
L'Inventaire Forestier National : suivi spatio-temporel conjoint de deux populations

Olivier BOURIAUD (*,**), François MORNEAU (***), Philippe BRION (****),
Guillaume CHAUVET (*****)

(*) Université Stefan cel Mare de Suceava, Roumanie

(**) IGN, Laboratoire d'Inventaire Forestier

(***) IGN, Service de l'Information Statistique Forestière et Environnementale

(****) IRMAR-UMR 6625, Rennes

(*****) ENSAI, CNRS, IRMAR-UMR 6625, Rennes

obouriaud@gmail.com

Mots-clés : : Inventaire forestier, plan de sondage en population continue, Échantillonnage spatial, Échantillonnage en deux phases.

Domaines : 1- Théorie des sondages amont - Échantillonnages particuliers : spatial, équilibré, sur population continue. 2- Théorie des sondages aval - Calcul de précision, estimation de variance.

Résumé (entre 350 et 900 mots environ)

L'Inventaire forestier national français est une enquête dont l'origine remonte à 1958. Elle portait initialement sur la description et la quantification des ressources forestières (surface des forêts et volume de bois) et s'est étendue au fil du temps et des enjeux croissants aux écosystèmes forestiers, à la description des variables écologiques, à la santé des forêts, à la biodiversité, au carbone, etc. Afin de répondre aux enjeux nouveaux d'écosystèmes dont la forte dynamique est encore accélérée par les changements globaux, la méthode de l'enquête a été entièrement revue en 2005. En particulier, elle s'organise désormais de manière systématique dans le temps et dans l'espace et couvre l'entièreté du territoire chaque année, contre quelques départements auparavant. Pour parvenir à ce résultat, une grille d'échantillonnage spécifique a été mise en place. Elle permet de coordonner dans le temps et l'espace les échantillons annuels successifs, et de garantir leur bonne représentativité tout en fournissant également la flexibilité nécessaire à l'adaptation de l'enquête au cours du temps. L'inventaire est également une enquête particulière puisque l'étendue de son domaine d'intérêt, la forêt, est inconnue avant enquête et en perpétuel changement, de même que la population d'arbres, en constant renouvellement, sous l'effet d'actions anthropiques directes (renouvellement, plantation, coupe) ou indirectes (changement climatique), et de perturbations (tempêtes, pathogènes, feux, etc.). De ce fait, les populations visées par l'enquête sont finalement de deux types, par ailleurs de nature fondamentalement différente. La première est constituée de points du territoire (population continue, infinie) quand la seconde est celle des arbres présents en forêt (population finie). Si, pour la première (des

points), la base de sondage est connue puisqu'il s'agit du territoire métropolitain, ce n'est pas le cas pour la seconde (des arbres). Cette difficulté est contournée par l'organisation conjointe des deux échantillons, celui des points servant au sondage indirect de la population d'arbres. Les informations de terrain collectées lors de l'enquête étant nombreuses et coûteuses à acquérir compte tenu du temps et des difficultés d'accès, de la complexité des mesures, l'inventaire recourt à des informations auxiliaires, comme les images aériennes, qui constituent une source privilégiée du fait de leur couverture spatiale exhaustive et de leur pertinence pour produire des strates. Cela a conduit l'inventaire français, comme beaucoup d'autres inventaires nationaux en Europe, à mettre en place des plans d'échantillonnage complexes, à deux phases statistiques (la première exclusivement en bureau sur photos) et par ailleurs post-stratifiées. Les estimations produites par l'inventaire s'adaptent à la complexité de l'échantillonnage pour fournir les estimations finales. Formellement, le lien entre les deux échantillons repose sur une méthode de partage des poids qui assure l'articulation entre l'échantillonnage en population continue du territoire et le sondage indirect des arbres sur lesquels porte l'essentiel des mesures.

Abstract

The French National Forest Inventory (NFI) is a statistical survey dating back to 1958. Over time, the initial focus on forest resources has been extended to forest ecosystem, ecology and biodiversity.

In order to address the new challenge of monitoring a system whose dynamic is accelerated by climate change, the survey methodology has been completely revised in 2005. It is now organised systematically in space and time and covers the entire territory each year.

The inventory is also a particular investigation since the extent of its field of interest, the forest, is unknown before investigation and in perpetual change, as well as the population of trees, in constant renewal, under the effect of direct (renewal, planting, cutting) or indirect (climate change) anthropogenic actions, and disturbances (storms, pathogens, fires, etc.). As a result, the survey is an indirect sampling survey combining two types of samples. The first is made up of points in the territory (continuous, infinite population) while the second is that of the trees present in the forest (finite population). If, for the first (points), the sampling frame is known since it is the metropolitan territory, this is not the case for the second (trees). This difficulty is circumvented by defining links between the two samples, formally based on a method of weight sharing, which ensures the articulation between the continuous population of points sampled in the territory (the sampling units), and the trees (the observational units).

To enable a spatially systematic sampling organized both in space and time, a specific sampling grid has been created that ensure the coordination of successive annual samples. The grid is the support of a complex two-phase sampling design of two populations, the first being sample points of a continuous population that allows indirect selection of individuals among the second : the large but finite population of trees.

Since the field information collected during the survey is numerous and expensive to acquire, the inventory uses auxiliary information, such as aerial images. This led the French inventory, like many other national inventories in Europe, to set up complex sampling plans, with two statistical phases combined with post-stratification.

Introduction

Produire des estimations statistiques sur les ressources naturelles pose un nombre important de problèmes méthodologiques, liés à l'absence de base de sondage due à la très grande taille de la population cible (les arbres) et à sa distribution spatiale à la fois dynamique et irrégulière.

Cette question est particulièrement prégnante pour les inventaires forestiers nationaux, qui ont donc dû développer des méthodes spécifiques pour échantillonner des arbres dont la localisation et le nombre ne sont pas des paramètres connus ni utilisables pour la mise au point du plan d'échantillonnage.

Les méthodes de sondage indirectes déployées par les inventaires forestiers répondent au besoin d'échantillonnage de la population d'arbres forestiers, mais la variabilité spatiale et la non localisation de la population imposent un effort très important de mesures. L'apport de données auxiliaires est très vite apparu comme un atout supplémentaire.

Les principes et les questions que posent les échantillonnages des inventaires forestiers nationaux sont exposés ici de manière synoptique.

1 Passer d'une population discrète à une population continue

Les forêts sont constituées d'une population d'arbres formant des couverts dont la dimension, la hauteur et la consistance doivent dépasser certains seuils prescrits dans une définition internationale. Dans l'étude des ressources forestières, la population ciblée est celle des arbres vérifiant ces conditions. D'après la définition de la FAO (de 2004), une forêt est une terre d'une surface minimum de 0,5 ha, d'une largeur supérieure ou égale à 20 m et de taux de recouvrement des arbres supérieur ou égal à 10%, où la vocation forestière ne peut a priori être écartée. Cette population d'arbres est discrète et finie, bien que de très grande taille : typiquement une dizaine de milliards d'individus pour un pays comme la France.

Estimer l'état de la ressource forestière et en particulier quantifier les volumes de bois qu'elle représente suppose de mesurer le volume des arbres, ainsi que de nombreux autres paramètres qui servent à ventiler les volumes dans des catégories utiles à la gestion. Compte tenu de la taille de la population d'arbres forestiers, un recensement est évidemment impossible et les inventaires forestiers nationaux doivent procéder par échantillonnage.

La population d'arbres possède des caractéristiques qui la rendent particulièrement difficile à échantillonner : elle n'est pas localisée spatialement, et elle est dynamique à la fois dans le temps et dans l'espace. Par exemple, la régénération de la forêt se fait par l'apparition d'un très grand nombre d'individus qui compensent la disparition de ceux qui meurent ou qui sont exploités. Les surfaces forestières en Europe sont particulièrement dynamiques, avec des augmentations de surface au niveau du pays (en France, +0,45% en moyenne sur 100 ans, cf. [1]). Compte tenu des critères de dimension et de taille des groupes d'arbres définissant une forêt, il serait en théorie possible de cartographier les limites spatiales des forêts dans un territoire donné, mais cette tâche est irréalisable en pratique.

Conséquemment à ces contraintes, les méthodes de sondage des inventaires forestiers ne se basent pas sur une approche de population finie ([8, 6]). En effet, il n'existe pas de base de sondage pour la population d'arbres, ni de connaissance précise de sa taille ou de sa localisation : déterminer ces informations fait partie des objectifs de l'enquête ([14]).

2 L'échantillonnage des arbres

Plusieurs auteurs ont assimilé les populations naturelles à des populations continues. [15] évoque la distribution spatiale continue des forêts sur le territoire, pour justifier leur assimilation à des populations continues. Cette assimilation a pour conséquence d'orienter l'échantillonnage vers celui de « portions géographiques » du territoire. D'une manière plus générale, la vision continue de la population conduit à la réalisation d'un échantillonnage où l'on fait apparaître une nouvelle population, celle de points du territoire.

Les inventaires forestiers ont fait appel depuis longtemps à cette assimilation des populations, en raisonnant et structurant spatialement l'échantillonnage d'un territoire. Cette méthode est désignée sous le terme d'approche de population infinie (Mandallaz 1991, 2007). Elle consiste à se baser sur un tirage de points dans un territoire, dont le nombre et la disposition sont contrôlés. Ensuite, à partir de ces points tirés avec probabilités connues, est réalisée la l'échantillonnage d'individus de la population cible (en l'occurrence des arbres) dans des cercles centrés sur ces points et qui forment les placettes de mesure. L'optimisation de la taille de ces placettes, en pratique ayant une surface de quelques centaines de m², a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche [10, 9].

L'approche dite de population infinie a eu un très grand succès dans les inventaires forestiers, car elle permet de construire un échantillonnage indirect mais contrôlé, en absence de base de sondage. De ce point de vue, les arbres sélectionnés de manière indirecte sont des unités d'observation plutôt que d'échantillonnage. Le passage d'unités échantillonnées en population infinie à des unités d'observation n'a jusqu'à présent pas été complètement formalisé, à notre connaissance. Brion et al. [2] proposent de le faire par la méthode de partage des poids [5]. Cette méthode définit une fonction de lien entre les unités d'échantillonnage et les arbres, permettant ainsi de mettre en œuvre des estimateurs utilisant les poids de tirage des unités d'échantillonnage pour pondérer les observations de la population cible.

3 L'estimation de la densité spatiale

Le passage de l'échantillon fini des points de mesure à une population continue pose un problème spécifique pour l'estimation, car une nouvelle équivalence, cette fois-ci inverse, est nécessaire entre l'échantillon d'arbres et le continuum spatial du territoire. Pour ce faire, sur un territoire donné de surface connue A_D , on définit la variable de densité $\rho(x)$ d'une variable quantitative d'intérêt y (définie au niveau « arbre »), prenant la valeur $\rho(x)$ sur tout point x . Alors sur le territoire, le total de y vaut

$$\tau_y = \iint \rho(x) dx$$

Typiquement, la variable y est mesurée sur les arbres, par exemple le volume individuel de bois, exprimé en m³. Elle sera transformée en une variable de densité surfacique, et exprimée en m³ ha⁻¹ (les forestiers rapportent à l'hectare qui vaut 10⁴ m² et qui se prête mieux aux échelles de travail en forêt, et est devenu un standard en gestion et en recherche). Les mesures effectuées sur les arbres sont donc rapportées à une unité de surface, la densité spatiale résultant étant attribuée au centre de la placette. Par exemple, le volume individuel des arbres échantillonnés sur la placette est sommé et rapporté à la surface de la placette pour calculer le volume moyen par unité de surface, qui est donc la densité spatiale du volume (ρ), et faisant ainsi le lien entre les variables discrètes au niveau « arbre » et les variables continues au niveau « point ».

La densité spatiale moyenne sur le territoire vaut $\frac{\tau_y}{A_D}$, mais son estimation nécessite de calculer la double intégrale, soit encore de connaître ρ en tout point x du territoire. Ceci étant bien sûr impossible, on ne mesure ρ que sur un échantillon de points discret de taille n .

Ainsi, on repasse d'une population continue (la surface du territoire) à un ensemble discret de points. La moyenne de la densité locale sur l'échantillon de points est l'estimateur de la densité spatiale moyenne sur tout le territoire. Cette approche est assimilée à une approximation par Monte Carlo [9, 11], car les points tirés dans le territoire permettent d'estimer à un facteur près ($\frac{1}{A_D}$), l'intégrale de la densité de la variable sur le territoire à partir du tirage d'un échantillon discret de points.

4 équilibrage spatio-temporel de l'échantillonnage

Étant entendu que l'échantillonnage repose sur le tirage de points dans le territoire, points qui servent à former une estimation de la densité spatiale moyenne du paramètre étudié, la question de la répartition spatiale des unités d'observation devient cruciale. Il y a de multiples possibilités d'échantillonnage probabilisé d'une population sur un territoire, et la question de la répartition spatiale a depuis longtemps été examinée. Une méthode privilégiée dans les inventaires forestiers nationaux est celle qui se base sur une disposition spatialement systématique des échantillons [18, 17]. Ce choix s'appuie notamment sur le principe qu'une disposition régulière permet d'éviter de créer des vides [3]. La régularité spatiale des points d'observation garantit une partition équilibrée du territoire, et est à la base du principe d'équilibrage spatial de l'échantillonnage [16], dont une forme simple est l'échantillonnage systématique.

Les avantages opérationnels d'une distribution spatialement systématique, très généralement portée par une grille carrée, ont fait que tous les inventaires nationaux ont adopté cette approche [12]. L'échantillonnage systématique qui en découle pose toutefois son cortège de difficultés dans les estimations de variance, en raison de probabilités d'inclusion d'ordre deux qui deviennent nulles, et soulève la question de potentiels effets de corrélation spatiale qu'il peut générer [7].

Par ailleurs, les objectifs de l'inventaire comportent l'estimation des changements de la forêt, et l'estimation relative à des variables dynamiques telles que la production de bois ou la récolte. L'enquête est ainsi non seulement spatiale mais aussi temporelle, à base de sondages successifs. Ainsi, la coordination des échantillons doit se faire à la fois dans l'espace et dans le temps. Les inventaires ont sur ce point des approches qui divergent : certains s'appuient sur un échantillon unique revisité à intervalles réguliers (par exemple, tous les 5 ans) et ont un caractère longitudinal, tandis que d'autres se basent sur des échantillons différents. En France, l'inventaire s'est longtemps inscrit strictement dans la seconde tradition, avant de faire évoluer ses pratiques et de combiner désormais les deux types d'approches avec des échantillons renouvelés dont la mesure coïncide avec celle, allégée, d'un précédent échantillon datant de 5 ans. Ces remesures permettent avant tout d'estimer les changements (flux de surface et de volumes de bois) en forêt : croissance, mortalité, prélèvements.

Cependant, l'organisation des échantillons successifs de l'inventaire français est originale de par la temporalité choisie. Ce sont en effet des échantillons systématiques à l'échelle du territoire, mais aussi annuels. Cette haute fréquence induit plusieurs contraintes au profit d'un suivi fin des écosystèmes : i) la nécessité de réaliser l'ensemble des mesures dans le délai imparti et ii) le besoin de coordonner dans l'espace les échantillons successifs. Cette coordination repose sur une grille carrée couvrant tout le territoire, qui définit la position géographique des points de mesure, et dont on tire les échantillons annuels successifs. Cette grille carrée est construite de sorte que les fractions annuelles successives que l'on en tire forment des sous-ensembles ayant les mêmes propriétés de systématisme spatiale.

5 La grille d'échantillonnage

La grille d'échantillonnage de l'inventaire français est une grille carrée, de 1 km de côté dans la projection Lambert 2 étendu, orientée nord-sud et est-ouest et dont l'origine est aléatoire. Elle couvre l'ensemble du territoire métropolitain. Cette grille initiale est fractionnée en 10 sous-ensembles, chaque dixième constituant lui-même une grille, toujours carrée mais dont la maille fait 10 km² et couvrant également l'ensemble du territoire.

Ces 10 fractions emboîtées constituent le support de l'échantillonnage annuel de l'inventaire. Autrement dit, chaque année le nouvel échantillon s'appuie sur une et une seule des fractions. Chaque fraction annuelle est par ailleurs structurée en « niveaux » hiérarchiques successifs et emboîtés correspondant à un sous-échantillonnage spatialement systématique d'un point sur deux.

Propriétés spécifiques de la grille carrée, ces sous-ensembles sont également des grilles carrées.

Le nombre de points de chaque niveau est divisé par 2 et la surface des nouvelles mailles est ainsi doublée par rapport au niveau précédent (Figure 1). Ces nouvelles mailles formées par sous-échantillonnage des nœuds définissent les poids statistiques des points de mesure associés aux nœuds, les poids étant directement proportionnels à leur surface.

Toutefois, les coordonnées de ces points d’inventaire sont tirées aléatoirement à l’intérieur d’un pavé de 1 km de côté centré sur les nœuds de la grille indifféremment du niveau (voir Figure 2) selon un plan systématique non aligné [4]. Le niveau de restitution ne pouvant être atteint avec une précision suffisante à partir d’un seul échantillon annuel, les résultats de l’inventaire sont fournis par la combinaison selon une moyenne mobile dans le temps des 5 derniers échantillons. Le choix des fractions annuelles utilisées chaque année en support aux échantillons annuels successifs est organisé de manière à obtenir une couverture également quasi-systématique sur cette moyenne mobile. Au bout de 10 ans, toutes les fractions de la grille ont été utilisées et le sont à nouveau pour la décennie suivante.

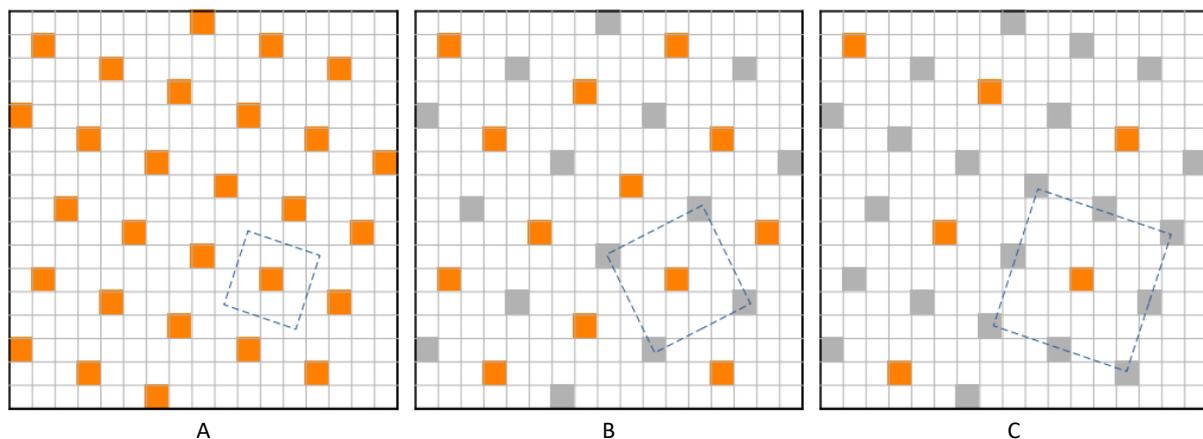


FIGURE 1 – Trois premiers niveaux d’une fraction annuelle (grille annuelle). Sont représentés les maillages de 10 km^2 (A), 20 km^2 (B) et 40 km^2 (C). Les maillages sont en tireté bleu. En orange figurent les mailles kilométriques de la grille initiale conservées à chaque niveau.

Les niveaux de la grille sont utilisés en pratique pour organiser le sous-échantillonnage entre première et deuxième phase statistique.

6 échantillonnage en deux phases pour stratification

La structure de la population est mal, ou pas, connue a priori. Les connaissances nécessaires à une stratification pourraient être parfois réunies, mais le très grand nombre de paramètres à étudier devient une difficulté.

Compte tenu de la variabilité spatiale importante, de l’irrégularité de la distribution des populations étudiées, le réseau de points d’observation doit avoir une densité importante. L’accessibilité en forêt demeure un des principaux obstacles, et un élément particulièrement consommateur de ressources. Les inventaires forestiers nationaux ont ainsi intérêt à minimiser le nombre de placettes de terrain. Cette contrainte est en contradiction avec la nécessité d’une couverture spatiale dense.

Dans ce contexte, l’échantillonnage en deux phases a rapidement émergé comme une solution efficace, la première phase étant basée sur un très grand effectif de points sur lesquels est observée la catégorie de végétation du sol. Dans le cadre de cet échantillonnage double pour stratification [13, 4], la moyenne d’un attribut donné est estimée efficacement à partir d’une population d’unités regroupées en strates. Dans ce cadre, un échantillon aléatoire de grande taille (de première phase)

est utilisé pour estimer le poids des strates, car la proportion de points de cet échantillon est un estimateur du poids relatif des différentes strates.

Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux inventaires forestiers nationaux car elle répond au problème d'estimation de la taille de la forêt, qui est généralement une des strates considérées. Elle permet en plus de localiser la population dont la distribution spatiale n'est pas connue avant l'enquête.

Ensuite, compte tenu de l'approche par population infinie, l'échantillon de première phase détermine les poids des strates (soit en fait la proportion en surface des strates dans le territoire), tandis que l'échantillon de deuxième phase est utilisé pour estimer la densité moyenne de l'attribut dans les strates constituées. Ainsi l'échantillonnage en deux phases permet de bien répondre aux deux besoins essentiels de l'estimation que sont l'estimation de la surface des strates d'une part, et de la densité spatiale moyenne dans les strates d'autre part.

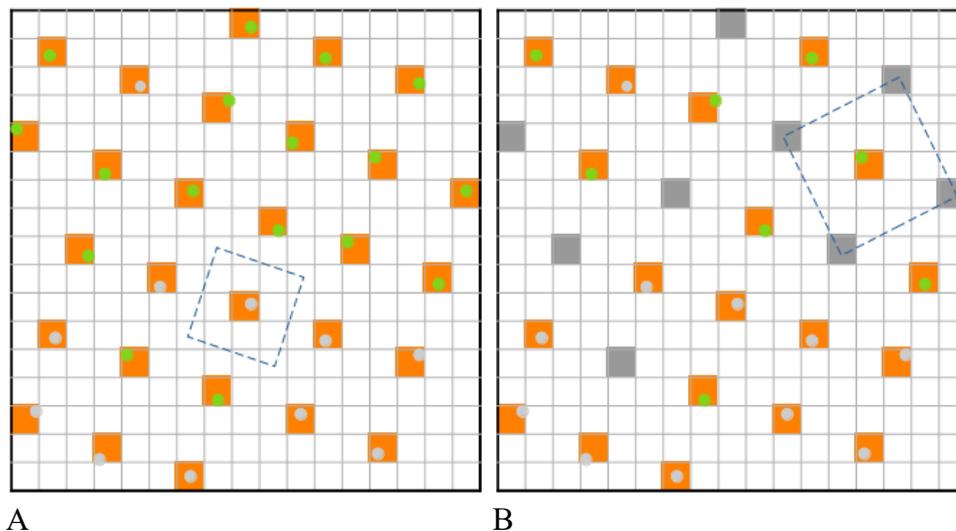


FIGURE 2 – Illustration des échantillons de phase 1 (A) et 2 (B).

(A) En première phase, un point est tiré au hasard dans toutes les mailles de la grille annuelle de niveau 1 (mailles orange formant une grille carrée de 10 km^2 symbolisée en tiretés). Les points verts sont des points photo-interprétés « Forêt », catégorie à visiter sur le terrain. Les points gris clair appartiennent au « Hors-Forêt », catégorie non visitée sur le terrain. (B). En deuxième phase, tous les points « Hors Forêt » sont conservés (sous-échantillonnage à 100%, niveau 1 de la grille) et un point sur 2 en forêt (sous-échantillonnage de 50%) en s'appuyant sur la grille carrée de niveau 2 de 20 km^2 , représentée en tiretés. Les carrés gris sont les mailles qui contenaient les points « Forêt » de phase 1, non conservés en phase 2. Les mailles orange sont celles qui contiennent les points de l'échantillon de phase 2.

7 Perspectives

Les données portant sur la couverture spatiale de la végétation ont fait d'immenses progrès ces dernières décennies, en particulier en augmentant leur fréquence, leur résolution, et leur pertinence vis-à-vis des besoins d'estimation des inventaires forestiers. La liaison existant entre ces données et les attributs cibles des arbres est en constante amélioration, par exemple la hauteur du couvert estimée par LiDAR aérien (Light Detection and Ranging, qui fournit des mesures de la hauteur de la canopée sur de très grandes surfaces) se montre généralement bien corrélée au volume.

Les inventaires forestiers nationaux restent cependant très fidèles aux estimations et à l'inférence basées sur les plans de sondage (« design-based inference »). L'emploi d'un échantillonnage en deux phases correspond donc bien aux besoins opérationnels. Mais la liaison entre la variable auxiliaire et la variable cible étant beaucoup plus forte que celle nécessaire à un découpage en strates (qui s'appuient sur des modalités de la variable auxiliaire), les approches basées sur les

modèles devraient se développer rapidement et pourraient enrichir le dispositif existant. Elles pourraient ainsi fournir des estimations routinières, en particulier à chaque fois que la contrainte d'additivité devient moins importante que le besoin de précision sur un territoire donné.

Références

- [1] Timothée AUDINOT, Holger WERNSDÖRFER et Jean-Daniel BONTEMPS. “Ancient forest statistics provide centennial perspective over the status and dynamics of forest area in France”. en. In : *Annals of Forest Science* 77.3 (2020), p. 1-24. ISSN : 1297-966X. DOI : 10.1007/s13595-020-00987-5.
- [2] Philippe BRION, Olivier BOURIAUD et Guillaume CHAUVET. “Une généralisation de la méthode de partage des poids au cas où la base de sondage est continue”. In : 11ème colloque international francophone sur les sondages. Brussel, 2021. URL : <https://drive.google.com/file/d/1YqhfhtEZZKN6S5kVxSrT2coi2wwtdMD6/view>.
- [3] Danielle S. CHRISTIANSON et Cari G. KAUFMAN. “Effects of sample design and landscape features on a measure of environmental heterogeneity”. en. In : *Methods in Ecology and Evolution* 7.7 (2016), p. 770-782. ISSN : 2041-210X. DOI : 10.1111/2041-210X.12539.
- [4] William G. COCHRAN. *Sampling Techniques*. Third. John Wiley & Sons, 1977. ISBN : 0-471-16240-X.
- [5] Jean-Claude DEVILLE et Pierre LAVALLÉE. “Indirect sampling : The foundations of the generalized weight share method”. eng. In : *Survey Methodology* 32.2 (2006), p. 165-176.
- [6] Anton GRAFSTRÖM et al. “The continuous population approach to forest inventories and use of information in the design”. en. In : *Environmetrics* 28.8 (2017), e2480. ISSN : 1099-095X. DOI : 10.1002/env.2480.
- [7] Steen MAGNUSSEN et al. “Comparison of estimators of variance for forest inventories with systematic sampling - results from artificial populations”. In : *Forest Ecosystems* 7.1 (2020), p. 17. ISSN : 2197-5620. URL : <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00223-6>.
- [8] Daniel MANDALLAZ. “A unified approach to sampling theory for forest inventory based on infinite population and superpopulation Models”. Thèse de doct. ETH Zürich, 1991. DOI : 10.3929/ethz-a-000585900.
- [9] Daniel MANDALLAZ. *Sampling techniques for forest inventories*. Sous la dir. de Richard SMITH. Boca Raton : Chapman & Hall/CRC, 2008, 256 p.
- [10] Daniel MANDALLAZ et Adrian LANZ. “Forest inventory : further results for optimal sampling schemes based on the anticipated variance”. In : *Canadian Journal of Forest Research* 31.10 (2001), p. 1845-1853. ISSN : 0045-5067. DOI : 10.1139/x01-099.
- [11] Daniel MANDALLAZ et Ronghua YE. “Forest inventory with optimal two-phase two-stage sampling schemes based on the anticipated variance”. In : *Canadian Journal of Forest Research* 29.11 (1999), p. 1691-1708. ISSN : 0045-5067. DOI : 10.1139/x99-124.

- [12] François MORNEAU et al. “Le dispositif statistique de l’inventaire forestier national français Échantillonnage spatial d’un objet complexe”. fr. In : *Journée de méthodologie statistique de l’Insee* (2018), 16 pp. URL : http://www.jms-insee.fr/2018/S23_5_ACTE_MORNEAU_JMS2018.pdf.
- [13] J. N. K. RAO. “On Double Sampling for Stratification and Analytical Surveys”. In : *Biometrika* 60.1 (1973), p. 125-133. ISSN : 0006-3444. DOI : 10.2307/2334914.
- [14] H. T. SCHREUDER, M. S. WILLIAMS et R. M. REICH. “Estimating the number of Tree Species in a Forest Community using Survey Data”. en. In : *Environmental Monitoring and Assessment* 56.3 (1999), p. 293-303. ISSN : 1573-2959. DOI : 10.1023/A:1005988402245. URL : <https://doi.org/10.1023/A:1005988402245> (visité le 10/03/2022).
- [15] Don L. STEVENS. “Variable density grid-based sampling designs for continuous spatial populations”. In : *Environmetrics* 8 (1997), p. 167-195.
- [16] Don L. STEVENS et A.R. OLSEN. “Spatially balanced sampling of natural resources”. In : *Journal of the American Statistical Association* 99.465 (2004), p. 262-278.
- [17] Geir-Harald STRAND. “A study of variance estimation methods for systematic spatial sampling”. en. In : *Spatial Statistics* 21 (2017), p. 226-240. ISSN : 2211-6753. DOI : 10.1016/j.spasta.2017.06.008.
- [18] Erkki TOMPPO et al., éd. *National Forest Inventories - Pathways fo common reporting*. Springer, 2010. ISBN : 978-90-481-3233-1.