

La biomasse des forêts méditerranéennes

Les premiers résultats du projet XyloDensMap*

par Jean-Michel LEBAN, Baptiste KERFRIDEN, Maxime LACARIN,
Amélie TAUPIN et Jean-Christophe HERVÉ

Aujourd’hui, le contexte de la transition climatique nécessite de passer d’une évaluation, non plus seulement en volume mais en biomasse bois, notamment pour l’estimation du captage de CO₂ par la forêt. Cela implique la connaissance de la masse volumique du bois qui varie beaucoup selon les espèces, les conditions de milieu et les propriétés des peuplements. Le projet XyloDensMap a permis la mesure de l’infradensité du bois de plus de cent dix mille carottes de sondage. Cet article montre quelques résultats originaux portant sur les essences forestières de la région méditerranéenne.

* Le projet XyloDensMap a été initié en 2015 grâce au soutien de Jean-Christophe Hervé qui venait de fonder le Laboratoire d’Inventaire forestier à Nancy.

Jean-Christophe est décédé le 16 avril 2017, ce papier lui est dédié.

1 - En France, plus de 150 essences sont inventoriées, dont 18 « principales » qui sont présentes sur des surfaces > 200 000 ha.

Toute filière industrielle a besoin de connaître et de caractériser ses matières premières. La filière bois française n'a cependant jamais documenté de manière exhaustive et avec précision les propriétés des bois de ses ressources forestières, du fait de leur diversité singulièrement grande en Europe, notamment en espèces¹.

Le contexte de la transition climatique et de l'émergence de la bioéconomie nécessite d'adapter la gestion forestière à des objectifs nouveaux d'optimisation de la production, non plus seulement en volume mais en biomasse bois (ROUX *et al.*, 2020), que ce soit (i) pour la production de bois-matériaux : construction, emballage, papier, voire nouveaux matériaux biosourcés : textiles, biomolécules pour la chimie, (CELZARD et LEBAN, 2012, KEBBI-BENKEDER *et al.*, 2015) (ii) pour le bois-énergie ou (iii) pour le captage de CO₂ par la forêt.

Le passage d'une évaluation en volume à une évaluation en biomasse nécessite la connaissance de la masse volumique du bois qui, au-delà de valeurs moyennes par essence ou groupe d'essences, varie beaucoup selon les espèces, les conditions de milieu (BERGÈS *et al.*, 2008), et les propriétés de structure et de gestion des peuplements. Réunies, ces sources de variation peuvent causer des variations de densité du bois allant couramment du simple au double.

Ceci est particulièrement vrai en France compte tenu de la grande diversité des espèces forestières (plus de 150 espèces, dont plus d'une quinzaine d'importance significative au moins régionalement, record en

Europe), des conditions écologiques — la forêt française comprend 13 des 14 types forestiers européens, ce qui en fait le pays le plus diversifié d'Europe (BARBATI *et al.* 2014) — et des modes de gestion. De plus, la masse volumique du bois est un prédicteur fiable de nombreuses propriétés du bois d'importance directe pour sa transformation et ses usages (ZOBEL & JETT, 1995).

En l'état actuel des connaissances, la biomasse des forêts françaises est estimée globalement à partir des volumes mesurés par l'IGN² dans le cadre du programme d'inventaire forestier national (IFN) et par des valeurs moyennes de masse volumique du bois issues de la littérature sans tenir compte de la variabilité ni de l'origine des bois (CARBOFOR, 2004).

Cela nous a conduit à concevoir et mettre en œuvre le projet XyloDensMap (LEBAN *et al.*, 2016) pour caractériser de manière précise et exhaustive la masse volumique du bois pour l'ensemble des ressources forestières en France métropolitaine, en mesurant pendant quatre années consécutives la densité du bois de l'ensemble des carottes de sondage prélevées à 1,30 m de hauteur par les équipes de l'IGN, et ceci grâce à une innovation dans le champ de la métrologie à haut débit (JACQUIN *et al.*, 2019), innovation qui met en œuvre un scanner tomographique à rayons X dont l'INRAE³ s'est équipé au départ pour les techniques de scannage RX de grumes (LONGUETAUD *et al.*, 2005).

Ce projet associe l'INRAE, l'IGN, l'Université de Lorraine (ENSTIB à Epinal) et la Fédération Nationale du Bois et se positionne dans le projet C3 « Promouvoir le suivi et le pilotage intelligents des forêts » du Plan recherche et innovation 2025 (D'AMÉCOURT *et al.*, 2016) et plus précisément dans l'action C3-2, « Amélioration des méthodes et outils d'évaluation et de prédition d'évolution de la ressource forestière à différentes échelles et à partir de sources multiples d'information ».

Le prélèvement de carottes a débuté en octobre 2015 et s'est achevé en octobre 2019. Toutes les mesures d'infradensité ont été finalisées en juin 2020 et les dernières procédures de vérification en octobre 2020. Les deux premières campagnes ont été financées par l'INRAE et l'IGN et un important soutien financier a été obtenu pour les deux dernières campagnes.

Les principaux résultats à ce jour sont (i) une xylothèque des espèces forestières françaises constituée de plus de cent dix mille carottes localisées à l'INRAE de Champenoux (ii) une première base de données d'infradensité des bois français mise en ligne (LEBAN *et al.* 2020) utilisée pour la première thèse exploitant ces nouvelles données (KERFRIDEN *et al.*, 2021), (iii) un atlas anatomique des bois français en cours de réalisation et (iv) des fiches de propriétés des bois des principales essences.

L'utilisation et l'analyse de ces nouvelles mesures d'infradensité va conduire à une réévaluation des stocks et des accroissements de la biomasse de nos forêts avec une représentation cartographiée à la même résolution que celle de l'inventaire forestier. On pourra les utiliser dans un contexte d'optimisation de la production et d'utilisation de la biomasse forestière (HERVÉ *et al.*, 2016) mais également pour mieux décrire et comprendre les effets de la gestion et des contraintes climatiques sur la production de biomasse.

L'objectif visé ici n'est pas de détailler les aspects méthodologiques ni les questions de recherche qui sont présentés dans les publications scientifiques citées précédemment, mais de montrer quelques résultats originaux portant sur les essences forestières de la région méditerranéenne.

Il s'agit de (i) souligner l'importance de la variabilité de l'infradensité des bois, (ii) de montrer un exemple d'utilisation simplifiée de nos nouvelles mesures pour l'estimation de la biomasse forestière (iii) de pointer l'intérêt et les limites de notre échantillonnage et (iv) d'en déduire des perspectives pour enrichir l'information forestière.

L'échantillonnage des carottes

Nous avons mis en œuvre le protocole de l'IFN qui prévoit la collecte de deux types de carottes de sondage prélevées à la tarière de Pressler (4,3 mm de diamètre intérieur), « les carottes d'âge » des arbres dominants et « les carottes d'accroissement ». Les premières contiennent la moelle, ce qui permet de compter les cernes annuels pour déterminer l'âge des arbres et on y mesure la largeur de chacun des cinq derniers cernes annuels, ce qui permet de quantifier l'accroissement biologique. Les secondes, « les carottes d'accrois-

2 - IGN : Institut national de l'information géographique et forestière.

3 - INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

segment », ont une longueur moyenne de 6 cm environ et sont utilisées pour mesurer exclusivement la longueur des cinq derniers cernes.

Le long de chaque carotte on mesure l'infradensité avec un pas de 0,625 mm ce qui permet l'obtention de profils intra-arbre d'infradensité qui seront analysés ultérieurement. On pourra par exemple quantifier la teneur en eau des arbres sur pied mais également déterminer les valeurs d'infradensité de la zone d'accroissement, ce qui permettra d'analyser finement les accroissements en biomasse. Pour l'instant, on se limite à calculer pour chaque profil (chaque arbre) une valeur arithmétique moyenne.

Ces nouvelles valeurs d'infradensité sont disponibles (LEBAN *et al.* 2020) et déjà intégrées dans la base de données de l'IFN à Nogent-sur-Vernisson.

L'infradensité

On rappelle brièvement que la densité du bois est une propriété d'intérêt puisqu'elle permet d'estimer les autres propriétés physiques et mécaniques des bois (LEBAN & HAINES, 1999, VERKASALO & LEBAN, 2002).

Le bois étant un matériau hygroscopique la mesure de sa masse volumique (ou densité par abus de langage) implique d'indiquer sa teneur en eau. Conditionné à 20°C avec 60% d'humidité relative, le bois est à l'équilibre avec l'air à 12% d'humidité qui est déterminée par rapport à sa masse anhydre.

Lorsqu'il s'agit d'estimer la biomasse on doit considérer non pas la densité à 12% mais l'infradensité qui est le rapport entre la masse anhydre (après séchage à 103°C) et le volume saturé d'un échantillon de bois (à l'état vert). Ces rappels sont motivés par le fait que les mesures de densité du bois ne sont pas toujours faites correctement (WILLIAMSON & WIEMANN, 2010) et que la compilation de données de la littérature doit également être faite avec précaution (VIEILLEDENT *et al.*, 2018).

Les résultats du projet XyloDensMap sont donc des valeurs d'infradensité des bois exprimées en kg/m³. En multipliant l'infradensité moyenne du bois d'un arbre par son volume on obtient la biomasse.

Les volumes sont calculés à partir des mesures dendrométriques des arbres inventoriés sur la période 2014-2018 et les tarifs de cubage de l'IFN. Il s'agit du volume bois fort tige (jusqu'à 7 cm de diamètre fin bout), du volume aérien total (VALLET *et al.* 2006) et du volume total qui intègre la biomasse racinaire. Ces volumes sont accessibles sur le site de l'IFN et présentés dans le Tableau I (données obtenues par consultation du site de l'IFN en janvier 2021).

Dans ce Tableau I, on indique également le nombre d'arbres inventoriés dans la Grande région écologique « méditerranée » (GRECO J, Cavaignac, 2009) sur la période 2014-2018. Il y a plus d'arbres mesurés que de carottes prélevées puisque pour des raisons de réduction des coûts d'inventaire tous les arbres inventoriés ne sont plus carottés.

Essences	V _{bft} 2014-2018 (Mm ³)	V _{aérien} 2014-2018 (Mm ³)	V _{tot} 2014-2018 (Mm ³)	Nombre d'arbres mesurés 2014-2018
Autre feuillus	8,14	14,15	18,11	1541
Autre résineux	4,03	6,44	8,38	436
Chêne pubescent	19,31	34,12	43,68	3771
Pin d'Alep	18,65	30,52	39,68	1997
Chêne vert	13,02	24,55	31,42	5832
Pin maritime	4,64	7,50	9,75	355
Chêne-liège	2,91	5,74	7,34	422
Pin sylvestre	3,19	5,35	6,96	430
Pin noir d'Autriche	1,98	3,23	4,20	246
Aulne glutineux	1,86	3,10	3,97	12
Épicéa commun	1,53	2,38	3,10	12
Pin parasol	1,30	2,26	2,93	151
Peuplier grisard	1,38	2,29	2,93	106
Hêtre	1,27	2,20	2,82	190
Châtaignier	1,20	2,11	2,70	122
Peuplier noir	1,15	1,89	2,42	59

Tab. I :
GRECO J, les principales essences méditerranéennes, le volume bois fort tige, le volume aérien et le volume total qui intègre la biomasse racinaire et le nombre d'arbres mesurés par l'IFN sur la période 2014-2018.

Tab. II :

Valeurs d'infradensité XDM des essences présentes dans le GRECO J, nombre de carottes mesurées sur la France entière, nombres de carottes prélevées dans le GRECO J et valeurs d'infradensité utilisées jusqu'à présent par l'IFN (CARBOFOR, 2004).

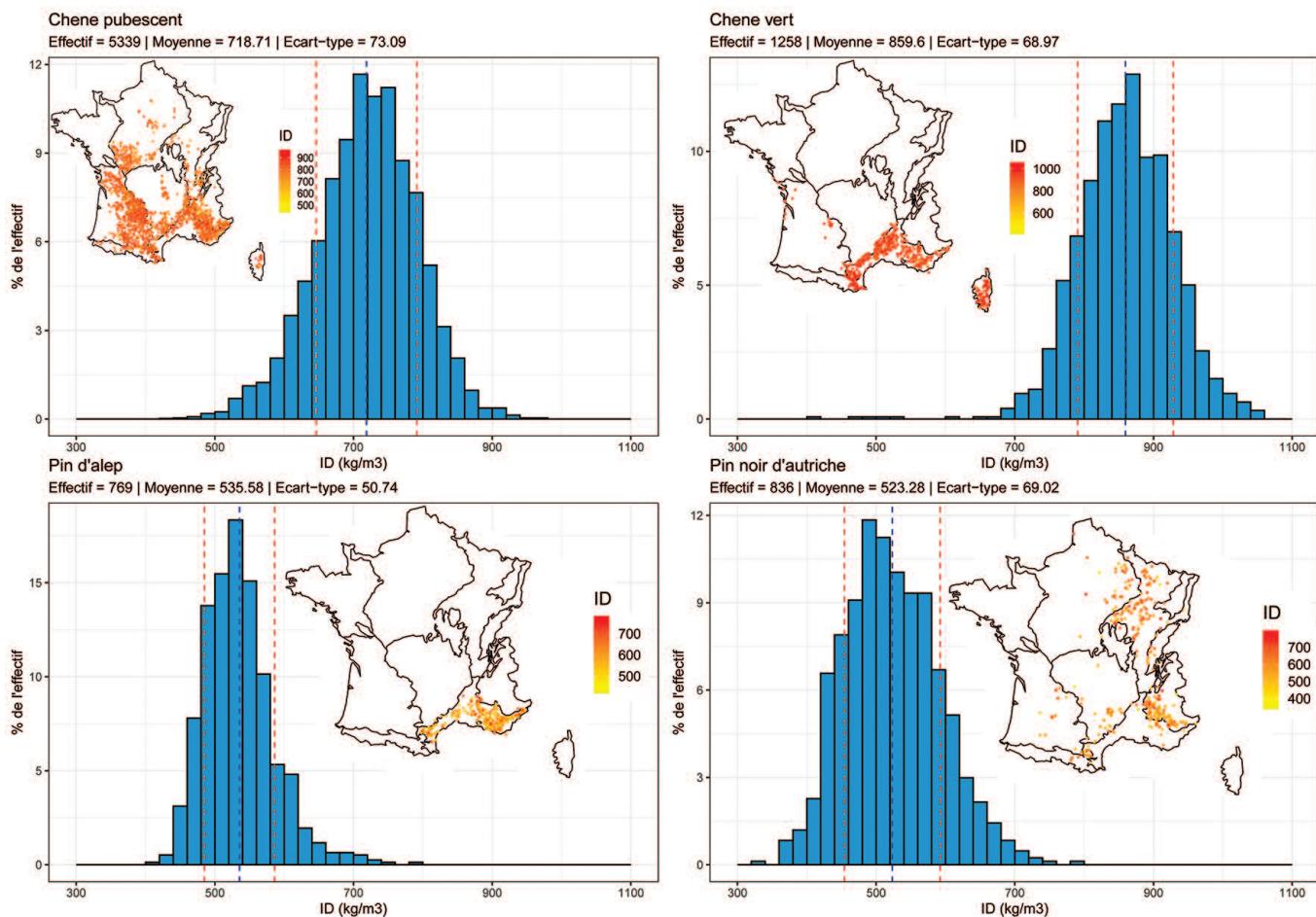
Essences	ID 2016-2019 XDM	Nombre de carottes XDM	Nombre de carottes XDM GRECO J	Densité IFN (Carbofor)
Autre feuillus	608,28	52777	552	544,47
Autre résineux	430,72	6843	165	410,30
Chêne pubescent	718,80	5339	976	650,00
Pin d'Alep	535,60	769	755	450,00
Chêne vert	859,59	1258	697	730,00
Pin maritime	442,94	3461	121	460,00
Chêne-liège	762,76	236	169	700,00
Pin sylvestre	457,97	4757	137	440,00
Pin noir d'Autriche	523,30	836	57	460,00
Aulne glutineux	452,32	1149	0	420,00
Épicéa commun	387,32	4711	0	370,00
Pin parasol	486,57	52	39	480,00
Peuplier grisard	450,32	97	38	370,00
Hêtre	605,62	10995	49	550,00
Châtaignier	504,48	5433	29	470,00
Peuplier noir	405,14	227	30	370,00

Fig. 1 (ci-dessous) :
Infradensité de quatre essences méditerranéennes : sur les cartes un point représente un arbre échantillonné pour le projet XDM. La flèche verticale sombre indique la valeur d'infradensité constante utilisée actuellement.

Dans le Tableau II on présente les valeurs moyennes d'infradensité des principales essences de la grande région écologique « méditerranée » (GRECO J) et les anciennes valeurs d'infradensité (CARBOFOR, 2004). S'agissant des effectifs on indique le nombre de carottes prélevées pour la France entière et le nombre de carottes prélevées dans la GRECO J.

La variabilité de l'infradensité

Si la variabilité interspécifique est importante, on peut voir sur les quatre graphes de la figure 1 que la variabilité intra spécifique est du même ordre de grandeur. Selon les essences la gamme de variation est de 300 à 400 kg/m³, ce qui est considérable.



Les causes de cette variabilité restent à analyser de manière systématique mais on sait déjà que les causes de ces variations peuvent être multiples. Les travaux déjà réalisés pour quelques essences d'importance commerciale (BOURIAUD *et al.*, 2005, FRANCESCHINI *et al.*, 2013, HOULLIER *et al.*, 1995) ont montré l'importance de l'âge des arbres, de leur taille, du mode de gestion et donc de la largeur des accroissements annuels, de l'origine génétique mais également les facteurs du milieu (niveau trophique, propriétés des sols) et les variables climatiques (pluviométrie, température).

La grande originalité de XyloDensMap c'est une base de données d'infradensité du bois qui est mesurée sur plus de cent dix mille carottes de sondage réparties sur la grille d'échantillonnage de l'IFN (HERVÉ, 2016).

Nos nouvelles données seront utilisées par l'IFN pour les calculs de biomasse et analysées pour faire des modèles permettant de simuler les variations de l'infradensité. On pourra ainsi répondre par exemple, à des questions sur les effets du changement climatique et de la gestion sur la production en biomasse. Ces modèles sont en cours de développement en collaboration avec le département « Ressources forestières et carbone » de l'IGN.

Faire de tels modèles implique d'avoir des effectifs suffisants (plusieurs centaines de carottes par essence si on veut couvrir tous les gradients trophiques et climatiques), ce qui n'est le cas que d'un nombre limité d'essences, celles qui sont aujourd'hui les plus représentées dans nos forêts. En effet, le nombre de carottes de chaque essence reflète globalement l'importance de cette essence dans les forêts métropolitaines.

Le tableau IV contient la liste des 82 essences inventoriées dans la GRECO J. On voit que (i) 28 essences ont plus de 500 carottes, ce qui est un nombre satisfaisant pour construire des modèles avec une dizaine de variables explicatives, (ii) 16 essences ont un nombre de carottes compris entre 100 et 500 et (iii) 37 essences ont moins de cent carottes. Si on se limite à la GRECO J on voit alors que l'effectif de carottes prélevées est supérieur à 500 pour seulement les trois essences principales, chêne pubescent, pin d'Alep et chêne vert. Donc disposer de modèles d'infradensité pour les autres essences implique vraisemblablement de prévoir des collectes complémentaires de carottes de sondage.

Une estimation simplifiée de la biomasse forestière

A partir de ces nouvelles données d'infradensité on peut faire une estimation simplifiée de la biomasse forestière de la GRECO J. On présente dans le tableau III le résultat du calcul de la biomasse du volume « Bois Fort Tige » avec les valeurs d'infradensité anciennes et avec les valeurs d'infradensité du projet XyloDensMap.

Nous avons limité ce tableau à la liste des 14 essences les plus importantes en termes de volume et regroupé toutes les autres essences du tableau IV dans les catégories « autres feuillus » et « autres résineux ».

La biomasse est ainsi réévaluée à la hausse de 12,4% pour l'ensemble de la GRECO J. Pour les trois essences les plus importantes cette réévaluation d'environ 10% pour le chêne pubescent, de près de 18% pour le chêne vert et presque 20% pour le pin d'Alep.

Cette méthode donne des résultats approchés réalistes, permet de comparer les nouvelles valeurs d'infradensité aux anciennes et permet déjà de faire des simulations simples de scénarios.

Les résultats montrés ici sont indicatifs et n'ont pas vocation à servir pour du reporting national ni international. La publication de la réévaluation des stocks de la biomasse des forêts métropolitaines sera faite en partenariat avec l'IFN et par la mise en œuvre de méthodes d'imputation qui sont en cours de développement et de finalisation au Laboratoire d'inventaire forestier.

Tab. III :
Biomasse des volumes
bois fort tige
(en millions de tonnes).
Avec les nouvelles valeurs
d'infradensité issues de
XDM, le stock augmente
de 12,4%. Pour les trois
essences les plus
importantes
l'augmentation varie
de 10% à presque 20%.

Essences	Biomasse Vbft avec infradensité XDM (millions de tonnes)	Biomasse Vbft avec infradensité IFN (millions de tonnes)	Ecart en %
Chêne pubescent	13,88	12,55	10,58
Chêne vert	11,19	9,51	17,75
Pin d'Alep	9,99	8,39	19,02
Autre feuillus	4,95	4,43	11,72
Chêne-liège	2,22	2,04	8,97
Pin maritime	2,06	2,14	-3,71
Autre résineux	1,74	1,65	4,98
Pin sylvestre	1,46	1,40	4,08
Pin noir d'Autriche	1,04	0,91	13,76
Aulne glutineux	0,84	0,78	7,69
Hêtre	0,77	0,70	10,11
Pin parasol	0,63	0,62	1,37
Peuplier grisard	0,62	0,51	21,71
Châtaignier	0,60	0,56	7,34
Epicéa commun	0,59	0,57	4,68
Peuplier noir	0,46	0,42	9,50
Total	53,06	47,20	12,41

Essences	Vbft (Mm ³)	Vol aérien (Mm ³)	Vtot (Mm ³)	Nombre arbres IGN GRECO J	Nombre de carottes XDM GRECO J	Nombre de carottes XDM France entière
Chêne pédoncule	0,035	0,060	0,076	1	0	12773
Hêtre	1,275	2,203	2,820	190	49	10995
Chêne sessile	0,483	0,853	1,091	29	14	10816
Charme	0,033	0,055	0,071	1	1	7592
Châtaignier	1,197	2,112	2,703	122	29	5433
Sapin pectiné	0,113	0,185	0,241	2	2	5355
Chêne pubescent	19,314	34,123	43,678	3771	976	5339
Frêne commun	0,540	0,895	1,146	69	27	4987
Pin sylvestre	3,193	5,353	6,959	430	137	4757
Epicéa commun	1,532	2,381	3,096	12	0	4711
Pin maritime	4,644	7,501	9,751	355	121	3461
Erable champêtre	0,229	0,399	0,511	50	28	2088
Merisier	0,044	0,076	0,097	13	7	1854
Robinier faux acacia	0,871	1,444	1,848	102	19	1436
Noisetier coudrier	0,039	0,068	0,087	16	4	1376
Tremble	0,619	1,011	1,294	19	7	1366
Chêne vert	13,021	24,550	31,423	5832	697	1258
Aulne glutineux	1,860	3,103	3,972	12	0	1149
Saule marsault	0,005	0,009	0,012	1	0	1080
Aubépine monogyne	0,056	0,101	0,130	26	19	1076
Pin laricio de corse	0,264	0,420	0,547	13	5	841
Alisier torminal	0,022	0,039	0,050	19	6	840
Pin noir d'Autriche	1,982	3,229	4,198	246	57	836
Pin d'Alep	18,654	30,523	39,680	1997	755	769
Alisier blanc	0,080	0,146	0,186	37	19	706
Orme champêtre	0,239	0,414	0,530	59	17	629
Tilleul à petites feuilles	0,033	0,056	0,072	3	1	597
Tilleul à grandes feuilles	0,091	0,153	0,196	10	4	513
Houx	0,045	0,084	0,108	4	4	433
Erable à feuilles d'obier	0,238	0,427	0,547	57	28	278
Erable de Montpellier	0,279	0,514	0,658	106	36	273
Arbousier	0,753	1,407	1,801	413	89	236
Chêne-liège	2,908	5,737	7,343	422	169	236
Peuplier noir	1,147	1,890	2,419	59	30	227
Saule blanc	0,149	0,246	0,315	9	6	220
Sureau noir	0,008	0,014	0,018	1	1	198
Pommier sauvage	0,015	0,027	0,035	4	2	160
Pin à crochets	0,200	0,343	0,446	6	3	158
Poirier commun	0,028	0,054	0,069	4	3	143
Frêne oxyphylle	0,524	0,891	1,141	98	35	133
Genévrier commun	0,085	0,136	0,177	47	22	131
Genévrier oxycedre	0,324	0,518	0,673	206	93	118
Prunelier	0,002	0,003	0,004	1	1	118
Sapin de Vancouver	0,030	0,048	0,063	1	0	106
Cèdre de l'atlas	0,990	1,527	1,985	60	19	98
Peuplier grisard	1,378	2,289	2,930	106	38	97
Filaire à feuilles larges	0,148	0,283	0,362	112	40	84
Cormier	0,033	0,059	0,075	9	10	80
Noyer commun	0,013	0,027	0,035	2	1	75
Buis	0,012	0,022	0,028	12	6	73
Cerisier de Sainte-Lucie	0,006	0,012	0,015	4	5	58
Frêne à fleur	0,091	0,160	0,205	16	2	58
Pin parasol	1,301	2,257	2,934	151	39	52
Saule cassant	0,007	0,014	0,018	1	1	50
Charme houblon	0,416	0,705	0,903	62	16	44
Peuplier blanc	0,858	1,430	1,830	38	25	43
Cornouiller male	0,006	0,012	0,016	3	2	42
Prunier domestique	0,060	0,106	0,136	6	3	41

Tab. IV (suite page suivante) :

Liste de toutes les essences inventoriées dans la Grande région écologique « méditerranée » (GRECO J).

Bruyère arborescente	0,066	0,120	0,154	32	4	36
Cytise aubour	0,007	0,013	0,016	1	0	35
Olivier d'Europe	0,062	0,121	0,154	15	6	29
Laurier noble	0,077	0,133	0,170	14	11	27
Platane d'occident	0,242	0,399	0,511	3	3	16
Cornouiller sanguin	0,017	0,034	0,044	5	0	15
Cyprès de Lawson	0,175	0,263	0,341	2	2	12
Figuier de carie	0,051	0,101	0,129	5	6	10
Pin brutia (ou) eldarica	0,665	1,108	1,441	48	10	10
Nerprun alaterne	0,026	0,052	0,066	8	3	7
Pin de salzmann	0,490	0,811	1,054	22	2	7
Pistachier térébinthe	0,069	0,132	0,169	26	6	6
Micocoulier	0,104	0,179	0,229	6	2	5
Poirier a feuilles d'amandier	0,068	0,139	0,178	6	2	5
Amandier	0,018	0,036	0,046	1	4	4
Aulne vert	0,004	0,009	0,011	1	1	4
Cyprès de Provence	0,194	0,307	0,399	17	4	4
Pistachier lentisque	0,015	0,029	0,037	5	1	4
Arbre à perruques	0,017	0,034	0,044	5	1	3
Cyprès de Lambert	0,192	0,302	0,393	2	2	2
Cyprès de l'Arizona	0,311	0,476	0,619	9	1	1
Eucalyptus (genre)	0,025	0,044	0,056	1	0	1
Mimosa	0,162	0,296	0,379	2	1	1

Conclusion

Nous avons présenté quelques résultats originaux qui contribuent à mieux documenter les ressources en bois des forêts méditerranéennes et tout particulièrement l'importante variabilité de l'infradensité des bois. Sur la base d'un exemple simplifié, nous avons montré que ces nouvelles mesures conduisent à une réévaluation à la hausse de la biomasse forestière en zone méditerranéenne.

Les perspectives de valorisation de ces nouvelles données sont la réalisation de modèles de l'infradensité avec lesquels on pourra par exemple montrer que, à volume sur pied identique, des chênes pubescents jeunes contiendront plus de biomasse que des vieux et l'inverse pour le pin d'Alep.

Au-delà de l'infradensité du bois, l'exploitation de la xylothèque de carottes de sondage permettra de produire des informations nouvelles sur les largeurs d'écorce, les retraits du bois et l'humidité du bois des arbres sur pied.

Dans cet article, nous avons également pointé l'importance de la résolution spatiale de notre échantillonnage en précisant le nombre d'arbres qui sont inventoriés et carottés. De cette manière on comprend mieux que pour répondre à des questions posées à des échelles locales de gestion, ou bien pour des essences peu représentées en forêt, il faudra réaliser des échantillonnages complémentaires. Toutes les nouvelles

mesures de terrain devraient idéalement être intégrées dans la base de données de l'IFN. Ce sera un atout pour la calibration des nouvelles technologies LIDAR qui émergent dans le champ des inventaires forestiers.

Tab. IV (suite) :
Liste de toutes les essences inventoriées dans la Grande région écologique « méditerranée » (GRECO J).

Références

- Barbati A, Marchetti M, Chirici G, Corona P (2014) European forest types and forest Europe SFM indicators: tools for monitoring progress on forest biodiversity conservation. *For Ecol Manag* 321:145–157
- Bouriaud, O., Leban, J. M., Bert, D., & Deleuze, C. (2005). Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. *Tree Physiology*, 25, 651–660.
- Berges, L., Nepveu, G., & Franc, A. (2008). Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management*, 255, 567–579. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.027>
- CARBOFOR, (2004). Rapport final du projet coordonné par Denis Loustaud. Programme GICC 2001 « Gestion des impacts du changement climatique », convention GIP ECOFOR n°3/2001.
- Cavaignac S, (2009). *Les sylvocorégions (SER) de France métropolitaine*. Etude de définition, document interne IFN, 146 pages. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/Rapport_ser.pdf
- Celzard A., Leban JM, (2012). De nouveaux matériaux à base de bois : un contexte, des exemples. Colloque Forêt Bois 16 décembre 2011, Nancy. Carrefour de l'Innovation Agronomique 18, 17-29. INRA éditeur
- Jean-Michel LEBAN [1]
Baptiste KERFRIDEN [1,2]
Maxime LACARIN [1],
Amélie TAUPIN [1,3]
Jean-Christophe HERVÉ [2]
- 1- BEF, INRAE, Champenoux
2- Laboratoire d'Inventaire Forestier, IGN, Nancy
3- FIBOIS Drôme Ardèche, Valence
Auteur
de correspondance : jean-michel.leban@inrae.fr

Remerciements

à tous les ingénieurs et techniciens du Service de l'Inventaire forestier et environnemental de l'IGN à Nogent-sur-Vernisson qui ont mis en œuvre le protocole de récolte et d'acheminement des carottes de sondage, aux techniciens du plateau technique Xyloscience de l'INRAE à Champenoux et aux personnels de la société Radiolor d'Imagerie médicale de la Clinique Louis Pasteur, Essey-les-Nancy qui ont réalisé les scan RX pour l'obtention des images tomographiques permettant la mesure sans contact de la densité du bois sur carottes de sondage.

Ce projet a été lauréat de l'appel à projets national 2016-2017 « Innovation et investissements pour l'amont forestier » (convention n°A6.01/2017 du MAA), a reçu le soutien financier de l'Agence nationale de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et de la Région Grand Est pour la bourse de thèse de Baptiste Kerfriden. Le LabEx ARBRE a également soutenu ce projet dans sa phase de lancement.

- D'Amecourt, A., Houllier, F., Lemas, PR., Sève, JC. (2016). #FBRI2025 - Plan Recherche et Innovation 2025 - Filière forêt-bois. DOI : 10.15454/1.4640916067229846E12
- Franceschini, T., Longuetaud, F., Bontemps, J.-D., Bouriaud, O., Caritey, B.-D., & Leban, J.-M. (2013). Effect of ring width, cambial age, and climatic variables on the within-ring wood density profile of Norway spruce *Picea abies* (L.) *Karst.* *Trees*, 27(4), 913–925. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0844-6>
- IGN (2019) Méthodologie. Pour bien comprendre les résultats publiés 2014-2018. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/191023-methodologie_v2.pdf
- Leban, J.-M., & Haines, D. W. (1999). The modulus of elasticity of hybrid larch predicted by density, rings per centimeter, and age. *Wood and Fiber Science*, 31(4).
- Hervé, J.-C., Morneau, F., Véga, C., Leban, J.-M., Saint-André, L., & Bontemps, J.-D. (2016). Evaluation des ressources forestières pour la bioéconomie: quels nouveaux besoins et comment y répondre ? *Innovations Agronomiques*, 56, 71–80.
- Hervé J.-C., 2016. France, Chap. 20, 385-404, in « National forest inventories assessment of wood availability and use », Vidal C., Alberdi I., Hernandez L., Redmond J. (Eds.), Springer, DOI:10.1007/978-3-319-44015-6
- Houllier, F., Leban, J.-M., & Colin, F. (1995). Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, 74(1–3), 91–102. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03510-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03510-4)
- Jacquin, P., Longuetaud, F., Leban, JM., Mothe, F. (2017). X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. *Dendrochronologia*, 42, 42–50. doi:10.1016/j.dendro.2017.01.004
- Jacquin, P., Mothe, F., Longuetaud, F., Billard, A., Kerfriden, B., & Leban, JM (2019). CarDen: A software for fast measurement of wood density on increment cores by CT scanning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156(1), 606–617. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.008>
- Kerfriden, B., Bontemps, JD, Leban, JM. Variations in temperate forest stem biomass ratio along three environmental gradients are dominated by interspecific differences in wood density. *Plant Ecol* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01106-0>
- Leban, JM., Hervé, JC., Bontemps, JD., Longuetaud, F., Mothe, F., Jacquin, P., (2016). Measurement of the annual biomass increment of the French forests –XYLOMAPDENS project. In: IUFRO Working Parties 5.01.04 and 3.02.04 (WoodQc), 12–17 June 2016, Québec/Baie-St-Paul, Canada
- Leban, JM, Kerfriden, B., Jacquin, P., Lacarin, M., Taupin, A., Mola, C., Duprez, C., Chabot S., Dauffy, V., Morneau F., Wurpillot, S., Hervé, J. C., (2020). « Wood basic density for 125 tree forest species from the French forests », <https://doi.org/10.15454/XFOPL1>
- Longuetaud, F., Saint-André, L. Leban, JM. (2005) Automatic Detection of Annual Growth Units on *Picea abies* Logs Using Optical and X-Ray Techniques. *J Nondestruct Eval* 24, 29–43. <https://doi.org/10.1007/s10921-005-6658-8>
- Kebbi-Benkeder, Z., Colin, F., Dumarçay, S., & Gérardin, P. (2015). Quantification and characterization of knotwood extractives of 12 European softwood and hardwood species. *Annals of Forest Science*, 72(2), 277–284.
- Roux A., Colin A., Dhôte JF., Schmitt B., Bailly A., Bastien J.-C., Bastick C., Berthelot A. Bréda N., Caurla S., Carnus JM, Gardiner B., Jactel H., Leban JM, Lobianco A., Loustau D., Marçais B., Meredieu C., Pâques L., Rigolot E., Saint-André L., Guehl JM, 2020. *Filière forêt-bois française et atténuation du changement climatique*. Editions Quæ, 170 p
- Vallet, P., Dhôte, JF., Moguedec, G. Le, Ravart, M., & Pignard, G. (2006). Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, (229), 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.03.013>
- Verkasalo, E., Leban JM., (2002). MOE and MOR in static bending of small clear specimens of Scots pine, Norway spruce and European fir from Finland and France and their prediction for the comparison of wood quality. *Paper and timber*. Vol 84, Num 5, pp 332-340
- Vieilledent G, Fischer FJ, Chave J, Guibal D, Langbour P, Gérard J (2018). New formula and conversion factor to compute basic wood density of tree species using a global wood technology database. *Am J Bot* 105(10):1653–1661
- Williamson GB, Wiemann MC (2010) Measuring wood specific gravity... correctly. *Am J Bot* 97(3):519–524
- Zobel B.J., Jett J.B. (1995). The Importance of Wood Density (Specific Gravity) and Its Component Parts. In: Genetics of Wood Production. Springer Series in Wood Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79514-5_4

Résumé

Le passage d'une évaluation en volume à une évaluation en biomasse nécessite la connaissance de la masse volumique du bois qui, au-delà de valeurs moyennes par essence ou groupe d'essences, varie beaucoup selon les espèces, les conditions de milieu, et les propriétés de structure et de gestion des peuplements. Se basant sur une innovation de rupture, le projet XyloDensMap a permis la mesure à haut débit de l'infradensité du bois de plus de cent dix mille carottes de sondage prélevées au cours de quatre campagnes successives de l'Inventaire forestier national. Nous présentons ici des premiers résultats d'infradensité des bois méditerranéens qui conduisent à une estimation à la hausse de 12% de la biomasse aérienne de ces forêts. Nous concluons en soulignant la nécessité d'échantillons complémentaires pour les essences faiblement représentées et lorsque les questions de gestion pour la biomasse sont posées à des échelles locales comme celle des peuplements.