

APPROCHE D'ESTIMATION DU VOLUME-TIGE DE PEUPELEMENTS FORESTIERS PAR COMBINAISON DE DONNEES LANDSAT ET DONNEES TERRAIN APPLICATION À LA PINERAIE DE TLEMCCEN-ALGÉRIE

Kada Bencherif, Houari Tadj
Département des ressources forestières
Faculté des sciences de la nature et de la vie ; BP119 ; Université de Tlemcen, 13000 Tlemcen. Algérie
bencherifk@yahoo.fr; kadersherif2@gmail.com

Résumé

Une approche méthodologique s'appuyant sur la combinaison de données satellitaires et données de terrain est proposée pour l'estimation du volume-tige de peuplements forestiers hétérogènes ou peu homogènes. L'objectif est d'évaluer la disponibilité forestière, en inventoriant moins de 1% de la surface étudiée et avec une erreur maximale de 15%. L'approche consiste en la réalisation de trois étapes principales : i) Analyse de la variance sur le volume-tige, ii) Classification des données satellitaires et iii) Désignation et inventaire des pixels-échantillons. L'analyse et le calcul de la variance permet d'orienter les calculs du volume en fonction de sa variabilité dans les différentes strates de la forêt alors que la classification des données satellitaires vise à obtenir une stratification de la forêt. La troisième étape consiste en la sélection de pixels-échantillons sur l'image classifiée puis la géolocalisation, l'installation et le cubage des placettes-terrain correspondantes (même dimension spatiale que le pixel de l'image utilisée). Appliquée sur une futaie peu homogène de pin d'Alep (forêt de Tlemcen, Nord-Ouest algérien), l'approche a permis d'estimer un volume global sur pied du peuplement égal à $30\,595\text{m}^3 \pm 15.6\%$ et ce en inventoriant 0.4% seulement de la surface totale. L'analyse de variance sur 12 placettes-échantillons a mis en évidence le caractère peu homogène de la forêt et la faible variabilité du volume-tige. Cependant, elle fait apparaître aussi que la stratification apporte une légère amélioration à la précision (15.6%) contre 17.6% sans stratification. La classification dirigée d'une image Landsat (Mai 2002) par la méthode du maximum de vraisemblance (précision moyenne de 96%) a permis de stratifier la zone étudiée en six classes (forêt très dense, forêt dense, forêt claire, matorral, herbacées, autres). Pour chaque strate de forêt, le cubage complet de 4 placettes-échantillons comparables en dimension au pixel (30m x 30m), a fourni le volume-tige moyen par pixel, alors que la généralisation de celui-ci à l'ensemble des pixels a permis de déterminer le volume total de chaque strate. Vu les confusions générées par la classification au profit des objets pistes, routes et matorral, le volume global a été revu à la baisse (taux de réduction de 10%) et la valeur du volume total corrigé était de $27\,535\text{m}^3 \pm 15.6\%$, une erreur, bien que non conforme à celle exigée par l'aménagement forestier (max $\pm 10\%$), s'approche de celle généralement admise (une moyenne de $\pm 15\%$) pour certains inventaires simplifiés.

Mots clés: inventaire forestier, volume-tige, Landsat, échantillonnage stratifié, pin d'Alep

Abstract

A methodological approach based on the combination of both satellite and field data is proposed for estimating the stem-volume of rather heterogeneous forest stands. The aim is to evaluate the wood availability, inventorying less than 1% of the studied surface with a maximum error of 15%. The approach involves three main steps: i) Analysis of variance on the stem-volume, ii) Classification of satellite data and iii) Designation and inventory of the pixel-samples. The analysis of the variance allows directing the calculations of the volume according to its variability in the different strata of the forest while the classification of satellite data provides a stratification of the forest. The third step is the selection of pixels-samples on the classified image and, once in the field, the location by GPS, installation and scaling of the corresponding plots (same spatial size as the pixel of the image used). Applied to a not very homogeneous high Aleppo pine forest (Tlemcen, Northwest of Algeria), the method permitted to determine an overall volume equal to $30,595\text{m}^3 \pm 15.6\%$ and inventorying less than 0.4% of the total surface. Analysis of variance of 12 sample plots showed the homogeneous nature of the forest and the low variability of the stem volume. It also showed that stratification brings a slight improvement in accuracy (15.6%) against 17.6% without stratification. Supervised classification of Landsat image (May 2002) using the method of maximum likelihood (average precision of 96%) led to stratify the study area into six classes (very dense forest, dense forest, clear forest, shrub-land, herbaceous, others). For each stratum of forest, the full scaling of four sample-plots comparable in size to the pixel (30m x 30m), provided the average volume per pixel while the generalization of this volume to the whole pixels, provided the total volume of the stratum. Given the confusion generated by the classification because of the presence of skid trails and shrub-lands, this volume has been revised downwards (10% reduction) and the value of the total corrected volume obtained was $27\,535.2\text{m}^3 \pm 15.6\%$, an error, considered as not in conformity with forest management requirements ((Max $\pm 10\%$), but generally admitted (average of $\pm 15\%$) for some approximative inventories.

Keywords: forest inventory, stem-volume, Landsat, stratified sampling, Aleppo pine

1. Introduction

L'aménagement forestier exige des informations utiles sur le peuplement forestier (informations descriptives tels que le régime, la forme, l'âge et informations dendrométriques, comme l'accroissement, le diamètre moyen, la hauteur moyenne et le volume-tige sur pied). Dans la pratique forestière, le volume-tige du

peuplement forestier est estimé principalement à travers des méthodes d'inventaire utilisant des placettes-échantillons où les paramètres hauteur et diamètre à hauteur de poitrine (à 1.3m du sol) sont mesurés directement (Baccini et al., 2004). Or ces méthodes bien qu'elles fournissent des résultats précis, ont l'inconvénient d'être coûteuses (Mäkelä et

Pekkarinen, 2004). Dans certains pays, la photogrammétrie¹ y est intégrée et y joue un rôle important, en réduisant le nombre de ces placettes, et favorisant la mesure des paramètres dendrométriques (hauteur et diamètre) nécessaires au calcul du volume-tige (Koch, 2012).

Comparées aux données satellitaires de moyenne résolution spatiale comme Landsat, les photographies aériennes présentent une meilleure résolution mais leur coût d'acquisition est élevé. C'est aussi valable pour les images de très grande résolution spatiale (Ikonos, Quickbird, Pleiades). Le potentiel de l'information texturale des images Pléiades (70cm en panchromatique, 2m en multispectral) semble prometteur pour estimer les variables de structure forestière comme le diamètre des couronnes ou la hauteur des arbres (Beguet et al., 2014). Mais les modèles de surface qui permettent une estimation directe de la hauteur, sont les mieux appropriés pour caractériser la structure des peuplements. Les images SPOT et pléiades offrent cette possibilité d'obtenir des modèles de surfaces à partir de couple d'images stéréoscopiques (Belouard et al., 2015). En dépit de ces avantages, il sera difficile d'obtenir avec des images de très haute résolution, une couverture complète d'une zone étendue, et la réalisation de cette tâche reste coûteuse.

Les images de moyenne résolution comme Landsat sont de plus en plus intégrées dans les inventaires forestiers vu leurs avantages (coût attractif, vision synoptique d'une grande étendue, répétitivité etc.) (GFOI, 2013; Bettinger et Hayashi, 2006). Bien souvent, l'intégration de ces données repose sur une approche en deux phases: la stratification forêt-non forêt à l'aide de données Landsat, et l'échantillonnage avec les données satellitaires à haute ou très haute résolution. Mais bien qu'elles ne peuvent pas fournir seules, des mesures dendrométriques absolues comme le volume (Wulder et al., 2003), elles offrent cependant la possibilité d'obtenir une corrélation potentielle entre la biomasse et le rayonnement électromagnétique (Lu, 2006) et surtout d'estimer le volume-tige si elles sont combinées avec des placettes d'inventaires (Reese et al., 2003). A titre d'exemples, Makela et Pekkarinen (2004) ont démontré que l'emploi des Knn et les valeurs moyennes des pixels d'un sous-peuplement donnent de bonnes estimations du volume total. Dans ce même sens, Tomppoa et al., (2008) ont combiné les placettes-échantillons de l'inventaire forestier avec les données satellitaires à travers l'approche des Knn pour l'analyse descriptive et dendrométrique des peuplements forestiers.

La stratification² de la forêt à partir de données satellitaires optiques permet soit d'améliorer la précision des estimations, soit de réduire le nombre des placettes d'échantillonnage sans perdre en précision (Koch, 2012). En plus d'être stratifié, l'échantillonnage peut être aléatoire ou systématique: d'un point de vue pratique, ce dernier est certainement attrayant (il est plus aisé de suivre un maillage sur le terrain) et du fait

1. Le développement de la photographie aérienne numérique de nouvelle génération (haute résolution spatiale) favorisera encore certainement davantage l'usage complémentaire des photographies aériennes par les forestiers, en association avec les mesures terrestres (Balenovic et al., 2013).

2. Il existe deux approches : la pré-stratification ou la post-stratification. Si la pré-stratification influe sur le plan de sondage retenu, la post-stratification permet d'améliorer la précision du plan de sondage existant (Koch, 2012).

que l'échantillon garantit une certaine représentativité des différentes parties de la surface. La procédure de l'échantillonnage systématique fournit des estimateurs plus efficaces que l'échantillonnage aléatoire simple (Jayaraman, 1999). L'échantillonnage stratifié possède l'avantage d'être plus précis mais exige des données suffisantes pour une stratification appropriée. Or, pour les peuplements aux canopées fermées, les données TM (Thematic Mapper) de Landsat offrent peu d'information sur les paramètres de densité de couvert, de hauteur et de diamètre (surface terrière) même si la relation radiométrie-volume semble bonne pour les conifères (Wulder et Seemann, 2003).

La stratification qui consiste à découper la forêt à inventorier en zones aussi homogènes que possible (strates) quant à la variabilité du volume-tige sur pied, s'appuie sur les valeurs moyennes de la hauteur et du diamètre (SIF, 1991). De fait, les classifications d'images Landsat permettent de former des classes homogènes pour les paramètres de densité et de hauteur (Bencherif et Letreuch, 2006). Pour mesurer le diamètre des arbres, absolument nécessaire pour l'estimation du volume-tige, il n'existe pas encore un procédé qui puisse se substituer aux mesures de terrain. L'objectif premier dans ce cas devrait être la mise au point de techniques permettant un échantillonnage réduit au strict minimum (au coût très réduit). L'une de ces techniques peut se baser sur la réflectance des pixels: Sur une image classée et pour une classe donnée, la réflectance est une mesure moyenne du rayonnement solaire réfléchi par différents éléments (dont les arbres) composant une placette comparable en surface à la taille du pixel.

L'hypothèse est que si un sous-peuplement (correspondant à une classe spectrale issue de la classification) de la zone étudiée, est homogène en hauteur, âge et densité, le cubage à partir d'un nombre réduit de placettes serait suffisant pour calculer le volume-tige moyen avec une bonne précision. Cette contribution décrit l'approche globale de calcul du volume-tige de peuplements forestiers avec une variabilité significative sur le volume et propose, à titre démonstratif, une application de celle-ci sur une forêt adulte assez homogène de pin d'Alep. L'approche utilise les données spectrales fournies par le capteur ETM+ de Landsat d'une part, et les données de terrain provenant d'un inventaire par échantillonnage stratifié d'autre part: une classification par pixel est utilisée pour définir des classes spectrales homogènes alors que l'identification des strates en fonction du paramètre densité de couvert permet d'assigner les résultats de l'inventaire terrain au calcul du volume-tige.

2. Présentation de la zone d'étude

La forêt domaniale de Tlemcen est composée principalement de pin d'Alep (*Pinus Halepensis*. Mill) planté dès 1890. La classe d'âge dominante est 100-120 ans mais existe des classes plus jeunes (40-60 ans) provenant de régénération après incendie et occupant de petits parquets. Elle est localisée en amont de la ville de Tlemcen à une altitude moyenne de 1023m (cf. Figure. 1). Son sous-bois est caractérisé par la présence du genévrier oxycédere (*Juniperus oxycedrus* L), de l'asperge sauvage (*Asparagus acutifolius* L), du diss (*Ampelodesma mauritanica* Poir), du chêne vert (*Quercus ilex* L), du cytise épineux (*Calycotome spinosa* Poir) et du palmier nain (*Chamaerops humilis* L). Généralement, elle présente une faible topographie à l'exception de sa partie nord où le relief change et où la pente est de 25% et plus.

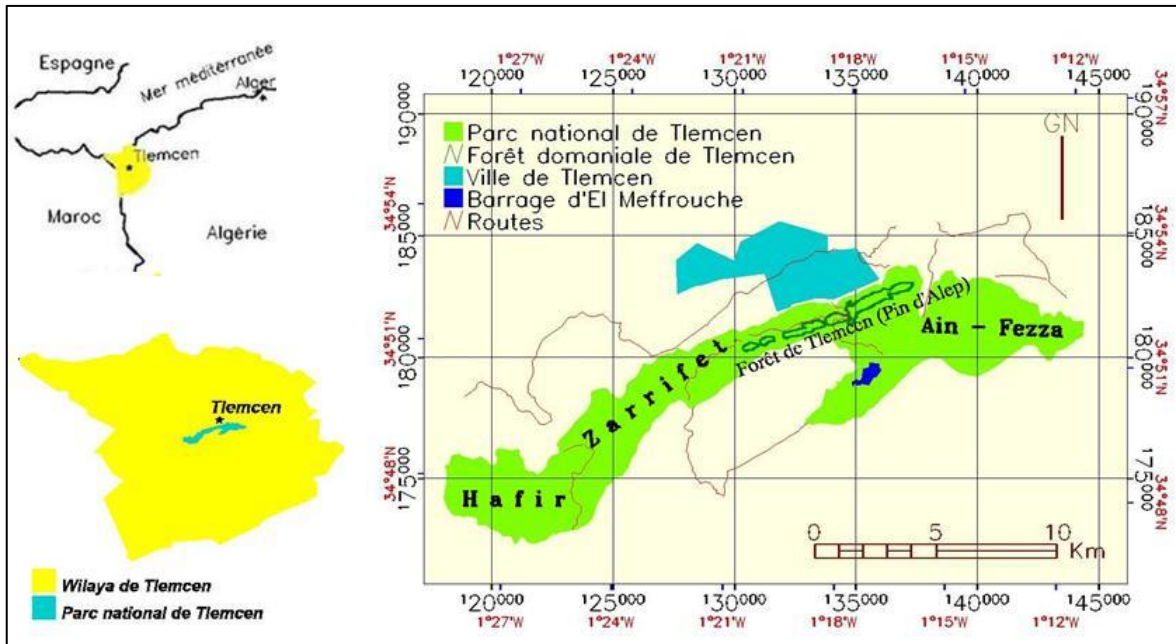


Figure 1: Localisation de la zone d'étude

3. Matériel et méthodes

3.1. Données terrain et satellitaires

Parmi une trentaine de placettes sélectionnées de manière représentative à travers la zone d'étude et décrites pour servir de zones-test dans la classification dirigée de l'image Landsat, douze (12) ont été inventoriées pour l'analyse de la variance du volume et la détermination du coefficient de variation et l'erreur d'inventaire de la strate forêt. Ces 12 placettes de 900m² chacune (30mX30m) sont sélectionnées sur la base de différences de densité de couvert, de hauteur moyenne et de diamètre moyen. Ces mêmes placettes seront également utilisées pour l'estimation du volume-tige de la forêt. Les données sont présentées dans le tableau (1).

Cet effort d'échantillonnage (12 placettes) a été déterminé en se basant sur la relation qui existe entre le volume-tige et la surface terrière. En effet, pour des peuplements jugés homogènes, il est possible de prendre un coefficient de variation de 25%, qui pour des erreurs fixées à 10% et 15%, détermine un nombre de placettes respectivement de 26 et 13 (Piat et al., 2007). Dans cette étude, on a obtenu pour la surface terrière, un coefficient de variation moyen de 25%, et fixé l'erreur tolérée à 15% (cas le plus défavorable).

La surface terrière³ constitue, seule ou en association avec d'autres éléments, un indicateur performant pour l'estimation de variables plus complexes et difficiles à obtenir par des mesures simples sur le terrain tel le volume-tige (Piat et al., 2007). Combinée à une hauteur totale moyenne d'un peuplement, la surface terrière 'g' permet d'estimer, avec une précision acceptable, le

volume-tige principale du peuplement) (Tran-Ha et al., 2007). Une estimation de (g) d'un arbre peut être obtenue à partir d'une simple mesure de la circonférence (c) à 1.30 m en utilisant l'équation (1).

$$g = \frac{c^2}{4\pi} \quad (1)$$

Strates	N° des placettes (30mX30m)	n	Σg	g_m	d_m
			m ²	m ²	m
Très dense	1	42	2.92	0.069	0.30
	2	45	3.15	0.070	0.30
	3	38	3.70	0.097	0.35
	4	61	3.06	0.050	0.26
Dense	5	30	3.58	0.120	0.39
	6	30	3.90	0.130	0.41
	7	30	3.83	0.127	0.40
	8	26	2.96	0.113	0.38
Clair	9	28	5.18	0.185	0.48
	10	25	4.09	0.163	0.45
	11	18	3.70	0.205	0.50
	12	20	2.76	0.115	0.38

Tableau 1: Caractérisation dendrométrique des placettes-échantillons. Forêt domaniale de Tlemcen

n : nombre d'arbres ; Σg : surface terrière totale

g_m : surface terrière moyenne ; d_m : diamètre moyen

La circonférence à hauteur de poitrine (1.30m) de chaque arbre dans la placette a été mesurée avec un ruban, alors que la hauteur est mesurée avec un dendromètre Blume-Leiss. Le centre de chaque placette a été positionné par des mesures GPS. La méthode de l'arbre modèle moyen a été utilisée pour le cubage des 12 placettes-échantillons réparties équitablement sur les 3 strates (soit 4 par strate). Les résultats sont présentés dans le tableau (2). Etant donné que dans notre cas, les échantillons utilisés pour l'analyse de variance sont eux-mêmes exploités pour l'estimation du volume-tige de la forêt, le principe de

3. D'un point de vue théorique, la surface terrière (g) d'un arbre est la surface de sa section transversale à 1.30 m. La surface terrière G d'un peuplement (ou d'un ensemble quelconque d'arbres) est alors la somme des surfaces terrières de tous les arbres constituant ce peuplement ou cet ensemble (Piat et al., 2007).

cette méthode est expliquée ci-dessous (cf. 3.2.3. désignation et inventaire des pixels échantillons).

En ce qui concerne les données satellitaires, une image Landsat ETM+, acquise en Mai 2002 a été utilisée. Sa résolution spatiale est de 30 mètres. Le capteur ETM+ de Landsat fournit des données dans sept bandes spectrales, du visible jusqu'à l'infrarouge moyen, en plus d'un canal panchromatique de résolution 15m (Girard et Girard, 1999).

3.2. Méthodologie

L'approche proposée passe par trois grandes étapes:

- Analyse de la variance sur le volume-tige
- Traitement des données satellitaires
- Désignation et inventaire des pixels échantillons.

3.2.1. Analyse et calcul de la variance sur le volume

C'est une étape préalable afin d'orienter les calculs du volume en fonction de sa variabilité dans les différentes parties de la forêt. En effet, deux cas peuvent se présenter : - une variabilité importante et dans ce cas, la stratification de la forêt et par la suite, la réalisation d'un inventaire par échantillonnage stratifié est justifié. - pas ou faible variabilité et dans ce cas, la stratification étant inutile, l'inventaire peut être réalisé par échantillonnage très réduit (aléatoire ou systématique) sur la totalité de la forêt. Mais quelle que soit la nature de cette variabilité, la vérification de l'hypothèse citée en haut, permettra de réduire au strict minimum, le nombre de placettes-échantillons à inventorier sur terrain, objectif tant recherché par les gestionnaires, et avec une erreur acceptable sur le volume (maximum 15 %).

Cette analyse nécessite l'inventaire rapide d'un certain nombre de placettes-échantillons. Pour les besoins du traitement des images satellitaires (la détection et l'identification des différents types d'occupation du sol), ces placettes-échantillons seront sélectionnées parmi les zones-test (zones d'apprentissage) décrites pour être utilisées dans les classifications dirigées. À la différence des autres zones-test, les placettes-échantillons à utiliser pour l'analyse de la variance seront assises uniquement dans la strate forêt, et dans des endroits où la densité du couvert arboré du peuplement est différente de celle des peuplements voisins. Des mesures complètes de la hauteur et du diamètre sont réalisées dans ces placettes.

En effet, le critère densité de couvert est déterminant pour la classification d'images de moyenne résolution spatiale. La classe de densité (exprimée en classe de pourcentage) est déterminée par la projection au sol de la couverture des cimes. La densité du peuplement est généralement déterminée par photo-interprétation mais peut être évaluée sur terrain en fonction de quatre classes distinguées [Methot et al., 2014]: A (de 80 à 100 % du couvert), B (de 60 à 79 % du couvert), C (de 40 à 59 % du couvert) et D (de 25 à 39 % du couvert). Dans cette étude, les trois premières classes retrouvées et déterminées sur terrain ont été intitulées respectivement très dense (TD), dense (D) et claire (C).

La variance totale de la forêt sur le volume-tige peut être divisée en deux parties: Variance inter-strates et variance intra-strates. Seule cette dernière (et l'erreur lui correspondant) est intéressante dans le cas d'évaluation du volume sur pied de peuplements forestiers. Le calcul de la variance des strates est

effectué conformément au tableau (3) (Pardé et Bouchon, 1987).

L'analyse de la variance des strates de la zone d'étude passe au préalable par le calcul du volume-tige V_{pi} de chaque placette. Cette analyse est conduite selon la méthode décrite au tableau (3) et les résultats sont présentés au tableau (4). Le test F permet de confirmer ou d'infirmer la viabilité de la stratification. Dans la table de SNEDECOR (Snedecor et Cochran, 1989), la valeur de F doit être inférieure au rapport entre la variance inter-strates et la variance des strates ($38.49/17.3=2.87$) pour confirmer les différences moyennes.

3.2.2. Traitement des données satellitaires

Dans le cas où la stratification de la forêt et par la suite, la réalisation d'un inventaire par échantillonnage stratifié est justifiée, on passe à la deuxième étape qui consiste en la classification de l'image satellitaire qui devrait être le résultat d'une démarche itérative: chaque résultat de classification est évalué et les classes redéfinies si nécessaire. À l'issue de cette démarche itérative, une classification en un certain nombre de classes doit être construite de façon à obtenir des classes thématiques les plus pures possibles sur le plan radiométrique.

Après un masquage de la zone d'étude, une composition en fausses couleurs ETM432 (cf. Figure. 2) a été soumise à une classification par la méthode du maximum de vraisemblance (les traitements ont été réalisés grâce au logiciel ENVI.3.5). La validité de la classification dirigée dépend en grande partie de la qualité de l'échantillonnage d'origine (zones-test) alors que sa qualité s'estime grâce à plusieurs paramètres tels que les comportements spectraux des zones-test, leur séparabilité et la matrice de confusion (Guis, 2004).

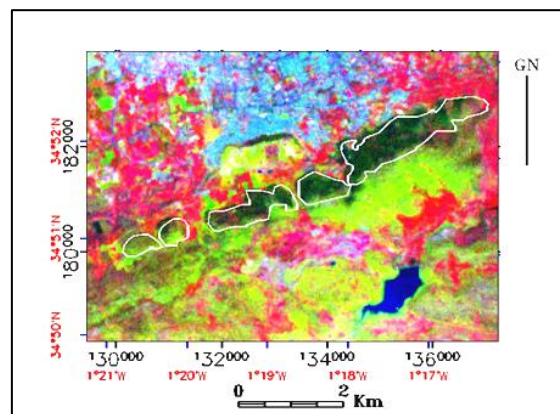


Figure 2: Localisation de la zone d'étude sur l'image Landsat ETM+

L'image a été acquise en niveau 1G correspondant à un niveau de prétraitement précis où l'ortho-rectification a été réalisée avec des points d'appui. Mais vu la faible précision de ces données (250m), une nouvelle correction⁴ a été faite pour ramener cette erreur à moins d'un demi pixel, soit une erreur de positionnement de 14m. Ceci est très important pour garantir la meilleure adéquation possible entre le positionnement des pixels échantillons sur l'image et

4. C'est une correction image-carte basée sur des points d'appui identifiés sur carte (connus en coordonnées Lambert nord Algérie) et sur l'image Landsat.

leurs équivalents sur terrain. Cette correction géométrique de l'image s'est faite après changement du référentiel d'origine par le système de projection Lambert Nord-Algérie.

Numéro de placette	Nap	Arbre modèle idéal		Arbre modèle réel		V _m	V _i	V _{pi}
		D _{1,3}	H	D _{1,3}	H			
		cm	m	cm	m			
TD1	42	30	10.7	29.6	11.2	0.41	0.32	13.5
TD2	45	30	10.4	29.7	11	0.31	0.31	14.3
TD3	38	35	10.5	31.4	10.2	0.43	0.34	12.9
TD4	61	26	8.8	25.5	9.2	0.21	0.21	13.1
D5	30	39	12.3	38.8	12.5	0.61	0.61	18.5
D6	30	41	12	40.1	11.6	0.66	0.61	18.3
D7	30	40	12.1	40.5	12.7	0.63	0.68	20.5
D8	26	38	12.1	38.6	11.5	0.57	0.56	14.5
C9	28	48	14.0	48.2	13.5	1.03	1.01	28.4
C10	25	45	13.1	45.0	12.8	0.86	0.85	21.2
C11	18	50	12.2	46.8	12.9	1	0.92	16.6
C12	21	38	12	37.8	11.7	0.56	0.55	11.5

Tableau 2: Calcul du volume-tige des placettes-échantillons (méthode de l'arbre moyen)

N_{ap}: Nombre d'arbres dans la placette ; V_{pi}: Volume réel contenu dans la placette ; V_i: volume moyen de l'arbre modèle réel ; V_m: Volume moyen de l'arbre modèle idéal ; H: hauteur totale ; D_{1,3}: Diamètre à 1.3m du sol ; TD: Très dense ; D: dense ; C: claire

Origine de la variation	Somme des carrés des écarts	Degré de liberté	Variance	Ecart-type des observations	Coefficient de variation	Ecart-type de la moyenne (%)	
Variation totale	$\sum_1^n (x - \bar{x})^2 = \sum x^2 - \bar{x} \sum x$	Nombre de placettes «n» moins un	$(\sum x^2 - \bar{x} \sum x) / n - 1 = V_T$	$\sqrt{V_T}$	Rapport en % de l'écart type à la moyenne	Colonne précédente divisée par \sqrt{n} S _T	
Variation entre strates	$\sum_i^m m_i \bar{x}_i^2 - \bar{x} \sum x$	Nombre de strates «m» moins un	$\sum_i^m m_i \bar{x}_i^2 - \bar{x} \sum x / m - 1 = V_B$	$\sqrt{V_B}$			S _B
Variation des strates	Différence entre les deux données ci-dessus soit R $\sum x^2 - \sum_i^m m_i \bar{x}_i^2$	n - m	R/n - m = V _R	$\sqrt{V_R}$			S _R ^ S _T

Tableau 3. Analyse simple de variance (Pardé et Bouchon, 1987)

n : nombre total de placettes ; m_i : nombre de placettes dans chaque strate
m : nombre de strates ; \bar{x} : moyenne générale ; \bar{x}_i : moyenne dans chaque strate

OV	SSD	df	S ² = SSD/df	S = √S ²	C _v	MS = C _v /√n
				m ³	%	%
VT	232.69	11	21.15	4.59	27.09	7.83
VS	76.98	2	38.49	6.20	36.6	10.57
VR	155.71	9	17.3	4.16	24.55	7.09

Tableau 4: Analyse de la variance du volume-tige de la zone d'étude

OV: Origine de la variation ; SSD: somme des carrés des écarts VT: Variation totale ; VS: Variation entre strates ; VR: Variation des strates (variation résiduelle) ; df: Degrés de liberté ; S²: Variance ; C_v: Coefficient de Variation = rapport en % de l'écart type à la moyenne totale ; S: écart-type des observations ; MS: écart type moyen. Nombre de placettes (n)=12; Nombre de strates=3; Moyenne totale=16.94m

Par contre, aucune correction radiométrique complémentaire n'a été effectuée en raison de la faible superficie traitée et de la méthode de traitement

adoptée. Les corrections atmosphériques et radiométriques ne sont pas nécessaires quand la zone d'étude est assez petite, ne contenant pas de variations

visibles dans les conditions atmosphériques et aussi quand les méthodes appliquées telles les classifications n'exigent pas des mesures de réflectance absolues (Wallerman, 2003 ; Chartier et Servain, 2000 ; Louy et al., 2000).

La séparabilité des zones échantillons peut s'estimer visuellement, préalablement à la classification, grâce à un histogramme pluridimensionnel représentant, pour chaque pixel, la probabilité d'appartenance à tel ou tel noyau. Sous ENVI®, il est aussi possible de calculer, en prenant les noyaux deux à deux, le coefficient de Jeffries-Matusita, reflétant la séparabilité des noyaux entre eux. Si ce coefficient est inférieur à 1.7, on peut considérer que les classes se séparent mal mais s'il est supérieur à cette valeur, les classes sont bien séparées (ENVI, 2000). L'analyse des tables de séparabilité spectrale a ainsi permis de redéfinir des parcelles d'entraînement qui se distinguaient très bien, alors que celles qui se distinguaient mal ont été regroupées en une classe commune. A l'issue de cette démarche itérative, une classification en 6 classes a été construite: futaie très dense (FTD), futaie dense (FD), futaie claire (FC), Matorral (MTR), herbacées (HRB) et autres (VD).

3.2.3. Désignation et inventaire des pixels échantillons

À partir de l'image classifiée (donc stratifiée), chacune des strates forêt est inventoriée par échantillonnage, puis les estimations des volumes respectifs sont comptabilisées pour produire le volume-tige total de la forêt. La technique est simple et consiste en i) Sélection de pixels échantillons sur l'image corrigée géométriquement au préalable et ii) Localisation et installation sur le terrain des placettes-échantillons correspondantes par un GPS. D'après Lejeune (2001), les erreurs de positionnement par le GPS observées en terrain découvert varient de 3 à 15m alors que les erreurs en bordure de trouées ou à l'intérieur de peuplements varient de 5 à 20m lorsque le nombre de satellite est optimal. Les erreurs de positionnement peuvent atteindre 35 à 50m en présence de couverts forestiers. Pour éviter l'impact de ces erreurs de positionnement, les placettes-échantillons doivent être assises au milieu de secteurs homogènes en densité et sur un rayon de 100m par rapport aux secteurs voisins différents.

L'analyse de la classification permet d'obtenir la distribution du nombre de pixels par classe puis de sélectionner, par leurs coordonnées, les pixels échantillons qui feront l'objet de cubage. Partant de cette idée, deux variantes sont possibles : soit utiliser les pixels appartenant aux zones d'entraînement utilisées dans la classification, soit d'utiliser, une fois les strates définies, de nouveaux pixels échantillons. Dans les deux cas, les pixels échantillons sont localisés par GPS. Sur le terrain, les paramètres dendrométriques sont mesurés uniquement dans ces points de sondage de dimensions égales à celle de la résolution spatiale de l'image, soit par exemple 30m×30m ou 900m² pour Landsat-ETM+. Dans la pratique forestière, et indépendamment de leur forme (cercle, carré ou rectangle), la surface des placettes varie généralement entre 100m² et 1000m² selon le stade de développement du peuplement (Pardé et Bouchon, 1987).

Appliquée sur le terrain, la méthode d'échantillonnage stratifié consiste à asseoir, de manière systématique ou aléatoire, les placettes-échantillons dans chaque strate thématique. Cependant et conformément aux règles de

l'échantillonnage stratifié aléatoire, le choix du mode d'assignation des pixels aux strates et l'intensité de l'échantillonnage dans chaque strate doivent être définies (Schreuder et al., 1993). Le nombre d'échantillons à sélectionner par strate peut être déterminé de deux façons (Schreuder et al., 1993): Le taux d'échantillonnage et le nombre d'unités-échantillons sont fixés avant l'inventaire. Dans cette approche, moins d'importance est donnée à la précision des calculs durant la phase de l'aménagement. La deuxième façon est de calculer le nombre d'unités pour une probabilité choisie et une erreur d'échantillonnage tolérée.

En principe, dans la phase post-classification, chacune des strates « forêt » est échantillonnée au hasard puis les estimations de l'ensemble des strates sont comptabilisées pour produire le volume-tige total de la forêt. La technique consiste en i) la sélection de pixels échantillons sur l'image corrigée géométriquement au préalable et ii) la localisation et l'installation sur le terrain des placettes échantillons correspondantes par un GPS de type Garmin12XL, où les niveaux d'erreurs correspondent à des erreurs à craindre pour un degré de confiance de 95%.

Le cubage de l'arbre modèle moyen permet de déterminer le volume contenu dans chacune de ces placettes. A juste raison, la valeur des paramètres dendrométriques de l'arbre moyen dans chaque placette-échantillon (même dimension que le pixel) est une moyenne de l'ensemble des arbres. Etant donné que le volume-tige dépend lui aussi du nombre d'arbres, on peut admettre que le volume dans chaque placette régulière et homogène serait égal au produit du volume de l'arbre moyen par le nombre d'arbres dans la placette. Les trois principales variables utilisées pour le calcul du volume-tige sont le diamètre, la hauteur et le nombre d'arbres. Le schéma de calcul est le suivant (cf. Equations 2, 3 et 4):

$$V_{pi} = V_i \times n_i \quad (2)$$

V_{pi} : volume-tige de la placette i (m³); n_i : nombre d'arbres dans la placette; v_i : volume de l'arbre modèle moyen dans la placette (m³).

$$V_i = g \times h \times f \quad (3)$$

v_i : volume (m³) de l'arbre modèle moyen; g : surface terrière mesurée à hauteur de poitrine (m²) ; h : hauteur de l'arbre (m), f : coefficient de forme⁵

Les paramètres moyens de l'arbre modèle sont le diamètre (à hauteur de poitrine) et la hauteur moyenne. Cette dernière est prise directement de la courbe des hauteurs de chaque placette. Le diamètre moyen est calculé à travers la surface terrière (cf. équation 4):

$$\frac{\sum g_i}{n_i} = g_{mi} ; g_{mi} = \frac{\pi \times d_{mi}^2}{4} \Rightarrow d_{mi} = \sqrt{\frac{4 \times g_{mi}}{\pi}} \quad (4)$$

d_{mi} : diamètre quadratique moyen (m) ; $\sum g_i$: surface terrière totale des arbres de la placette i (m²) ; n_i : nombre d'arbres dans la placette i ; g_{mi} : surface terrière moyenne par arbre de la placette i (m²).

5. Les valeurs du coefficient de forme sont prises de la table des coefficients de forme pour le pin d'Alep (Bencherif et Belouatek, 2011).

Sur la base des valeurs moyennes du diamètre et de la hauteur, on cible un arbre avec les mêmes mensurations puis on calcule son volume par la formule (3). Cependant, il n'est pas toujours facile de trouver un arbre avec les dimensions idéales (calculées). Dans ce cas, il a été remplacé par un arbre ayant les dimensions les plus proches possibles (cf. 3.1. Données-terrain, tableau 2).

4. Résultats et discussions

La figure (3) représente la carte d'occupation du sol obtenue à l'issue de la classification dirigée. Sa précision totale est donnée par le tableau de contingence appelé aussi matrice de confusion (cf. Tableau 5). Ce tableau est établi sur la base d'une trentaine de zones test décrites sur terrain. Les principales contraintes relevées durant le processus de classification sont des confusions dues à des réflectances similaires. Ainsi dans la classification à six classes, les principales confusions identifiées sont: FTD/FD ; FC/MTR; MTR/HRB, VD/HRB. La valeur de la précision globale (96%) traduit une très bonne qualité de la classification. Toutefois, et étant donné que la matrice est calculée à partir des zones-tests utilisées dans l'apprentissage, la valeur de 96% ne représente en fait, qu'une bonne indication de la performance de la classification pour distinguer des classes, mais pas nécessairement la preuve d'une bonne estimation de la classification.

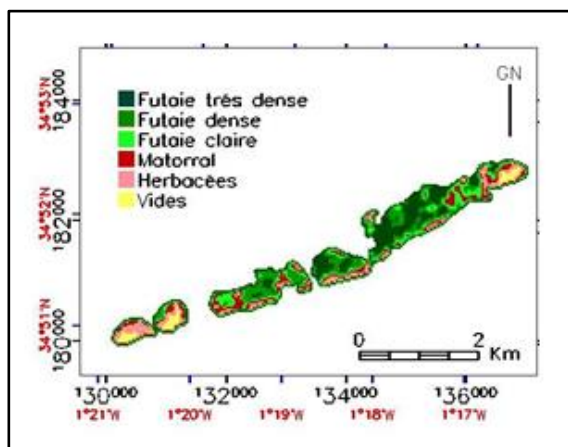


Figure 3: Classification dirigée par maximum de vraisemblance. Image Landsat ETM+. Mai 2002

La classification par pixel a permis de discriminer entre plusieurs strates en fonction de trois indices, la hauteur, la densité et la nature du couvert (forêt, matorral, herbacées). Mais le paramètre le plus lié à la radiométrie semble être la densité étant donné qu'à hauteurs comparables, les futaies correspondent à différentes classes spectrales (cf. Tableau 6). Par conséquent, l'origine de la bonne séparabilité est le double effet de la densité de couvert et de la radiométrie. L'effet apparent de la hauteur provient d'une différence de radiométrie de couverts ayant sur terrain différentes physiologies (hauteurs).

Quant au paramètre âge, la réponse spectrale dans les canaux TM3 et TM4, décroît jusqu'aux valeurs 40-60 ans à partir desquelles, le taux de variation devient très bas (Wallerman, 2003). Par conséquent, l'approche serait plus efficace en présence de résineux homogènes avec une structure assez régulière et une composition en essences simple. Le calcul des

placettes-échantillons confirme le rôle secondaire, voire, non significatif de la densité pour l'estimation du volume tige: une forte densité ne signifie pas une grande valeur du volume et inversement, une faible densité ne traduit pas nécessairement une faible valeur du volume comme l'indiquait le tableau (2).

Conformément au tableau (4), la valeur de F prise de la table de Snedecor (Snedecor et Cochran, 1989) est égale à 4.1, une valeur supérieure au ratio entre la variance intra-strates et la variance inter-strates qui est de 2.87, ce qui indique des différences moyennes pas assez significatives entre les volumes des strates.

Par conséquent, la stratification n'apporterait pas une amélioration sensible puisque l'erreur serait, avec ou sans stratification, respectivement de, $\pm 7.09 \times 2.20 = \pm 15.59\%$ et $7.83 \times 2.20 = \pm 17.22\%$ pour un seuil de probabilité de 95% et pour 11 degrés de liberté et t égal à 2.20 ("t" est l'écart réduit pris de la table de Student. De fait, on pouvait à juste raison, ne pas procéder à un échantillonnage stratifié et se contenter de designer au hasard des pixels échantillons dans la surface boisée. Néanmoins, il semble aussi avantageux d'exploiter la stratification pour sa légère amélioration de la précision. À cet effet, les 12 placettes échantillons seront réparties équitablement sur les trois strates forêts (FTD, FD FC).

Classe	Terrain						Total
	FTD	FD	FC	MTR	HRB	VD	
NC	3	0	0	0	0	0	1
FTD	97	0	0	0	0	0	29
FD	0	100	0	0	0	0	13
FC	0	0	90	10	0	0	8
MTR	0	0	10	90	0	2	8
HRB	0	0	0	0	100	0	8
VD	0	0	0	0	0	98	33
Total	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 5: Matrice de confusion de la classification dirigée. Image Landsat ETM+. Mai 2002 (Précision globale 96% ; Kappa=0.95)

Futaie très dense (FTD), futaie dense (FD), futaie claire (FC), Matorral (MTR), herbacées (HRB) et autres (VD), NC : Non classés

classes	Hauteur	Densité de couvert	Nombre d'arbres par hectare
	m	%	
FTD	10-15	80-90	680
FD	10-15	60-70	470
FC	10-15	20-50	240-330
MTR	1.5-3	60-80	
HRB	1.5-3	10-50	
VD	0-0.5	10	

Tableau 6: Correspondances entre les classes thématiques et les paramètres hauteur/densité.

La stratification obtenue à l'issue de la classification permettra dans un premier temps (premier niveau) de limiter l'inventaire dendrométrique à la seule strate forêt. Dans un deuxième temps (deuxième niveau), elle permettra d'affiner l'inventaire pour chaque sous-strate, soit les trois classes (FTD) (FD) (FC), en fonction de leur densité de couvert. La somme des volumes-tige contenus dans chacune de ces sous-strates permettra une estimation du volume total disponible dans la strate forêt. L'inventaire de seulement 0.36% (12X900m² = 1.08ha) de la surface totale (310ha) a été suffisant

pour estimer le volume-tige sur pied (30595m³) alors que ce pourcentage dépasse souvent le 1% dans les

inventaires statistiques traditionnels. Le tableau (7) résume les résultats.

Strate	N _{pixel}	S	V _{pixels}	V _{pixel} ×N _{pixels}	V _{pixel} ×N _{pixels} /s
		ha	m ³	m ³	m ³ /ha
FTD	543	49	13.51	7335.93	150.11
FD	921	83	20.27	18668.67	225.22
FC	326	30	14.08	4590.08	156.44
MTR	620	56			
HRB	311	28			
VD	712	64			
Total	3433	310		30594.68	

Tableau 7: Répartition du volume total de la zone d'étude par pixels et par strates

N_{pixel}: Nombre de pixels par strate ; S: Surface de la strate ;

V_{pixel}: Volume-tige moyen contenu dans un pixel ; V_{pixel}×N_{pixels}: volume-tige moyen contenu dans la strate ;

V_{pixel}×N_{pixels}/s: Volume-tige moyen par hectare

Mais une surestimation du volume n'est pas à écarter et proviendrait des confusions observées entre certains objets ainsi que de l'incertitude sur la surface réelle étudiée. En ce qui concerne la surface de la zone d'étude, les données de l'administration indiquent une surface de 286ha. Or, les limites numérisées sur l'image donnent un total de 310ha, soit un surplus de 24ha. Probablement, des erreurs de numérisation ont engendré cette surestimation. Quant aux confusions constatées, les pistes forestières sont invisibles sous la canopée, les jeunes peuplements ont la même réflectance que les peuplements adultes et le matorral est confondu avec les futaies claires.

Probablement, à cause de cette confusion (surtout quand le matorral est arboré), cette dernière classe (FC) présente une certaine hétérogénéité puisqu'elle a un coefficient de variation sur le volume de 27% par rapport à celui de la classe futaie très dense qui est de 3% (voir Tableau 2). L'amélioration de la précision des calculs implique l'estimation de l'importance de ces confusions. La matrice de confusion et l'analyse de la table de séparabilité ont permis de quantifier ces confusions par l'estimation du nombre de pixels couvrant les objets pistes, routes et matorral. Ce sont les confusions inter-strates qui sont les plus intéressantes à l'instar des strates basses (matorral, herbacées) et strates hautes (futaie adulte). Ainsi, à partir des tables de séparabilité et de la matrice de confusion, il a été établi que le taux de confusion est en moyenne de 10% et ce chiffre ne représente qu'une approximation puisque les pistes de débardage ne sont pas visibles sur les images Landsat. Ces 10% ont été équitablement réparties entre les trois sous strates forêt afin de revoir à la baisse la valeur du volume obtenu (30594.68m³). La nouvelle valeur du volume ajusté est de 27535.21m³±15.59%.

L'approche, bien qu'elle n'ait pas produit la précision exigée par l'aménagement forestier (erreur maximale demandée ±10%), a pu fournir une précision qui ne s'éloigne pas trop de celle généralement admise pour certains inventaires simplifiés (erreur moyenne de ±15%) (Pardé et Bouchon, 1987). Mais le mérite de l'approche est l'utilisation des zones d'entraînement de la classification de l'image pour l'analyse de la variance et le calcul du volume-tige. Pour une meilleure précision de l'inventaire, Pardé et Bouchon (1987) signalent que le nombre de placettes est plus important que le taux d'échantillonnage et il aurait été souhaitable que ce nombre, très réduit dans notre cas, soit beaucoup plus élevé. Enfin, l'utilisation de photographies aériennes ou d'images de grande résolution spatiale comme SPOT

serait susceptible d'améliorer les résultats bien que les données Landsat, demeurent intéressantes pour contribuer à la stratification forestière et à l'estimation de la disponibilité en bois.

5. Conclusions

Pour être efficace, la combinaison de données satellitaires et données terrain à travers des classifications, doit être soutenue au préalable par une stratification du territoire forestier. À cet effet, les données Landsat, semblent efficaces et la classification par pixel, qui paraît convenir à cet objectif, n'est viable que si sa précision globale est effectivement suffisante. Le premier mérite de l'approche est son intérêt pour l'évaluation de la ressource en bois disponible à partir d'inventaires dendrométriques expéditifs. Elle a en plus, cet avantage de limiter l'inventaire terrain à la strate boisée, permettant ainsi d'estimer le volume-tige correspondant à la surface forestière réelle. La procédure développée dans cette étude et appliquée à la forêt domaniale de Tlemcen (Algérie), a fourni des données utiles sur la disponibilité forestière en inventoriant moins de 1% de la surface étudiée (soit 0,36%). Enfin, l'approche pourrait contribuer, conjointement avec d'autres techniques, à l'estimation de la biomasse forestière à l'échelle du peuplement forestier dans les zones semi-arides sud-méditerranéennes, caractérisées par une tendance régressive du couvert forestier.

Références

- Baccini A., Friedl MA., Woodcock CE., Warbington R., 2004. *Forest biomass estimation over regional scales using multi-source data*, geophysical research letters 31. L10501, doi: 10.1029/2004GL019782.
- Balenovic I., Hmarjanovi H., Indir S., Vuleti D., Ostrogovi M., Benko M., 2013. *Estimation of the stands' arithmetic mean diameter using manual method of digital photogrammetry*, Periodicum Biologorum: Vol. 115, n° 3, pp 399–407.
- Beguet B., Chehata N., Boukir S., Guyon D., 2014. *Quantification et cartographie de la structure forestière à partir de la texture des images Pléiades*. Revue française de photogrammétrie et de télédétection: 208: pp 83-88.
- Belouard T., Py N., Maillet G., Guyon D., Meredieu C., Pausader M., Champion N., 2015. *Pinastéro- Estimation de la hauteur dominante et de la biomasse forestière dans le massif des Landes de Gascogne à*

- partir d'images stéréoscopiques Pléiades. Revue française de photogrammétrie et de télédétection: 209: pp 133-139.
- Bencherif K., Letreuch Belarouci N., 2006. *Cartographie physiologique de la végétation forestière par télédétection satellitaire de moyenne résolution spatiale en zones semi-arides*. Bulletin des sciences géographiques: 18: pp 38-50.
- Bencherif K., Belouatek Y., 2011. *Aleppo pine (Pinus halepensis. Mill) reforestation stem form study using natural form factors method*. 2011. <cirad-01154846>
- Bettinger P., Hayashi R., 2006. *Estimation of above-ground biomass with remotely sensed imagery: A brief literature review*, University of Georgia Center for Forest Business, Research Note 25.
- Chartier M., Servain S., 2000. *Apports de la télédétection satellitaire à l'étude de l'environnement de sites archéologiques en milieu tempéré, le cas de la vallée de l'Aisne*. Cybergeo: pp 176:1-7. www.cybergeo.fr
- Durrieu S., 1994. *Utilisation de la télédétection satellitaire pour la mise à jour de la carte de types de peuplements de l'inventaire forestier national. Application à une région forestière diversifiée de moyenne montagne*. Thèse de doctorat; Cemagref-Ingref, Montpellier, France, 1994.
- ENVI., 2000. *User's Guide*. Research Systems, Inc. USA, (2000). pp 277-304.
- GFOI., 2013: *Intégration des données de télédétection et d'observation au sol pour l'estimation des émissions et des absorptions de gaz à effet de serre dans les forêts*. Méthodes et pratiques recommandées par Initiative mondiale pour l'observation des forêts. Éditeur: Groupe sur l'observation de la Terre, Genève (Suisse).
- Girard MC., Girard CM., 1999. *Traitement des données de télédétection*. Dunod, Paris, France. pp 51- 52.
- Guis H., 2004. *Caractérisation par télédétection de l'environnement favorable aux Culicoides, vecteurs de la fièvre catarrhale ovine dans le bassin méditerranéen : cas de la Corse*. Rapport du Mastère SILAT (Systèmes d'Informations Localisées pour l'Aménagement des Territoires), Montpellier.
- Jayaraman K., 1999. *Manuel de statistique pour la recherche forestière*. Ed. FAO. 229 p +annexes.
- Koch B., 2012. *La télédétection et son utilisation dans les évaluations forestières nationales (EFN)*. Répertoire des connaissances sur évaluations des ressources forestières nationales, catalogue de la FAO.18 p
- Lejeune P., 2001. *Les possibilités d'utilisation du matériel GPS en forêt*. Note technique forestière de Gembloux n° 3, 10 p.
- Louy O., Borne F., Marceau DJ., 2000. *Etude de la variabilité spatiale de couverts forestiers en fonction de l'échelle d'observation*". Géomatique expert 9: pp 20-30.
- Lu D., 2006. *The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation*. International journal of remote sensing: 27: pp 1297-1328.
- Mäkelä H., Pekkarinen A., 2004. *Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data*. Forest Ecology and Management : Volume 196, Issues 2–3, pp 245–255
- Methot S., Blais L., Gravel J., Latrémouille I., St-Pierre S., Vézeau S., 2014. *Guide d'inventaire et d'échantillonnage en milieu forestier*, Québec, gouvernement du Québec, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 237 p.
- Pardé J., Bouchon J., 1987. *Dendrométrie*. Nancy-France: ENGREF. pp144-198.
- Piat J., François G., Cordonnier T., Tran-Ha M.; 2007. *La surface terrière : méthodes de mesure et intérêts*. ONF. RDV techniques n° 18 : pp 9-16.
- Reese H., Nilsson M., Pahlén TG., Hagner O., Joyce S., Tingelöf U., Mikael E., Håkan O., 2003. *Countrywide Estimates of Forest Variables Using Satellite Data and Field Data from the National Forest Inventory*. AMBIO: A Journal of the Human Environment. Vol. 32, Issue 8, pp 542-548 doi: 10.1579/0044-7447-32.8.542
- Schreuder HT., Gregoire TG., Wood GB.; 1993. *Sampling Methods for Multiresource Forest Inventory*. John Wiley & Sons, New York. 446 p.
- SIF (Service de l'inventaire forestier)., 1991. *Placettes-échantillons permanentes, normes techniques*. Ministère de l'énergie et des Ressources du Québec, Canada.
- Snedecor GW., Cochran WG., 1989. *Statistical Methods*, 8th Edition, Ed.: Iowa State University Press. 503 p.
- Tomppoa E., Olsson H., Ståhl G., Nilsson M., Hagner O., Katilaa M., 2008. *Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases Remote Sensing of Environment*, Volume 112, Issue 5, pp 1982–1999
- Tran-Ha M., Perrotte G., Cordonnier T., Duplat P. 2007. *Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France*. Revue Forestière Française: Vol IX n° 6, pp 357-368
- Wallerman J., 2003. *Remote Sensing Aided Spatial Prediction of Forest Stem Volume*. Doctoral dissertation. ISSN 1401-6230, ISBN. Swedish University of Agricultural Sciences .Umeå Sweden: SLU Grafiska Enheten, pp 7-17.
- Wulder MA., Seemann D., 2003. *Forest inventory height update through the integration of lidar data with segmented Landsat imagery*. Canadian journal of remote sensing: 29: pp 536-54.