
LE DISPOSITIF STATISTIQUE DE L'INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL FRANÇAIS

Échantillonnage spatial d'un objet complexe

François MORNEAU(), Stéphanie WURPILLOT(*), Cédric DUPREZ(*), Jean-Daniel
BONTEMPS(**) et Jean-Christophe HERVÉ†(**)*

()IGN, Service de l'Inventaire Forestier et Environnemental (SIFE)*

*(**)IGN, Laboratoire d'Inventaire Forestier (LIF)*

Francois.Morneau@ign.fr

Mots-clés. Échantillonnage spatial, Inventaire forestier, Optimisation

Résumé

En 2005, l'Inventaire forestier national, créé par une ordonnance du Général de Gaulle de 1958, a fortement fait évoluer ses méthodes statistiques, passant d'un inventaire départemental asynchrone, organisé sur des cycles d'une douzaine d'années, à une enquête nationale en continu.

Ce changement s'est notamment traduit par la mise en place d'un nouveau plan d'échantillonnage permettant la couverture systématique et annuellement exhaustive (inventaire dit "continu") du territoire métropolitain, plan qui s'appuie sur une grille d'échantillonnage originale, disposant de propriétés d'optimalité et donnant une souplesse importante au dispositif.

Les estimateurs statistiques ont également été reformulés pour s'adapter à ce nouveau plan à deux phases statistiques post-stratifiées et pour tenir compte des spécificités des variables forestières.

Ces changements ont permis de faire de l'Inventaire français un des plus modernes au monde.

Le contexte exige également une capacité d'adaptation permanente de l'enquête aux contraintes (moyens alloués), aux nouvelles demandes (résultats, précision accrue, ...) et aux enjeux émergents (changement climatique notamment). Le futur inventaire devra s'appuyer sur l'utilisation couplée d'échantillons (remesures), sur de nouvelles technologies (LiDAR terrestre, modèles numériques de hauteur) et de « nouvelles » méthodologies statistiques (*kNN*, *Small Area Estimation*, ...)

Ces évolutions, récentes ou à venir, n'auraient pas été possibles sans le concours d'un statisticien auquel cet article est dédié.

Abstract

The french National Forest Inventory (NFI) has been created in 1958 in order to provide, at different administrative levels, from the department to the whole country, precise informations on the forest ressources.

In 2005, the sampling survey has greatly evolved from a stratified sampling organized at the department level to a modern continuous (in space and time) survey renewed each year whose estimates are now post-stratified.

The french NFI is a constantly evolving survey that need to cope with emerging questions such as carbon estimate, ecosystem monitoring in the context of a global warming that has already greatly affected the forests.

Introduction

Par ordonnance du 24 septembre 1958, le Président du Conseil, Charles de Gaulle, a décidé de la mise en place d'un « inventaire permanent des ressources forestières nationales, indépendamment de toute question de propriété », confié au ministère de l'agriculture en charge des forêts. Cette ordonnance ne vise que les forêts du territoire métropolitain, auxquelles l'enquête est restée limitée jusqu'à aujourd'hui.

Comme dans tous les pays où ils existent, parfois depuis un siècle (Norvège, Suède, Finlande), la mission d'un inventaire est de mesurer les stocks (de surface, de bois, *etc.*), variables d'état du système, ainsi que les flux (accroissement, prélèvement, mortalité), qui permettent d'en approcher la dynamique.

Le programme d'inventaire forestier national (IFN) a été mis en place à partir de 1961, au départ sous forme d'un service spécifique du ministère de l'agriculture (service de l'inventaire forestier national).

En 1994, le service est devenu un établissement public à caractère administratif (Inventaire Forestier National ou IFN) portant le nom de l'enquête dont il a la charge. Depuis le premier janvier 2012, l'IFN a fusionné avec l'Institut géographique national pour former l'Institut national de l'information géographique et forestière qui a conservé le sigle IGN. Dans le cadre de ce nouvel établissement, la mission d'inventaire forestier national est assurée conformément aux articles L.151-1 et R.151-1 du Code forestier.

De 1961 à 2004, l'inventaire a été réalisé par enquêtes départementales successives et asynchrones, avec une périodicité d'environ 12 ans. L'unité départementale avait notamment été choisie pour sa cohérence administrative ainsi que pour sa faible variabilité en charge de travail, qui facilitait la planification des travaux.

À partir de 1985, une cartographie préalable de critères forestiers (types de peuplement, propriété forestière) a été introduite afin de disposer de strates cartographiques destinées à améliorer la précision et la localisation des résultats d'inventaire. Les cartes forestières ainsi constituées ont elles-mêmes été exploitées et utilisées comme de nouveaux résultats, produits ensuite en routine par l'IFN.

En particulier, la carte décrivant les différents types de peuplements forestiers a progressivement été intégrée au référentiel de l'IGN dont elle a d'abord permis de constituer le « fond vert » des cartes au 25 000 ème avant de devenir aujourd'hui une base de données à part entière de l'établissement sous le nom de BD Forêt®.

Dans le cas de l'inventaire départemental, l'échantillon final (de phase 2), était tiré dans chaque strate avec un taux de sondage variable déterminé par une consigne de précision sur le volume sur pied.

Les strates étaient, sauf exception, moins d'une centaine par département et étaient définies de manière à optimiser l'estimation des volumes de bois sur pied.

La taille moyenne des échantillons pour un département était de l'ordre de 20 000 points en phase 1 et de 1 200 points-forêt en phase 2.

Cette méthode, qui offrait en principe le meilleur rapport de la précision au coût, répondait cependant difficilement à une demande évolutive qui privilégie désormais :

1. Des résultats actualisés plus fréquemment pour tous les domaines d'étude, en particulier suite à un événement exceptionnel ;
2. La région administrative plutôt que le département comme subdivision de référence pour les statistiques nationales et européennes (niveaux NUTS) ;
3. Des résultats localisés, relatifs à des domaines spatiaux quelconques ;
4. Des résultats nouveaux pour des variables faiblement corrélées au volume sur pied, variable directrice de la stratification.

Plus spécifiquement, l'inventaire départemental souffrait de deux inconvénients majeurs [12] :

- une mesure des évolutions très imprécise liée au grand intervalle de temps entre deux cycles d'inventaire et à l'absence de remesure (même partielle) des placettes de terrain de l'inventaire précédent ;
- une difficulté de consolidation des résultats entre inventaires départementaux asynchrones qui reposait sur l'hypothèse forte d'une faible évolution des grandeurs, de fait non réaliste dans un contexte de changement rapide des forêts, particulièrement ces 50 dernières années.

En particulier, les problèmes d'actualisation et de consolidation des résultats sur des domaines spatiaux quelconques ont été particulièrement flagrants à l'occasion des tempêtes des 26 (Lothar) et 27-28 décembre 1999 (Martin) qui ont durement frappé la France et provoqué des dégâts considérables en forêt.

L'évaluation des volumes de bois touchés (176 millions sur les 2 400 millions de mètres cubes de bois que comptait alors la France) a mis en évidence les limites du système, les départements affectés ayant, pour certains, été inventoriés plus de 10 ans auparavant. Il n'était par ailleurs pas possible de mettre à jour (après perturbation) les différents départements affectés.

À partir de cette date, la conception d'une nouvelle enquête devenait nécessaire. Comme il ne semblait pas facile d'adapter la méthode départementale pour en corriger les défauts, une méthode alternative a été étudiée puis mise en œuvre fin 2004 [6].

1 L'inventaire forestier national : un sondage systématique dans l'espace et continu dans le temps

1.1 Description de la « nouvelle méthode » de l'inventaire

1.1.1 Organisation

À partir de 2005, le sondage de l'Inventaire s'appuie sur un échantillonnage annuel complet et systématique du territoire. Le découpage temporel est organisé non sur des années calendaires mais sur les périodes de végétation *ie* sur les années de croissance des arbres. Plus précisément, l'échantillon dit de l'année n fait l'objet de mesures sur le terrain, entre octobre-novembre $n - 1$ et octobre-novembre de l'année n , période qui correspond au début de la phase de dormance des arbres.

Les mesures de terrain, indispensables au recueil de la données finale et à la mesures de très nombreux paramètres forestiers (plus d'une centaine de variables notées par points) sont réalisées en continu par des équipes désormais constituées de 2 personnes.

L'inventaire est toujours à deux phases statistiques mais non plus stratifiées en amont.

La répartition de l'effort sur l'ensemble du territoire ainsi que la baisse des moyens dédiés conduisent désormais à un taille d'échantillon annuel moyen par département de 750 points en phase 1 (photo-interprétation) et de 80 points-forêt (terrain) en phase 2.

La chronologie de l'enquête est résumée dans la figure 1.

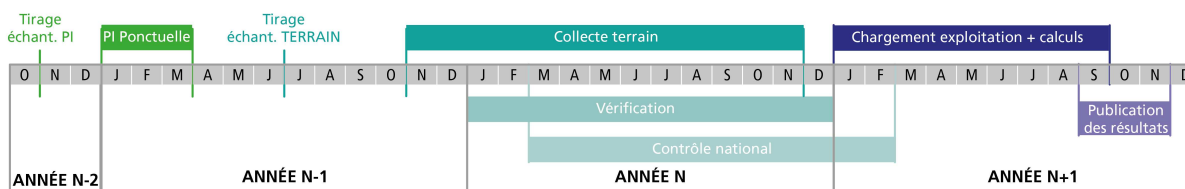


FIGURE 1 – Chronologie d'une campagne d'inventaire (année n)

1.1.2 Estimations

Les résultats sont calculés en combinant plusieurs échantillons, selon une logique de fenêtre glissante à pas annuel, afin d'accroître la précision statistique des estimations.

Les résultats standards portent ainsi sur 5 années successives et fournissent des estimations pour l'année médiane de la fenêtre. Par ce biais, l'ensemble des résultats fournis est mis à jour annuellement (notion d'inventaire continu).

La notion de cycle d'inventaire a donc disparu définitivement depuis 2005.

La figure 2 illustre l'effet du changement de type de sondage qui privilégie désormais une couverture annuelle complète de l'espace-temps au détriment de l'intensité de sondage initiale.

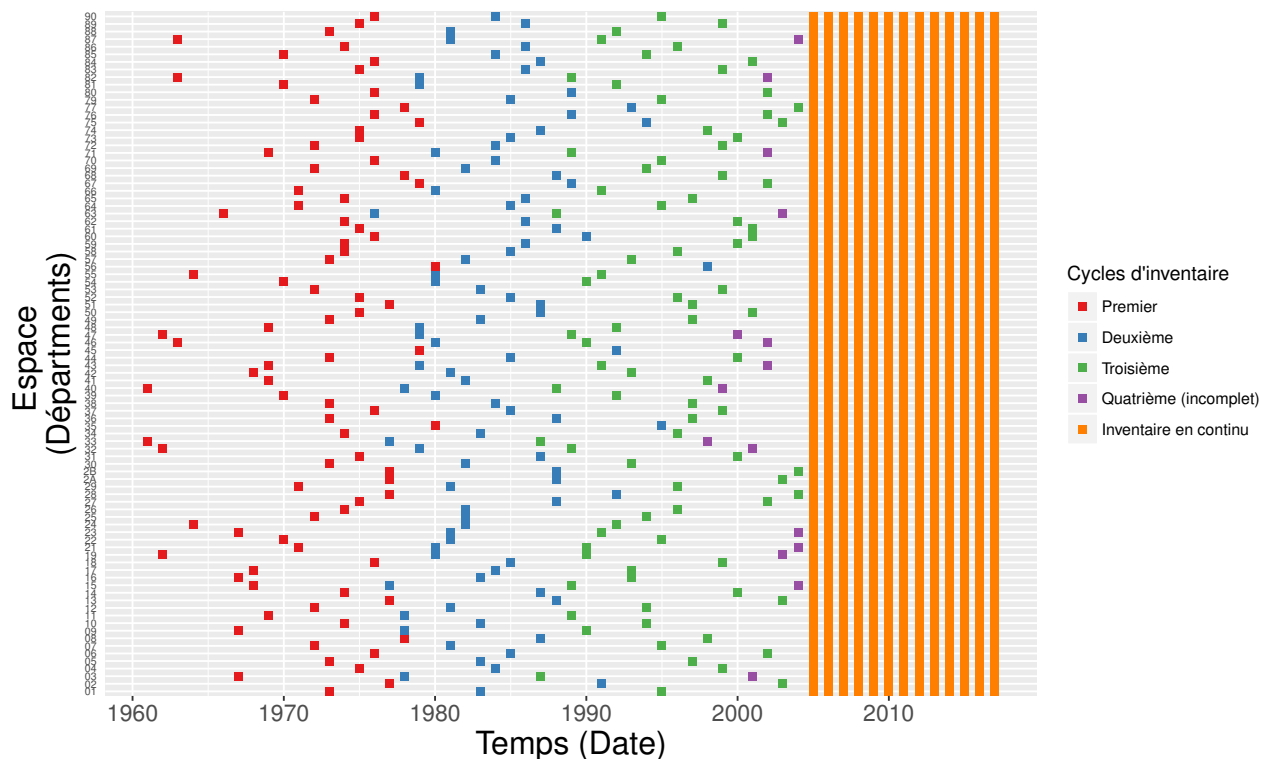


FIGURE 2 – Couverture espace-temps de l'IFN, depuis les inventaires départementaux jusqu'à l'inventaire en continu

Le calcul des résultats fait intervenir un estimateur à deux phases statistiques, toutes deux post-stratifiées.

La post-stratification de phase 1 fait intervenir les informations suivantes, sous forme de couches cartographiques :

- une typologie simplifiée issue de la carte forestière de l'IGN ;
- un découpage administratif départemental de la France ;
- une couche de la propriété forestière distinguant les forêts domaniales (État), des autres forêts publiques (communes, collectivités) et les forêts privées.

En phase 2, la post-stratification s'appuie sur les mêmes couches de propriété forestière et des départements mais utilise cette fois l'information photo-interprétée de phase 1.

1.1.3 Contraintes de la nouvelle méthode

Une contrainte fondamentale est la nécessité de respecter la planification annuelle, chaque campagne de mesure devant être complète avant de pouvoir passer à la suivante.

Comme il n'y a pas de pause dans l'année pour les équipes de terrain, tout retard a potentiellement des conséquences sur la ou les campagnes suivantes et peut éventuellement compromettre l'enquête. Une évaluation correcte de la charge est par conséquent essentielle.

Sur le plan logistique, l'adoption de la nouvelle méthode a conduit à des changements majeurs : les équipes de terrain, auparavant concentrées à tout instant dans quelques départements, sont désormais dispersées sur l'ensemble du territoire, puisque chaque échantillon annuel est uniformément réparti dans l'espace.

Comme les échantillons annuels sont spatialement nettement moins denses que ne l'étaient les échantillons départementaux, les temps d'accès aux points de sondage ont été augmentés. Cependant, chaque équipe est globalement affectée à un territoire réduit dans lequel elle est employée une grande partie de l'année.

1.1.4 Réactivité

Après un événement majeur (tempête, incendie), l'actualisation rapide des principaux résultats est désormais possible (et nécessaire) en revisitant les échantillons des années précédentes. Ainsi, après la tempête Klaus (24 janvier 2009), plus de 3000 points d'inventaire ont pu être revisités et les résultats définitifs fournis moins d'un mois après l'événement [7] (Figure 3).

Ces événements perturbent toutefois l'organisation ordinaire de l'inventaire, et supposent également une réactivité logistique afin d'absorber la charge de travail supplémentaire.

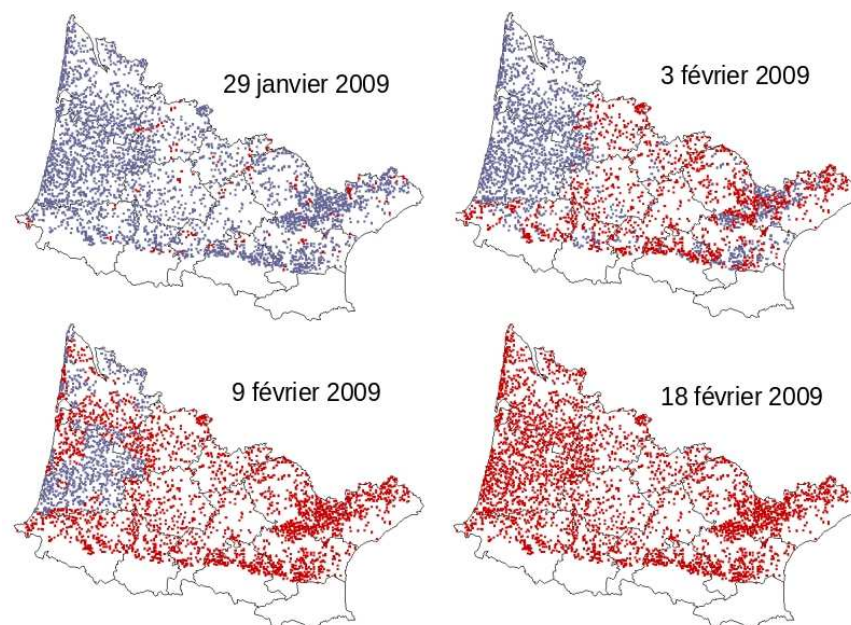


FIGURE 3 – Campagne de remesure après la tempête Klaus du 24 janvier 2009. En rouge, les points revisités, en bleu les points à revisiter

1.1.5 Champ de l'enquête

Le programme d'inventaire forestier national porte sur l'ensemble du territoire métropolitain (Corse comprise).

Son objet principal est la forêt, avec un effort plus particulier sur la forêt dite « disponible pour la production de bois », c'est-à-dire où rien ne s'oppose à la récolte de bois.

La notion de forêt s'entend au sens de sa définition internationale, appliquée en France depuis 2005 [3] :

Terres occupant une superficie de plus de 0,5 hectares avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 mètres et un couvert forestier de plus de 10 pour cent, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils in situ. Sont exclues les terres à vocation agricole ou urbaine prédominante.

Un seuil de largeur de 20 m minimum est également appliqué qui distingue la forêt des formations linéaires arborées de diverses natures (haies, cordons boisés, alignements, etc.)

Les territoires d'Outre-mer n'ont jamais été inventoriés jusqu'à présent.

Cependant la « loi d'Avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt » (2014-1170) adoptée le 13 octobre 2014 prévoit, en son article L. 151-3 : « L'inventaire permanent des ressources forestières nationales prend en compte les particularités des bois et forêts situés en Guadeloupe, en Guyane, en Martinique, à La Réunion, à Mayotte, à Saint-Barthélemy, à Saint-Martin et à Saint-Pierre-et-Miquelon. »

L'enjeu principal concerne toutefois la Guyane qui, avec 8 millions d'hectares de forêts, constitue le compartiment prédominant de ces nouveaux territoires, et représente à elle seule la moitié de la surface des forêts métropolitaines.

Le caractère considérable de cette surface, son statut singulier (seule forêt tropicale « européenne » au sein du bassin amazonien), ses particularités (biodiversité exceptionnelle, climat équatorial) et son éloignement des moyens logistiques métropolitains fait du futur inventaire de ce territoire un défi technique et budgétaire.

1.2 Le plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage est à deux phases statistiques. La première phase est une étape de photo-interprétation (PI) systématique qui a pour but de repérer et de classer sur photo aérienne – plus précisément des orthophotographies, le plus souvent en (proche) infrarouge-couleur – les points de couverture boisée et non boisée.

En deuxième phase, un sous-échantillon est tiré, à probabilités de tirage variables selon les classements de la première phase, dans les couvertures boisées qui font l'objet d'un contrôle sur le terrain et de mesures précises lorsqu'il y a lieu. Les points situés dans les couvertures ne faisant pas l'objet d'un contrôle terrain sont conservés tels quels dans l'échantillon final de phase 2.

La constitution des échantillons annuels (première et deuxième phase) s'appuie sur une grille d'échantillonnage kilométrique qui couvre l'ensemble du territoire. Les propriétés de cette grille, détaillée plus loin, offrent une grande souplesse au service de l'inventaire pour adapter au mieux chaque échantillon annuel et garantissent une couverture spatiale optimale pour la fenêtre de publication de 5 ans.

1.2.1 Les unités d'échantillonnage - placettes de mesure

Formellement, les unités d'échantillonnage sont des points du territoire tirés au sein des mailles kilométriques de la grille d'échantillonnage.

Généralement un point, dit principal, est tiré au hasard, auquel peuvent être adjoints jusqu'à 3 autres points afin de densifier l'échantillon si nécessaire.

Le tirage s'effectue en fait dans un carré de 900 m de côté qui permet d'éviter les recouvrements et assure une mise à distance entre points de mailles adjacentes (Figure 4). Ce faisant, 19 % du territoire est de fait exclu du tirage.

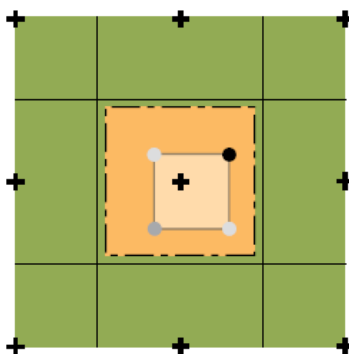


FIGURE 4 – Points échantillon au sein d'une maille. Les croix sont les nœuds des mailles (carrés noirs). De 1 à 4 points sont tirés dans un carré de 900 m de côté

1.2.2 Les mesures

Dans les faits, les mesures et observations sont réalisées, non pas sur des points du territoire, mais sur des placettes de mesure circulaires centrées sur ces points, de surface non nulle.

Leur emploi est rendu nécessaire par l'impossibilité de mesurer ponctuellement la plupart des grandeurs forestières.

En effet, la mesure d'une densité (volume de bois par hectare par exemple) nécessite la mesure d'un certain nombre d'arbres sur une surface s donnée, celle de la placette.

Sur une placette d'inventaire, une grandeur mesurée est fondamentalement la régularisée (moyenne spatiale mobile) de la grandeur que l'on cherche à observer [2].

L'ensemble des arbres portés par ces placettes constitue ainsi, au-delà des points, un deuxième type d'échantillon sur lequel sont réalisées de nombreuses mesures.

Le choix des placettes est guidé par deux contraintes principales :

- une taille suffisante pour bien régulariser la microstructure liée à la distribution des arbres en forêt, « îlots de bois » dans un océan de vide » [2] ;
- une taille pas trop importante pour être petite devant la macrostructure forestière et pour en permettre la réalisation pratique dans des délais raisonnables.

Cela a conduit concrètement à retenir des placettes circulaires concentriques (figure 5) :

- une placette de 6 m pour la mesure des petits bois (diamètre de 7,5 à 22,5 cm) ;
- une placette de 9 m pour la mesure des bois moyens (diamètre de 22,5 à 37,5 cm) ;
- une placette de 15 m pour la mesure des gros bois (diamètre supérieur à 37,5 cm) ;
- une placette de 25 m de description du peuplement forestier.

La placette de 25 m est commune aux deux phases statistiques, l'étape de classification des points par photo-interprétation s'appuyant en effet uniquement sur cette surface de description.

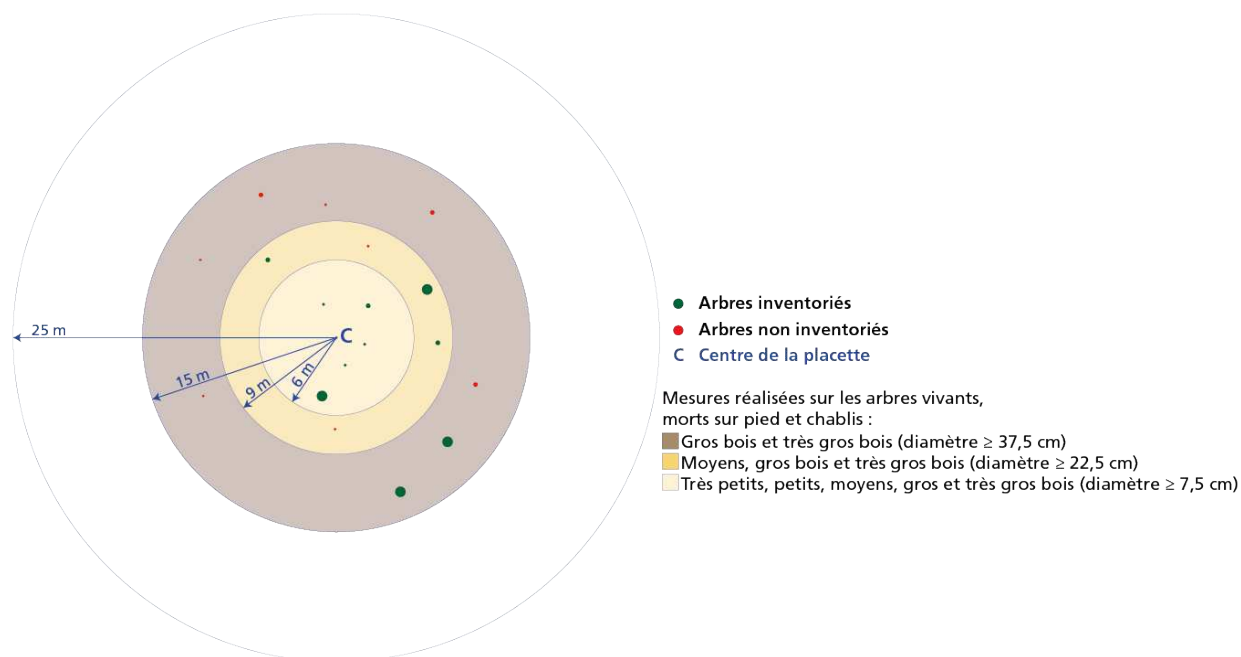


FIGURE 5 – Placettes de mesure de l'Inventaire forestier français

1.2.3 « Retour sur points », notion d'inventaire semi-permanent

À partir de 2010, et grâce à la proximité des mailles des échantillons n et $n - 5$, en même temps qu'un nouvel échantillon est créé et visité sur le terrain, l'échantillon $n - 5$ est revisité, d'abord partiellement, puis, entièrement à partir de 2015.

Ce retour est destiné à estimer de manière précise et fiable les évolutions (flux) en forêt comme l'accroissement des peuplements, la mortalité des arbres ou les prélèvements de bois.

Par conséquent, les placettes, initialement uniquement temporaires, et ce depuis les débuts de l'inventaire, ont désormais un caractère « semi-permanent » puisqu'elles font l'objet d'une nouvelle mesure, 5 ans après leur mise en place.

2 Description de la grille d'échantillonnage

Afin de répartir au mieux les échantillons annuels successifs, leur tirage s'appuie sur un maillage régulier et complet du territoire.

La grille de base de l'Inventaire est ainsi une grille carrée kilométrique, définie dans le système de projection dit « Lambert 2 étendu ». Elle couvre l'ensemble du territoire métropolitain et est orientée selon les axes Nord-Sud et Est-Ouest du système de projection.

Les points centraux de la grille constituent les nœuds de cette dernière.

2.1 Fractionnement annuel

La grille de base kilométrique est fractionnée en grilles annuelles présentant les mêmes propriétés de répartition uniforme dans l'espace. Chaque grille annuelle représente un dixième de la grille initiale, soit un maillage de 10 km^2 .

La grille initiale a d'abord été organisée en positionnant les 5 premières années (2005 – 2009) sur la moitié des mailles disponibles.

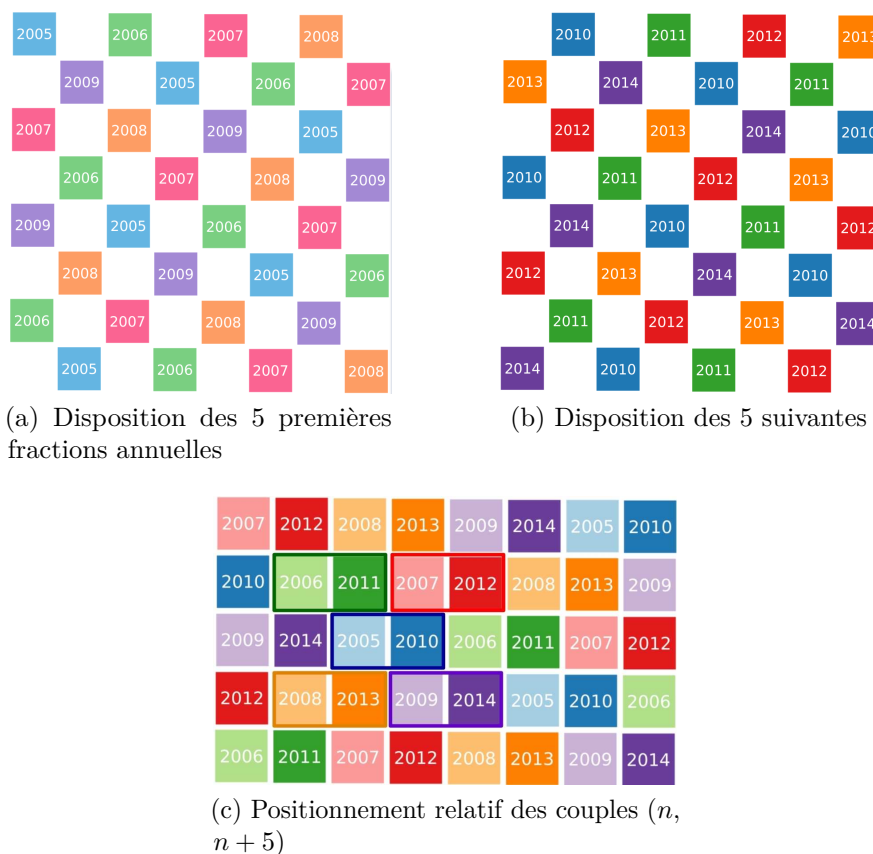


FIGURE 6 – Organisation de la grille de base par groupes de 5 années

Les 5 années suivantes (2010 – 2014) ont ensuite été placées de telle manière que les fractions n et $n + 5$ sont adjacentes (Figure 6) [4] et possèdent les mêmes propriétés (niveau).

2.2 Niveaux de la grille et poids des points

En plus de son organisation en fractions annuelles, la grille est divisée en niveaux.

Ces niveaux sont organisés en puissance de 2 de telle sorte que chaque grille de niveau n comporte deux fois plus de mailles que la grille de niveau supérieur $n + 1$. La maille $n + 1$ est donc de surface double par rapport à la maille de niveau n .



(a) Niveau 1 - Carrés de 10 km²



(b) Niveau 2 - Carrés de 20 km²



(c) Niveau 3 - Carrés de 40 km²



(d) Niveau 4 - Carrés de 80 km²

FIGURE 7 – Les niveaux emboîtés des grilles annuelles

L'organisation en niveaux et la structure géométrique sont conservées au sein de chaque fraction annuelle. Le passage d'un niveau au suivant se fait en supprimant un nœud sur deux en quinconce. À chaque montée d'un niveau, la surface de la maille, toujours carrée et d'orientation alternativement « droite » et oblique, est bien doublée (Figure 7).

Les niveaux permettent de créer aisément des sous-échantillons de la grille annuelle de base. Le poids statistique affecté aux points tirés est alors directement fonction de ces niveaux.

Ainsi, par rapport aux points de niveau 1 (poids arbitraire 1), les points tirés au niveau n de la grille (sous réserve qu'un seul point soit tiré au sein de la maille kilométrique), auront un poids de 2^{n-1} .

2.3 Propriétés de la grille - optimalité

À partir d'un maillage carré comme celui de la grille de base, le fractionnement en sous-réseaux (annuels ici) également carrés n'est possible que par des entiers (diviseurs) de la forme $a^2 + b^2$ où a et b sont les coordonnées entières des nœuds du sous-réseau.

Ainsi, les fractionnements en 10 ($= 3^2 + 1^2$) et en 5 ($= 2^2 + 1^2$) sont possibles.

Par ailleurs, le choix d'un fractionnement organisé en 2×5 fractions juxtaposées permet de profiter d'une propriété particulière du maillage carrés. En effet, dans un réseau carré, chaque maille est entourée de 4 autres (ses plus proches voisins). Un fractionnement en 5 garantit une couverture spatiale complète et symétrique sur 5 ans qui correspond justement au choix de la fenêtre temporelle de publication des résultats en France, comme d'ailleurs dans de nombreux autres pays forestiers.

Ainsi, comme les points $n - 5$, à 1 km des nouveaux points, sont revisités, le maillage de l'inventaire peut avant tout être décrit comme un fractionnement en 5 mailles rectangulaires (de 2 km X 1 km) couvrant de manière régulière et complète l'ensemble du territoire.

À ce titre, l'organisation des fractions annuelles dans l'espace et dans le temps est effectivement optimisée, de même qu'elle utilise de façon optimale les propriétés du maillage carré.

3 Les évolutions de l'inventaire - perspectives

3.1 Vers une précision accrue

Un des enjeux des inventaires forestiers porte sur l'amélioration de la précision et de la résolution des résultats fournis, en réponse à une demande accrue d'information sur les territoires forestiers, porteurs d'enjeux majeurs dans le contexte de changement global et de celui, plus récent de la stratégie européenne pour la bioéconomie [5].

La souplesse du système français, ses propriétés et notamment l'organisation de son système d'échantillonnage, ouvrent la voie à des améliorations sensibles de l'enquête sans augmentation de ses coûts.

3.1.1 Par combinaison d'inventaire

Quand on considère le dispositif actuel de l'inventaire français, capable, dans une même année de mesure, de constituer un nouvel échantillon annuel et de revisiter un échantillon précédent datant de 5 ans, on peut avoir l'idée de coupler ces deux échantillons afin d'améliorer significativement la précision et la résolution des résultats.

Deux cas se présentent alors :

1. L'estimation des stocks ;
2. L'estimation des flux.

Dans le premier cas, sous réserve de mise à jour complète des points revisités, les variables d'état doivent pouvoir être dérivées de la même manière pour les deux échantillons et, ainsi, conduire à un doublement virtuel de l'intensité de sondage.

Dans le second, les points revisités ayant justement été mis en place pour une évaluation correcte des flux, l'utilisation conjointe des deux échantillons n'est possible que par la mise en œuvre de méthodes d'imputations destinées à compléter les informations manquantes du nouvel échantillon.

Ce travail, et les méthodes pour y parvenir, sont à développer à l'inventaire et constituent un champ d'innovation certain du sondage statistique forestier.

3.1.2 Par utilisation d'informations auxiliaires

3.1.2.1 Quelles informations ?

L'emploi de données auxiliaires n'a de sens que dans la mesure où elles apportent une information pertinente, c'est-à-dire *a minima* corrélée aux variables dont on souhaite améliorer la précision.

Depuis sa mise en place, l'inventaire français s'est appuyé sur les photographies aériennes qui possèdent les propriétés fondamentales d'une haute résolution, d'une couverture systématique du territoire et d'une continuité dans le temps. Cependant, l'information véritablement utilisable n'était pas les photographies elles-mêmes mais les données (cartographie des types de peuplement, photo-interprétation de points d'inventaire, *etc.*) qui en étaient dérivées. C'est encore le cas aujourd'hui.

Avec le temps, la diversification des capteurs et la disponibilité de chaînes de traitement numériques, les informations issues de la télédétection se sont enrichies et multipliées. En particulier, des images satellites à haute résolution, des nuages de points (3D) issus du LiDAR (Light Detection And Ranging) aérien ou de modèles photogrammétriques dérivés des campagnes d'acquisition des photographies aériennes sont désormais disponibles pour des applications forestières [8].

Malgré tout, si ces nouvelles sources de données constituent autant d'informations auxiliaires potentiellement mobilisables par les inventaires forestiers nationaux, leur utilisation suppose qu'elles présentent *a minima* les caractéristiques suivantes :

- une disponibilité complète à l'échelle du territoire national ;
- une homogénéité aux différentes échelles d'utilisation ;
- un décalage temporel limité avec les données de terrain ;
- une possibilité de renouvellement dans le temps ;
- un coût raisonnable (diminué) par rapport aux technologies précédentes.

Par exemple, les couches d'informations issues de satellites dont les programmes ont des durées de vie courtes peuvent difficilement être prises en compte, quelles qu'en soient les qualités. Ainsi, l'inventaire forestier finlandais mobilise depuis les années 90 les données Landsat [11] dont le programme existe depuis 1972 et continue de nos jours.

En particulier, les traitements photogrammétriques réalisés en routine permettent désormais de disposer de modèles numériques de surface (MNS) qui ont, par ailleurs, la grande qualité d'être renouvelés au rythme des campagnes de photographies aériennes de l'IGN, soit dans un délai de 3 ans, à l'échelle du territoire. Cependant, du point de vue des variables forestières, c'est le modèle numérique de hauteur (MNH) qui s'avère le plus pertinent. Or la qualité du MNH résulte en grande partie de celle du modèle numérique de terrain (MNT) : $MNH = MNS - MNT$.

L'utilisation efficace des MNH se heurte encore en France, et contrairement à de nombreux pays européens (Suisse, Italie, Autriche, Angleterre bientôt, *etc.*) à l'absence d'un MNT de qualité suffisante, sous couvert forestier. Le coût des données LiDAR est en effet un frein à la généralisation de leur acquisition, qui permettrait de disposer partout d'un MNT utilisable en forêt.

À ce titre, il est utile de préciser que l'acquisition d'une couverture LiDAR à haute résolution (10 impulsions / m²) fait partie des investissements suggérés pour le 3^{ème} programme des investissements d'avenir [1]. Son coût est en effet substantiel (160 M€), et pose la question de son renouvellement temporel. Cependant, des évolutions technologiques récentes, moins onéreuses, pourraient permettre d'en disposer dans quelques années.

Du fait de la faible disponibilité des nouvelles couches d'informations, les données auxiliaires utilisées actuellement se limitent essentiellement à la BD Forêt qui permet déjà d'améliorer grandement les estimations de l'inventaire.

3.1.2.2 Pour quels usages ?

L'utilisation d'informations auxiliaires s'envisage toujours dans un but d'amélioration des résultats.

Dans le cadre de l'inventaire forestier national, l'usage le plus simple consiste à intégrer les nouvelles sources d'information par le biais de la post-stratification, mise en œuvre précisément pour cela : ne pas dépendre de strates définies une fois pour toute mais pouvoir les définir *a posteriori* si de nouvelles données plus pertinentes deviennent utilisables.

Par exemple, les MNS étant calculables également à partir des anciennes campagnes de photographie aérienne, sous réserve toujours d'un MNT fiable (LiDAR) que l'on peut considérer comme stable en forêt, il est parfaitement envisageable d'utiliser cette information nouvelle afin d'améliorer la précision des estimations. Des tests portant sur des portions restreintes du territoire ont d'ailleurs été menés qui concluent à l'intérêt de cette donnée.

Cependant, les résultats des inventaires ne sont pas utilisés qu'à l'échelle du pays ou des régions et de plus en plus d'études locales (bassin d'approvisionnement) nécessitent une information précise et mieux résolue.

Des travaux de recherche sont justement en cours à l'IGN. Ils portent notamment sur l'emploi de techniques statistiques nouvelles à l'inventaire français. Ces méthodes, initialement développées en Finlande [11] dans les contextes forestiers plus simples sont testées et adaptées au cas de la forêt française, par nature la plus diversifiées d'Europe.

Il s'agit notamment d'utiliser des données auxiliaires offrant une couverture complète de la zone d'intérêt et d'utiliser des méthodes d'imputation afin d'améliorer la résolution et la précision locale des estimations. La méthode statistique employée, dite k-NN (k-Nearest Neighbors) consiste à imputer à chaque pixel de la carte les valeurs pondérées issues des k plus proches voisins, cette proximité s'entendant dans l'espace des variables.

D'autres recherches en cours portent sur l'emploi des techniques de « small area estimation » [10] afin d'améliorer la précision des résultats.

3.2 Vers la production de nouveaux résultats

Une autre voie d'amélioration des inventaires, au-delà de leur précision et de leur résolution spatiale, consiste à enrichir les résultats afin de répondre aux nouveaux enjeux [5].

Il s'agit là d'un axe de travail qui a, avec d'autres, justifié la création d'un laboratoire de recherche en inventaire forestier (Laboratoire d'Inventaire Forestier ou LIF) au sein de l'IGN en 2013.

Dans les perspectives à court ou moyen terme, on peut citer celle de disposer, au-delà des volumes, d'une comptabilité biomasse et carbone grâce aux progrès de la recherche [9].

L'évaluation des volumes et de la forme des arbres fait également l'objet de recherches importantes. Ainsi l'utilisation de technologies récentes comme le LiDAR terrestre, qui fournit des nuages de points en trois dimensions et à haute densité des arbres et peuplements scannés, permet d'acquérir des mesures précises qui seraient beaucoup trop coûteuses par des mesures terrain classiques.

4 Conclusions

La forêt est désormais au cœur de nouveaux enjeux, accentués par les changements globaux en cours.

Elle est source de services écosystémiques fondamentaux pour la société puisqu'elle est à la fois une source renouvelable de produits pour une nouvelle bioéconomie, elle assure un rôle d'atténuation des changements climatiques (puits de carbone), et de régulation du climat, elle abrite une part importante de la biodiversité (réservoir), elle joue un rôle essentiel de protection contre l'érosion et de maintien de la fertilité des sols, elle intervient, en plus de celui du carbone, dans le cycle bio-géochimique de l'eau (épuration) ou remplit un rôle socioculturel (relation de l'homme à la forêt).

Depuis près de 60 ans désormais, l'Inventaire forestier national français a dû s'adapter au fur et à mesure aux demandes en constante évolution et passer d'un inventaire des ressources en bois à un outil souple et adaptable à même de répondre aux besoins nouveaux.

Pour ce faire, un changement majeur de méthodologie a été opéré en 2005 qui passe désormais par un plan d'échantillonnage systématique dans l'espace et dans le temps. L'organisation même de cet échantillonnage est unique en Europe et tâche d'exploiter au mieux les propriétés fondamentales du maillage carré du territoire.

Cette transformation s'est toutefois effectuée au prix d'une réduction drastique de la taille des échantillons et l'un des enjeux cruciaux pour l'inventaire lui-même est celui de l'optimisation de son dispositif statistique. Il s'agit d'exploiter au mieux les caractéristiques des plans d'échantillonnages successifs, d'intégrer de nouvelles sources d'informations et de développer des méthodologies statistiques innovantes pour en tirer le meilleur parti.

En effet, l'organisation du dispositif confère à l'inventaire français toutes les propriétés lui permettant de se positionner comme un outil de suivi (« monitoring ») des écosystèmes forestiers, indispensables dans le cadre de changements en cours et à venir.

La vision de cet inventaire moderne était portée par Jean-Christophe Hervé, notre rôle est désormais de la mettre en œuvre...

Références

- [1] Antoine D'AMÉCOURT et al. *Plan Recherche et Innovation 2025 - Filère Forêt-Bois*. Rapp. tech. 2016.
- [2] Pierre DUPLAT et Georges PERROTTE. *Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers*. ONF, 1981, 432 p.
- [3] FAO. *Évaluation des ressources forestières mondiales 2020 - Termes et Définitions* -. Français. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 2018.
- [4] Jean-Christophe HERVÉ. "National Forest Inventories - Assessment of wood availability and use". In : sous la dir. de Claude VIDAL et al. Springer, 2016. Chap. France, p. 385–404.
- [5] Jean-Christophe HERVÉ et al. "Évaluation des ressources forestières pour la bioéconomie : quels nouveaux besoins et comment y répondre ?" In : *Innovations Agronomiques* 56 (août 2016), p. 71–80.
- [6] Jean-Christophe HERVÉ et al. "L'inventaire des ressources forestières en France: un nouveau regard sur de nouvelles forêts". In : *Revue Forestière Française* LXVI.3 (2014), p. 247–260. DOI : 10.4267/2042/56055. URL : <http://hdl.handle.net/2042/56055>.
- [7] IFN. *Tempête Klaus du 24 janvier 2009 : 234 000 hectares de forêt affectés à plus de 40 %, 42,5 millions de mètres cubes de dégât*. 2009.
- [8] Annika KANGAS et al. "Remote sensing and forest inventories in Nordic countries – roadmap for the future". In : *Scandinavian Journal of Forest Research* 33.4 (2018), p. 397–412. DOI : 10.1080/02827581.2017.1416666.
- [9] Jean-Michel LEBAN et al. "Measurement of the annual biomass increment of the French forests, XYLODENS MAP project". In : *Modelling Wood Quality, Supply and Value Chain Networks-Wood QC*. Québec, 2016.
- [10] J. N. K. RAO et Isabel MOLINA. *Small Area Estimation*. 2nd edition. Wiley series in survey methodology. Wiley, 2015.
- [11] Erkki TOMPPA. "Satellite image-based national forest inventory of Finland". In : *Photogrammetric Journal of Finland* 12.1 (1990), p. 115–120.
- [12] Jean WOLSACK. *Révision de la méthode de sondage de l'Inventaire forestier national*. Document interne. IFN, 2004.