite avec Stef Haesen qui est venu passer plusieurs semaines en tant que chercheur invité dans l'unité EDYSAN pour travailler avec Eva Gril, ce qui a conduit à plusieurs publications conjointes (Gril *et al.* 2023a, Haesen *et al.* 2023). Là encore, nous avons répondu à l'un des enjeux initiaux du projet IMPRINT qui était d'améliorer et d'affiner les prédictions issues des modèles de niche des espèces, une problématique majeure dans le contexte actuel des changements climatiques.

Le quatrième résultat marquant suggère que les systèmes existants de valeurs indicatrices des espèces pour bio-indiquer la température à partir de la composition taxonomique des communautés végétales sont inadaptés à la bio-indication des températures microclimatiques telles que ressenties dans le sous-bois (Livrable N°11) (Gril *et al.* 2024). Notre étude, réalisée à partir des données acquises sur les trois forêts domaniales de Blois, Mormal et l'Aigoual (Niveau II), montre que les systèmes de valeurs indicatrices existants et à dire d'expert captent surtout la variabilité inter-massifs, c'est-à-dire des différences macroclimatiques entre massifs, mais pas la variabilité intra-massif liée aux variations du couvert arboré. Cette tendance est non seulement observée chez les espèces de plantes vasculaires mais aussi chez les espèces de bryophytes, un groupe taxonomique non initialement prévu dans le projet. Ces travaux ont été publiés dans la revue *Journal of Vegetation Science*.

Le cinquième résultat marquant du projet IMPRINT est la construction de courbes de réponse des espèces vis-à-vis de l'effet tampon de la canopée forestière, et la détermination d'un indice permettant de classer les espèces végétales du sous-bois (plantes vasculaires et bryophytes) d'un point de vue de leurs préférences microclimatiques (Livrable N°15). Plutôt

que de calibrer des courbes de réponses thermiques, c'est-à-dire vis-à-vis de la température du sous-bois, comme cela est fait traditionnellement, nous avons opté pour une approche plus originale et novatrice qui s'appuie sur le premier résultat marquant et notamment sur le paramètre de pente de la relation entre microclimat et macroclimat comme proxy de l'effet tampon de la canopée. Ainsi, nous avons calibré une courbe de réponse des données de présence/absence de chacune des espèces végétales inventoriées sur nos trois massifs d'étude (Niveau II) en fonction de ce paramètre de pente pour en extraire la valeur de l'optimum et ainsi classer nos espèces végétales de celles qui affectionnent le plus les couverts forestiers très tamponnés (peu de fluctuations dans les extrêmes thermiques) à celles qui affectionnent le plus les zones de clairières intra-forestières soumises à de fortes variations thermiques journalières et saisonnières. Ces travaux sont actuellement en cours de révision dans la revue *Journal of Ecology*.

Enfin, en plus de ces cinq résultats les plus marquants du projet IMPRINT, nos travaux ont largement été diffusés auprès de la communauté scientifique et du grand public via de nombreuses participations à des congrès et de nombreuses actions de médiations (**Fig. 4**). Pour une liste des publications et communications issues du projet, voir la section E2 ainsi que la rubrique dédiée sur le site Internet du projet : https://microclimat.cnrs.fr/publications/

Figure 4 : Quelques exemples illustrés d'actions de vulgarisation et de médiation scientifique autour des résultats du projet IMPRINT. Composition et captures d'écran réalisés par Eva Gril.

C.5 Discussion

Discussion sur le degré de réalisation des objectifs initiaux, les verrous restant à franchir, les ruptures, les élargissements possibles, les perspectives ouvertes par le projet, l'impact scientifique, industriel ou sociétal des résultats.

A la fin de la période administrative, le 31 mars 2024, les principaux objectifs du projet IMPRINT ont largement été atteint avec non seulement la mise au point d'une méthode simple mais efficace de modélisation des températures telles qu'elles sont réellement ressenties par les espèces du sous-bois, et cela en ultra haute définition spatiale et temporelle, mais aussi la mise en évidence que ce type de données est primordial pour améliorer les prédictions issues des modèles de distribution des espèces du sous-bois, notamment en réponse aux changements climatiques.

Parmi les 16 livrables initialement listés dans la proposition détaillée du projet IMPRINT (voir section D), seulement cinq livrables (voir les livrables N°9, 10, 12, 13 et 14 en jaune doré dans le tableau de la section D) n'ont pas été livrés à ce stade de fin administrative du projet (31 mars 2024). Trois de ces cinq livrables concernent l'analyse fonctionnelle des données de biodiversité qui n'a pas encore été réalisée mais qui pourra être facilement réalisée à l'avenir étant donné que les données de traits de vie sont déjà disponibles pour beaucoup d'espèces, notamment pour beaucoup d'espèces végétales vasculaires. Pour les espèces d'arthropodes du sol, une base de traits de vie est en cours de constitution pour les ordres les mieux décris, par des mesures biométriques réalisées sur les individus piégés. Ces trois livrables ne sont donc pas complétement abandonnés mais reportés à une date ultérieure à la fin administrative du projet. Néanmoins, de nombreux livrables supplémentaires ont été générés (voir la liste des livrables non prévus initialement et inscrits en bleu dans le tableau de la section D) comme la production de données de biodiversité pour certains groupes taxonomiques qui n'étaient pas programmés dans la proposition détaillée du projet IMPRINT, comme c'est le cas avec les bryophytes (livrable N°21), ou bien la production de données sur les descriptions des humus du sol (livrable N°22).

L'impact scientifique du projet IMPRINT est plus que satisfaisant avec la publication de 9 articles scientifiques (voir section E) en lien direct avec les objectifs du projet. Ces 9 publications, dont 4 sont présentées plus haut dans les résultats les plus marquants, impliquent un membre au moins de la jeune équipe IMPRINT qui est positionné en premier ou en dernier auteur dans la liste des auteurs. En plus de la publication d'articles scientifiques, nous avons participé à de nombreuses conférences nationales et internationales en présentant un total de 9 communications scientifiques sur la durée du projet. En ce qui concerne l'impact sociétal du projet, il se mesure par la diffusion de nos travaux à un très large public incluant des professionnels, des élèves issus d'écoles primaires, de collèges et de lycées, mais aussi monsieur et madame tout le monde, avec pas moins de 11 conférences grand public, 24 actions de médiations et la publication de 5 articles de vulgarisation (voir la liste détaillée en section E2). La meilleure illustration de cet impact sociétal de nos recherches est la diffusion d'un reportage de 8 min réalisé par Pierre de Parscau en partenariat avec CNRS Images et le journal *Le Monde* : https://images.cnrs.fr/video/7757. Cette vidéo résume et illustre parfaitement le projet IMPRINT.

Parmi les perspectives ouvertes par le projet, celles d'une cartographie des microclimats forestiers en ultra haute définition grâce à la disponibilité future des données issues du lidar HD de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

Le verrou principal restant à franchir à la lumière du projet IMPRINT est celui de la modélisation du paramètre d'humidité atmosphérique de l'air qui est l'autre élément clé, avec la température, qui caractérisent les conditions microclimatiques des sous-bois, d'autant que l'humidité atmosphérique de l'air influence les conditions de températures dans les sous-bois. La principale barrière associée à ce verrou est celle du coût et de la qualité des micro-capteurs d'humidité de l'air qui sont actuellement disponible sur le marché. Néanmoins, les progrès technologiques en matière de capteurs en environnement laissent à penser que ce type de verrou pourra facilement être levé dans les années à venir, ce qui offre de belles perspectives pour la suite du projet IMPRINT, notamment grâce aux nouvelles opportunités de collaborations et aux nouveaux projets initiés pendant la durée du projet IMPRINT (voir section E3 pour plus de détails).

C.6 CONCLUSIONS

En conclusion, les principaux objectifs du projet IMPRINT ont été atteints et même largement dépassés en terme d'impact sociétal (voir section E2). Nos travaux montrent l'importance des processus microclimatiques en forêt pour mieux comprendre et appréhender les changements de distribution en cours et à venir, en réponses aux changements climatiques, des espèces qui vivent dans le sous-bois.

C.7 REFERENCES

Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A. & Hegewisch, K.C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Sci. Data*, 5, 170191.

Bramer, I., Anderson, B.J., Bennie, J., Bladon, A.J., De Frenne, P., Hemming, D., *et al.* (2018). Chapter Three - Advances in Monitoring and Modelling Climate at Ecologically Relevant Scales. In: *Advances in Ecological Research*, Next Generation Biomonitoring: Part 1 (eds. Bohan, D.A., Dumbrell, A.J., Woodward, G. & Jackson, M.). Academic Press, pp. 101–161.

De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Scheffers, B.R., Hylander, K., Luoto, M., *et al.* (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nat. Ecol. Evol.*, 3, 744–749.

De Frenne, P.D. & Verheyen, K. (2016). Weather stations lack forest data. *Science*, 351, 234–234.

Fick, S.E. & Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 37, 4302–4315.

Gril, E., Laslier, M., Gallet-Moron, E., Durrieu, S., Spicher, F., Le Roux, V., *et al.* (2023a). Using airborne LiDAR to map forest microclimate temperature buffering or amplification. *Remote Sens. Environ.*, 298, 113820.

Gril, E., Spicher, F., Greiser, C., Ashcroft, M.B., Pincebourde, S., Durrieu, S., *et al.* (2023b). Slope and equilibrium: A parsimonious and flexible approach to model microclimate. *Methods Ecol. Evol.*, 14, 885–897.

Gril, E., Spicher, F., Vanderpoorten, A., Vital, G., Brasseur, B., Gallet-Moron, E., *et al.* (2024). Ecological indicator values of understorey plants perform poorly to infer forest microclimate temperature. *J. Veg. Sci.*, 35, e13241.

Guisan, A. & Zimmermann, N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.*, 135, 147–186.

Haesen, S., Lenoir, J., Gril, E., De Frenne, P., Lembrechts, J.J., Kopecký, M., *et al.* (2023). Microclimate reveals the true thermal niche of forest plant species. *Ecol. Lett.*, 26, 2043–2055.

Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., *et al.* (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Sci. Data*, 4, 170122.

Lembrechts, J.J., Aalto, J., Ashcroft, M.B., De Frenne, P., Kopecký, M., Lenoir, J., *et al.* (2020). SoilTemp: A global database of near-surface temperature. *Glob. Change Biol.*, 26, 6616–6629.

Lembrechts, J.J., van den Hoogen, J., Aalto, J., Ashcroft, M.B., De Frenne, P., Kemppinen, J., *et al.* (2022). Global maps of soil temperature. *Glob. Change Biol.*, 28, 3110–3144.

Lembrechts, J.J., Nijs, I. & Lenoir, J. (2019). Incorporating microclimate into species distribution models. *Ecography*.

Lenoir, J., Graae, B.J., Aarrestad, P.A., Alsos, I.G., Armbruster, W.S., Austrheim, G., *et al.* (2013). Local temperatures inferred from plant communities suggest strong spatial buffering of climate warming across Northern Europe. *Glob. Change Biol.*, 19, 1470–1481.

Lenoir, J., Hattab, T. & Pierre, G. (2017). Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: implications for species redistribution. *Ecography*, 40, 253–266.

D LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

Date de livraison	**N°**	**Titre** (tel qu'il était écris, en anglais, dans la proposition détaillée)	**Nature** (rapport, logiciel, prototype, données, …)	**Partenaires** (souligner le responsable)	**Commentaires**
Avril 2020	1	Creation of a geo-database to store all the data generated by the project	Base de données	EDYSAN	Base de données SIG crée en avril 2020 sous le logiciel ArcGIS avec réalisation d'une carte interactive des zones d'étude du projet visible sur le site internet du projet IMPRINT (voir livrable N°17). Cette base SIG est complétée par une base PostgreSQL stockée sur le serveur UPJV. La base est continuellement alimentée des données du projet depuis sa création et une extraction des données est prévue en fin de projet pour stockage et publication en libre accès sur le portail InDoRES.
Octobre 2021	2	Digital terrain models (DTMs) for all three studied temperate deciduous forests	Données	EDYSAN	Données issues d'un LiDAR aéroporté. Survol LiDAR effectué avec succès par la société ALTOA (juin-août 2021) sur les trois forêts étudiées (Aigoual, Blois et Mormal). Ces données sont sauvegardées sur le serveur de l'UPJV.
Octobre 2021	3	Canopy height models (CHMs) for all three studied temperate deciduous forests	Données	EDYSAN	Données issues d'un LiDAR aéroporté. Survol LiDAR effectué avec succès par la société ALTOA (juin-août 2021) sur les trois forêts étudiées (Aigoual, Blois et Mormal). Ces données sont sauvegardées sur le serveur de l'UPJV.
2023	4	A species × site matrix for every ground-dwelling arthropod group (ground beetles, millipedes, etc.)	Données	EDYSAN	Données faunistiques issues de deux campagnes de piégeages successives (pots pièges Barber) par site d'étude. Les données ont été acquises entre juin et aout 2021 sur 60 placettes de la forêt de Mormal et entre juin et aout 2022 sur 60 placettes de la forêt de Blois. La forêt de l'Aigoual n'a pas été inventoriée pour la faune carabique faute de temps et de moyens mais aussi pour des raisons administratives liées à l'obtention des autorisations de piégeage auprès du Parc national des Cévennes. Ces données sont stockées dans la base postgreSQL sur le serveur UPJV.

Date de livraison	**N°**	**Titre** (tel qu'il était écris, en anglais, dans la proposition détaillée)	**Nature** (rapport, logiciel, prototype, données, …)	**Partenaires** (souligner le responsable)	**Commentaires**
2022	5	A species × site matrix for vascular plants	Données	EDYSAN	Données floristiques issues des inventaires botaniques qui ont eu lieu entre juin et août 2021 sur un total de 180 placettes disposées sur les 3 forêts du projet (Aigoual, Blois et Mormal). Ces données sont stockées dans la base postgreSQL sur le serveur UPJV.
Mars 2023	6	A methodological paper presenting the approach to assess microclimatic processes	Article scientifique	EDYSAN	Publication du premier article de la thèse d'Eva Gril dans la revue *Methods in Ecology and Evolution* et intitulé « Slope and equilibrium: A parsimonious and flexible approach to model microclimate ».
Décembre 2023	7	Maps of monthly microclimatic conditions during 2020-2021	Carte	EDYSAN	Carte de prédiction du microclimat forestier actuel à une résolution de 10 m, disponible uniquement pour la forêt de Blois.
Décembre 2023	8	A research paper on modeling sub-canopy microclimate in temperate deciduous forests	Article scientifique	EDYSAN	Publication du second article de la thèse d'Eva Gril dans la revue *Remote Sensing of Environment* et intitulé « Using airborne LiDAR to map forest microclimate temperature buffering or amplification ».
Non livré	9	A species × trait matrix for every ground-dwelling arthropod group (ground beetles, millipedes, etc.)	Données	EDYSAN	Livrable reporté à une date ultérieure et consistant à produire une matrice des données de traits de vie des principales espèces de carabes inventoriées sur le terrain. A noter toutefois qu'une base de traits de vie est en cours d'élaboration via des mesures biométriques sur un grand nombre d'espèces d'arthropodes du sol.
Non livré	10	A species × trait matrix for vascular plants	Données	EDYSAN	Livrable reporté à une date ultérieure et consistant à produire une matrice des données de traits de vie des principales espèces végétales vasculaires inventoriées sur le terrain.
Mars 2024	11	A first research paper on the link between microclimate and (taxonomic) diversity	Article scientifique	EDYSAN	Publication du troisième article de la thèse d'Eva Gril dans la revue *Journal of Vegetation Science* et intitulé « Ecological indicator values ofunderstory plants perform poorly to infer forest microclimate temperature ».
Non livré	12	A second research paper on the link between microclimate and (functional) diversity	Article scientifique	EDYSAN	Livrable reporté à une date ultérieure faute de temps pour analyser les données sur le plan de la diversité fonctionnelle.

Date de livraison	**N°**	**Titre** (tel qu'il était écris, en anglais, dans la proposition détaillée)	**Nature** (rapport, logiciel, prototype, données, …)	**Partenaires** (souligner le responsable)	**Commentaires**
Non livré	13	Maps of monthly sub-canopy temperatures from 1995 onwards	Carte	EDYSAN	Livrable abandonné et impossible à livrer faute de données lidar permettant de décrire la structure 3D des peuplements forestiers à une période antérieure.
Non livré	14	A research paper on reconstructing long-term sub-canopy temperatures	Article scientifique	EDYSAN	Livrable abandonné faute de données lidar permettant de décrire la structure 3D des peuplements forestiers à une période antérieure.
2024	15	A research paper testing the impact of microclimate on species' response curves along temperature	Article scientifique	EDYSAN	Quatrième article de la thèse d'Eva Gril révisé et resoumis à la revue *Journal of Ecology* et intitulé « Responses of vascular plants and bryophytes to forest microclimate buffering ».
Décembre 2023	16	A research paper testing the impact of microclimate on species distribution changes	Article scientifique	EDYSAN	Article publié dans la revue *Ecology Letters* et intitulé « Microclimate reveals the true thermal niche of forest plant species ».
Juin 2020	17	Creation of a website for the project	Site Internet	EDYSAN	Livrable non prévu initialement mais ayant conduit à la création d'un site Internet dès le début du projet et pendant la période de confinement suite à la pandémie de COVID19. Le site Internet est régulièrement alimenté pour diffuser les travaux réalisés sur le projet IMPRINT.
Juin 2020	18	Creation of a Twitter/X account to share news on the project	Compte X/Twitter	EDYSAN	Livrable non prévu initialement mais ayant conduit à la création d'un compte Twitter (devenu X) pendant la période de confinement suite à la pandémie de COVID19.
2021	19	A data frame describing forest stand structure of each site (tree diameter, basal area, stand height, etc.) as well as the degree of canopy closure (hemispherical photo and densiometer measurements)	Données	EDYSAN	Livrable non prévu initialement mais ayant conduit à la production d'un jeu de données d'inventaire forestier (diamètre, surface terrière, hauteur dominante, etc.) pour chacune des 180 placettes installées entre juin et août 2020 sur les 3 forêts du projet (Aigoual, Blois et Mormal). Ces données sont stockées dans la base postgreSQL sur le serveur UPJV.
2021	20	A data frame of soil ATP data for each site in the Mormal forest	Données	EDYSAN	Livrable non prévu initialement mais ayant conduit à la production d'un jeu de données sur l'ATP du sol pour les 60 placettes de la forêt de Mormal. Ces données sont stockées dans la base postgreSQL sur le serveur UPJV.

Date de livraison	**N°**	**Titre** (tel qu'il était écris, en anglais, dans la proposition détaillée)	**Nature** (rapport, logiciel, prototype, données, …)	**Partenaires** (souligner le responsable)	**Commentaires**
2022	21	A species × site matrix for mosses (a non-vascular group)	Données	EDYSAN	Livrable non prévu initialement mais ayant conduit à la production d'une matrice de données de composition en espèces de mousses et hépatiques (groupes des bryophytes) pour chacune des 180 placettes inventoriées entre juin et août 2021 sur les 3 forêts du projet (Aigoual, Blois et Mormal). Ces données sont stockées dans la base postgreSQL sur le serveur UPJV.
2024	22	A data frame describing humus quality for each site	Données	EDYSAN	Livrable non prévu initialement mais ayant conduit à la production d'un jeu de données de description des humus forestiers pour chacune des 180 placettes lors du retrait des micro-capteurs de T°C entre août et septembre 2023 sur les 3 forêts du projet (Aigoual, Blois et Mormal). Ces données sont stockées dans la base postgreSQL sur le serveur UPJV.

E IMPACT DU PROJET

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

*Comptabiliser séparément les actions mono-partenaires, impliquant un seul partenaire, et les actions multipartenaires résultant d'un travail en commun. **Attention** : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).*

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	**Revues à comité de lecture**	**12**	**10**
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	0	0
	Communications (conférence)	0	**6**
France	**Revues à comité de lecture**	0	0
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	0	0
	Communications (conférence)	0	**3**
Actions de diffusion	**Articles vulgarisation**	0	**9**
	Conférences vulgarisation	0	**11**
	Autres	0	**31**

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	Non applicable
Brevet internationaux en cours d'obtention	Non applicable
Brevets nationaux obtenus	Non applicable
Brevet nationaux en cours d'obtention	Non applicable
Licences d'exploitation (obtention / cession)	Non applicable
Créations d'entreprises ou essaimage	Non applicable
Nouveaux projets collaboratifs	- Projet MaCCMic (ANR-21-CE32-0012) - ANR SAPS (AAPG2018-2019) CSTI - PC3 MONITOR du PEPR FORESTT
Colloques scientifiques	Organisation d'une journée scientifique franco-belge entre l'équipe française du projet IMPRINT et l'équipe belge du projet ERC StG FORMICA (25 novembre 2021 en forêt de Mormal, Villers-Pol)

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section E en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.

NB : Dans les listes d'articles et de communications fournies ci-dessous, **les noms en gras correspondent aux membres permanents et non-permanents (doctorants, doctorantes et stagiaires) de l'unité EDYSAN**, unique partenaire du projet IMPRINT. Les **noms en gras avec un astérisque*** correspondent aux personnes recrutées et dont le salaire ou la gratification de stage est rémunérée sur le budget du projet IMPRINT.

Liste des publications scientifiques dans des revues internationales à comité de lecture en lien direct avec le projet IMPRINT et porté par EDYSAN (cf. membres de l'unité positionnés en premier et/ou dernier auteur dans la liste), le partenaire unique du projet IMPRINT :

1. **Lenoir**, **Gril***, Durrieu, **Horen**, **Laslier**, Lembrechts, Zellweger, Alleaume, **Brasseur**, **Buridan**t, Dayal, De Frenne, **Gallet-Moron**, **Marrec**, Meeussen, Rocchini, Van Meerbeek & **Decocq** (2022) « *Unveil the unseen: Using LiDAR to capture time-lag dynamics in the herbaceous layer of European temperate forests* ». ***Journal of Ecology***, vol. 110, issue 2, pages 282-300. Lien HAL : https://hal.science/hal-03611977
2. Lembrechts, van den Hoogen, Aalto, Ashcroft, De Frenne, Kemppinen, Kopecký, Luoto, Maclean, […] & **Lenoir** (2022) « *Global maps of soil temperature* ». ***Global Change Biology***, vol. 28, issue 9, pages 3110-3144. Lien HAL : https://hal.science/hal-03518443
3. **Gril***, **Spicher**, Greiser, Ashcroft, Pincebourde, Durrieu, Nicolas, Richard, **Decocq**, **Marrec** & **Lenoir** (2023) « *Slope and equilibrium: A parsimonious and flexible approach to model microclimate* ». ***Methods in Ecology and Evolution***, vol. 14, issue 3, pages 885-897. Lien HAL : https://hal.inrae.fr/MATHNUM/hal-04023168v1
4. **Gril***, **Laslier**, **Gallet-Moron**, Durrieu, **Spicher**, **Le Roux**, **Brasseur**, Haesen, Van Meerbeek, **Decocq**, **Marrec** & **Lenoir** (2023) « *Using airborne LiDAR to map forest microclimate temperature buffering or amplification* ». ***Remote Sensing of Environment***, vol. 298, n°113820. Lien figshare : https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19576423.v1
5. **Laslier**, **Lalechère**, **Gril***, **Ferrer** & **Lenoir** (2023) « *Mapping forest microclimates using Sentinel 1 radar data: insights and complementarity with LiDAR and optical data* ». ***Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXV***, vol. 12727, 127270C. Lien HAL : https://hal.science/hal-04204767
6. **Gril***, **Spicher**, Vanderpoorten, **Vital***, **Brasseur**, **Gallet-Moron**, **Le Roux**, **Decocq**, **Lenoir** & **Marrec** (2024) « *Ecological indicator values of understorey plants perform poorly to infer forest microclimate temperature* ». ***Journal of Vegetation Science***, vol 35, n°e13241. Lien HAL : https://hal.science/EDYSAN/hal-04501902v1
7. **Brusse**, **Lenoir**, Boisset, **Spicher**, **Dubois**, Caro & **Marrec** (2024) « *Mechanistically mapping near-surface temperature in the understory of temperate forests: A validation of the microclima R package against empirical observations* ». ***Agricultural and Forest***

Meteorology, vol. 346, n°109894. Lien HAL : https://hal.univ-lorraine.fr/LAE-UL/hal-04442818v1

8. Michalet, Carcaillet, Delerue, Domec & **Lenoir** (early view) « *Assisted migration in a warmer and drier climate: less climate buffering capacity, less facilitation and more fires at temperate latitudes?* » ***Oikos***, vol XXX, n°e10248. Lien HAL : https://hal.science/hal-04485248
9. **Gril***, **Spicher**, Vanderpoorten, **Gallet-Moron**, **Brasseur**, **Le Roux**, **Laslier**, **Decocq**, **Marrec** & **Lenoir** (under revision) « *Responses of vascular plants and bryophytes to forest microclimate buffering* ». ***Journal of Ecology***, vol. XXX, issue X, pages XXX-XXX. Lien figshare : https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25358488.v2

Liste des publications scientifiques dans des revues internationales à comité de lecture non porté par EDYSAN, le partenaire unique du projet IMPRINT, mais en lien direct avec le projet ou bien qui utilise des données issues du projet IMPRINT, comme la base SoilTemp :

1. Lembrechts, Aalto, Ashcroft, De Frenne, Kopecký, **Lenoir**, Luoto et al. (2020) « *SoilTemp: A global database of near-surface temperature* ». ***Global Change Biology***, vol. 26, issue 11, pages 6616-6629. Lien HAL : https://hal.science/hal-03003135
2. De Frenne, **Lenoir**, Luoto, Scheffers, Zellweger, Aalto, Ashcroft, Christiansen, Decocq, De Pauw, Govaert, Greiser, **Gril***, et al. (2021) « *Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda* ». ***Global Change Biology***, vol 27, issue 11, pages 2279-2297. Lien HAL : https://hal.science/hal-03293490
3. Lembrechts, **Lenoir**, Scheffers & De Frenne (2021) « *Designing countrywide and regional microclimate networks* ». ***Global Ecology and Biogeography***, vol. 30, issue 6, pages 1168-1174. Lien HAL : https://hal.science/hal-03362937
4. Maclean, Duffy, Haesen, Govaert, De Frenne, Vanneste, **Lenoir**, Lembrechts, Rhodes & Van Meerbeek (2021) « *On the measurement of microclimate* ». ***Methods in Ecology and Evolution***, vol. 12, issue 8, pages 1397-1410. Lien HAL : https://hal.science/hal-03362953
5. Haesen, Lembrechts, De Frenne, **Lenoir** et al. (2021) « *ForestTemp – Sub-canopy microclimate temperatures of European forests* ». ***Global Change Biology***, vol 27, issue 23, pages 6307-6319. Lien HAL : https://hal.science/hal-03614155/
6. Haesen, Lembrechts, De Frenne, **Lenoir**, Aalto, Ashcroft, Kopecký, Luoto, Maclean et al. (2023) « *ForestClim – Bioclimatic variables for microclimate temperatures of European forests* ». ***Global Change Biology***, vol 29, issue 11, pages 2886-2892. Lien HAL : https://cnrs.hal.science/EDYSAN/hal-04089003v1
7. Haesen, **Lenoir**, **Gril***, De Frenne, Lembrechts, Kopecký, Macek, Man, Wild & Van Meerbeek (2023) « *Microclimate reveals the true thermal niche of forest plant species* ». ***Ecology Letters***, vol 26, issue 12, pages 2043-2055. Lien figshare : https://doi.org/10.6084/m9.figshare.23277332.v1
8. De Pauw, Depauw, Calders, Caluwaerts, Cousins, De Lombaerde, Diekmann, Frey, **Lenoir**, Meeussen, Orczewska, Plue, **Spicher**, Zellweger, Vangansbeke, Verheye & De Frenne (2023) « *Urban forest microclimates across temperate Europe are shaped by deep edge*

effects and forest structure ». ***Agricultural and Forest Meteorology***, vol. 341, n° 109632. Lien HAL : https://u-picardie.hal.science/hal-04192751

9. De Pauw, Depauw, Calders, Cousins, Decocq, De Lombaerde, Diekmann, Frey, **Lenoir**, Meeussen, Orczewska, Plue, **Spicher**, Zellweger, PVangansbeke, Verheyen & De Frenne (2024) « *Nutrient-demanding and thermophilous plants dominate urban forest-edge vegetation across temperate Europe* » ***Journal of Vegetation Science***, vol 35, n°e13236. Lien HAL : https://hal.science/hal-04477228
10. Beugnon, Le Guyader, Milcu, **Lenoir**, Puissant, Morin & Hättenschwiler (2024) « *Microclimate modulation: An overlooked mechanism influencing the impact of plant diversity on ecosystem functioning* ». ***Global Change Biology***, vol. 30, issue 3, n° e17214. Lien HAL : https://hal.science/EDYSAN/hal-04464876v1
11. De Pauw, Depauw, Cousins, De Lombaerde, Diekmann, Frey, Kwietniowska, **Lenoir**, Meeussen, Orczewska, Plue, **Spicher**, Vanneste, Zellweger, Verheyen, Vangansbeke & De Frenne (early view) « *The urban heat island accelerates litter decomposition through microclimatic warming in temperate urban forests* ». ***Urban Ecosystems***, vol. XXX, issue X, pages XXX-XXX. Lien HAL : https://hal.science/hal-04456490
12. Kempinen, Lembrechts, Van Meerbeek, Carnicer, Chardon, Kardol, **Lenoir** et al. (accepted) « *Microclimate, an important part of ecology and biogeography* ». *Global Ecology and Biogeography*, vol. XXX, issue X, pages XXX-XXX. Lien Zenodo : https://zenodo.org/records/10642977

Autres articles publiés **sur invitation éditoriale** dans des revues scientifiques internationales mais non soumises à un comité de lecture :

1. **Lenoir** (2020) « *Rethinking climate context dependencies in biological terms* ». ***Proceedings of the National Academy of Sciences***, vol. 117, issue 38, pages 23208-23210. Lien HAL : https://hal.science/hal-02997528

Liste des communications orales dans des congrès internationaux :

1. **Spicher**, **Gril***, **Mahier***, Demailly, **Marrec**, **Decocq** & **Lenoir** (2022) « *Of sensors and intercalibrations: The need for standardized protocols and consequences on microclimate studies relying on low-cost temperature sensors* ». ***Microclimate Ecology & Biogeography Conference***, Anvers, Belgique, du 29 août au 1er septembre 2022
2. **Callebaut**, **Lenoir**, **Spicher**, Lemeur & Chehab (2002) « *Using airborne laser scanning to model light and temperatures conditions in the forest understorey* ». **Microclimate Ecology & Biogeography Conference**, Anvers, Belgique, du 29 août au 1er septembre 2022
3. **Laslier**, **Gril***, **Spicher**, Greiser, Ashcroft, De Frenne, Lembrechts, Haesen, Van Meerbeek, **Gallet-Moron**, **Marrec** & **Lenoir** (2022) « *Using airborne laser scanning to interpolate forest microclimate at relevant spatial resolutions* ». ***Microclimate Ecology & Biogeography Conference***, Anvers, Belgique, du 29 août au 1er septembre 2022
4. **Gril***, **Spicher**, Greiser, Ashcroft, Pincebourde, Durrieu, Nicolas, Richard, **Decocq**, **Marrec** & **Lenoir** (2022) « *Keeping your equilibrium in a slope or how to simply model*

microclimate ». ***Microclimate Ecology & Biogeography Conference***, Anvers, Belgique, du 29 août au 1er septembre 2022

5. **Gril***, **Laslier**, **Gallet-Moron**, Durrieu, **Spicher**, **Le Roux**, **Brasseur**, Haesen, Van Meerbeek, **Decocq**, **Marrec** & **Lenoir** (2022) « *Using airborne LiDAR and simple linear models to map forest temperature* ». ***Microclimate PhD symposium***, Gand, Belgique, 5 novembre 2022
6. **Gril***, **Spicher**, Vanderpoorten, **Gallet-Moron**, **Brasseur**, **Le Roux**, **Laslier**, **Decocq**, **Marrec** & **Lenoir** (2024) « *Some like it buffered: response of vascular plants and bryophytes to forest microclimate* ». ***Nordic Oikos Conference***, Lund, Suède, du 12 au 15 mars 2024

Liste des communications orales dans des congrès nationaux

1. **Gril***, **Marrec**, **Decocq**, **Spicher**, **Le Roux**, **Gallet-Moron**, **Brasseur**, **Lenoir** (2022) « *Microclimat et biodiversité du sol forestier* ». ***Salon de l'écologie Ad Natura***, Montpellier, France, 29 octobre 2022
2. **Lenoir** (2023) « *Microclimats forestiers & adaptation des forêts aux changements climatiques* ». ***Journées TEMPO***, Station d'écologie forestière de Fontainebleau, France, 4 octobre 2023 (**SUR INVITATION**)
3. **Lenoir** (2024) « *Réponses des communautés végétales aux changements climatiques d'origine anthropique : regards croisés & changement d'échelle entre macroclimat & microclimat* ». ***17ème édition du colloque Écologie des communautés végétale (ECOVEG)***, Anthropisation des communautés végétales en environnement changeant, Amiens, France, du 20 au 22 mars 2024 (**SUR INVITATION**)

Liste des communications affichées (posters) dans des congrès internationaux :

1. **Gril***, **Gallet-Moron**, Durrieu, **Spicher**, **Le Roux**, **Brasseur**, **Decocq**, **Marrec** & **Lenoir** (2022) « *Using LiDAR to model forest microclimate* ». ***Summer School from the COST action 3DForEcoTech***, Helsinki, Finlande, 18-21 juillet 2022
2. **Marrec**, **Gril***, **Spicher**, **Vital*** & **Lenoir** (2022) « *Can flora predict forest microclimate?* ». ***Microclimate Ecology & Biogeography Conference***, Anvers, Belgique, du 29 août au 1er septembre 2022
3. **Brusse**, Boisset, Caro, **Lenoir**, **Spicher**, **Gallet-Morron**, **Dubois** & **Marrec** (2022) « *Mapping microclimate variations using near-surface temperature modelling: validation of the Microclima R package on the scale of the Compiègne forest and its surroundings* ». ***Microclimate Ecology & Biogeography Conference***, Anvers, Belgique, du 29 août au 1er septembre 2022
4. **Brusse**, Boisset, Caro, **Lenoir**, **Spicher**, **Gallet-Morron**, **Dubois** & **Marrec** (2022) « *Mapping microclimate variations using near-surface temperature modelling: validation of the Microclima R package on the scale of the Compiègne forest and its surroundings* ». ***International conference in Ecology & Evolution (Sfe², GfÖ, EEF)***, Metz, France, du 21 au 25 novembre 2022

Liste des conférences de vulgarisation :

1. **Gril*** (2021) « *Arbres & microclimat, en forêt et en ville* ». ***Conférence grand public dans le cadre du Festival « Ma ville en vert »***, Atelier Média, Carvin, France, 24 septembre 2021
2. **Gril*** & **Lenoir** (2021) « *Présentation du projet IMPRINT* ». ***Conférence à destination de professionnels de la filière forestière (agents forestiers) lors du séminaire RENECOFOR***, Annecy, France, 6 octobre 2021
3. **Gril*** (2021) « *Le microclimat forestier* ». ***Conférence à destination de professionnels de la conservation des espaces naturels lors de la réunion de l'association Picardie Nature***, Amiens, France, 6 décembre 2021
4. **Gril*** (2022) « *Les arbres en villes & le microclimat* ». ***Conférence grand public***, Relais Nature de la Deule, Santes, France, 3 mai 2022
5. **Gril*** (2022) « *Forêt, un microclimat menacé ?* ». ***Conférence grand public dans le cadre du webinaire organisé par l'association Etats Sauvages***, 17 novembre 2022
6. **Lenoir** (2023) « *Impact du microclimat sur l'adaptation de la forêt aux changements climatiques* ». ***Conférence grand public dans le cadre du webinaire de la Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DRAAF) Auvergne Rhône-Alpes***, Groupe de travail forêts & changements climatiques, 7 février 2023
7. **Spicher**, **Gril*** & **Lenoir** (2023) « *Modélisation du microclimat forestier* ». ***Conférence à destination de professionnels de la filière forestière (agents forestiers) lors du séminaire RENECOFOR***, Mont-Saint-Michel, France, 30 mars 2023
8. **Gril*** (2023) « *Le microclimat forestier* ». ***Conférences et ateliers pour les 10 ans de la fondation Rovaltain/Evertéa***, Valence, France, 7 juin 2023
9. **Spicher**, **Gril*** & **Lenoir** (2023) « *Le microclimat forestier, un rempart efficace face au changement climatique* ? ». ***Conférence grand public dans le cadre du colloque de la Fédération nationale des sociétés d'amis des forêts (FNSAF)***, Fontainebleau, France, 6 octobre 2023
10. **Lenoir** (2023) « *Microclimats forestiers & adaptation des forêts aux changements climatiques* ». ***Conférence grand public pour l'Association ProSylva France sur le thème de la Sylviculture mélangée à couvert continu (SMCC)***, Faculté des Sciences, Campus Triolet, Montpellier, France, 13 octobre 2023
11. **Spicher**, **Gril*** & **Lenoir** (2024) « *Le microclimat forestier et l'adaptation des forêts face au changement climatique* ». ***Conférence grand public dans le cadre de l'assemblée générale de la Société amis région de Rambouillet et de sa forêt (SARRAF)***, Rambouillet, France, 23 mars 2024

Articles de vulgarisation :

1. **Gril*** (2021) « *La fraicheur du microclimat forestier face aux impacts du changement climatique* ». Article publié en ligne sur la plateforme ***Echosciences***, 8 janvier 2021

2. **Gril*** (2021) « *Changement climatique & biodiversité : des lycéens qui ont du PEPS !* ». Article publié en ligne sur la plateforme ***Echosciences***, 15 juillet 2021
3. **Lenoir** (2022) « *La première carte européenne de l'effet isolant des forêts* ». Article publié en ligne dans la rubrique « Actualités » du ***site Internet du CNRS Ecologie & Environnement***, 4 octobre 2021
4. **Lenoir** (2022) « *La température réelle au sol enfin cartographiée* ». Article publié en ligne dans la rubrique « Actualités » du ***site Internet du CNRS Ecologie & Environnement***, 14 janvier 2022
5. **Lenoir** (2022) « *La technologie LiDAR : une alliée pour l'étude des changements de biodiversité* ». Article publié en ligne dans la rubrique « Actualités » du ***site Internet du CNRS Ecologie & Environnement***, 9 février 2022
6. **Lenoir** (2022) « *Climate change: effect on forests could last millennia, ancient ruins suggest* ». Article publié en ligne sur la plateforme ***The Conversation UK***, 24 février 2022
7. **Gril*** (2023) « *Microclimat : la température de la forêt… en ultra HD !* ». Article publié en ligne dans la rubrique « Actualités » du ***site Internet du CNRS Ecologie & Environnement***, 21 novembre 2023
8. **Lenoir** (2023) « *Migration assistée des espèces ligneuses et emballement climatique ?* ». Article publié en ligne dans la rubrique « Actualités » du ***site Internet du CNRS Ecologie & Environnement***, 20 décembre 2023
9. Carcaillet, Delerue, Decocq, Domec, **Lenoir** & Michalet (2024) « *Planter des arbres venus de régions sèches : la « migration assistée », une fausse bonne idée ?* ». Article publié en ligne sur la plateforme ***The Conversation FR***, 25 janvier 2024

Autres actions de vulgarisation et de médiation :

1. **Gril*** (2020) « *Impacts des processus microclimatiques sur la redistribution de la biodiversité forestière en contexte de réchauffement du macroclimat* ». ***Création du site Internet (versions française et anglaise) du projet*** : https://microclimat.cnrs.fr/
2. **Gril*** (2020) « *Fête de la science : mon parcours jusqu'à la thèse et mon projet de recherche* ». ***Intervention auprès de 8 classes de collégiens du Collège Jean de Saint Aubert***, Libercourt, France, 9 octobre 2020
3. **Gril*** (2020) « *La forêt, eden des espèces invasives et oasis pour les réfugiées climatiques* ». ***Interviewée en direct par Radio Campus Amiens***, Amiens, France, 14 octobre 2020
4. **Gril*** (2020) « *Changement climatique, biodiversité & écologie forestière* ». ***Intervention auprès des lycéens du Lycée Saint Joseph***, Château-Thierry, Aisne, France, 15 décembre 2020
5. **Gril*** (2021) « *Changement climatique, biodiversité & écologie forestière* ». ***Intervention auprès des lycéens du Lycée Européen***, Villers-Cotterêts, France, 10 février 2021
6. **Gril*** (2021) « *Changement climatique, biodiversité & écologie forestière* ». ***Intervention auprès des lycéens du Lycée Camille Claudel***, Soissons, France, 8 mars 2021

7. **Gril*** (2021) « *Changement climatique, biodiversité & écologie forestière* ». ***Intervention auprès des lycéens du Lycée des métiers d'art***, Saint-Quentin, France, 17 mars 2021
8. **Gril*** (2021) « *Le Climat sur le Gril(l)* ». ***Interviewée par Louis Teyssedou pour le journal culturel amiénois « La Bête » n°9 (p. 14-17)***, Amiens, France, mars/avril 2021
9. **Gril*** (2021) « *Le microclimat forestier* ». ***Réalisation d'une planche de bande dessinée***, Amiens, France, avril 2021
10. **Spicher** & **Gril*** (2021) « *Les microclimats forestiers* ». ***Activité en forêt avec deux classes de niveau CE2 et CM1 sur notre terrain d'étude, en forêt domaniale de Mormal***, Landrecies, 4 octobre 2021
11. **Spicher** & **Gril*** (2021) « *Les microclimats forestiers* ». ***Animation d'un stand et d'un atelier lors de la 30ème édition de la Fête de la Science***, Village des Sciences, Bibliothèque Louis Aragon, Amiens, 8 octobre 2021
12. **Lenoir** & **Gril*** (2021) « *Le pouvoir isolant des forêts* ». ***Interviewés par téléphone par Camille Crosnier pour l'émission « Camille Passe au vert » sur France Inter***, 11 octobre 2021
13. **Gril*** & **Spicher** (2022) « *Les microclimats forestiers* ». ***Animation d'un stand LEGO® lors de la 31ème édition de la Fête de la Science***, Village des Sciences, Bibliothèque Louis Aragon, Amiens, 9 octobre 2022
14. **Spicher**, **Gril***, **Le Gouëf** & **Lenoir** (2022) « *A l'ombre des arbres !* ». ***Animation d'un stand LEGO® lors du Festival du CNRS***, Le Labo, Cambrai, France, 12-13 octobre 2022
15. **Spicher** (2023) « *A l'ombre des arbres !* ». ***Animation d'un atelier sur les microclimats forestiers auprès de 7 classes de la 6ème à la 4ème (90 élèves) du Collège César Savart,*** Saint-Michel, France, 23 janvier 2023
16. **Lenoir** (2023) « *La forêt au défi du changement climatique* ». ***Interviewé par Grégory Fléchet pour CNRS Le Journal en amont du One Forest Summit***, Amiens, France, 24 février 2023
17. **Spicher**, **Le Gouëf** & **Ulmer** (2023) « *A l'ombre des arbres !* ». ***Animation d'un atelier sur les microclimats forestiers dans le cadre de Mélisciences (la récré scientifique du CNRS au Collège d'Antoine de Saint-Exupéry***, Bray-sur-Somme, France, 16 mars 2023
18. **Spicher**, **Gril*** & **Garcia** (2023) « *A l'ombre des arbres !* », ***Animation d'un atelier sur les microclimats forestiers dans le cadre de Mélisciences (la récré scientifique du CNRS) à l'Institution Saint-Joseph du Moncel***, Pont-Saint-Maxence, France, 6 avril 2023
19. **Spicher**, **Lenoir** & **Vanpeperstraete** (2023) « *A l'ombre des arbres !* », ***Animation d'un atelier sur les microclimats forestiers dans le cadre de Mélisciences (la récré scientifique du CNRS) au Lycée de La Providence***, Amiens, France, 13 avril 2023
20. **Spicher** (2023) « *La recherche en forêt de Compiègne* ». ***Rencontres botaniques***, Compiègne, France, 3 juin 2023
21. **Gril*** (2023) « *Le rôle majeur du relief et de la mer dans la formation des microclimats* ». ***Interviewée par téléphone par Frédérique Boursicot pour le magazine ça m'interesse***, 15 octobre 2023

22. **Spicher** & **Le Gouëf** (2023) « *Forêts et biodiversité : quel avenir face au changement climatique* ? » ***Café débat***, Saint-Quentin, France, 7 novembre 2023
23. **Gril*** (2023) « *Scanner la forêt pour comprendre son microclimat* ». ***Interviewée par téléphone par Alexandra Delbot dans une émission radio de France Culture***, Amiens, 28 novembre 2023
24. **Lenoir**, **Gril*** & **Spicher** (2023) « *Forêts, au cœur d'un refuge climatique* ». ***Réalisation d'une vidéo dans le cadre d'un reportage de CNRS Images en partenariat avec Le Monde***, Forêt de Mormal, France, 30 novembre 2023
25. **Spicher** & **Marrec** (2023) « *A l'ombre de mon arbre !* », ***Animation d'un atelier sur les microclimats forestiers lors du Forum des outils pour la transition***, Amiens, France, 13 décembre 2023
26. **Lenoir** (2023) « *Et si le réchauffement climatique était accentué par l'adaptation forcée des forêts ?* ». ***Interviewé par téléphone par Gilles Durand pour le journal 20 minutes Lille***, 19 décembre 2023
27. **Lenoir** (2023) « *Amiens : un chercheur alerte sur la « migration assistée » d'arbres pour contrer le changement climatique* ». ***Interviewé par téléphone par Gaël Rivallain pour le journal du Courrier Picard***, 20 décembre 2023
28. **Spicher**, **Ubaldi**, **Kichey**, **Gallet-Moron** & **Buridant** (2023) « *La forêt à l'ère de l'Anthropocène* », ***Conférence au Lycée de la Hotoie***, Amiens, France, 31 janvier 2024
29. **Spicher** & **Ubaldi** (2023) *« A l'ombre des arbres !* », ***Animation d'un atelier sur les microclimats forestiers au Lycée de la Hotoie***, Amiens, France, 31 janvier 2024
30. **Lenoir** (2024) « *Aider les arbres à migrer, une fausse bonne idée ?* ». ***Interviewé par téléphone par Isabelle Bellin pour le média de l'écologie Reporterre***, 11 mars 2024
31. **Lenoir** (2024) « *Forêts : la migration assistée d'espèces d'arbres pourrait accélérer le changement climatique* ». ***Interviewé par téléphone par Isabelle Bellin pour le journal Pour la Science n° 558***, 20 mars 2024

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section E.

Parmi les éléments de valorisation marquant du projet IMPRINT, nous avons organisé une journée scientifique conjointe, le 25 novembre 2021, entre les membres de l'équipe du projet IMPRINT et les collègues belges de l'Université de Gand. Le total de participants à cette journée scientifique franco-belge était de 12, dont Pieter De Frenne, porteur du projet ERC StG FORMICA qui porte aussi sur les microclimats associés aux sous-bois. Nous nous sommes réunis à Villers-Pol, non loin de la forêt domaniale de Mormal, pour une matinée de présentation de plusieurs travaux scientifiques issus des deux équipes de recherche (IMPRINT & FORMICA), suivi d'une après-midi sur le terrain en forêt de Mormal pour présenter notre dispositif de recherche aux collègues belges.

L'autre point important dans les éléments de valorisation est celui de la participation de notre unité EDYSAN à plusieurs projets connexes. L'un de ces projets est un projet de Culture scientifique, technique et industrielle (CSTI) porté par la Direction régionale des Hauts-de-France (DR18) du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en réponse à l'appel à projets SAPS-CSTI-Générique-20 « Science avec et pour la société ». Nous avons activement participé à ce projet avec la réalisation, par Fabien Spicher, d'une maquette LEGO® financé sur ce projet. Cette maquette nous a permis de communiquer auprès du grand public, à maintes reprises (Festival du CNRS, Fête de la Science, Mélisciences), sur l'importance des processus microclimatiques en forêt. Nous sommes également impliqués en tant que partenaire du projet MaCCMic (ANR-21-CE32-0012) intitulé « *Impact de la gestion forestière et du changement climatique sur le microclimat en sous-bois* » Ce projet est porté par Jérôme Ogée et notre unité gère une enveloppe budgétaire de 115 136 €. A ce titre nous avons déjà recruté, début janvier 2024, Franck Gandiaga en post-doc pour une durée de 24 mois dont la mission est de construire une base nationale sur les microclimats forestiers en s'appuyant notamment et en grande partie sur les données du projet IMPRINT ainsi que d'autres données issues du consortium MaCCMic impliquant plusieurs partenaires. Enfin, nous avons récemment intégré le PEPR FORESTT et notamment le PC3 MONITOR avec la prise en charge d'une tâche sur le suivi des microclimats forestiers en France.

A noter également le projet SIMIFOR porté par Fabien Spicher et financé dans le cadre de l'appel à projet « *Living Lab* » de l'Université de Picardie Jules Verne. Ce projet utilise la technique de modélisation des microclimats forestiers développée dans le cadre du projet IMPRINT (voir le premier résultat marquant pour plus de détails) pour l'appliquer à un simulateur. Ce simulateur a pour objectif de sensibiliser un large public (professionnel et grand public) aux paramètres influençant les microclimats forestiers. Le modèle utilisé par ce simulateur a été paramétré avec des données issues du projet IMPRINT, entre autre.

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.
Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Gril Eva	F	eva.gril@u-picardie.fr	Mars 2024	Master	France	DREAL Hauts-de-France	EDYSAN	Doctorante CNRS financé sur le budget IMPRINT	40	Mai 2023	Post-doc recherche	UPJV	Ingénieure de recherche	Non	Oui

Aide pour le remplissage

(1) Adresse email : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
(2) Poste dans le projet : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
(3) Durée missions : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
(4) Devenir professionnel : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
(5) Type d'employeur : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
(6) Type d'emploi : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
(7) Lien au projet ANR : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
(8) Valorisation expérience : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les

concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact).