



*Un jumeau numérique des forêts vosgiennes pour étalonner les stratégies d'échantillonnage de l'inventaire forestier*

## **Échantillonnage dynamique et inférence pour un monitoring intelligent des forêts, Application à l'Inventaire Forestier National**

Responsable scientifique : Olivier, Bouriaud

Laboratoire d'appartenance : Laboratoire d'Inventaire Forestier, IGN, Nancy

Partenaires Labex : IECL (Elie Cartan)

Collaborations : Dr Guillaume CHAUVET (HDR), ENSAI, UMR 6625 IRMAR, Rennes

Actions thématiques concernées : WP2

---

### **Contexte —**

Les effets des changements globaux et la perte de biodiversité sont devenus des problématiques présentes dans les sphères publiques et politiques, tandis que la prise de conscience de l'empreinte des actions humaines accroît les attentes envers les forêts. Ces nouvelles attentes soulignent la nécessité de quantifier et de suivre non seulement l'état des forêts mais aussi leur capacité à soutenir l'approvisionnement de ces services écosystémiques. Cependant, les méthodes d'inventaire à grande échelle ont été développées avant tout pour un suivi de la ressource et à un pas de temps pluriannuel. Les nouvelles attentes, ainsi que les perturbations plus intenses et fréquentes, imposent un examen de ces méthodes, pour les faire évoluer vers une plus grande réactivité.

Les méthodes de sondage et d'estimation de l'inventaire forestier national français ont été repensées en 2004 dans l'objectif de permettre une couverture annuelle du territoire et une adaptabilité de l'effort d'échantillonnage. Les données recueillies depuis 15 ans constituent une base empirique inégalée, qui doit permettre d'évaluer l'efficacité et les limites des méthodes actuelles.

Par ailleurs, les compétences nécessaires à l'analyse des méthodes de sondage et d'estimation sont extrêmement rares, particulièrement dans le domaine forestier. La disparition prématurée des statisticiens de référence (Jean-Christophe Hervé, Adrian Lanz) laisse un manque profond dans une communauté de très petite taille. Le rôle du projet est de contribuer au renouvellement de ces compétences et de développer de nouvelles stratégies d'échantillonnage et d'inférence, en rapprochant dans le cadre du projet des personnes possédant chacune une expérience spécifique et complémentaire.

### **Objectifs —**

Le but du projet est de développer des méthodes de sondage, allant de l'échantillonnage jusqu'à l'estimation, permettant de répondre à des contraintes de modulation rapides de l'intensité d'échantillonnage, tout en conservant des hauts niveaux de précision. Bien que développées dans le contexte de l'inventaire forestier national, le caractère général de ces méthodes sera conservé et renforcé pour permettre d'être employé aux enquêtes des écosystèmes.

Un premier objectif est de décrire et d'évaluer les estimateurs statistiques post-stratifiés actuels, et de les comparer avec les estimateurs existants dans des contextes critiques. Un deuxième objectif est d'évaluer et d'optimiser les schémas de stratification / post-stratification des forêts avec comme perspectives le compromis variance-biais et les problèmes de strates de petite taille. Un troisième objectif est de reconcevoir la stratégie d'échantillonnage de cet inventaire et d'accroître sa flexibilité.

### **Démarche —**

La démarche comporte deux aspects très complémentaires : l'axiomatisation et l'analyse quantitative. L'axiomatisation constitue une formalisation des méthodes de sondage et d'estimation de l'inventaire forestier national. Cette formalisation représente un effort d'ancrage des méthodes d'inventaire dans la théorie des sondages, et représente donc une activité essentiellement théorique. Cette activité vise à offrir aux travaux des fondations statistiques propres à la discipline ainsi qu'une base de références bibliographiques. La formalisation assure également le développement des propriétés limites et des hypothèses de validité des estimateurs statistiques.

L'analyse quantitative repose sur la mise en valeur de l'exceptionnelle base de données de l'inventaire forestier national, et en premier lieu, d'en réaliser une analyse quantitative critique. Les hypothèses et valeurs limites théoriques seront confrontées aux étendues et variances estimées sur la base des données collectées lors de la quinzaine d'années de fonctionnement de l'inventaire.

### **Résultats marquants —**

- Un nouveau simulateur pour les inventaires forestiers a été créé, qui permet de simuler une variété de plans d'échantillonnage et de méthodes d'estimation associées. Le simulateur peut prendre en charge des plans d'échantillonnage très complexes, qui sont actuellement utilisés dans les inventaires forestiers nationaux dans toute l'Europe. Cela inclut un échantillonnage en deux étapes, par ex. lorsqu'un pavage est appliqué au territoire étudié et que les cellules sont sélectionnées dès la première étape. Cela couvre également l'échantillonnage en deux phases, qui est d'usage courant dans les inventaires forestiers.
- Une contribution théorique importante a consisté dans le développement d'un cadre théorique combinant l'échantillonnage à deux degrés et à deux phases. Dans ce cadre théorique (simulateur), un pavage est appliqué au territoire étudié et les cellules sont d'abord sélectionnées dans un premier temps. Dans un deuxième temps, un échantillon de points est sélectionné dans ces cellules, caractérisé par photo-interprétation, et un sous-échantillon peut être sélectionné par diverses stratégies d'échantillonnage et étudié sur le terrain. Cette stratégie, bien que courante dans plusieurs inventaires forestiers nationaux (IFN), n'était ni reconnue ni formalisée en tant que telle.

- Le simulateur est un outil de référence qui permet de comparer les stratégies d'échantillonnage et l'efficacité des plans d'échantillonnage utilisés par les inventaires forestiers nationaux dans l'UE et en Amérique du Nord. C'est la première fois qu'un tel simulateur d'échantillonnage et d'estimation de l'IFN est réalisé.
- Incorporer et tester de nouvelles méthodes d'échantillonnage pour les inventaires forestiers nationaux. Le cadre théorique du simulateur a été complété par des stratégies d'échantillonnage qui ne sont actuellement pas utilisées en routine par les inventaires forestiers nationaux. Cela nous permet de comparer l'efficacité des méthodes actuelles avec celles de la concurrence, notamment les méthodes dédiées à plus d'adaptabilité dans l'échantillonnage.
- Augmenter l'adaptabilité des plans d'échantillonnage. Le cadre développé permet d'adapter les plans d'échantillonnage par ailleurs rigides basés sur une grille afin de moduler l'intensité d'échantillonnage dans l'espace et dans le temps, par exemple en réponse à des perturbations forestières.
- Création d'un jumeau numérique à très grande échelle des forêts vosgiennes (64 x 96 km). S'appuyant sur la thèse d'Ankit Sagar (dirigée par Cédric Vega), le jumeau numérique est composé de plus de 83 millions d'arbres spatialement répartis dans 13552 peuplements forestiers. La composition, le diamètre et la hauteur des arbres reflètent strictement les mesures effectuées par l'IFN dans cette région. Ce jumeau numérique permet de simuler n'importe quel plan d'échantillonnage utilisé dans un IFN en Europe.

### ***Principales conclusions incluant des points-clés de discussion —***

- Les travaux réalisés ont apporté des résultats dans plusieurs domaines critiques, tels que l'échantillonnage d'enquêtes avec apports théoriques (combinant l'échantillonnage à deux degrés et à deux phases pour des enquêtes à grande échelle) et le domaine de l'inventaire forestier.
- Les résultats de la simulation réalisée dans le cadre proposé ont confirmé l'impartialité des approches d'inventaire forestier, notant notamment que l'échantillonnage systématique au premier degré entraîne des variances plus faibles par rapport à l'échantillonnage aléatoire simple avec ou sans remise. Ces résultats sont particulièrement pertinents pour les inventaires forestiers nationaux.
- L'axiomatisation de l'IFN français, un objectif majeur du doctorat, a été finalisée et le cadre développé permet de comparer la stratégie actuelle avec des alternatives. L'impartialité des estimations a été confirmée.
- Le cadre permet de tester de nombreuses options dans les méthodes d'échantillonnage et d'estimation. Des choix doivent être faits en raison du temps limité disponible dans le cadre du doctorat.
- Les efforts consacrés au développement du simulateur (très complexe), avec des aspects liés à la théorie et à sa mise en œuvre informatique, ont ralenti la publication des résultats.

### ***Perspectives —***

- Des méthodes alternatives d'échantillonnage et d'estimation peuvent être proposées puisque le simulateur développé dans le cadre du doctorat permettra de tester n'importe quel plan d'échantillonnage particulier, et ainsi de comparer les plans d'échantillonnage actuels et nouveaux.
- Le cadre est le premier outil de simulation pour les inventaires forestiers nationaux. Avec des développements ultérieurs, il pourrait devenir un simulateur universel qui engloberait toutes les méthodes d'échantillonnage utilisées dans les IFN dans le monde. Un tel outil universel aurait un impact considérable s'il était publié, à la fois comme moyen de comparer les méthodes, mais également dans le but d'harmoniser les estimations, par exemple dans toute l'UE.
- L'optimisation de l'IFN français est possible grâce au cadre développé, dans lequel une variété de changements dans les plans d'échantillonnage de la première étape ou de la deuxième phase, dans la stratification et la post-stratification peuvent être testés.

## Valorisation —

### Conference:

1. Présentation à une conférence  
12<sup>th</sup> International french-speaking conference in survey sampling ; Location : Aubervilliers Campus Condorcet,  
Date : 22nd to 24th March 2023  
Type : Présentation orale  
Titre : Formalization of the sampling design and of the estimators used in the French NFI
2. Présentation à une conférence  
Programme de la journée scientifique (Seminar of the SiReNa Doctoral School)  
Date : 21st March 2023  
Type : Présentation orale  
Titre : Sampling and estimation in French National Forest Inventory
3. Présentation à une conférence (prévue, acceptée)  
26th IUFRO World Congress 2024 in Stockholm, Sweden  
Type : Poster  
Titre : An adaptive sampling and estimation method for National Forest Inventory to monitor the disturbances

### Articles:

1. Duong T, Bouriaud O, Chauvet G. A new framework for spatial surveys of natural populations. Soumis au journal Survey Statistics and Methodology, en révision.
2. Bouriaud O, Brion P, Chauvet G, Duong T, Pulkkinen M. The weight share method in forest inventories : refining the relation between points and trees. Soumis au journal Canadian Journal of Forest Research, en révision.

## Effet levier du projet —

Le domaine de l'échantillonnage des enquêtes est extrêmement spécialisé et représente très peu de personnes. Les inventaires forestiers présentent des spécificités qui les rendent encore plus spécialisés : enquête spatiale, populations continues, échantillonnage indirect. Ainsi, l'investissement dans le doctorat représente une forte contribution à un domaine de compétences très précieux et rare.

Le doctorat a été l'occasion de faire appel à des spécialistes travaillant dans différents domaines et de synthétiser les connaissances afin de repousser les frontières des connaissances.

Les travaux théoriques et de simulation entrepris dans le cadre du doctorat ont des conséquences importantes sur d'autres activités de recherche liées à la surveillance des forêts. Par exemple, les efforts déployés pour formaliser les méthodes de l'IFN français sont d'une importance directe pour les activités de recherche dans l'inventaire forestier multi-sources (C. Vega, J-P Renaud, C Piedallu) et tous les efforts portant vers le monitoring forestier.