« Sous bénéfice d'inventaire » – genèse et développement du projet Laboratoire d'inventaire forestier (LIF)

Jean-Daniel Bontemps[1,*], Cédric Vega[1], Olivier Bouriaud[1,2]

1. Laboratoire d'Inventaire Forestier, ENSG, IGN, F-54000 Nancy, France
2. Ştefan cel Mare University of Suceava, Str. Universităţii 13, 720229 Suceava, Romania

* Auteur correspondant : Jean-Daniel Bontemps, jean-daniel.bontemps@ign.fr
ORCID : 0000-0003-3045-2799

« Sous bénéfice d'inventaire » – genèse et développement du projet Laboratoire d'inventaire forestier (LIF)

Le *Laboratoire d'inventaire forestier* (LIF) de l'IGN a été installé en 2013 sur le pôle académique forestier et d'ingénierie de Nancy pour simultanément appuyer l'innovation technologique et amplifier la valorisation scientifique de l'inventaire forestier national. L'article retrace les modalités historiques de son développement, de son insertion et de son financement. Il détaille aussi son projet scientifique, et analyse la production académique et les développements technologiques opérés sur une période de dix ans, permettant de mesurer l'utilité et la pertinence de ce projet dans l'écosystème national. Ses perspectives d'évolution sont discutées, en matière de recherches nouvelles, d'investissement dans la formation supérieure et de stratégies d'alliance en matière de recherche.

"Subject to inventory" – genesis and development of the Laboratory of Forest Inventory (LIF) project

The Laboratory of Forest Inventory (LIF) of the National Institute of Geographic and Forest Information (IGN) was set up in 2013 at the forest academic and engineering centre of Nancy to simultaneously support technological innovation and enhance the scientific value of the national forest inventory. The present article traces the historical background of its development, integration and funding. It also details its scientific project and analyses its academic output and technological developments over a period of ten years, allowing the usefulness and relevance of the project within a national ecosystem to be assessed. Its prospects for development are discussed in terms of new research, investment in higher education and research alliance strategies.

Messages-clés :

- L'IGN a créé en 2013 un laboratoire de recherche en inventaire forestier à Nancy adossé à l'inventaire forestier national.
- Dix années ont été nécessaires pour initier et insérer ce laboratoire dans le tissu académique régional et national.
- Il assume une double posture de recherche technologique et scientifique, et assure plus de 50 % de la production académique nationale associée à l'inventaire forestier.

Mots-clés : inventaire forestier, laboratoire, projet scientifique, recherche technologique, production académique

Highlights:

- In 2013, the IGN created a laboratory in Nancy for research on forest inventory based on the National Forest Inventory.
- Ten years were needed to initiate this laboratory and to integrate it into regional and national academia.
- It has the dual approach of technological and scientific research, and accounts for over 50 % of national academic output associated with forest inventory.

Keywords: Forest inventory, laboratory, scientific project, technological research, academic output

Citation de l'article : Bontemps, J.D., Vega, C. et Bouriaud, O. (2025). Sous bénéfice d'inventaire – genèse et développement du projet Laboratoire d'inventaire forestier (LIF). *Revue forestière française, 76*(2), 135-148. https://doi.org/10.20870/revforfr.2025.9589 :

Licence Creative Commons
Attribution - 4.0 International (CC BY 4.0)

LE DÉFI DE LA CRÉATION D'UN LABORATOIRE EX-NIHILO

Plusieurs tentatives ont été engagées par le passé pour associer recherche et inventaire forestier national, incluant des partenariats avec des laboratoires d'organismes de recherche, ou l'installation de capacités propres (Bontemps et Vidal, 2025). Ces tentatives ont démontré, à la fois tout le bénéfice pouvant résulter d'une telle démarche, et la difficulté de partager pleinement la préoccupation pour certains thèmes spécifiques à l'inventaire des ressources forestières, pour lesquels il reste donc raisonnable de disposer d'une capacité propre minimale qui leur soit dédiée.

C'est dans ce contexte, favorisé par l'existence d'une mission de recherche au sein de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) auquel l'inventaire forestier national a été rattaché en 2012, que le projet de laboratoire d'inventaire forestier a pu voir le jour, à la fois explicite quant à son point focal, et dans une posture ouverte sur le plan de la recherche, fondée sur l'observation des forêts.

Son histoire et son développement sont largement décrits dans le rapport d'activité associé à sa première évaluation, en libre accès (Bontemps *et al.*, 2023), et le propos du présent article sera de mettre l'accent sur les faits les plus saillants de la construction. Il est ainsi possible de sérier les chantiers initiaux dans trois grandes directions : définir un projet scientifique, constituer une équipe de recherche autonome, et l'insérer dans le tissu académique régional et national, ainsi que dans celui du financement de la recherche.

De façon générale, le pari était initialement risqué, puisqu'il est rapidement apparu que cette construction devrait essentiellement s'assumer en propre. De plus, si la feuille de route initiale paraît limpide (Hervé, 2011), il aura fallu près de dix ans pour atteindre un stade de développement raisonnable et efficace. Une des raisons de ce délai tient à la complexité institutionnelle et réglementaire du dispositif de recherche national, ainsi que son évolution rapide depuis le début du siècle avec l'autonomie des universités, l'évolution de la formation doctorale, et les plans d'investissements d'avenir ayant fait émerger les *initiatives d'excellence* (Idex), les *laboratoires d'excellence* (Labex) et les *initiatives science innovation territoire économie* (i-sites). Un objectif essentiel de ces restructurations étant de dépasser une concentration critique et de donner plus de visibilité à l'existant, le paysage se prêtait peu à l'intégration d'initiatives nouvelles de faible ampleur. Il s'agit là d'un enseignement tangible pour qui serait concerné par l'insertion d'un nouveau projet dans un existant complexe.

CONSTITUTION ET INSERTION D'UNE ÉQUIPE DE RECHERCHE

Capacité de recherche et options partenariales

Comme l'article précédent l'a évoqué, l'initiation du laboratoire a démarré à partir de 2013 à Nancy, d'abord dans les locaux de la direction territoriale de l'IGN de Nancy, sur le campus d'AgroParisTech, puis de façon autonome.

Le laboratoire a été initialement et durablement dimensionné sur la base de trois chercheurs permanents incluant son fondateur, recrutés en 2014 et 2015 dans les domaines de la géomatique et de la science forestière. Cet effectif resserré venait avec trois implications immédiates :

1/ Celle de l'obtention rapide d'habilitations à diriger des recherches (HDR) pour acquérir l'autonomie d'encadrement de recherches et travaux doctoraux ;

2/ Celle relative à la circonscription du projet du laboratoire à un nombre identique de thèmes, pouvant être abordés de façon autonome ;

3/ Celle enfin de prioriser des projets postdoctoraux contractuels pour étayer la capacité de recherche.

Au cours de son développement, le laboratoire a également plusieurs fois contractualisé des projets de chercheurs-associés, externes à l'établissement, mais opérant tout ou partie de leur recherche au laboratoire : initialement avec l'actuel INRAE (sciences du bois), avec la R&D de l'ONF (biométrie et télédétection pour le déploiement de l'inventaire multisource en aménagement forestier), et avec l'Université Ştefan cel Mare de Suceava (Roumanie, inventaire forestier et politique forestière). Ces partenariats rapprochés ont été extrêmement flexibles et productifs, étant davantage fondés sur la motivation individuelle que sur la formalisation institutionnelle.

Si l'on additionne les capacités propres, ces contrats, les projets postdoctoraux et doctoraux, le laboratoire a évolué à partir de 2017 autour d'un équivalent-temps plein de recherche de l'ordre de la dizaine, avec une dimension humaine (photo 1) mais, par construction, un renouvellement constant de l'équipe.

Étant donné sa taille modeste, la question de l'insertion de l'équipe dans des laboratoires existants à Nancy, sous le format de l'Unité Mixte de Recherche (UMR), a été posée dès le départ et à plusieurs reprises. Ce fut d'abord en 2015 l'occasion d'étudier un rapprochement avec les laboratoires INRAE/AgroParisTech LERFoB (Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois) et INRAE/Université de Lorraine EEF (Écologie et écophysiologie forestière) se préparant à une fusion dans le nouveau laboratoire Silva.



Photo 1 | L'équipe du laboratoire d'inventaire forestier en 2020 sur le campus de Nancy d'AgroParisTech. (Photo : LIF, 2019[1].)

Toutefois, l'échelle de positionnement du LIF, additionnée à l'approche macro-écologique déjà existante de l'équipe d'écologie d'AgroParisTech (à l'œuvre dans le partenariat IFN-LERFoB), fut jugée à risque d'une distorsion des échelles de recherche dans la nouvelle unité. Ce fut encore un projet plus abouti en 2016 avec le laboratoire de Biogéochimie des écosystèmes forestiers (BEF), unité propre de l'INRAE, et qui fut évalué par l'HCERES avant d'être abandonné[2] à la suite du décès soudain de Jean-Christophe Hervé (1961-2017), alors directeur du LIF[3], et d'une coopération jugée déjà étroite sur la question principale du carbone forestier. C'est du fait de ce décès que sera perçue la nécessité de renforcer l'équipe par un demi-ETP de gestion d'unité, qui sera obtenu en 2019 puis pérennisé.

Le laboratoire reste aujourd'hui encore une unité propre de l'IGN, toutefois complétée par un dispositif élargi d'unité sous contrat (USC) avec le département Écologie-Diversité (ECODIV) d'INRAE, permettant d'amplifier des collaborations potentielles avec cet institut.

Les perspectives d'association en UMR restent toutefois malaisées pour deux raisons. D'abord, et comme évoqué (Bontemps et Vidal, 2025), le projet multidisciplinaire du laboratoire, centré sur la forêt à grande échelle, dans une démarche d'observation, reste difficile à apparier avec une équipe ou une unité privilégiée, les hésitations pouvant être rapidement géographiques, institutionnelles ou disciplinaires, et se superposer. Ensuite, le processus de concentration marqué des unités en de grands instituts (de plusieurs centaines de chercheurs) depuis plus d'une dizaine d'années place le laboratoire face à des options potentielles, où l'on peut s'interroger sur la plus-value d'une telle initiative face au risque de dilution.

Feuille de route conventionnelle

Pour un nouveau laboratoire, l'intégration dans le tissu académique a requis la formalisation de nombreuses conventions (tableau 1), dont l'aboutissement a la plupart du temps nécessité plusieurs années. Elles ont exigé un investissement continu et patient, visant à « monter dans le train académique ».

En premier lieu, une convention séminale tripartite de coopération scientifique a été mise en place en juillet 2014, pour une durée de quatre ans, avec les centres nancéiens d'INRAE et d'AgroParisTech. Cette convention abordait l'implantation physique du laboratoire sur le campus, et balisait le champ des coopérations possibles ou existantes, avec l'investissement particulier du LIF dans la formation d'ingénieurs (spécialité existant à l'époque dans le champ des ressources forestières et filière-bois) et dans les formations de masters co-habilités avec l'Université de Lorraine, et la perspective d'intégrer le LIF dans le Labex

1 https://sites.google.com/view/labforestinventory/5_more-about-lif/gallery
2 https://hal-hceres.archives-ouvertes.fr/hceres-02030621
3 https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean-Christophe_Hervé

Tableau 1 | Accords établis avec des partenaires scientifiques du pôle académique lorrain pour l'insertion du laboratoire LIF.

Année	Partenaires	Type d'accord	Objectif
2014	AgroParisTech / INRAE	Convention de coopération	Installer le laboratoire, et coopérer en matière d'enseignement supérieur et recherche.
2016	Labex ARBRE (dont U. Lorraine, INRAE, AgroParisTech)	Convention ANR	Participer à la structuration des recherches d'ARBRE, et garantir leur financement.
2018	i-site LUE U. Lorraine	Rattachement au projet DEEPSURF	Participer à la dynamique de recherche sur les transitions énergétiques et environnementales, et garantir leur financement.
2019	U. Lorraine, Ecole doctorale SiReNa	Décision de rattachement comme laboratoire associé	Inscription des étudiants en formation doctorale.
2023	INRAE, département ECODIV	Convention d'Unité Sous Contrat (USC)	Favoriser la coopération scientifique avec le département.
2025	U. Lorraine	Accord-cadre de coopération	Meilleure intégration du laboratoire dans l'écosystème technique et administratif de l'Université.

ARBRE[4]. S'il faut reconnaître son intérêt pratique, elle n'a pas permis de structuration scientifique plus affirmée.

La formation doctorale étant un besoin vital pour un laboratoire, les démarches d'intégration dans l'école doctorale SiReNa (Science et ingénierie des ressources naturelles[5]) de l'Université de Lorraine ont débuté dès 2015. Elles ont toutefois conduit à un premier échec, du fait de la capacité de recherche jugée trop modeste de l'équipe. Il faudra attendre 2019, et les questions posées par la conduite à bon terme des premiers projets doctoraux, pour que le LIF obtienne un statut de laboratoire associé.

Produit de la politique académique des investissements d'avenir nationaux, le projet de laboratoire d'excellence ou Labex ARBRE (recherches avancées sur la biologie de l'arbre et les écosystèmes forestiers) porté par l'Université de Lorraine et INRAE et réunissant sept partenaires, a été acté en 2014. Le LIF a reçu un accueil assuré de l'équipe opérant ce projet, et y a été intégré par voie de convention avec l'ANR dès 2016. Depuis, le LIF a pu y jouer un rôle actif, contribuant à la définition du projet de programme interdisciplinaire *Artemis* qui en prendra la suite, dans le cadre de l'initiative pérennisée *Lorraine Université d'Excellence* (LUE).

Après l'abandon de la logique d'UMRisation, l'INRAE a proposé au laboratoire en 2018 la formalisation d'un partenariat avec le département scientifique devenu ECODIV au sein d'INRAE, sous la forme d'une unité sous contrat (USC) permettant de renforcer les collaborations par projet, ou l'affectation de chercheurs INRAE dans l'unité, sans que cet établissement soit tutelle du laboratoire. Cette convention sera signée à l'automne 2023.

Dès 2019, du fait de la montée en puissance de l'initiative LUE, de la participation du LIF dans des projets de recherche relevant de cette initiative, dont le projet ARBRE amené à la rejoindre et le projet DEEPSURF sur la transition énergétique[6], la question s'est posée de la formalisation d'un accord-cadre entre l'IGN et l'Université de Lorraine aux visées multiples : participation à la dynamique scientifique collective, administration des contrats doctoraux, coopération d'enseignement, accès aux facilités de calcul intensif pour le développement de l'inventaire multisource. Signé début 2025, ce partenariat est une étape importante, dans un contexte où le rôle des universités dans la structuration de la recherche nationale est devenu majeur. De surcroît, le positionnement explicite du projet LUE sur les approches d'ingénierie systémique et les questions de transitions et de ressources est une justification supplémentaire au développement du laboratoire sur ce pôle régional, à côté de sa vocation forestière ancienne. De fait, les initiatives LUE et Labex ARBRE ont représenté, pour le laboratoire, sa première source de financement contractuelle.

4 https://mycor.iam.inrae.fr/ARBRE/
5 https://doctorat.univ-lorraine.fr/fr/les-ecoles-doctorales/sirena/presentation
6 https://www.univ-lorraine.fr/lue/les-projets-impact/deepsurf/

UN PROGRAMME SCIENTIFIQUE ET DES AXES DE RECHERCHE ORIGINAUX

Grandes orientations du programme

Ce programme présente d'abord certains attributs très structurants, donnant une identité originale au laboratoire, que l'on série ici.

Observation – Il est d'abord centré sur une démarche d'observation à grande échelle des forêts et des écosystèmes (de territoires régionaux jusqu'au continent européen), avec une attention particulière portée à leurs évolutions temporelles. Cette observation s'appuie ici à la fois sur le plan de sondage des forêts de l'inventaire, et sur la capacité de développement et d'entretien d'infrastructures de données spatialisées sur le territoire de l'IGN, parmi lesquelles on peut citer le programme continu de photographie aérienne, ou le récent programme national Lidar aérien HD. Un enjeu récurrent pour le laboratoire a ainsi été de plaider pour une recherche à coût marginal nul d'acquisition de l'information (notion de recyclage d'information acquise par ailleurs).

Recherche duale – Il vise ensuite à opérer une recherche duale, à la fois technologique (recherche « pour » l'inventaire) et scientifique (« par » l'inventaire), assumée étant donné les missions de l'établissement IGN auquel il est rattaché. C'est ce positionnement dual qui justifie la formule d'incipit de cet article. L'expérience de recherche acquise en a renforcé tout l'intérêt, et conduit à relativiser certaines lectures trop convenues de catégorisation de la recherche (recherche fondamentale, appliquée, scientifique, technique, etc.). Nous donnerons deux exemples emblématiques de l'intérêt tout relatif de ces distinctions : 1/ tandis que l'ambition technologique des recherches statistiques a visé la consolidation et le développement d'estimateurs statistiques opérationnels (Duong *et al.*, 2025), elle a aussi produit des développements scientifiques originaux et fondamentaux en théorie des sondages (Bouriaud *et al.*, 2024, Duong *et al.*, 2025) ; 2/ de même, l'objectif de mise en place d'un système de monitoring en temps réel des impacts du changement climatique sur les forêts[7] a conduit à la découverte que la perte de croissance des espèces résineuses exotiques était imputable à la gestion sylvicole des peuplements associés, plutôt qu'à l'identité botanique de l'espèce (Ols *et al.*, 2020, en particulier figure 3). Ainsi, ces enjeux parallèles de recherche concourent finalement à un objectif unitaire : favoriser la reconnaissance de l'inventaire forestier national en tant que *grand instrument scientifique*.

Pluridisciplinarité – Parce que le programme privilégie un objet et une posture d'observation, il se nourrit enfin de l'ensemble des disciplines pouvant concourir à son avancement, sans a priori : statistique d'échantillonnage, traitement du signal et télédétection, modélisation dynamique et biométrie, sciences écologiques et forestières, sciences politiques également. Cette concentration de disciplines au sein d'une équipe de recherche est un des éléments ayant rendu peu évidente, dans la durée, l'identification de partenaires potentiels pour la constitution d'UMR, puisque des projets de laboratoires entiers sont dédiés à chacun de ces champs sur le plan national. Cette pluralité porte en germe la promesse d'approches interdisciplinaires, dont la cristallisation suppose un effectif de recherche minimal. Deux exemples peuvent être donnés :

1/ Après une phase centrée sur l'assimilation de produits de télédétection et leur évaluation pour l'inventaire dit « multisource » (Renaud *et al.*, 2024), on aborde aujourd'hui la question de l'harmonisation des estimateurs statistiques entre ce dernier et l'inventaire traditionnel, amenant à une coopération serrée entre statisticiens et télédétecteurs ;

2/ Dans une logique où politique et dynamique forestières sont liées, l'examen du rôle des droits de propriété forestière dans cette dynamique ont été l'objet d'une synergie étroite entre approches politiques et forestières (Bontemps, 2021a ; Rimoli *et al.*, 2023).

Appui aux politiques publiques – La démarche d'observation à grande échelle amène encore à caractériser et détecter des réalités et phénomènes à impact pour les ressources forestières, en lien étroit avec les politiques publiques actuelles (adaptation au changement climatique : Bontemps, 2021a ; caractérisation des ressources pour la bioéconomie : Bontemps *et al.*, 2012 ; suivi des crises sanitaires). C'est là l'incarnation de la théorie de la synergie interactive entre politique et inventaire forestiers, le second étant « l'œil » de la première, il la renseigne autant qu'il en observe l'effectivité. Pour cette raison, les recherches ont un caractère engagé. Elles ont régulièrement amené à être aux prises avec le débat public (par exemple, dans des interventions régulières auprès du Conseil Général de l'Agriculture (CGAAER : Bontemps, 2016 ; Bontemps *et al.*, 2019), lors de l'élaboration du rapport parlementaire de la députée Anne-Laure Cattelot, ou à l'occasion du débat sur l'intensification des coupes forestières en Europe : Picard *et al.*, 2020).

Trois axes de recherche

Les trois grandes directions de recherche associées à ce programme, déjà évoquées (Bontemps et Vidal, 2025) ont relativement peu varié depuis l'origine, et sont aujourd'hui assumées dans leur formulation suivante :

1/ Échantillonnage et estimation statistiques en inventaire forestier ;

7 inventif.ign.fr/croissance/

Figure 1 l Analyse fréquentielle des catégories sémantiques apparaissant dans les titres des publications du laboratoire (2015-2022, établi avec edwordle.net).

Les termes les plus fréquents (*forêt*, *inventaire*, *estimation* et *algorithme*) correspondent à un objectif essentiel de développement de systèmes d'information forestière, et reflètent les piliers méthodologiques définis par l'inférence statistique et l'usage de données de télédétection, avec un accent mis sur la *photogrammétrie*, le *lidar,* ou les *modèles*. La préoccupation pour la dynamique temporelle de la forêt est également marquée (*récent*, *tendances*, *changement*, *pluri-décennal*). En termes d'échelles spatiales, les échelles *française* et *européenne* sont identifiées. Les principaux indicateurs étudiés (*croissance*, *productivité*, *biomasse*, *surface*) et leur contexte environnemental (*climat*, *environnement*, *écosystème*) sont identifiés.



2/ Télédétection et inventaire multisource pour l'estimation et la cartographie des forêts ;

3/ Nouveaux indicateurs et systèmes d'information pour les forêts dans un environnement changeant ;

Ces orientations sont bien reflétées dans les contributions scientifiques de l'unité (figure 1).

Quelques inflexions notables sont toutefois à mentionner. En premier lieu, tandis que la préoccupation principale relative au premier thème portait initialement sur les méthodes d'estimation, un investissement croissant a été consacré au questionnement et à la définition des plans de sondage potentiels pour l'avenir des inventaires. Cette évolution s'est faite à la faveur de la relation entre méthodes d'estimation et plans de sondage, des nouvelles questions émergentes sur les forêts (par exemple, monitoring des perturbations environnementales, ou notion d'inventaire augmenté sur certains territoires), et plus généralement de l'aisance progressivement acquise sur ces sujets.

En deuxième lieu, le thème d'inventaire multisource s'est significativement ramifié. C'est le cas en amont, avec la multiplication des sources de télédétection – par exemple lidars, qu'il s'agisse du programme national de lidar aéroporté à haute densité, ou de l'exploitation de capteurs spatiaux comme ceux associés aux satellites Sentinel, ou de la mission spatiale Gedi (lidar) de la NASA sur la station spatiale internationale – et la nécessité de mise en place de méthodes de qualification de ces sources (Besic *et al.*, 2025). C'est aussi le cas en aval, avec une diversification des postures applicatives, qu'il s'agisse par exemple de la cartographie du carbone forestier, ou du monitoring des grandes perturbations forestières.

En dernier lieu, le périmètre du troisième thème a beaucoup évolué depuis les partenariats de recherche antérieurs à l'inventaire, avec une inflexion forte sur la composante écologique et stationnelle, pour prioriser la dynamique des forêts à grande échelle en contexte transitionnel, et le suivi des impacts du changement climatique sur les forêts (Hertzog *et al.*, 2025). Dans ce thème, les recherches pour l'exploitation du lidar terrestre aux fins de quantification des ressources et du carbone forestier ont également été abandonnées, tant elles sont exigeantes en termes de compétences, et de taille minimale d'équipe à sécuriser.

Une recherche soutenue par des contrats de recherche variés

À partir de 2015 le LIF a pu répondre à divers appels d'offre de recherche, obtenant une grosse trentaine de projets jusqu'à 2024, pour un taux d'échec extrêmement faible venu confirmer la logique de « niche » scientifique qu'occupait ce jeune laboratoire sur un champ de recherche déserté. Ces projets, souvent de taille modeste (comprenant une à trois équipes de recherche), et pour plusieurs d'entre eux cofinancés par l'IGN lui-même, ont été obtenus auprès d'acteurs variés incluant l'Union Européenne (horizon H2020), l'ADEME, les récents PEPR (Programmes et équipements prioritaires de recherche) *FairCarbon* et *Forestt* (à l'élaboration duquel dernier le LIF a contribué[8]), le CNES, l'Institut des mathématiques pour la planète Terre (IMPT), l'I-site LUE de l'Université de Lorraine, le Labex ARBRE, et la région Grand-Est.

La logique d'exploitation pérenne, par le laboratoire, de sources d'information existantes et financées par ailleurs (inventaire forestier national, sources de télédétection) a donné à ces projets une forme d'efficacité, par la recherche quasi-exclusive de ressources financières pour le développement des contrats de chercheurs, puis le développement de collaborations. Au travers de ces projets, ce sont ainsi plus de 50 équivalents-temps plein annuels contractuels qui ont été obtenus sur la période 2015-2024, pour le financement de projets postdoctoraux (neuf projets d'au moins un an et demi) ou doctoraux (dix projets).

En termes d'importance, les initiatives d'excellence positionnées sur l'Université de Lorraine représentent la première source de financement du laboratoire (11 ETP annuels), suivis de l'ADEME (7 ETP annuels) et plus récemment le PEPR FORESTT (6 ETP). L'IGN a cofinancé 6 projets doctoraux (9 ETP annuels) et financé 3 projets post-doctoraux. Ces masses ne doivent pourtant pas cacher la multitude d'opportunités offertes par un écosystème varié. À ce titre, qu'il soit acté par certains opérateurs qu'une thèse interdisciplinaire, par exemple à l'interface entre sondage statistique et perturbations forestières, puisse être prolongée au-delà de trois ans au titre de sa complexité, est un aspect remarquable malgré son caractère modeste dans ce panorama (IMPT[9]).

Ces projets permettent également de bien illustrer la grande variété des collaborations initiées et développées à travers eux, collaborations internationales (Université de Sherbrooke), européennes (réseau des inventaires forestiers européen ENFIN, et notamment BFW autrichien et FVA allemand), ou nationales (laboratoires français TETIS, ESE, Cesbio, Mistea, Silva, Irmar, LSCE, ONF R&D). Ces collaborations reflètent aussi la diversité disciplinaire du laboratoire, et soulignent à nouveau la difficulté de repérage d'un partenaire-clé qui émergerait naturellement pour une collaboration plus structurante.

UNE PRODUCTION À LA FOIS TECHNOLOGIQUE ET ACADÉMIQUE

Productions académiques

Par « production académique », nous entendons toute contribution faisant état des développements de recherche dans le domaine, en y incluant la formation diplômante. Dans un contexte où la recherche reste aujourd'hui largement évaluée sur ses performances en matière de publication scientifique, il n'est pas inutile d'indiquer ici en quoi ces publications représentent également un enjeu particulier pour un laboratoire dont une finalité est aussi technologique. Ainsi, tout en reprenant à son compte les enjeux génériques de la publication (assurer la publicité des résultats originaux, rendre compte de l'investissement public en recherche, obtenir un contrôle par les pairs de la rigueur et de la validité des recherches), le laboratoire y ajoute volontiers les mérites suivants :

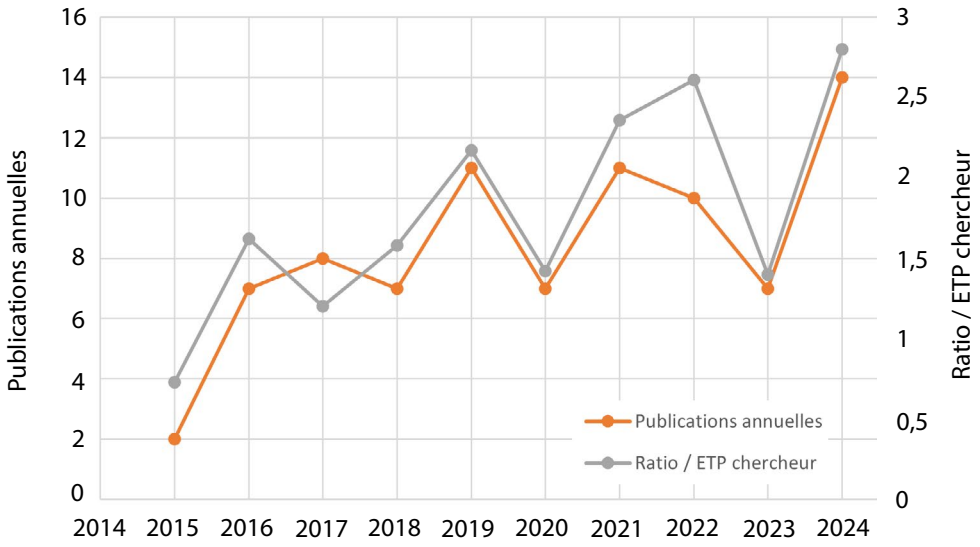
1/ Assurer une publicité et une reconnaissance institutionnelle de l'investissement dans le champ de l'inventaire et de l'information forestière, malgré les handicaps d'une création récente et d'une taille modeste à côté d'opérateurs historiques et établis de la recherche (intégration de la forêt à l'IGN en 2012, intégration du LIF à l'ENSG-géomatique, École nationale des sciences géographiques) ;

2/ Assurer une documentation ouverte et traçable de développements technologiques validés, dont l'applicabilité opérationnelle est avérée.

C'est par ce double bénéfice additionnel que le laboratoire justifie sa pertinence. Sur ce dernier aspect, la re-

8 https://hal.science/hal-04503573/
9 https://impt.math.cnrs.fr/

Figure 2 | Flux annuel de publications scientifiques du laboratoire LIF sur la période 2015-2024, et ratio de publication par ETP de recherche associé.



connaissance de l'Inventaire forestier national comme enquête statistique publique placée sous le contrôle du « comité du label » de l'INSEE (CNIS, conseil national de l'information statistique) depuis 2017[10] est une exigence supplémentaire et salutaire, qui oblige à une rigueur renforcée sur la documentation des méthodes et de leurs évolutions. Pour tout cet ensemble de raisons, l'objectif de publication scientifique a été rapidement identifié, formalisé et priorisé comme une partie intégrante du projet.

Formation diplômante – S'agissant de la formation diplômante, le collectif de recherche s'est acquitté de l'impératif initial d'obtention d'habilitations à diriger des recherches (HDR). Trois ont été obtenues entre 2016 et 2020, et ont permis de couvrir la plupart des champs disciplinaires du laboratoire (le champ de la statistique est, aujourd'hui, encore en question). Comme il a été indiqué, une dizaine de projets doctoraux ont été initiés, et sept d'entre eux ont été soutenus jusqu'à 2024. Si ce flux peut à première vue sembler modeste, il représente cependant un investissement très significatif pour un tel collectif de recherche. Il a en outre grandement favorisé des collaborations devenues structurantes, l'intégralité de ces projets ayant été voulus en codirection avec d'autres unités (École nationale de la statistique et de l'analyse de l'information (ENSAI), ONF, et laboratoires d'INRAE notamment). Enfin, le taux de succès de ces projets est entier, ce qui mérite d'être souligné, d'une part au regard de la crise « COVID » des années 2020-2021 qui a fragilisé tous les projets de recherche, d'autre part au regard du taux d'abandon actuel des formations doctorales dans le champ scientifique. Du fait des capacités d'encadrement, l'investissement dans l'encadrement de projets de niveau master ou ingénieur a été de priorité moindre (le LIF n'étant par ailleurs à ce jour partenaire d'aucune formation d'ingénieur ou de master). Sur le flux associé de six stages diplômants, la moitié des étudiants concernés ont été recrutés en formation doctorale, dans une logique d'allongement du temps d'appropriation des connaissances et des approches techniques, sur des disciplines qui restent très peu enseignées en France. Face à ce constat, de nouveaux projets de formation se dessinent dans lesquels le laboratoire est partie prenante et sur lesquels nous reviendrons.

Publications scientifiques – S'agissant des publications scientifiques, plus de 80 contributions dans des journaux internationaux ont été publiées entre 2015 et 2024, dont plus des deux-tiers sont immédiatement dédiées au projet de recherche du laboratoire (le complément relevant de collaborations). Ce flux correspond à une intensité de publication élevée, de 1,7 en moyenne par ETP scientifique et par an, et ayant dépassé les deux unités par an depuis 2021 (figure 2). En termes de citations, ces articles présentent un facteur d'impact moyen dépassant les

10 https://www.cnis.fr/enquetes/enquete-inventaire-forestier-national-2022a058ag/

neuf unités (nombre de citations dans les deux années suivant la publication), confirmant la perception de ces recherches dans la communauté internationale. De fait, les contacts spontanés de chercheurs étrangers sont en augmentation, et traduisent cette tendance, y compris par de grands instituts (par exemple le service forestier du département d'agriculture – USDA – aux États-Unis). Au total, et suivant les sources, le flux cumulé de citations de ces travaux se situe entre 700 et 1000. Il faut encore ajouter que le thème « sondage statistique », dont le démarrage réel a été différé et qui a été éprouvé à plusieurs reprises, commence juste à générer son lot de résultats originaux et publiés (par exemple Bouriaud *et al.*, 2023 ; Bouriaud *et al.*, 2024 ; Duong *et al.*, 2025). Outre la caution que ces contributions apporteront pour l'inventaire forestier lui-même et pour sa labellisation d'enquête statistique, elles reconnaissent aussi la capacité de l'équipe à contribuer à ce champ à un niveau internationalement reconnu, et permettent d'envisager des investissements nouveaux et plus sereins.

Ces publications sont complétées par un petit flux (une quinzaine) de publications techniques, visant des publics plus larges. Si leur importance relative traduit la priorité d'abord mise sur les publications scientifiques, il s'agit là d'un champ qui reste à encourager et investir, aux fins d'un meilleur partage avec la communauté forestière nationale, des avancées et perspectives en évolution rapide dans ce champ de l'information forestière.

On doit enfin tenter de pondérer la contribution du laboratoire à l'ensemble de la production scientifique nationale exploitant *a minima* les données de l'inventaire forestier national, sur le champ de la forêt ou de l'environnement, et dont au moins un auteur est associé à un laboratoire français. Une requête opérée sur le *web of science* (27 janvier 2025) indique ainsi un volume de publication de près de 150 sur la période 2015-2024, signifiant que la production scientifique totale se répartit pour moitié sur le laboratoire LIF, et pour moitié sur le reste de la communauté. Le rôle de l'inventaire comme instrument scientifique ouvert est ainsi effectif. Si l'on tente de ventiler cette production complémentaire par grands thèmes et laboratoires, elle est d'abord (40 %) le fait des anciennes unités de l'IRSTEA (les laboratoires LESSEM à Grenoble, RECOVER à Aix-en-Provence et EFNO à Nogent-sur-Vernisson) dans les champs de l'écologie, de la dynamique forestière ou du risque incendie. Elle provient ensuite : de l'IGN lui-même (20 %) par le biais de l'inventaire forestier national, sur les champs de l'harmonisation des inventaires européens[11] ou de la prédiction des habitats forestiers d'intérêt communautaire ; ainsi que de la collaboration européenne en écologie de la diversité[12] (20 %). Enfin, l'unité mixte de recherche BIOGECO de Bordeaux (10 %) a contribué sur les champs de la distribution et de la mortalité des espèces sous changement climatique, ou du risque tempête.

Si la grande majorité de ces contributions concernent des champs non abordés au laboratoire par défaut de capacité (écologie des forêts, risques naturels, harmonisation en inventaire), les travaux dédiés à la dynamique démographique sous changement climatique et à la dynamique forestière entrent davantage en résonance avec les objectifs du troisième thème du laboratoire, invitant à un examen futur de la plus-value de collaborations, au profit en particulier de l'inventaire forestier (dimension de systèmes d'information et indicateurs de monitoring).

Développements et avancées technologiques

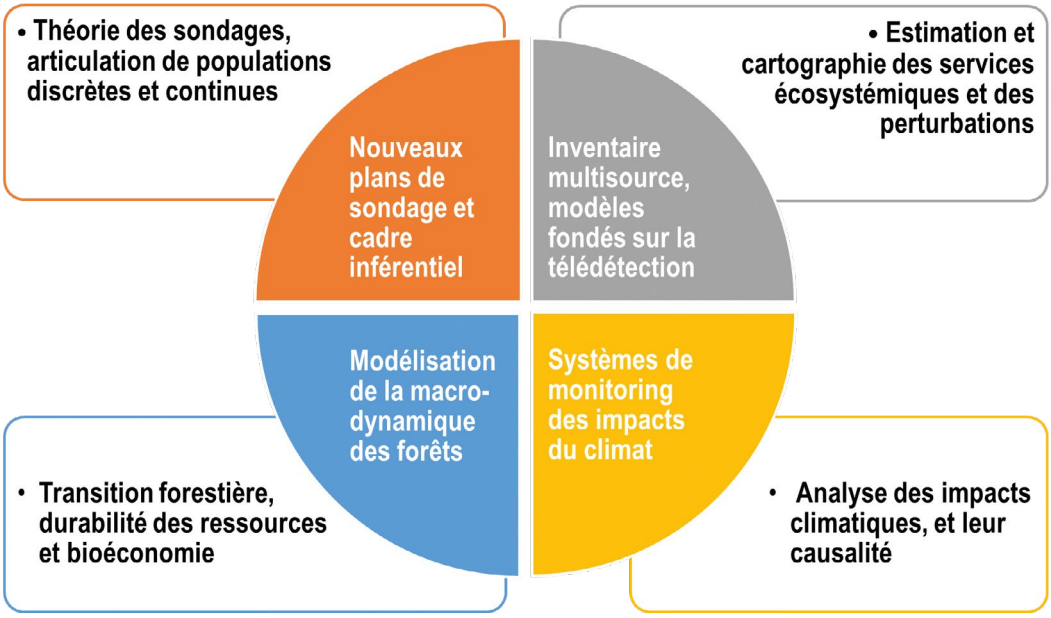
Comme exposé antérieurement, l'objectif de contribution technologique à l'évolution de l'inventaire forestier et plus largement de la mission d'information forestière de l'IGN est partie intégrante du projet scientifique (figure 3).

Pour se repérer dans ce domaine, le laboratoire a eu recours à une lecture des développements selon l'échelle TRL initialement développée par la NASA (*Technology Readiness Level*[13]), une échelle à neuf niveaux ordonnés permettant de formaliser les critères et seuils-clés d'un développement technologique avant d'atteindre une pleine maturité. Une première phase (TRL 1 à 3) propre à de nombreux laboratoires positionnés dans le champ de la recherche appliquée, s'étend depuis l'identification des principes fondamentaux de la technologie, jusqu'à une preuve expérimentale de concept (par exemple une simulation des nouveaux estimateurs de sondage statistique de l'inventaire sur des maquettes numériques de forêt : Duong *et al.*, 2024). Une seconde phase, beaucoup plus engageante (TRL 4 à 6), s'étend de la validation de la technologie en laboratoire, jusqu'à la validation puis la démonstration en environnements réels (ce que l'on pourrait dénommer des démonstrateurs sur des situations réelles, par exemple une application de la technologie d'inventaire multisource pour le massif de Sologne sur le stock forestier : Sagar *et al.*, 2022).

À partir de ce seuil (TRL 7 et au-delà), l'aspect critique réside dans le « passage à l'échelle » d'une application dont on recherche la validité en environnement opérationnel, c'est-à-dire entrant dans le champ d'expérimentation des services opérationnels de l'inventaire forestier national, et qui à ce titre ne peut être opérée par un laboratoire, même s'il peut évidemment accompagner ces développements ultérieurs. Ces aspects amènent à positionner l'ambition du laboratoire aux niveaux 5 et 6 de l'échelle TRL (la distinction étant le degré de prototypage de l'application).

11 https://www.enfin.info/index.php/projects
12 http://project.fundiveurope.eu/
13 https://fr.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level

Figure 3 | Mise en perspective du caractère à la fois technologique et scientifique des recherches conduites au Laboratoire d'inventaire forestier pour 4 champs de recherche.
Quartiers du cercle : champ et objectifs technologiques abordés. Cadres associés : cadres disciplinaires ou questions scientifiques simultanément abordées dans ces travaux.



L'examen des développements consentis ces dernières années en la matière amène à identifier quatre technologies cibles :

1/ L'analyse et la reformulation des estimateurs statistiques associés au nouveau plan d'échantillonnage mis en œuvre en 2004, qui a fait l'objet d'une collaboration avec l'ENSAI à Rennes (UMR IRMAR) puis d'un projet doctoral ;

2/ Le développement de la technologie d'inventaire multisource, reposant sur la fusion d'information statistique de terrain et d'information auxiliaire issue le plus souvent de la télédétection, pour les forêts françaises, qui a fait l'objet de deux projets doctoraux et plusieurs projets postdoctoraux ;

3/ La reformulation, le développement et la validation du modèle de projection des ressources forestières à grande échelle (Margot), initié à l'ancienne cellule d'évaluation de la ressource (CER) de l'inventaire forestier (voir Bontemps et Vidal, 2025), qui a bénéficié d'un projet doctoral ;

4/ Enfin, le développement d'indicateurs et systèmes de monitoring annuel de l'impact du changement climatique sur la dynamique démographique des forêts françaises.

Le constat général que l'on peut opérer, dix ans après le lancement des recherches, est celui du pari gagnant du positionnement dual des recherches, en ce que le seuil cible de TRL 6 est systématiquement approché à ce jour pour chacune de ces technologies. Une conséquence est aussi la matérialité d'une période cible de dix ans pour y parvenir, parfois plus brève.

Nous y ajoutons quelques précisions.

Estimateurs statistiques – La situation initiale est assez singulière, puisque la configuration de 2005 est l'application effective dans l'inventaire national d'un système d'estimateurs n'ayant fait l'objet d'aucune documentation ni de validation, dans un contexte où les plans de sondage, originaux, ne correspondent pas immédiatement aux situations décrites dans les ouvrages de référence. Les travaux entrepris ont consisté à la reformulation rigoureuse du plan de sondage, au développement des estimateurs associés, et à un premier test de leur comportement sur un jumeau numérique de quelques dizaines de kilomètres carrés (Duong *et al.*, 2024, TRL 4). Sur le plan théorique, il a par ailleurs été démontré l'exactitude des estimateurs ponctuels initiaux, et des formes alternatives pour leur variance, conduisant à discuter des aspects de conservativité de l'inférence. Les perspectives portent sur l'extension à des avatars numériques régionaux (TRL 5-6), et sur la question de l'application opérationnelle des nouveaux estimateurs de variance en inventaire.

Inventaire multisource – Si un pays comme la Finlande avait déjà abouti la production opérationnelle d'une telle

technologie au commencement du laboratoire (TRL 9, Tomppo *et al.*, 2008), il s'agissait cependant de travaux pionniers (Tomppo a reçu le Prix Wallenberg en 1997 pour ceux-ci), dans un contexte applicatif extrêmement favorable (une ressource homogène, à deux espèces dominantes, épicéa et pin sylvestre, sous un climat boréal, et sur socle granitique ancien prédominant, avec peu de variations altitudinales), de sorte que son exploration pour le très contrasté territoire français était à reprendre depuis l'origine (Renaud *et al.*, 2025). Par ailleurs, l'évolution rapide des capteurs de télédétection (arrêt du satellite Spot, substitution de Landsat par Sentinel pour des raisons de fréquence et résolution, émergence des capteurs lidar spatial GEDI ou aérien avec le programme lidar HD ce dernier restant pour le moment une initiative ponctuelle) rend la technologie toujours évolutive, et difficile à situer de façon définitive sur une échelle TRL. De plus, le constat est à sérier selon les variables cibles, un stock sur pied étant par exemple plus aisé à inférer par télédétection qu'une distribution des arbres par classe de diamètre. Dans ce domaine, les explorations ont été progressives, depuis un territoire homogène de plaine (la Sologne : Vijayakumar *et al.*, 2019 ; Vega *et al.*, 2021), jusqu'à des contextes d'hétérogénéité forestière et topographique croissante (par exemple dans les Vosges, avec un essai de caractérisation de l'impact de la crise scolyte : Sagar *et al.*, 2022). Elles ont toutefois ciblé directement des environnements réels (TRL 5). Les développements opérés ont récemment conduit à la sélection par l'IGN de la technologie pour en tester et développer l'application en environnement opérationnel, avec un déploiement progressif à venir sur quelques départements-cibles, correspondant à l'enjeu du passage à l'échelle.

Modèle de projection de ressources – Dans ce domaine, les développements sont déjà anciens (Pignard, 1994) et ont conduit à une évolution essentiellement heuristique où, à l'image des estimateurs statistiques, il reste difficile de documenter la formulation, les développements et tests opérationnels anciens, qui n'ont cependant pas empêché des applications opérationnelles de grande portée (Roux *et al.*, 2017 ; IGN & FCBA, 2024) ; en matière de prévision, l'existence d'un modèle reste une base utilisable raisonnable plutôt que de pures hypothèses qualitatives. Par ailleurs, de nouvelles questions sont venues interroger la formulation du modèle, essentiellement liées à la non-stationnarité des forêts (extension, capitalisation : Denardou *et al.*, 2019), de leur environnement (non-stabilité des paramètres démographiques : Charru *et al.*, 2017 ; Taccoen *et al.*, 2019). Dans ce contexte, un projet de thèse (Audinot, 2021) a été initié pour une intervention sur un champ de TRL très large, bas pour des développements nouveaux (par exemple introduction des densités-dépendances démographiques), plus élevé pour un ensemble de procédures systématiques d'analyse et de validation (paramétrisation, analyse d'incertitude, validation rétrospective, TRL 3-5). Sur ce champ historique où existent des équipes de développement et d'exploitation dédiées au sein de l'IGN, les aspects de montée en maturité ont été plus aisés à envisager.

Monitoring des impacts du changement climatique – L'idée à l'origine de ce monitoring a été de tirer parti, d'une part du savoir-faire historique en analyse des changements environnementaux de paramètres forestiers démographiques (Bontemps *et al.*, 2009 ; Charru *et al.* ; 2017, Taccoen *et al.*, 2019), et d'autre part d'un plan de sondage devenu annuel, pour développer une capacité de suivi spatio-temporel de ces paramètres à cette résolution temporelle, et au grain de territoires régionaux, de sorte que la base de développement était déjà très solide, s'agissant au moins de la croissance des forêts (TRL 3-4). C'est sur ce champ qu'ont été poussés les développements, dont une des contraintes réside dans la mise à jour du socle de données permettant le contrôle des facteurs stationnels[14]. Une perspective de développement réside encore dans la capacité de spatialiser et cartographier les anomalies démographiques (voir Charru *et al.*, 2014 dans un très rare essai documenté à ce jour). À la faveur du nouveau protocole d'évaluation de la régénération (2023), des travaux de recherche fondamentaux sont aussi actuellement initiés sur cette dernière. L'ampleur des questions posées (diversité des indicateurs, diversité des espèces, recherche de spatialisation, mise à jour temporelle) interroge toutefois la capacité de développement homogène, exhaustif et efficace sur ce champ, dont l'importance devrait amener à discuter la forme de coopération de recherche amplifiée qu'un tel projet pourrait prendre sur le plan national. Il y a urgence.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DU PROJET DE COURT ET LONG TERME

Après dix années de construction et de recherches, le bilan que l'on peut tirer de ce jeune laboratoire est qu'il est parvenu à s'installer patiemment dans le pôle académique nancéien, et dans le paysage de la recherche française, apportant une contribution originale et utile, à la fois pour l'enquête publique qu'est l'inventaire forestier national (son évolution et son accréditation statistique), et pour sa valorisation et sa reconnaissance, ainsi que l'a récemment conclu la commission d'évaluation de son premier bilan d'activité (2023).

14 inventif.ign.fr/croissance/

Sa dimension lui confère une vulnérabilité certaine, due à la faible redondance des champs d'expertise, ou aux marges de manœuvre parfois restreintes en cas d'accidents (par exemple au décès de son fondateur, Jean-Christophe Hervé, en 2017), ou lorsque des opportunités de recherche peu anticipables se profilent (par exemple, lorsqu'émergent des projets comme l'inventaire de la Guyane française). Toutefois, la dimension humaine des effectifs permet une fluidité permanente des échanges et des mises en débat, le LIF bénéficie des infrastructures de données socles pour son projet, et peut tirer agilement profit d'un très grand spectre d'appels d'offres, qui serait sans doute plus restreint pour de plus gros projets, ou à dimension expérimentale plus tangible.

Dans ce contexte, la question d'une éventuelle association de recherche en UMR, compte tenu de son historique récent, demeure très largement au plan d'une interrogation. Si l'un de ses avantages potentiels réside dans la mise en commun de la gestion de l'unité – de nombreux coûts étant fixes – c'est bien l'enjeu d'une valeur ajoutée en recherche, ou dans l'articulation entre recherche et enseignement supérieur voulu comme un principe fondateur des UMR, qui doit être examiné. D'une part, le nombre significatif d'initiatives et d'unités de recherche exploitant l'information produite par l'inventaire forestier national ne doit pas conduire à préjuger d'un intérêt pour les échelles caractéristiques (régionale, nationale, européenne), pour la posture d'observatoire, ou pour les questions technologiques dont le laboratoire se préoccupe. Ce constat, et les enseignements apportés par l'analyse historique (Bontemps et Vidal, 2025) n'autorisent à ce titre qu'un optimisme restreint, à l'origine même du raisonnement sur la nécessaire création du laboratoire. D'autre part, le défaut historique d'« école de formation » sur le champ des ressources forestières, de leur observation et de leur monitoring, dans l'enseignement forestier supérieur en France est une singularité internationale, qui tempère encore cette perspective. Il a d'ailleurs récemment conduit le laboratoire et son école de rattachement (ENSG) à s'imaginer eux-mêmes entités de formation et de recherche sur ce domaine. Un tel projet de formation – orienté sur « l'information pour les ressources forestières et leurs stratégies » – est actuellement en cours d'élaboration dans un co-portage à remarquer entre l'ENSG et AgroParisTech Nancy (antérieurement porteur d'une formation d'ingénieur dédiée aux ressources forestières et aux filières), avec le mérite de cristalliser la coopération avec l'établissement sur le campus duquel le LIF est domicilié.

Sur le plan des champs investis, il subsiste à notre sens un angle mort notable, relatif à la caractérisation et au suivi de la diversité biologique, dont l'intérêt sur le plan global est tout aussi critique que celui lié au changement climatique[15]. Si l'inventaire forestier est déjà largement valorisé dans sa composante d'inventaire de la strate végétale (par exemple Bertrand *et al.,* 2011 ; Dumas *et al.,* 2022 ; Maciejewski *et al.*, 2020), il en résulte toutefois peu de démarches applicatives (indicateurs et modèles) qui pourraient renforcer la capacité informationnelle de l'inventaire. De plus, l'analyse et le suivi de la diversité ligneuse, sa structuration et ses déterminants, restent le parent pauvre de ces recherches, que le laboratoire n'a pu investir. Or les enjeux ne manquent pas, qu'il s'agisse du rôle de la strate ligneuse dans la structuration des écosystèmes forestiers, de l'effet de la composition ligneuse sur la résilience des écosystèmes au changement climatique, des effets de la gestion et de la pression herbivore sur cette diversité, ou de son évolution rapide résultant de l'introduction d'espèces exotiques ou des plans récents de renouvellement forestier dans une logique d'adaptation au changement climatique. Ces questions intégratives semblent constituer un champ prometteur, et peut-être plus aisé, pour le développement de collaborations structurantes avec des laboratoires spécialisés dans l'analyse de la diversité.

Nous ne finirons pas sans évoquer le message porté par Tiberius Cunia en 1978 (Brenac, 1980 ; Bontemps et Vidal, 2025), selon lequel, à la fois la stature restreinte des équipes de recherche dédiées aux questions d'observation des forêts sur le plan international, et la convergence évidente de leurs questionnements et de leur culture scientifique, devrait conduire à un effort de coopération renforcée et structurée. Les décisions récentes d'adhésion de l'IGN à l'IUFRO (International Union of Forest Research Organizations[16]) et à l'EFI (European Forest Institute[17]) sont déjà de bon augure. Cependant, si le paysage européen a montré un véritable dynamisme depuis vingt ans (actions COST E43 et FP1001, projets européens Diabolo et Pathfinder), cela n'a pu se faire que par des projets contractuels de courte durée. Nous pensons qu'à côté de ces initiatives, un projet de laboratoire international en la matière ferait sens, et permettrait d'aborder certaines questions fondamentales à un niveau continental, où les dynamiques et problématiques forestières montrent une forte proximité entre pays (extension des surfaces, accumulation de stock, préoccupation pour la conservation des forêts et de la diversité, enjeu de séquestration de carbone, crise climatique et sanitaire, le tout dans un cadre européen émergent de politique forestière : Bontemps 2021a). Des instruments existent pour encourager ce type de laboratoire, et ils mériteraient une exploration plus attentive. ■

15 https://www.millenniumassessment.org/en/index.html
16 https://www.iufro.org/about-iufro
17 https://efi.int/

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Jean-Luc Peyron, ancien président de la section spéciale « inventaire des ressources forestières » du Conseil scientifique de l'IGN, pour sa relecture attentive du manuscrit. Ils témoignent également leur gratitude à toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin, ont soutenu l'initiative d'émergence de ce laboratoire dans des calendriers institutionnels ou de projets toujours contraints. À la faveur du chemin parcouru depuis 2017, l'auteur principal de l'article souhaite enfin adresser un message de sympathie à la famille de Jean-Christophe Hervé.

RÉFÉRENCES

Audinot, T. (2021). *Développement d'un modèle de dynamique forestière à grande échelle pour simuler les forêts françaises dans un contexte non-stationnaire.* Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 447 p. https://theses.fr/2021LORR0179

Bertrand, R., Lenoir, J., Piedallu, C. *et al.* (2011). Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature, 479*, 517–520.

Besic, N., Picard, N., Vega, C., Bontemps, J.-D., Hertzog, L., Renaud, J.-P., Fogel, F., Schwartz, M., Pellissier-Tanon, A., Destouet, G., Mortier, F., Planells-Rodriguez, et M., Ciais, P. (2025). Remote-sensing-based forest canopy height mapping: some models are useful, but might they provide us with even more insights when combined? *Geosciences and Model Developpement, 18*, 337–359.

Bontemps, J.-D., Hervé, J.-C., et Dhôte, J.-F. (2009). Long-Term Changes in Forest Productivity: A Consistent Assessment in Even-Aged Stands. *Forest Science*, *55*(6), 549–564.

Bontemps, J.-D. (2016). Comprendre et simuler la dynamique des forêts françaises à grande échelle. Communication au CGAAER, section forêt-bois, 9 novembre 2016, 58 p.

Bontemps, J.-D., Denardou, A., Dupouey, J.-L. (2019). Expansion tendancielle du stock de bois dans les forêts françaises. Communication au CGAAER, section forêt-bois, 5 juin 2019, 40 p.

Bontemps, J.-D. (2021a). Inflation of wood resources in European forests: the footprints of a big-bang. *Plos One*, 0259795 ; https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259795

Bontemps, J.-D. (2021b). Les temps des forêts et de leur observation. *Revue Forestière Française*, *73*(5), 557-565.

Bontemps J.-D., Vega C., Renaud J.-P., Sécherre H., et Bouriaud O. (2023). Laboratoire d'Inventaire Forestier (LIF) IGN / ENSG-Géomatique Activity report for the period 2015-2022, 15 novembre, 169 pp. https://hal.science/hal-04731542/document

Bontemps, J.-D., Vidal, C. (2025). La recherche et l'inventaire forestier national français : une relation évidente mais tourmentée. *Revue Forestière Française*, *76*(2), 123-133.

Bouriaud, O., Morneau, F., et Bontemps, J.-D. (2023). Square-grid sampling support to reconcile systematicity and adaptivity in periodic spatial surveys of natural populations. *Journal of Vegetation Science*, *34*(3), e13195.

Bouriaud, O., Brion, P., Chauvet, G., Duong, T. H. K., Pulkkinen, M. (2024). The weight-share method in forest inventories: refining the relation between points and trees. *Canadian Journal of Forest Research*, *54*(10), 1129-1141.

Charru, M., Seynave, I., Hervé, J.-C., et Bontemps, J.-D. (2014). Spatial patterns of historical growth changes in Norway spruce across Western European mountains and the key effect of climate warming. *Trees*, *28*(1), 205-221.

Charru, M., Seynave, I., Hervé, J.-C., Bertrand, R., & Bontemps, J.-D. (2017). Recent growth changes in Western European forests are driven by climate warming and structured across tree species climatic habitats. *Annals of Forest Science*, *74*, 33.

Denardou, A., Hervé, J.-C., Dupouey, J.-L., Bir, J., Audinot, T., et Bontemps, J.-D. (2017). L'expansion séculaire des forêts françaises est dominée par l'accroissement du stock sur pied et ne sature pas dans le temps. *Revue forestière française*, *69*(4-5), 319–340.

Dumas, N., Dupouey, J.-L., Gégout, J.-C., Boulanger, V., Bontemps, J.-D., Morneau, F., Dalmasso, M., et Collet, C. (2022). Identification and spatial extent of understory plant species requiring vegetation control to ensure tree regeneration in French forests. *Annals of Forest Science*, *79*, 41.

Duong, T. H. K., Chauvet, G., et Bouriaud, O. (2025). A new sampling framework for spatial surveys with application to the French National Forest Inventory. *Journal of Survey Statistics and Methodology*, *13*(1), 197-222.

Hervé, J.-C. (2011). *Recherche et Développement pour l'inventaire forestier. Eléments de réflexion pour la mise en place d'un dispositif*. 23 mai 2011, inédit, 4 p.

Hertzog, L., Piedallu, C., Lebourgeois, F., Bouriaud, O., et Bontemps, J.-D. (2025). Turning point in the productivity of western European forests associated with a climate change footprint. *Science of the Total Environment, 167*, 178843.

IGN, FCBA (2024) *Projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone du secteur forestier français*. Rapport d'étude, 77 p. rapport-projections-foret-bois-ign-fcba.pdf

Maciejewski, L., Pinto, P., Wurpillot, S., Drapier, J., Cadet, S., Müller, S., Agou, P., Renaux, B., et Gégout, J.-C. (2020). Vegetation unit assignments: phytosociology experts and classification programs show similar performance but low convergence. *Applied Vegetation Science*, *23*(4), 698-709.

Picard, N., Leban, JM., Guehl, J.-M., Dreyer, E., Bouriaud, O., Bontemps, J.-D., Landmann, G., Colin, A., Peyron, J.-L., et Marty, P. (2021). Recent increase in European forest harvests as based on area estimates (Ceccherini et al. 2020a) not confirmed in the French case. *Annals of Forest Science, 78*, 9.

Pignard, G. (1993). *Eléments pour l'élaboration d'un logiciel de simulation de l'évolution des peuplements irréguliers*. Note technique, IFN, Cellule d'Evaluation de la Ressource, 4 p.

Renaud J.-P., Cordonnier T., Vega, C., Pulkkinen M, et Bastick, C. (2024). Un inventaire forestier multisource, vous connaissez ? *Revue forestière française, 75*(3), 233-241.

Rimoli, R., Nichiforel, L., Acharya, A. *et al.*, (2023). The Property Rights Index (PRIF) can be used worldwide to compare different forest governance systems. *Scientific Reports*, 13, 19437 https://doi.org/10.1038/s41598-023-46097-w

Sagar, A., Vega, C., Bouriaud, O., Piedallu, C., et Renaud, J.-P. (2022). Multisource forest inventories: A model-based approach using k-NN to reconcile forest attributes statistics and map products, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *192*, 175-188.

Taccoen, A., Piedallu, C., Seynave, I., Perez, V., Gégout-Petit, A., Nageleisen, L.-M., Bontemps, J.-D., et Gégout, J.-C. (2019). Background mortality drivers of European tree species: climate change matters. *Proceedings of the Royal Society of London series B*, 286, 20190386

Tomppo, E., Haakana, M., Katila, M., & Peräsaari, J. (2008). *Multisource National Forest Inventory. Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, 386 p.

Vega, C., Renaud, J.-P., Sagar, A., Bouriaud, O. (2021). A new small area estimation algorithm to balance between statistical precision and scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *94*, 102303.

Vijayakumar, D. B. I., Renaud, J.-P., Morneau, F., McRoberts, R. E., et Vega, C. (2019). Increasing Precision for French Forest Inventory Estimates using the k-NN Technique with Optical and Photogrammetric Data and Model-Assisted Estimators. *Remote Sensing*, *11*, 991.

Roux, A., Dhôte, J.-F. (Coordinateurs), Achat, D., Bastick, C., Colin, A., Bailly, A., Bastien, J.-C., Berthelot, A., Bréda, N., Caurla, S., Carnus, J.-M., Gardiner, B., Jactel, H., Leban, J.-M., Lobianco, A., Loustau, D., Meredieu, C., Marçais, B., Martel, S., Moisy, C., Pâques, L., Picart-Deshors, D., Rigolot, E., Saint-André, L., et Schmitt, B. (2017). *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050.* Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA/IGN, 101 p.