



HAL
open science

Évaluation de la ressource forestière disponible sur le bassin d’approvisionnement de la centrale biomasse P4B d’Uniper France Power

Philip Roche, Bertrand Teuf

► To cite this version:

Philip Roche, Bertrand Teuf. Évaluation de la ressource forestière disponible sur le bassin d’approvisionnement de la centrale biomasse P4B d’Uniper France Power. IRSTEA. 2018. hal-04013261

HAL Id: hal-04013261

<https://hal.science/hal-04013261>

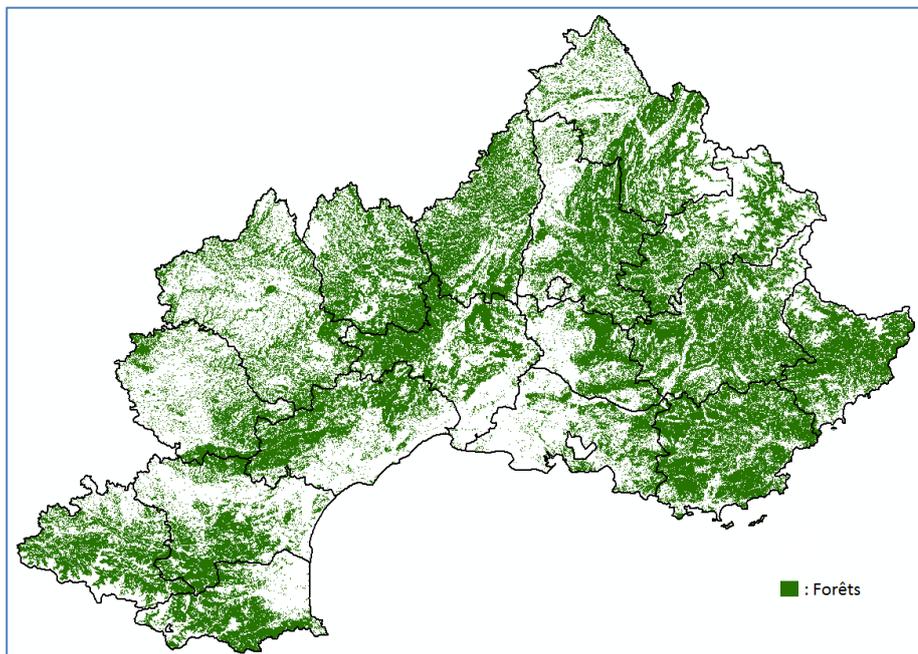
Submitted on 3 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Evaluation de la ressource forestière disponible sur le bassin d'approvisionnement de la centrale biomasse P4B d'Uniper France Power

Janvier 2018



IRSTEA Aix-en-Provence

Philip Roche et Bertrand Teuf

Cette étude a été financée par Uniper France Power. Elle a été réalisée de manière indépendante au sein de l'équipe Ecosystèmes Méditerranéens et Risques de l'Unité de Recherche RECOVER d'Irstea Aix-en-Provence par Bertrand Teuf (chargé de mission en CDD) et Philip Roche (directeur de recherche) en collaboration avec Tiziano Panini du bureau d'étude Terra Silva.

Référence : Roche, P., Teuf, B. 2018. Evaluation de la ressource forestière disponible sur le bassin d'approvisionnement de la centrale à biomasse P4B d'Uniper France Power. Rapport d'étude Scientifique et Technique, Irstea, Aix-en-Provence, 38 pp.

1. Zones d'étude

Le bassin d'approvisionnement de la centrale biomasse de Gardanne est fixé par les services de l'Etat aux dix-sept départements du sud-est de la France (fig. 1) :

Alpes de Haute Provence (04), Hautes-Alpes (05), Alpes Maritimes (06), Bouches-du-Rhône (13), Var (83), Vaucluse (84), Ardèche (07), Drôme (26), Isère (38), Gard (30), Hérault (34), Lozère (48), Aude (11), Pyrénées Orientales (66), Tarn (81), Aveyron (12), Ariège (09).

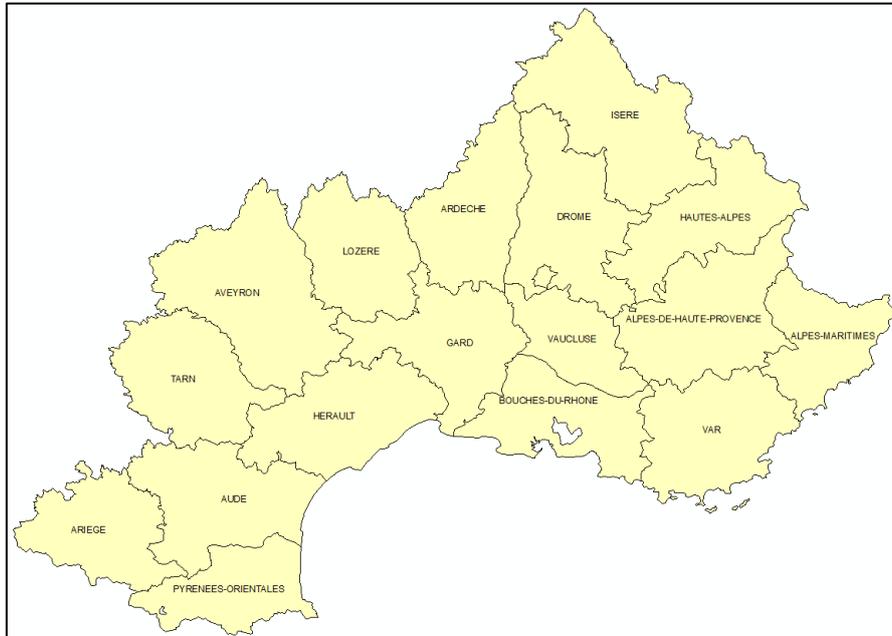


Figure 1. Bassin d'approvisionnement de la centrale à biomasse Uniper -Gardanne.

2. Méthodologie générale de l'étude

L'obtention d'estimation des ressources en biomasse est particulièrement importante pour une gestion raisonnée des ressources forestières, notamment dans un contexte de demande croissante pour ces ressources pour des usages industriels et de bois-énergie. En France les données de l'inventaire forestier national (IFN) qui est maintenant incorporé dans l'IGN, fournissent un échantillonnage national de l'état des forêts, de paramètres biométriques et des données environnementales selon un protocole clairement établi et récurrent sur des séries temporelles longues. Ces données sont fondamentales pour les estimations de la ressource forestière et ont été utilisées dans différentes études sur la ressource bois (par exemple : rapport d'étude IGN-ADEME, 2017). Les données de l'IFN sont accessibles librement en ligne sous forme d'un ensemble de tables de données par années¹. Dans cette étude nous avons considéré les données de 2005 à 2015 qui fournissent un lot de données homogènes et proches de la période actuelle.

¹ Il convient de noter que les coordonnées des points d'inventaires ne sont communiquées par l'IGN que sous une forme dégradée en précision pour des raisons de confidentialité statistique. Les points d'inventaires sont alloués à des points de grille réguliers de 1km de résolution. Ceci amène à une incertitude dans l'extraction et le croisement des données d'inventaires avec des couches d'information empirique et en conséquence génère des incertitudes statistiques accrues. Nous avons suivi un protocole de sous-échantillonnage des points d'inventaires pour limiter ce problème et générer des

A partir des données de l'IFN, deux grandes méthodes d'estimation de la ressource peuvent être mises en œuvre : 1. L'analyse statistique des données ponctuelles regroupées par entités géographiques (régions, départements, entités forestières) et thématiques (essences, propriété foncière, etc.) ; 2. La modélisation statistique spatialisée en combinant les données ponctuelles et des couches d'information spatiales prédictives, qui est très utilisée dans de nombreuses études internationales (par exemple : Baccini et al., 2004 ; Fernández-Manso et al., 2014 ; Gemmell, 1995 ; Tan et al., 2007 ; Tomppo et al., 2008).

Dans cette étude nous avons choisi la seconde méthode. La figure suivante (fig. 2) présente l'organisation générale de la méthode de modélisation de la ressource disponible.

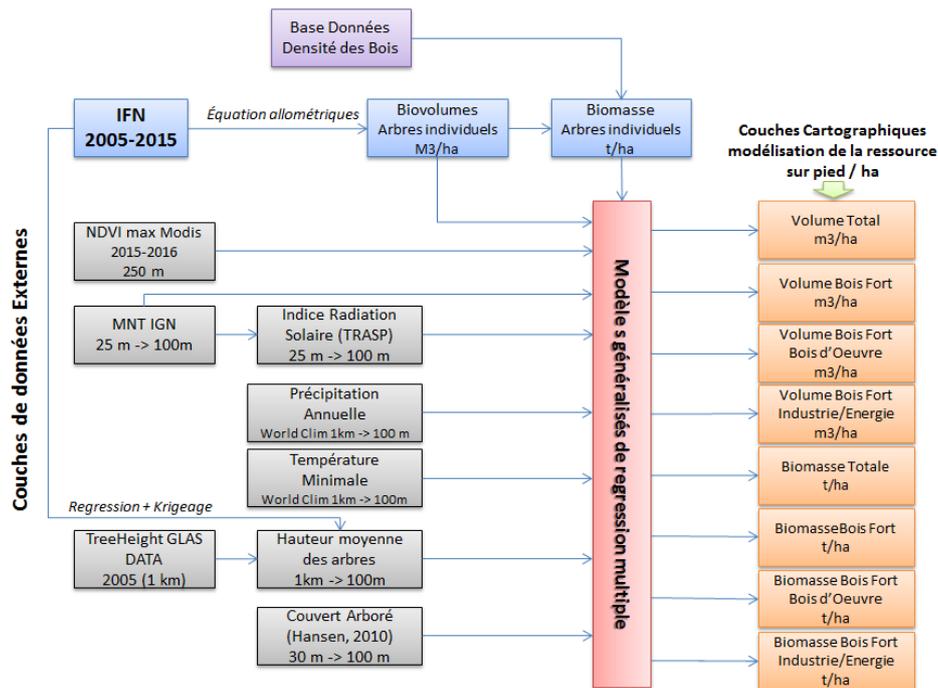


Figure 2 : Méthodologie de modélisation statistique par couplage de points d'inventaires et de données empiriques prédictives mises en œuvre pour l'évaluation à la résolution de l'hectare de différents paramètres de la ressource en bois.

La modélisation statistique a été réalisée en utilisant des régressions linéaires multiples. Les variables à prédire ont été les biovolumes et les biomasses. Les variables prédictives sont détaillées dans le paragraphe suivant. Plusieurs méthodes alternatives qui permettent d'intégrer des non linéarités ont été testées (Modèles Additifs Généralisés (GAM), Random Forest) sans fournir des ajustements de meilleure qualité.

Les couches d'information prédictives utilisées se regroupent en 3 catégories : Topographie (Altitude et Indice de radiation solaire (TRASP), Données forestières issues d'imagerie satellitaire (NDVI Max 2015-2016), % couvert arboré, hauteur moyenne des arbres) et Données climatiques (Précipitation annuelle moyenne et Température minimale moyenne). L'ensemble des données sont issues de sources de données accessibles en ligne pour des études scientifiques et techniques.

modèles statistiques significatifs. Un travail secondaire pourrait être conduit pour améliorer les estimations, mais nécessiterait l'accès aux coordonnées exactes des points d'inventaires.

L'évaluation de la disponibilité de la ressource en bois nécessite de prendre en compte l'exploitabilité de la ressource. Cette disponibilité peut se décliner en 3 grands ensembles : l'exploitabilité physique, l'exploitabilité réglementaire et l'exploitabilité économique.

Dans cette étude, nous avons considéré les deux premières catégories (fig. 3).

L'exploitabilité physique a été estimée sur la base de critères de distances aux routes et pistes et importance de la pente. Ces deux critères sont généralement utilisés pour réaliser des analyses à échelle régionale. Pour être plus précis, il conviendrait d'ajouter la prise en compte de la rugosité du terrain et la portance des sols pour la mécanisation.

L'exploitabilité réglementaire est déterminée par l'existence d'enjeux réglementaires et particulièrement ceux liés à la protection de la biodiversité et des paysages qui excluent ou limitent l'exploitation forestière. Nous avons intégré l'ensemble des données de zonations réglementaires disponibles et défini 3 modalités de protection cf. Fig. 3.

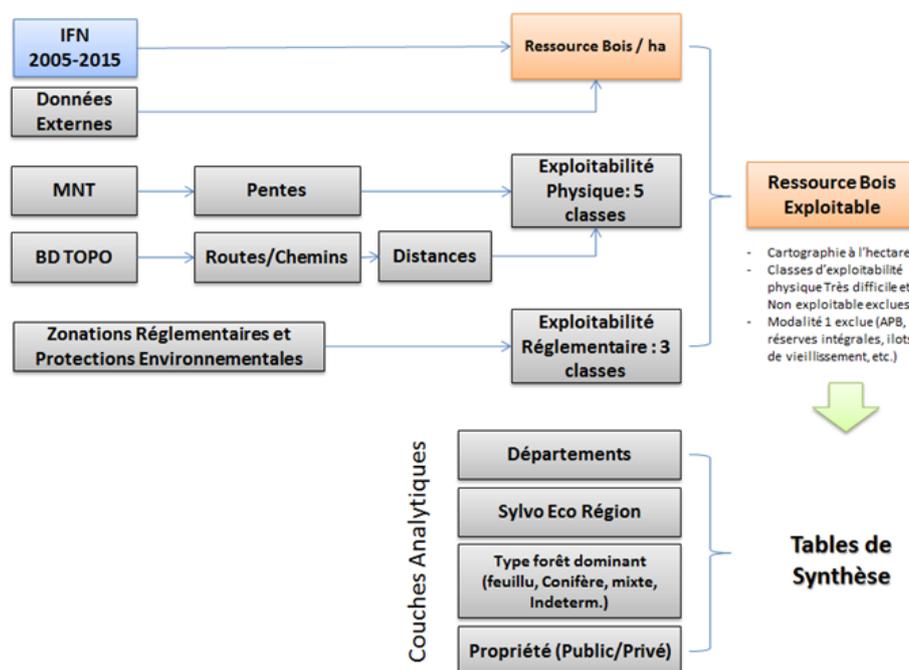


Figure 3 : organisation générale de l'étude de la ressource en bois exploitable.

Sur la base des critères d'exploitabilité physique et réglementaire, il est possible d'évaluer la ressource en bois exploitable (c'est-à-dire accessible physique et non exclue réglementairement).

3. Modélisation des phyto-volumes

A. Volume de l'arbre

Une estimation des volumes totaux a été effectuée en utilisant les données des inventaires forestiers de l'IGN sur dix années (2005-2015). Cette estimation ponctuelle est effectuée sur les points de relevés de l'IFN. Une présentation exhaustive de la méthodologie d'inventaire de l'IFN peut être trouvée sur le site internet « de l'inventaire forestier national » et est également fournie dans les KITs régionaux produits par l'IGN en appui à la stratégie forestière nationale.

Les arbres pris en compte sont ceux inventoriés par l'IFN, c'est-à-dire d'un diamètre supérieur à 7,5cm (ou d'une circonférence supérieure à 23,5cm).

Les volumes totaux sont estimés suivant le modèle décrit dans l'article de Deleuze *et al* (2014). L'avantage de l'utilisation de ce modèle est qu'il est paramétré pour la plupart des essences présentes en France. Pour les essences non renseignées un paramétrage est disponible pour les divisions Angiospermes (feuillus) et Gymnospermes (conifères). Il permet de modéliser le volume d'un arbre d'une essence donnée en fonction de sa circonférence à 1,3m et de sa hauteur.

La mesure de la circonférence est faite par l'IFN sur tous les arbres présents dans la placette inventoriée. La hauteur n'est pas mesurée de manière systématique, c'est le cas des arbres simplifiés (arbres pour lesquels l'ensemble des mesures ne sont pas effectuées). Pour estimer le volume nous avons besoin de la circonférence et de la hauteur de tous les arbres. Les hauteurs manquantes sont attribuées par placette en attribuant la valeur de la hauteur moyenne de l'espèce par catégorie de diamètre.

Il existe 3 catégories de diamètre :

- ❖ Petits bois : ($23,5 \leq C13 < 70,5$ cm ou $7,5 \leq D13 < 22,5$ cm)
- ❖ Moyen bois : ($70,5 \leq C13 < 117,5$ cm ou $22,5 \leq D13 < 37,5$ cm)
- ❖ Gros bois : ($C13 \geq 117,5$ cm ou $D13 \geq 37,5$ cm)

Avec C13 la circonférence à 1,30 m et D13 le diamètre à 1,30 m.

Au sein d'une même placette les hauteurs des arbres simplifiés sont attribuées comme étant la moyenne des hauteurs d'une essence donnée, d'une classe de diamètre donnée.

Le modèle utilisé intègre la transformation du coefficient de forme de Vallet *et al* (2006). Cette transformation permet de prendre en compte et de corriger l'artefact lié à la prise en compte du diamètre à 1,3m.

La formule générale du modèle est la suivante :

$$VolTot = \frac{h_{tot} \cdot c_{130}^2}{4\pi \left(1 - \frac{1.3}{h_{tot}}\right)^2} \left(a + b \cdot \frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{tot}} + c \cdot \frac{h_{tot}}{c_{130}} \right)$$

VolTot est le volume total (en m3), c13 et d13 sont exprimés en m, htot est la hauteur totale, a,b et c sont des coefficients

Le modèle est présenté comme relativement fiable sur la forme des petits arbres grâce à la transformation du coefficient de forme de Vallet *et al* (2006). Il est cependant moins fiable sur le volume total des arbres les plus gros, mais ces arbres sont peu présents sur la zone d'étude, principalement en climat méditerranéen.

Les espèces disponibles ainsi que leurs paramètres sont indiqués dans le tableau 1 ci-dessous (Deleuze *et al.*, 2014).

	Nb d'arbres	Modèle complet Emerge			Constante
		a [sans unité]	b (robustesse) [en m ³]	c (défilement) [sans unité]	
Feuillus	4783	0,522	0,661	-0,002	0,496
Acer campestre	2	0,534	0,661	-0,002	0,509
Acer pseudoplatanus	5	0,502	0,661	-0,002	0,486
Betula pendula	16	0,493	0,661	-0,002	0,472
Carpinus betulus	79	0,533	0,661	-0,001	0,503
Fagus sylvatica	2302	0,542	0,661	-0,002	0,515
Fraxinus excelsior	161	0,509	0,661	-0,001	0,497
Prunus avium	1	0,521	0,661	-0,002	0,497
Quercus palustris	27	0,513	0,661	-0,002	0,479
Quercus robur_petraea	2079	0,561	0,661	-0,002	0,512
Quercus rubra	111	0,511	0,661	-0,002	0,477
Résineux	7433	0,356	1,756	0,002	0,496
Abies alba	1688	0,398	1,756	0,002	0,520
Abies nordmanniana	47	0,375	1,756	0,002	0,533
Abies sp.	35	0,360	1,756	0,003	0,529
Cedrus atlantica ou libani	142	0,340	1,756	0,002	0,483
Larix decidua	163	0,377	1,756	0,001	0,488
Picea abies	404	0,303	1,756	0,004	0,486
Picea sitchensis	12	0,351	1,756	0,002	0,494
Pinus halepensis	134	0,403	1,756	0,001	0,522
Pinus laricio	338	0,306	1,756	0,003	0,455
Pinus mugo	3	0,432	1,756	0,001	0,550
Pinus nigra	240	0,305	1,756	0,003	0,498
Pinus nigra ssp pallasiana	7	0,332	1,756	0,002	0,468
Pinus pinaster	1533	0,396	1,756	-0,002	0,489
Pinus sp.	2	0,332	1,756	0,002	0,484
Pinus strobus	42	0,356	1,756	0,001	0,485
Pinus sylvestris	1958	0,372	1,756	0,001	0,473
Pinus uncinata	257	0,443	1,756	-0,001	0,541
Pseudotsuga menziesii	428	0,235	1,756	0,004	0,447

Table 1 : Coefficients du modèle d'estimation du volume total par espèce (Deleuze *et al*, 2014). La constante) fournit une estimation du coefficient de forme si on utilise une formule simplifiée.

B. Volume BFT de l'arbre

Le volume bois fort tige (BFT) d'un arbre correspond au volume d'un arbre avec une découpe terminale de 7cm de diamètre « fin bout ».

L'estimation du volume BFT est faite à partir des volumes totaux individuels. Le facteur d'expansion du volume (VEF) permettant de passer d'un volume total à un volume BFT est décrit dans Longuetaud *et al* (2013). Cet article donne différents modèles en fonction du diamètre seul ou du diamètre et de la hauteur, avec ou sans effets aléatoires. Les valeurs des calibrages sont renseignées par espèce ainsi que par divisions Angiospermes et Gymnospermes.

Le modèle utilisé pour l'étude est celui à deux entrées, DBH et H par espèce.

$$VEF = \exp(\beta_1 - DBH)^{\beta_2} + \exp(\beta_3) \cdot DBH/H^2 + 1$$

La correspondance entre volume total et volume BFT se fait par la formule : $VEF = V_{tot} / VBFT$

Des paramètres spécifiques ont été utilisés pour 13 espèces, pour les autres il a été pris un paramétrage selon les catégories conifères et feuillus.

- ❖ Espèces avec un paramétrage suffisamment robuste : Hêtre, Frêne, Chênes pédonculé et sessile, Bouleau, Pin laricio, Pin à crochet, Pin pignon, Sapin pectiné, Pin sylvestre, Sapin de Nordmann, Mélèze d'Europe et Epicéa.
- ❖ Exception 1, les paramètres du genre Quercus qui sont meilleurs qu'en renseignant seule la division Angiosperme. Pour ce genre, les paramètres propres au genre sont donc utilisés.
- ❖ Exception 2, les paramètres des Pin noirs sont rapprochés de ceux des Pins laricio et ceux des paramètres du Pin d'Alep sont rapprochés de ceux du Pin sylvestre. De par leur proximité architecturale les estimations seront meilleures qu'un simple paramétrage à la division des Gymnospermes.

C. Indice de surface

Les phyto-volumes ainsi estimés à l'échelle de l'arbre doivent être rapportés à l'hectare. Cependant les arbres ne sont pas inventoriés sur les mêmes superficies selon leurs catégories de diamètre. Les petits bois ($23,5 \leq C13 < 70,5$ cm ou $7,5 \leq D13 < 22,5$ cm) sont inventoriés sur des placettes circulaires de 6m de rayon, les moyens bois ($70,5 \leq C13 < 117,5$ cm ou $22,5 \leq D13 < 37,5$ cm) sur des placettes de 9m de rayon et les gros bois ($C13 \geq 117,5$ cm ou $D13 \geq 37,5$ cm) sur des placettes de 15 m de rayon.

Afin d'avoir une échelle identique pour ces trois catégories, toutes les valeurs de phyto-volumes sont ramenées à l'hectare à l'aide d'un indice de pondération. L'indice de pondération de l'arbre par la surface d'échantillonnage est le suivant :

Indice = $10000 / \pi R^2$, avec R le rayon de la placette (6,9 ou 15m selon la catégorie de bois).

Ainsi, la multiplication du volume individuel avec cet indice permet de ramener le volume de l'arbre à l'hectare.

4. Qualités des bois

Les qualités des bois correspondent aux débouchés futurs prévisionnels. Elles sont classées en fonction de l'utilisation techniquement possible et économiquement souhaitable.

Lors des inventaires IFN, la qualité des bois est renseignée en pourcentage. Durant les dix années, la prise en compte de ces qualités et leur dénomination a changé. Avant 2014, on distinguait trois catégories, Q1, Q2, Q3 (de la qualité de bois supérieure à inférieure). Après 2014, quatre catégories de qualité sont recensées : S+, S1, S2 et BI. Afin d'avoir une approche intégrative sur les dix années, nous avons combiné les indices de qualité de la manière suivante pour fournir deux grandes catégories :

- ❖ SBO : - Q1 et S+, soit tranchage, déroulage, ébénisterie, menuiserie fine...
- Q2 et S1 / S2, soit les bois de sciages, bois d'œuvre, menuiserie courante, charpente, caisserie, coffrage, traverse...
- ❖ BIE : - Q3 et BI, soit le bois d'industrie et d'énergie.

Ces deux grandes catégories de qualités correspondent à la qualité cible BIE « bois d'industrie et d'énergie » et SBO aux autres qualités « sciage et bois d'œuvre principalement ».

L'estimation des volumes de différentes qualités se fait de manière proportionnelle et à l'échelle individuelle. Pour un arbre inventorié par l'IFN, il est estimé un volume et des pourcentages de qualités. Après regroupement de ces pourcentages selon les deux classes SBO et BIE, on les multiplie par le volume estimé afin d'obtenir une disponibilité en bois d'œuvre et en bois d'industrie et énergie.

5. Modélisation de la biomasse

Pour estimer la biomasse il est utilisé un coefficient de densité (en kg/m^3). Le volume de bois estimé est multiplié par le coefficient de densité pour avoir une estimation de la biomasse de bois sec en tonne. Le coefficient de densité est disponible dans une base de données par espèce. Cette base de données a été créée à partir d'une base de données mondiale (Global Wood Density Database, Chave et al., 2009²) disponible sur la plateforme Dryad.org³ et consolidée avec des données de la littérature pour certaines essences locales non renseignées.

Il est à noter que cette estimation ne prend pas en compte la variabilité intra spécifique de la densité, qui peut être due à une hétérogénéité des conditions de croissance individuelles de l'arbre, notamment selon les variations de qualité des sols et l'état de la ressource en eau. Seuls des échantillonnages sur la zone d'étude pourraient apporter des éléments pour prendre en compte les variabilités géographiques de la densité de bois au sein des essences.

Pour l'ensemble des essences prises en compte dans l'analyse la densité moyenne par département est proche de $750 \pm 0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ en poids sec sur volume frais.

6. Estimation de la productivité biologique

La productivité influence fortement la croissance des peuplements forestiers après une perturbation du milieu de nature anthropique (coupe, incendies) ou non (chablis, incendies, tempêtes).

Les kits IGN-FN renseignent la productivité par espèce mais calculée sur la France entière ou par grandes régions administratives (figure 4) ce qui manque de précision lorsque l'on ne considère qu'un sous-ensemble de ces régions.

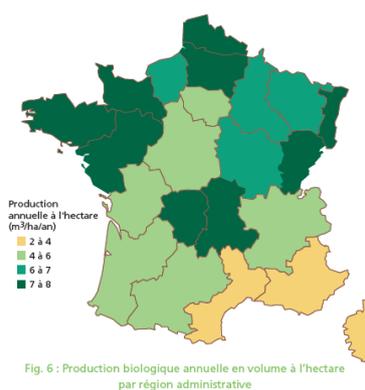


Figure 4 : Production biologique annuelle en volume à l'hectare

² <http://datadryad.org/handle/10255/dryad.235>; Chave J, Coomes DA, Jansen S, Lewis SL, Swenson NG, Zanne AE (2009) Towards a worldwide wood economics spectrum. Ecology Letters 12(4): 351-366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>

³ <http://datadryad.org>; Zanne AE, Lopez-Gonzalez G, Coomes DA, Ilic J, Jansen S, Lewis SL, Miller RB, Swenson NG, Wiemann MC, Chave J (2009) Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad Digital Repository. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>

par région administrative (Source IGN).

Afin d'avoir une estimation de la productivité des départements situés sur la zone potentielle d'approvisionnement de la centrale, nous avons utilisé les accroissements radiaux inventoriés par l'IFN sur une période de 10 ans. L'accroissement radial correspond à la mesure des cernes des cinq dernières années (IR5).

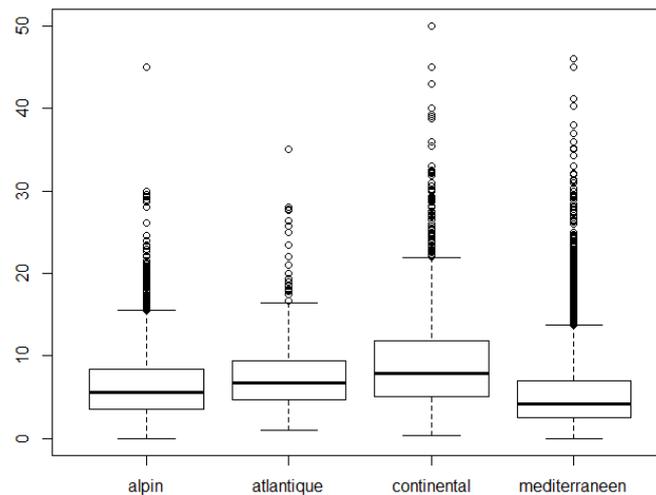


Figure 5 : Répartition des accroissements radiaux moyen (en mm) selon les 4 grandes régions biogéographiques présentes sur les 17 départements de la zone d'approvisionnement de la centrale biomasse. (données inventaires IFN 2005-2015)

L'accroissement radial est disponible pour les arbres inventoriés IFN et répertoriés comme non simplifiés. A partir des accroissements radiaux sur cinq ans sont estimés des accroissements annuels en volume (figure 5 et 6).

L'accroissement annuel correspond au gain en volume des arbres existants. Il est calculé en ajoutant l'accroissement radial (IR5) au rayon dans le modèle d'estimation du volume total. Le passage de l'accroissement sur le volume total à l'accroissement sur le volume bois fort se fait par le coefficient d'expansion VEF. Les valeurs obtenues sont ensuite ramenées à une échelle annuelle.

Des précautions sont de mises lors de l'interprétation de cet estimateur. En effet, le changement de hauteur n'est pas pris en compte dans l'estimation alors que la hauteur est une entrée du modèle. On peut estimer que ce facteur joue peu pour des arbres matures, cependant cela peut être une source d'erreur pour des arbres à la croissance en hauteur importante. De plus, ce n'est pas une prévision du volume dans 5 ans mais une estimation de la productivité basée sur l'accroissement passé. Cette méthode a été utilisée car si l'on retranche l'accroissement radial on estimera le volume d'arbres trop fins non pris en compte dans les données IFN et donc dans le modèle d'estimation du volume.

Notre estimation de l'accroissement en volume ne prend en compte dans un premier temps, ni le recrutement, ni le changement des surfaces forestières au cours du temps (Table 2). Cela correspond à ce que l'IGN désigne en tant qu'accroissement biologique des arbres vifs.

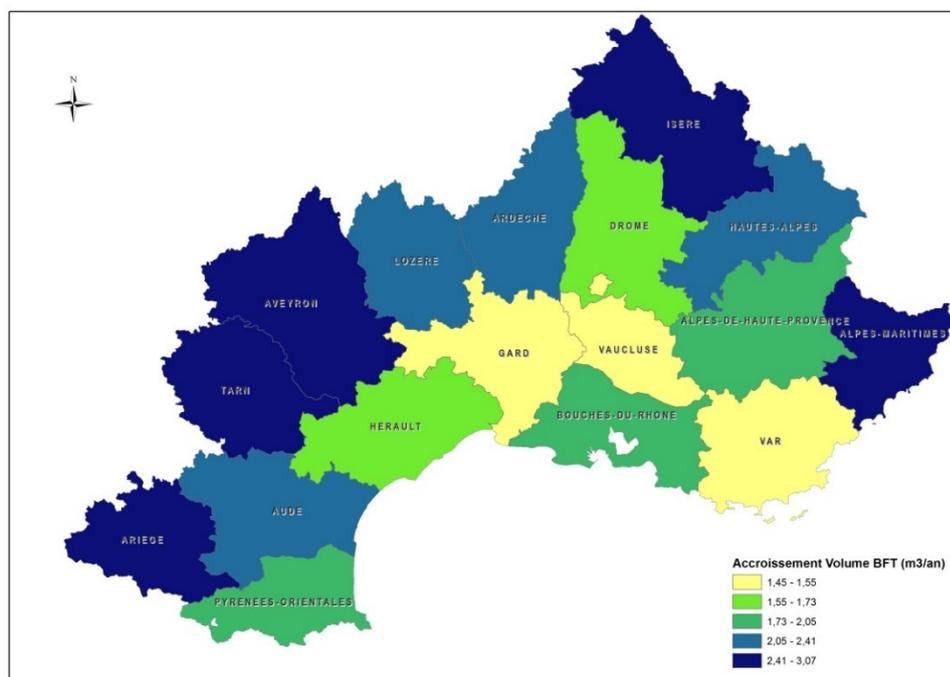


Figure 6 : Estimation de l'accroissement biologique du volume BFT des arbres vifs par département (en $m^3/ha/an$). Données sources Inventaires IFN.

Départements	Volume tot $m^3/ha/an$	Erreur standard	Volume BFT $m^3/ha/an$	Erreur standard	Biomasse tot $t/ha/an$	Erreur standard	Biomasse BFT $t/ha/an$	Erreur standard	Nb Arbres
04	2,67	± 0,03	1,89	± 0,03	1,49	± 0,03	1,03	± 0,03	10653
05	3,10	± 0,03	2,33	± 0,03	1,69	± 0,03	1,26	± 0,03	8152
06	3,56	± 0,04	2,66	± 0,04	1,92	± 0,04	1,41	± 0,04	6471
07	3,35	± 0,03	2,37	± 0,03	1,80	± 0,03	1,26	± 0,03	11089
09	3,93	± 0,03	2,88	± 0,03	2,26	± 0,03	1,64	± 0,03	8767
11	3,08	± 0,03	2,29	± 0,03	1,74	± 0,03	1,26	± 0,03	6923
12	3,77	± 0,03	2,61	± 0,03	2,22	± 0,03	1,54	± 0,03	8941
13	2,94	± 0,06	2,05	± 0,06	1,64	± 0,06	1,13	± 0,06	2323
26	2,58	± 0,03	1,73	± 0,03	1,49	± 0,03	0,97	± 0,03	10034
30	2,37	± 0,04	1,55	± 0,04	1,37	± 0,04	0,87	± 0,04	5192
34	2,44	± 0,04	1,66	± 0,04	1,42	± 0,04	0,93	± 0,04	4984
38	3,92	± 0,02	3,07	± 0,02	2,00	± 0,02	1,54	± 0,02	14008
48	3,32	± 0,03	2,41	± 0,03	1,72	± 0,03	1,24	± 0,03	7989
66	2,88	± 0,04	1,96	± 0,04	1,63	± 0,04	1,09	± 0,04	5302
81	3,66	± 0,04	2,77	± 0,04	2,17	± 0,04	1,62	± 0,04	5826
83	2,43	± 0,03	1,50	± 0,03	1,60	± 0,03	0,94	± 0,03	7940
84	2,24	± 0,05	1,45	± 0,05	1,36	± 0,05	0,84	± 0,05	3346

Table 2 : Estimation de l'accroissement biologique en volume et biomasse des arbres vifs par département.

7. Exploitabilité de la ressource

Plusieurs filtres à l'exploitation ont été considérés pour cette étude : exploitabilité économique-physique, protection réglementaire, types de peuplements, type de propriétaire, départements et sylvoécotégions.

Les coefficients de réduction de volume selon les différentes modalités ne sont pas appliqués dans ce travail. Cependant les différentes catégories sont suffisamment distinguées pour le faire a posteriori. Cette démarche a été menée dans le but de ne pas figer les résultats, en effet les coefficients de réduction sont très subjectifs et dépendent du prélèvement envisagé par les gestionnaires et propriétaires forestiers.

A. Exploitabilité physique

Les critères d'exploitabilité retenus sont la pente et la distance à la plus proche voie de débardage. La pente a été calculée à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) sur une maille de résolution de 25x25 mètres. Les routes et chemins d'exploitation ont été pris en compte pour calculer la distance aux voies de circulation sur la base des entités correspondantes de la BD topo (IGN) disponible sur les 17 départements. Il a été conservé les routes de la nature suivante : Route à 2 chaussées, Route à 1 chaussée, Route empierrée et Chemin (Table 3).

Route à 2 chaussées	Routes comportant 2 chaussées séparées par un obstacle physique éventuellement ouvert aux carrefours. Elles possèdent donc des croisements à niveau, ce qui leur interdit d'être classées dans la catégorie Autoroute ou Quasi-autoroute.
Route à 1 chaussée	Routes comportant 1 chaussée. Toutes les routes goudronnées qui ne sont pas classées en Route à 2 chaussées, Quasi-autoroute ou Autoroute se retrouvent dans cette classe.
Route empierrée	Routes sommairement revêtues (pas de revêtement de surface ou revêtement très dégradé), mais permettant la circulation de véhicules automobiles de tourisme par tout temps. Toutes les routes empierrées sont incluses.
Chemin	Les chemins sont prévus pour la circulation de véhicules ou d'engins d'exploitation. Ils ne sont pas forcément carrossables pour tous les véhicules et par tout temps (voir aussi "route empierrée").

Table 3 : métadonnées de la BD topo (Source : IGN).

Une matrice d'exploitabilité a été créée sur la base des matrices d'exploitabilité de l'IGN et la prise en compte de retours d'expérience des forestiers (table 4). Cette matrice prend en compte les critères de pente et de distance à la route. Le document établi par M. Panini de Terra Silva (Annexe 1) cadre l'exploitabilité.

Les classes d'exploitabilité physique sont les suivantes : E1 (Facile), E2 (Modérée), E3 (Difficile), E4 (Très Difficile), I (Non exploitable).

Dans les classes E4 et I aucune exploitation n'est envisagée dans cette étude.

Table 4 : Matrice d'exploitabilité physique et économique sur le bassin d'approvisionnement de la centrale.

Distances	Pentes				
	0-30%	30-45%	45-60%	60-100%	>100%
<150m	E1	E2	E2	E3	I
150-500m	E1	E2	E3	E4	I
500-1000m	E2	E3	E4	E4	I
1000-2000m	E3	E3	E4	E4	I
>2000m	E4	E4	E4	I	I

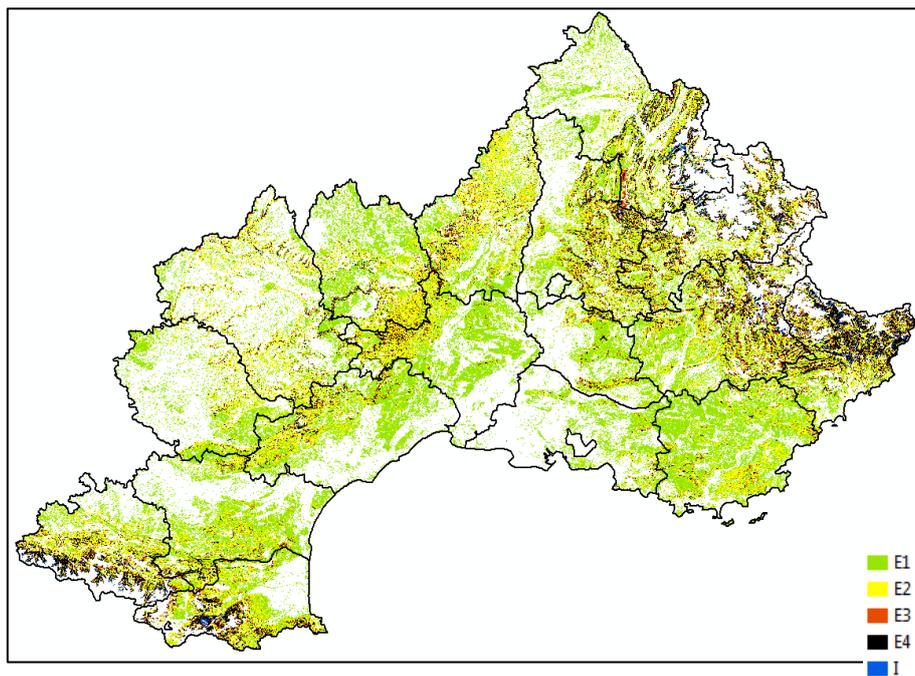


Figure 7 : Carte de la répartition des classes d'exploitabilité.



Figure 8 : Carte de la répartition des classes d'exploitabilité – illustration pour le PNR Luberon.

B. Protections règlementaires

La zone d'approvisionnement de la centrale à biomasse est vaste et comprend de ce fait de nombreux territoires faisant l'objet de forts enjeux concernant la biodiversité et les paysages. Afin de prendre en compte les différentes protections connues, il a été créé trois modalités de protection.

Modalité 1 : Cœur de Parc National ; Réserves Naturelles Nationales ; Réserves Naturelles Régionales; Réserve Biologique Intégrale ; Réserve Biologique Dirigée ; Convention de Ramsar ; Réserve Nationale de Chasse et de Faune Sauvage ; Arrêté Préfectoral de Protection Biotope.

Dans la modalité 1 aucune exploitation n'est envisagée. En conséquence, l'exploitabilité sera de 0% de la biomasse mobilisable.

Modalité 2 : Paysages et Zones Natura 2000.

- Protection de paysages prise en compte :

Occitanie : Sites inscrits, Sites classés, Zones Protections loi 1930, Bien Unesco

Rhône-Alpes Auvergne : Sites classés, Sites inscrits

PACA : Sites inscrits, Sites classés, Zones Protections loi 1930, Directive paysagère Alpilles.

- Natura 2000 : Zones de Protection Spéciales et Zones Spéciales de Conservation.

Cette modalité concerne des zones potentiellement exploitables, mais éventuellement soumises à évaluation selon les enjeux locaux.

L'exploitation dans ces zones est possible **mais** peut requérir des démarches administratives supplémentaires. De plus l'exploitation mécanisée et les coupes rases sont potentiellement prohibées ou régulées.

Modalité 3 : Réservoirs de biodiversité des SRCE (Forêts fermées et Zones humides).

Sont considérées comme forêts fermées, les forêts qui ne sont pas renseignées ni en forêts ouvertes ni en forêts semi-ouvertes. La dénomination Zones humides comprend les réservoirs SRCE Zones humides/milieus humides. Il existe actuellement de très forts enjeux de conservation sur les espèces d'habitats humides.

Cette modalité concerne des zones exploitables renseignées à titre informatif sur des enjeux concernant les continuités écologiques. Aucune contrainte à l'exploitation n'est actuellement existante.

Cartographie des modalités

Les modalités de protection sont hiérarchisées de la plus contraignante (modalité 1) à la moins contraignante (modalité 3). Lors d'une superposition des différentes couches SIG de protection c'est le principe d'ordre hiérarchique supérieur qui prime Modalité 1 > Modalité 2 > Modalité 3 (figure 8). Pour cela, les superficies qui appartiennent déjà à une modalité d'ordre hiérarchique supérieur ne sont pas comptabilisées dans la modalité la moins contraignante. Certaines portions du territoire sont donc concernées par les trois modalités.

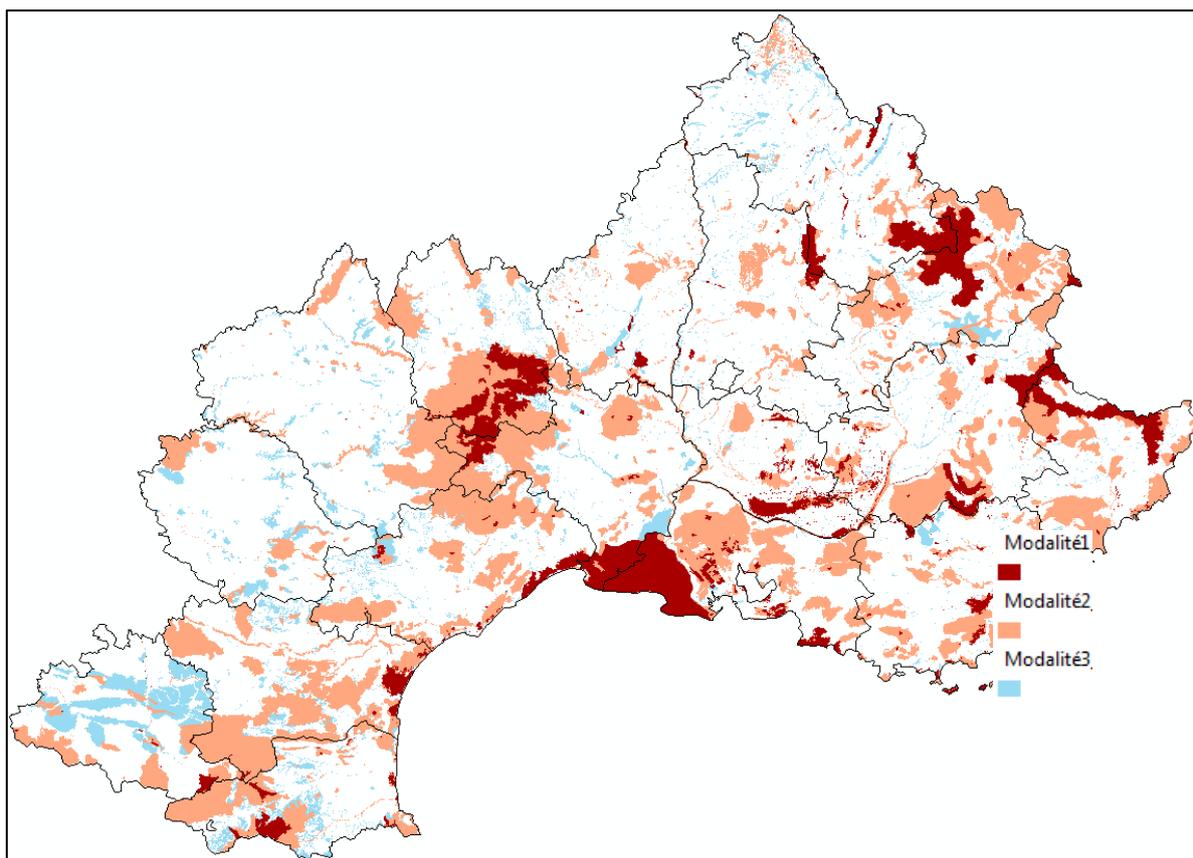


Figure 8 : Carte de la répartition des différentes modalités de protections. Les zones en blanc sont celles où n'existe aucune modalité de protection

Cas des PNR Verdon et Luberon

Les PNR Verdon et Luberon nous ont fourni des informations spécifiques quant à la disponibilité des bois et leur protection (fig.9). Afin de prendre en compte ces informations, les zones de protection renseignées hors sylviculture, c'est-à-dire sans aucune exploitation possible ont été intégrées dans la modalité 1 de protection. Ces zones sont décrites plus en détails ci-dessous⁴.

- PNR Verdon : 3 arrêtés préfectoraux de protection de biotope (APPB)

- Les sites d'intérêt écologique majeur inscrits au Plan de Parc.
- La zone de Malassoque qui va faire l'objet d'un APPB ou classement en RN.
- Les périmètres des îlots de sénescence où la ressource forestière est immobilisée.
- Le périmètre de la future réserve biologique d'Aiguines
- Le site du Grand Canyon, où un avenant est en cours de validation pour que l'enjeu soit inscrit au DOCOB.
- Le site des Gorges de Trevans qui accueille une RBI.

⁴ Il sera possible lors d'une mise à jour d'intégrer les données issues des autres PNR et PN de la zone d'approvisionnement. Cependant, la majeure partie des zonations réglementaires sont déjà intégrées dans cette étude.

- L'emplacement des zones humides : dans le SAGE Verdon, toutes les zones humides sont protégées, y compris celles se trouvant en milieu forestier. (Exclusion pour difficulté d'exploitation et protection des sites de Saint-Maurin, Marais de la Palud, Marais de Puimoisson ; Marais de Peroules, Plan d'Anelle).

- PNR Luberon : Milieux exceptionnels de la charte du parc qui concernent des forêts.

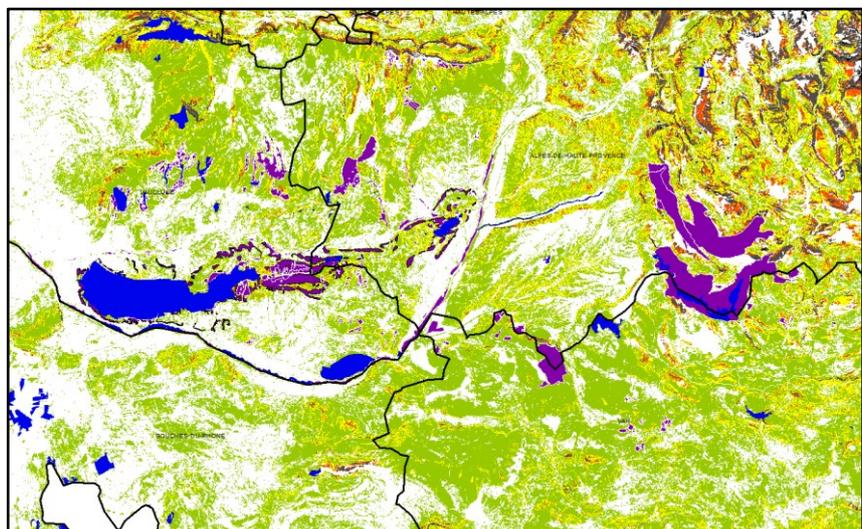
- Réservoirs de biodiversité de la trame de vieux bois.
- Analyse paysagère du massif du Luberon indiqué « très sensible ».
- Gestion en forêt publique : analyse des aménagements forestiers en cours de validité à la date de 2016.

A titre d'illustration sur le territoire du PNR près de 16 000 ha (soit 50% des forêts publiques) sont « hors exploitation » pour des motifs qui ne relèvent pas de la maturation de jeunes peuplements, mais bien d'enjeux écologiques ou paysagers ou pour des motifs, souvent combinés, de trop faible productivité et d'inaccessibilité (figure 9).

Gestion en forêt publique	Surface (ha)
Evolution naturelle	931
Evolution naturelle des peuplements	3597
Hors sylviculture	564
Ilot de sénescence	159
Ilot de vieillissement	431
Pas d'intervention pendant l'aménagement (hors jeunes peuplements)	4717
Réserve biologique intégrale	924
Réserve biologique intégrale en projet	106
Zone d'intérêt écologique	4757

Table 5 : Gestion en forêt publique PNR Luberon « hors sylviculture ».

Figure 9 : Carte des espaces à enjeux de conservation et de paysage au sein des PNR du Verdon et du Luberon. Le fond correspond au code renseigné pour les critères d'exploitabilités physique ; les zones en bleu correspondent aux protections « Modalité 1 » et les zones en violet aux demandes des PNR (inclus ensuite en modalité 1).



C. Types de forêts

Afin de caractériser les types de peuplement et de distinguer les débouchés, nous avons pris en compte une répartition des peuplements forestiers selon la nature des essences dominantes et co-dominantes (figure 10). La source de données utilisée a été la cartographie forestière de l'IGN V2. Sur cette base, nous avons séparé les peuplements de feuillus, conifères, mixtes et indéterminés (fig.10). Cette dernière catégorie comprend les peuplements « non discriminés » et regroupe les forêts qualifiées dans la BD forêts IGN en tant que « jeunes plantations, jeunes peuplements, coupes... » (CODE TYPE : FF0) ; « Reboisement » (CODE TYPE : FF0-02) ; « Forêt ouverte sans couvert arboré ; forêt ouverte incident » : (CODE TYPE : FO0). Cette dernière catégorie est très minoritaire et ne concerne que quelques pourcents de la surface forestière.

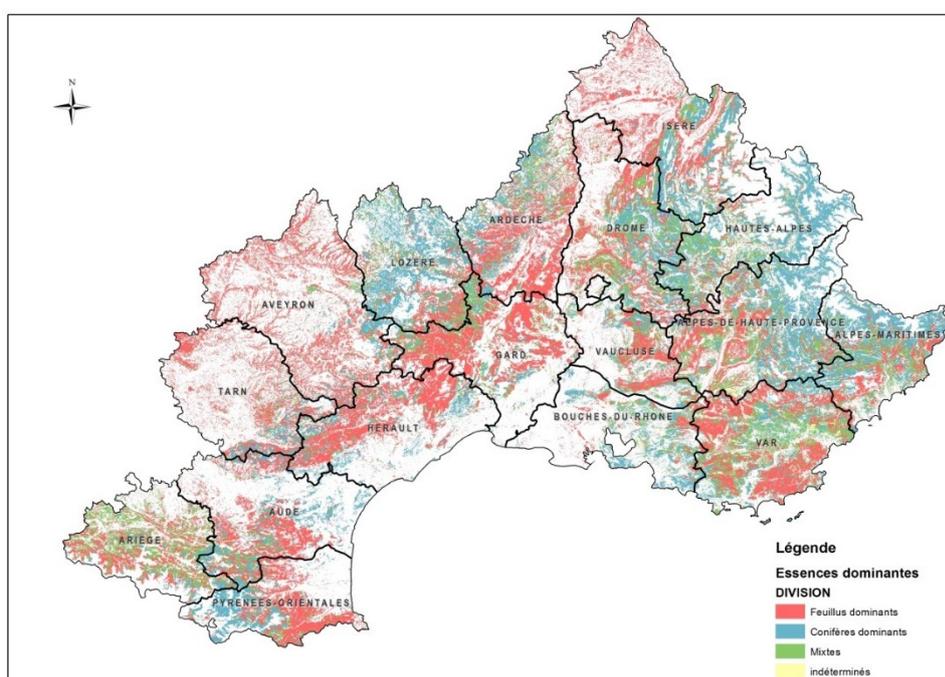


Figure 10 : Carte de la répartition des différents types forestiers dominants (Données issues de la BD forêt IGN).

D. Nature de la propriété foncière

Nous avons également constitué une couche de données qui renseigne les zones appartenant au domaine public, telles que les forêts domaniales, forêts communales et autres espaces publics. Cette couche nous a été fournie par le bureau d'étude Terra Silva. Les forêts non publiques ont été considérées comme privées (Fig. 11). A cette étape, nous n'avons pas réalisé une analyse foncière poussée et notamment une analyse de la taille et du morcellement de la propriété privée.

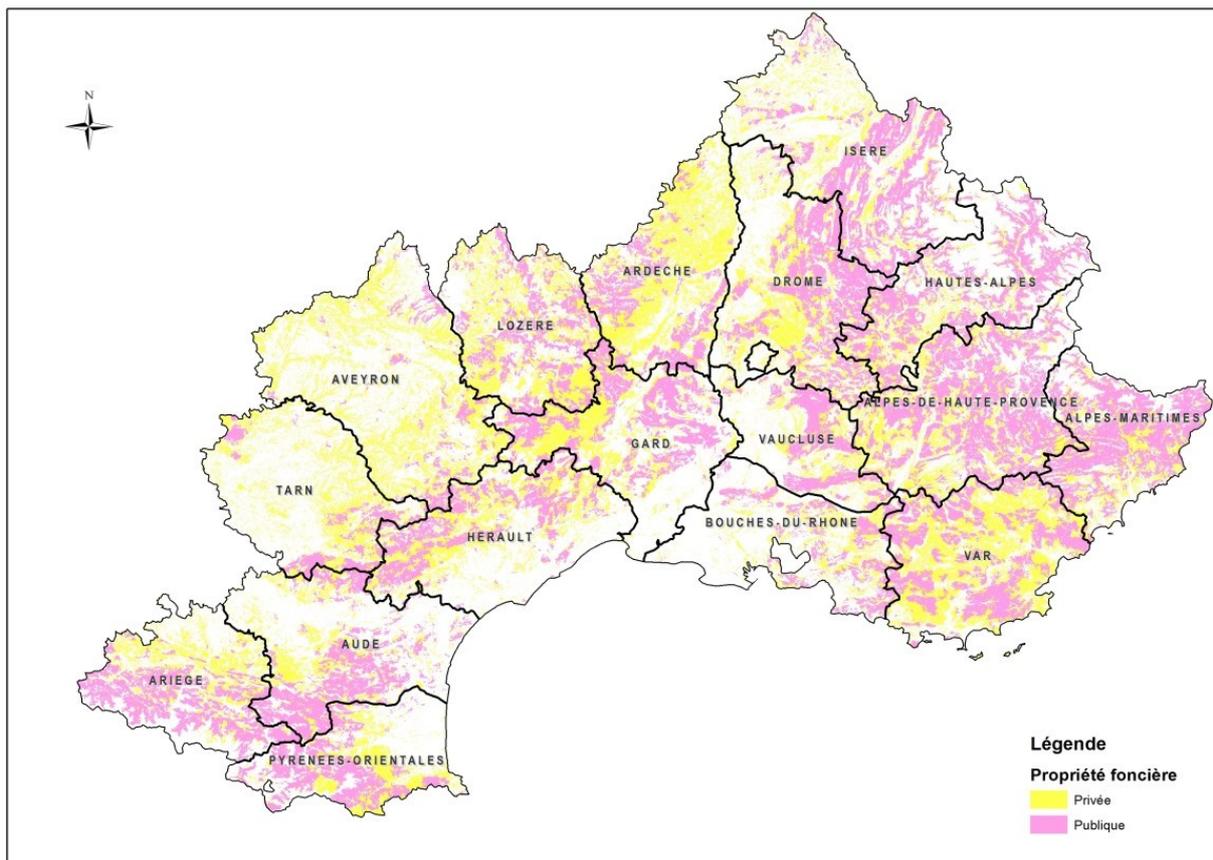
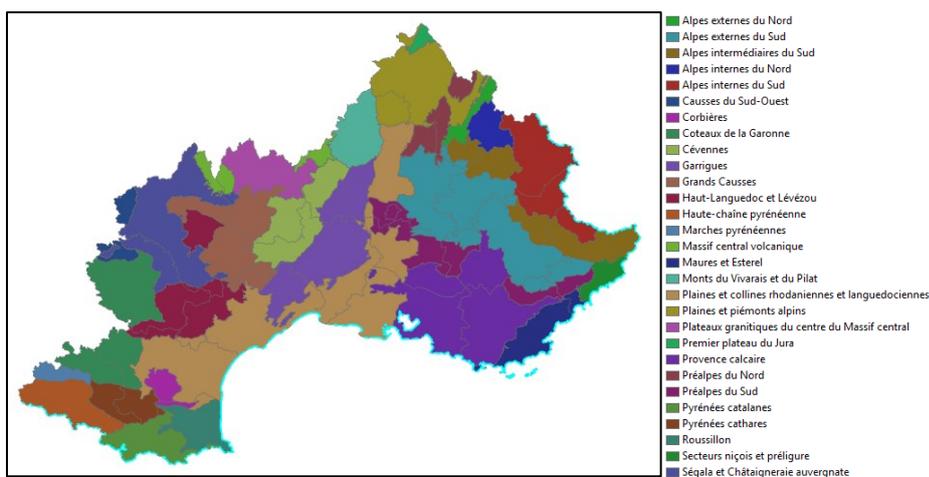


Figure 11 : Carte de la répartition des forêts selon leurs propriétaires.

E. Départements et sylvoécotégions

La couche des sylvoécotégions (SER) a été recroisée avec la couche des départements (figure 12). Des entités résiduelles représentant environ 0.06% de la surface totale (en jaune dans la légende de la carte ci-dessous) sont supprimées. Ces entités résiduelles sont dues à une différence d'échelle et de précision des couches de polygones.



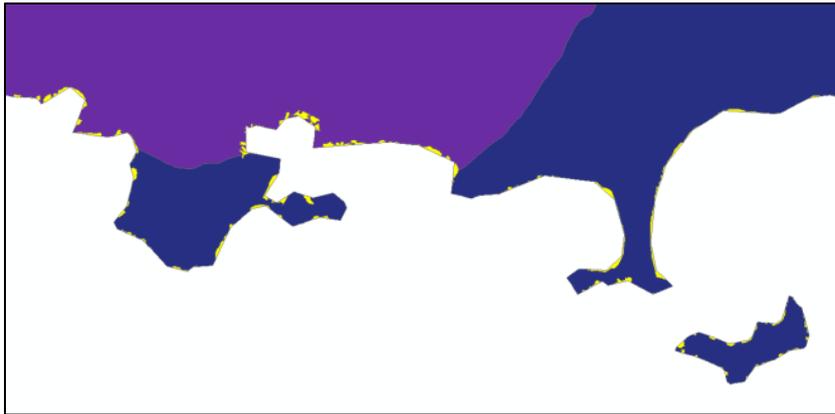


Figure 12 : Carte des sylvoécorigions et exemple d'entités résiduelles (en jaune), sur les bordures du littoral et les bordures des départements

Les entités résiduelles correspondent aux entités n'ayant pas de code de sylvoécorigion défini "codeser" = '-1' ou "codeser" = ' '. Elles sont localisées aux zones frontalières avec l'Italie, l'Espagne et la mer méditerranée et correspondent à 0,06 % de la surface totale (Annexe 2).

8. Spatialisation des données forestières

A. Zonage des forêts

La définition des entités forestières est issue de la BD forêt (figure 13). Pour cette étude nous n'avons pris en compte que la partie forêt de production. Pour cela, on exclut des forêts toutes les peupleraies, landes, grandes landes, pelouses pastorales, pelouses alpines, grandes formations pastorales, garrigues ou maquis non boisés et friches.

La compilation des données se fera lors de l'étape finale à une maille de 1ha, soit 100x100 mètres. Pour éviter une surestimation des surfaces forestières, les entités résiduelles isolées d'une surface inférieure à 1ha sont supprimées du zonage forestier. Cela correspond à moins de 0,4% de la surface totale.

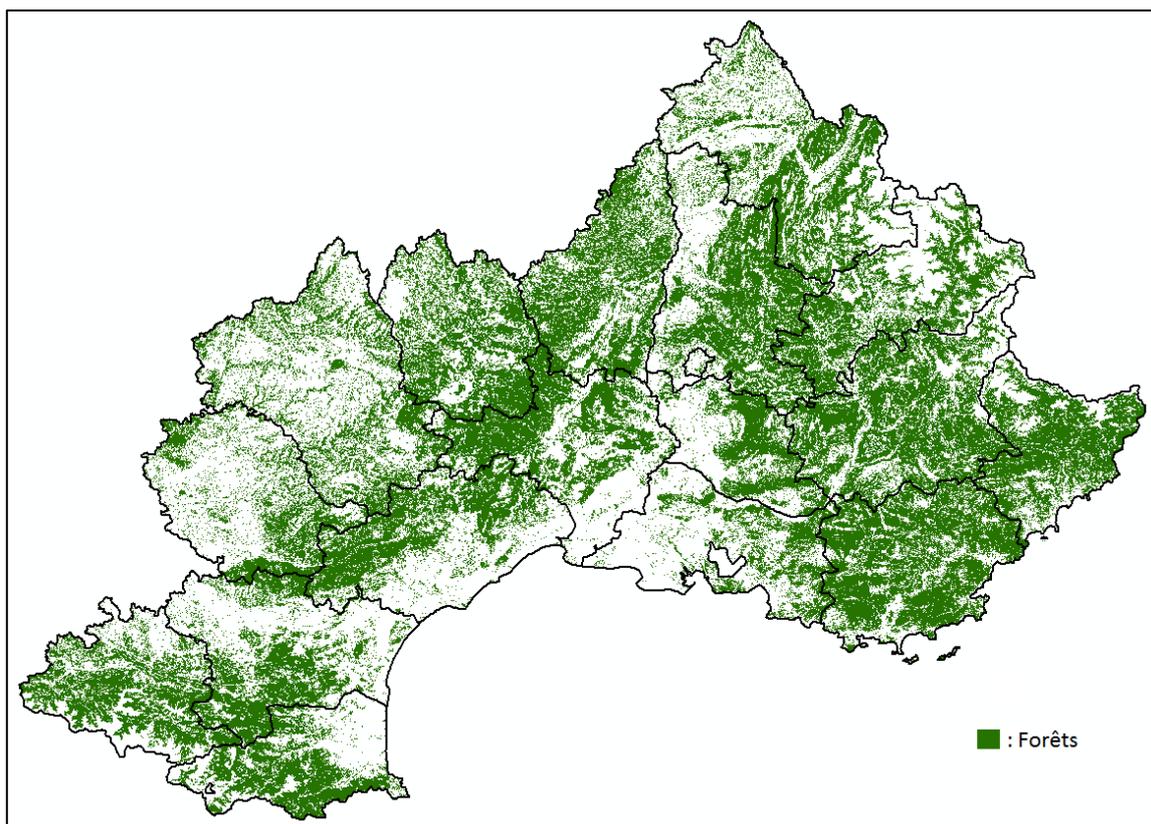


Figure 13 : Carte des surfaces forestières prises en compte dans le zonage forestier

B. Modélisation SIG des phytovolumes, volumes bois fort et biomasse

La modélisation des ressources en bois a été réalisée selon un protocole de combinaison de données d'inventaires issu de l'inventaire forestier national (IGN) et de sources de données prédictives multiples. Des travaux de recherche antérieurs ont montré que des données d'imagerie satellite combinées à des données topographiques et climatiques peuvent servir en corrélation avec des données d'inventaires à modéliser de façon satisfaisante la disponibilité en biovolumes et biomasses forestières. Ainsi en Californie, en bioclimat méditerranéen (Baccini et al., 2004) ont proposé une modélisation de la biomasse forestière en couplant les inventaires du service des forêts des États-Unis avec des données issues du capteur satellitaire MODIS et de données climatiques. En Espagne dans la région de Léon, (Fernández-Manso et al., 2014) ont couplé des données d'inventaire avec des images du satellite ASTER. En Finlande, (Tomppo et al., 2008) ont proposé une étude détaillée des méthodes de couplage entre les inventaires forestiers et des données cartographiques prédictives.

Nous avons basé notre étude sur ces travaux et bien d'autres pour asseoir la méthodologie à suivre.

Notre choix s'est porté sur une liste de données prédictives pertinentes et aisément accessibles :

- Le capteur satellitaire MODIS pour produire un indice de végétation. Le NDVI (normalized differential vegetation index) proportionnel à la production végétale. Nous avons utilisé une série annuelle de 18 images pour calculer le NDVI maximum sur chacun des pixels de l'image et ainsi ne pas être sensible à des décalages phénologiques au sein de la zone d'étude.

- Le modèle numérique de terrain de l'IGN qui nous a permis de réaliser une couche d'altitude, une carte des pentes et un indice de radiation solaire (TRASP – Topographic Solar Radiation Index).
- Des données climatiques, la précipitation annuelle moyenne et la température minimale qui sont des données climatiques importantes pour la végétation.
- Des données de végétation :
 - o la cartographie du pourcentage de couvert forestier de l'Université du Maryland⁵ qui fournit une carte du pourcentage de couvert forestier à 30 m de résolution par période de 3 ans à compter de 2001. La carte de 2010 a été utilisée pour l'étude.
 - o Hauteur des arbres : couches dérivées des données du GLAS de 2005 (satellite LIDAR NASA)⁶. Cette couche de données à 1km a été améliorée par régression avec les données de hauteur d'arbres issues des inventaires de l'IFN et krigeage des résidus pour produire une couche de hauteur d'arbre.

Les données relatives aux biovolumes totaux, volumes de bois fort et biomasses totales et de bois fort ont été transformées en log avant régression. Les données relatives aux SBO et BIE sont basées sur une modélisation du taux de SBO par rapport au Volume et à la Biomasse totale, puis converties en évaluation de SBO et BIE.

Les modèles régressifs sont en annexe 3.

Une série de cartes illustrent les modélisations de la ressource forestière sur le bassin d'approvisionnement (figures 14-18).

⁵ Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. 2013. "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." *Science* 342 (15 November): 850–53. Data available from: earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest.

⁶ https://webmap.ornl.gov/ogc/dataset.jsp?ds_id=10023

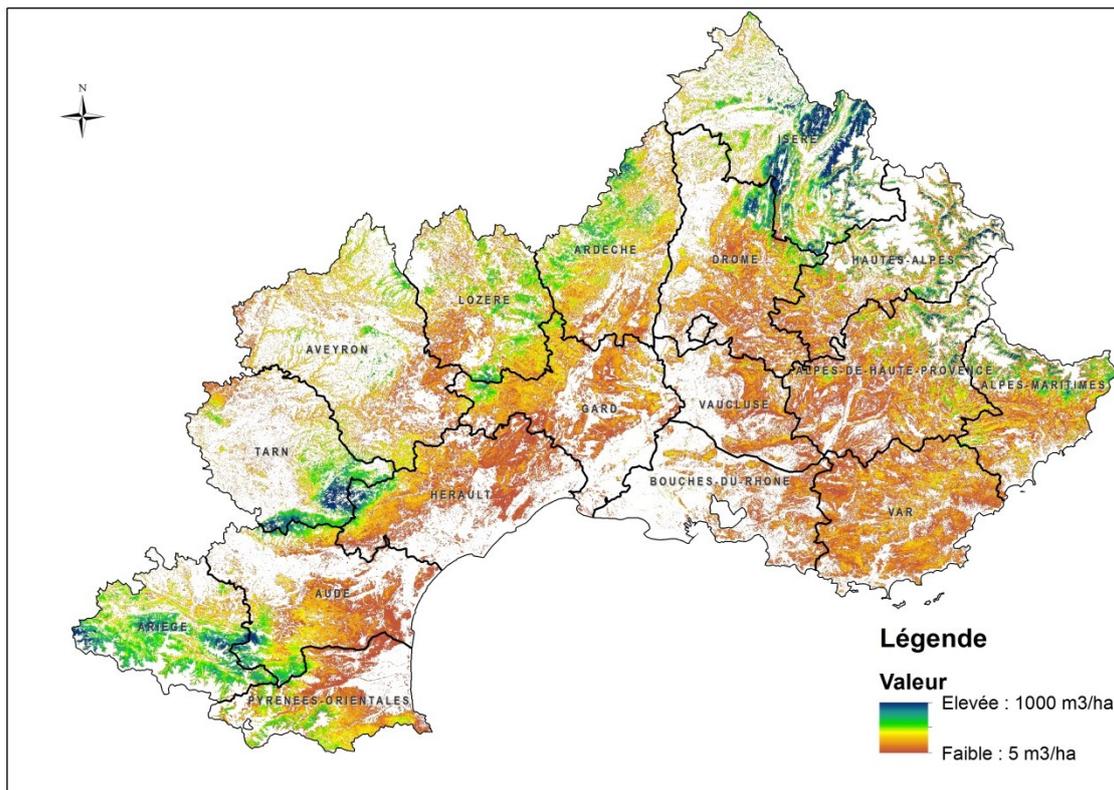


Figure 14 : Carte de répartition du volume total des forêts sur le bassin d’approvisionnement.

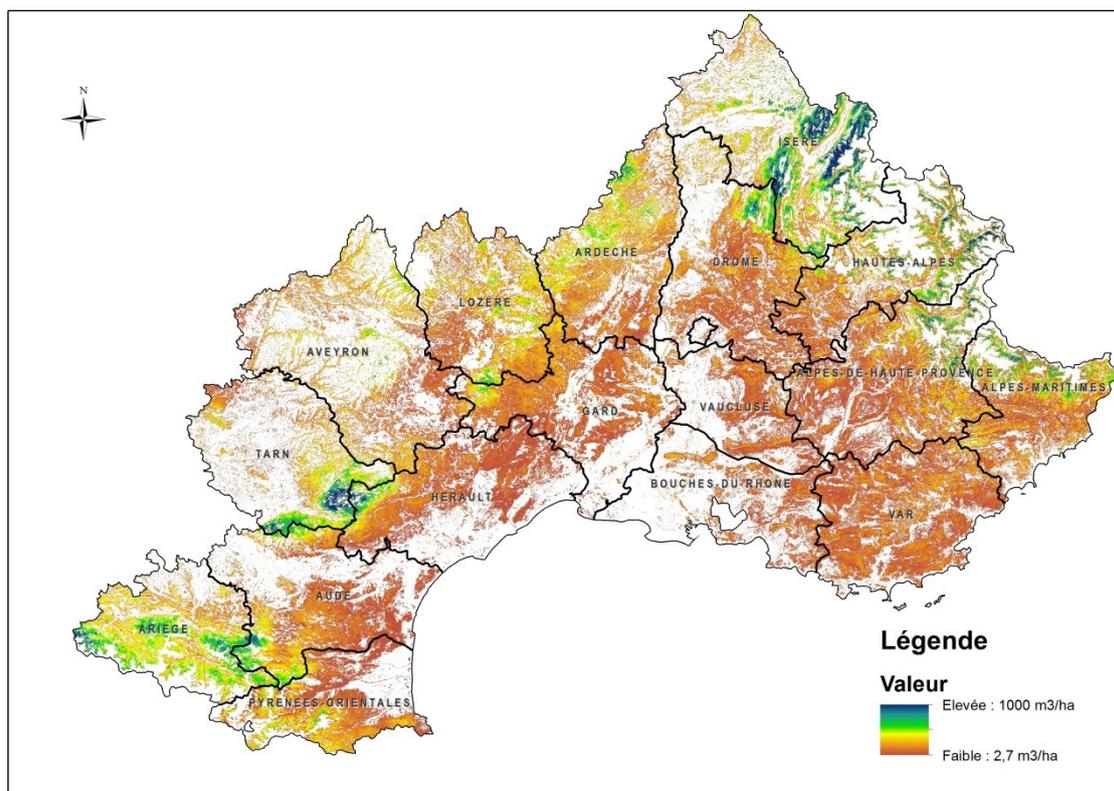


Figure 15 : Carte de répartition du volume de bois fort des forêts sur le bassin d’approvisionnement.

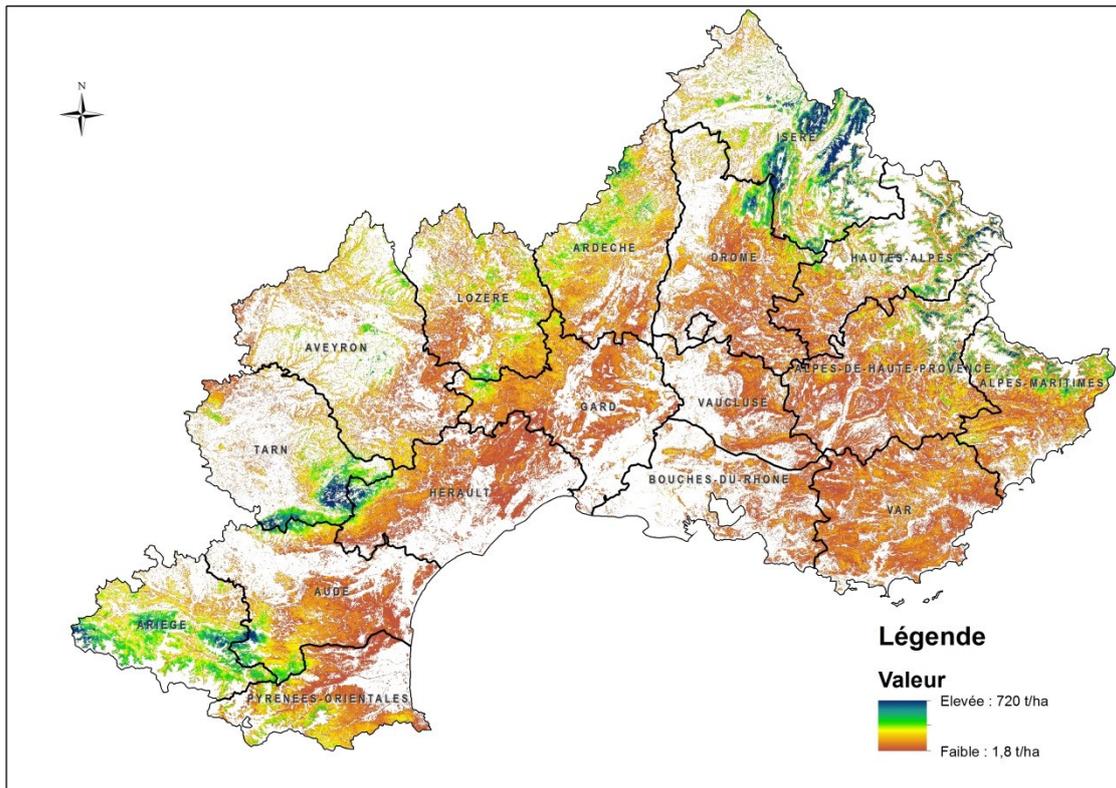


Figure 16 : Carte de répartition de la biomasse de bois fort des forêts sur le bassin d’approvisionnement.

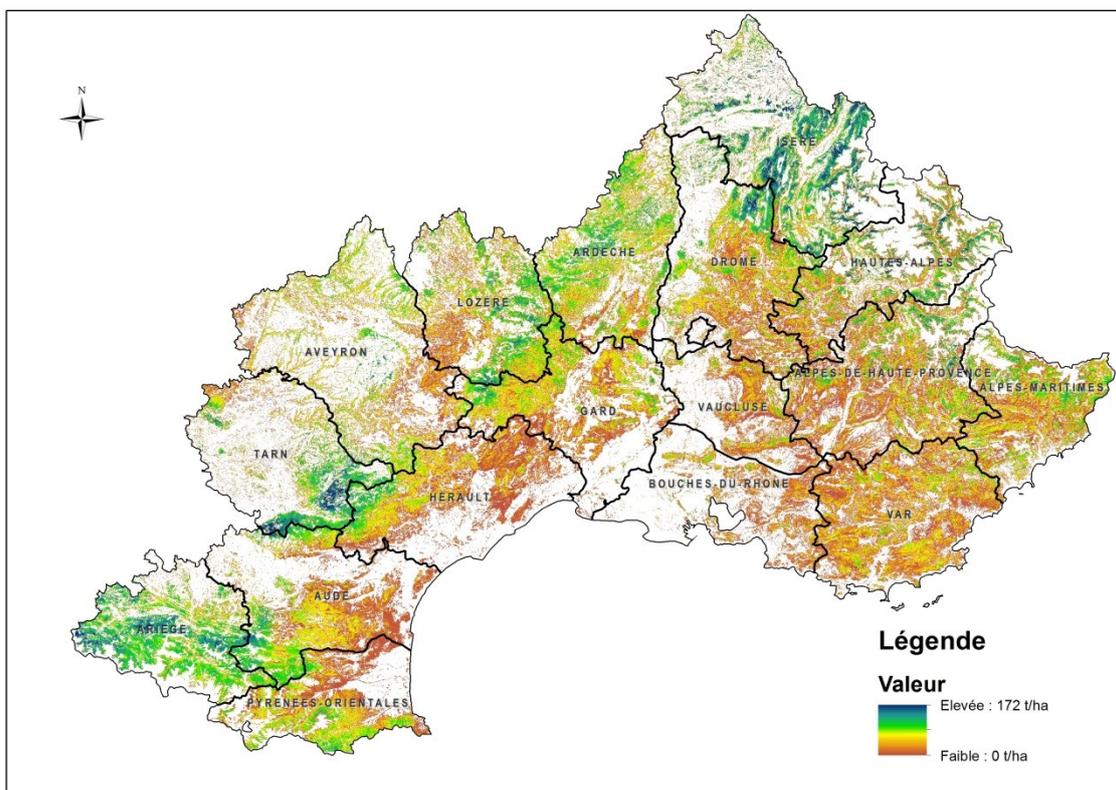


Figure 17 : Carte de répartition de la biomasse de bois fort, qualité bois d’industrie et énergie, des forêts sur le bassin d’approvisionnement.

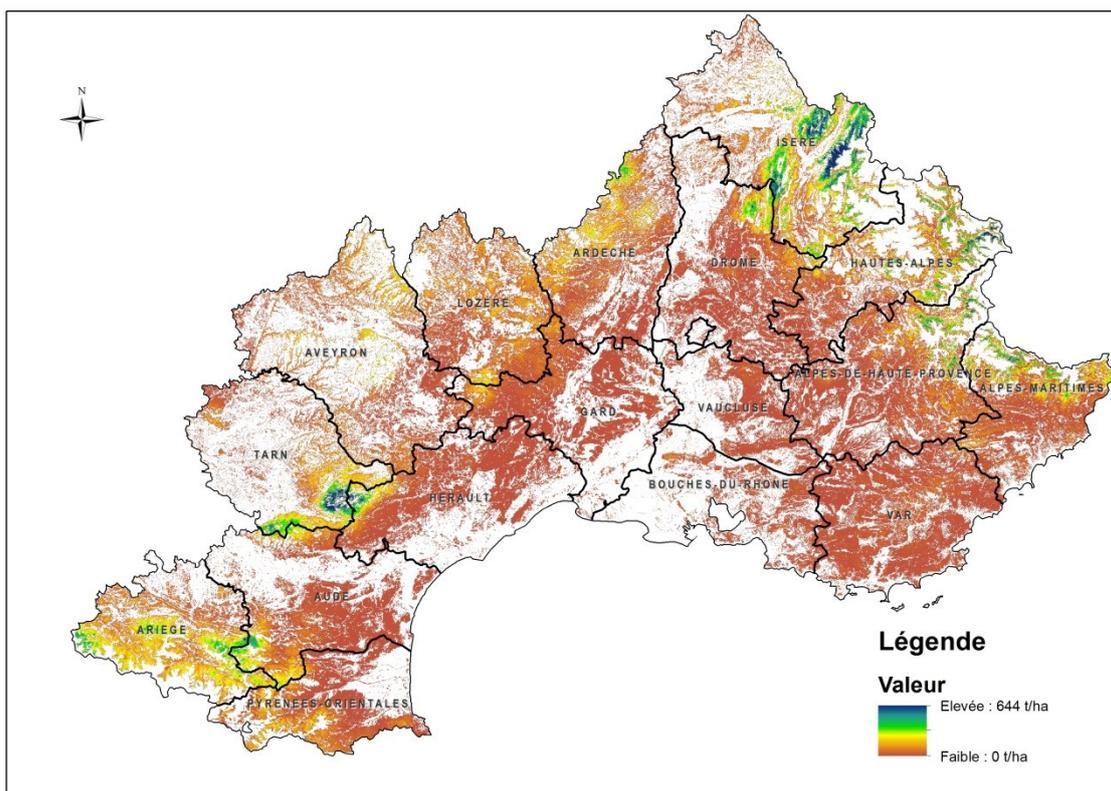


Figure 18 : Carte de répartition de la biomasse de bois fort, qualité bois d’œuvre, des forêts sur le bassin d’approvisionnement.

9. Extraction des valeurs en fonction des différents filtres

Sur l’ensemble du bassin d’approvisionnement la surface forestière globale est de l’ordre de 4,7 millions d’hectares, dont 49% sont en situation d’exploitation facile (E1), 29,7% modérée (E2) et 6% en situation difficile (E3). Les 13% restant sont en situation d’exploitation très difficile et non exploitable (figure 19). Ces zones ne seront pas considérées dans le reste de l’étude.

Le volume total de bois est estimé à 591,9 millions de m³ sur les 17 départements concernés.

Le volume de bois exploitable est de 464,3 millions de m³.

Cette évaluation est proche de l’évaluation réalisée dans l’étude IGN/ADEME conduite en 2017 pour la région PACA. Les auteurs de l’étude avaient trouvé un volume total de bois de 117 millions de m³ pour cette seule région pour une surface de forêt de production de 1 362 milliers d’hectares. Nos résultats indiquent un volume total de l’ordre de 150 millions de m³, pour une surface forestière de 1 694 milliers d’hectares. **Ce qui correspond à un stock moyen de 88 m³/ha dans cette étude et de 86 m³/ha dans celle de l’IGN/ADEME.** Les variations de surface forestière proviennent vraisemblablement de variations dans les sources, les dates considérées et la nature des forêts incluses.

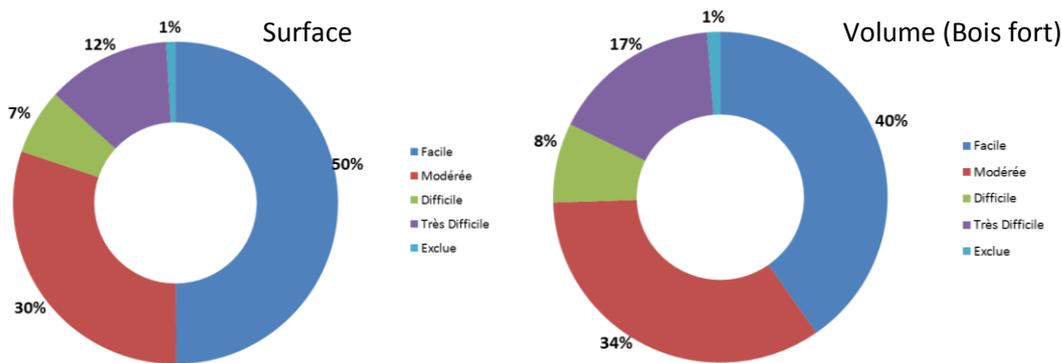


Figure 19 : répartition de la ressource par catégorie d'exploitabilité physique selon la typologie définie pour le bassin d'approvisionnement.

Etat de la ressource selon l'exploitabilité physique.

La répartition des volumes de bois selon l'exploitabilité physique est proche de celle des surfaces, avec cependant seulement 40% en situation facile et 32% en situation modérée. 18% de la ressource est située dans des conditions d'exploitabilité jugées très difficiles, voire impossibles (table 4).

Table 4 : Répartition des ressources en bois selon les classes d'exploitabilité physique (les surfaces en modalité 1 des enjeux de protection sont exclues)

Classes d'exploitabilité	Volume Total Mm3	Volume Bois Fort Mm3	Biomasse Totale Mt	Biomasse BF Mt	Biomasse SBO BF Mt	Biomasse BIE BF Mt
Facile	231,03	147,80	163,68	112,24	47,26	64,98
Modérée	191,13	126,58	134,63	95,32	45,07	50,26
Difficile	42,17	29,25	30,33	21,76	10,85	10,90
Très difficile	88,85	64,01	63,84	47,19	25,46	21,73
Non exploitable	6,49	5,02	4,75	3,63	2,12	1,51

Etat de la ressource selon les modalités réglementaires de protection des enjeux environnementaux (table 5)

65% de la ressource est réparti sur des territoires n'ayant pas de régulation spécifique de l'exploitation forestière (ce qui n'exclut pas l'existence de plans de gestion forestière).

5% de la ressource est en modalité 1 et sont donc exclus de l'exploitation et non considérés dans cette étude.

21% en modalité 2 et sont donc soumis à certaines contraintes et restrictions en ce qui concerne les surfaces, volumes et méthodes d'exploitation. Il est probable que sur les territoires concernés par cette modalité, de 10 à 20% de la ressource excluent une exploitation forestière.

8% de la ressource sont en modalité 3 et ne sont pas soumis à contraintes en ce qui concerne l'exploitation forestière.

Table 5 : Répartition des ressources en bois selon les modalités d'enjeux environnementaux (les classes d'exploitabilité physique « Très difficile et non exploitable » ne sont pas considérées)

Protection	Volume Total Mm3	Volume Bois Fort Mm3	Biomasse Totale Mt	Biomasse BF Mt	Biomasse SBO BF Mt	Biomasse BIE BF Mt
Hors modalité	319,11	210,00	224,68	158,21	71,53	86,68
modalité 1	23,48	15,77	16,79	11,56	5,32	6,24
modalité 2	104,60	67,66	75,48	51,23	22,79	28,44
modalité 3	40,63	25,98	28,48	19,88	8,87	11,01

Etat de la ressource selon les types de forêt.

Les forêts dominées par les feuillus (chênes, hêtres, etc.) représentent la majorité de la ressource disponible avec 128,30 Mm³ de bois fort et une biomasse de 98,15 Mt, tandis que les forêts de conifères (Pin, Sapin, Epicéa, etc) ont un volume de 107,9 Mm³ de bois fort et une biomasse de 80,2 Mt. Cependant ces derniers fournissent une part plus importante de bois de qualité bois d'œuvre près de 43 Mt contre 37 Mt pour les feuillus. La table ci-dessous résume ces valeurs (table 6).

Table 6 : Répartition des ressources en bois disponibles selon le type de forêt

Type Forêt	Volume Total Mm3	Volume Bois Fort Mm3	Biomasse Totale Mt	Biomasse BF Mt	Biomasse SBO BF Mt	Biomasse BIE BF Mt
Feuillus	207,89	128,30	146,03	98,15	37,39	60,76
Conifères	151,89	107,94	109,20	80,18	42,73	37,44
Mixtes	102,02	65,69	71,51	49,69	22,49	27,19
Indéterminé	2,53	1,71	1,90	1,31	0,57	0,74

On peut voir que la majorité de la ressource se trouve en forêt privée, par exemple pour le volume bois fort total, 211 Mm³ contre 92 Mm³ pour les forêts publiques (table 7).

Table 7 : Répartition des ressources en bois disponibles selon la nature de la propriété foncière

Type Propriété	Volume Total Mm3	Volume Bois Fort Mm3	Biomasse Totale Mt	Biomasse BF Mt	Biomasse SBO BF Mt	Biomasse BIE BF Mt
Privée	333,78	211,18	233,68	160,76	67,71	93,06
Publique	130,55	92,46	94,96	68,56	35,48	33,08

Etat de la ressource par département

La quantité de ressource disponible est très variable entre les 17 départements du bassin d'approvisionnement (Table 8) et est fonction des surfaces forestières, mais également de la qualité et de la productivité des forêts. Les volumes de bois fort disponibles (pour rappel : exploitables techniquement et hors modalité 1 de protection de l'environnement) vont de 43,45 Mm³ pour l'Isère à 6,14 Mm³ pour le Vaucluse.

Ainsi les départements à climat fortement méditerranéen, par exemple les Alpes Maritimes, les Bouches-du-Rhône, l'Hérault, le Gard et le Vaucluse ont des volumes de bois et des biomasses disponibles beaucoup moins importants que les départements à climat plus montagnard (Isère,

Ariège, Ardèche). Le Var bien que méditerranéen dispose d'un niveau important de ressource de par sa très forte couverture forestière. Les quatre départements les plus boisés étant les Alpes-de-Haute-Provence (410 milliers d'Ha), le Var (408 milliers d'Ha), l'Ardèche (321 milliers d'Ha) et l'Aveyron (303 milliers d'Ha). Les deux départements les moins boisés étant les Bouches-du-Rhône (137 milliers d'Ha) et le Vaucluse (119 milliers d'Ha).

On voit donc que certains départements comme les Bouches-du-Rhône et le Vaucluse combinent de relativement faibles couvertures forestières et une productivité plus réduite (Table 8). Cet effet de la productivité biologique va avoir une influence sur le taux de prélèvement de la ressource.

Table 8 : Répartition des ressources en bois disponible par département

Dep	Volume Total Mm3	Volume Bois Fort Mm3	Biomasse Totale Mt	Biomasse BF Mt	Biomasse SBO BF Mt	Biomasse BIE BF Mt
04	28,10	18,34	19,61	13,78	5,91	7,87
05	24,21	17,14	16,44	12,61	6,71	5,90
06	16,42	11,05	11,95	8,36	4,18	4,18
07	43,45	27,45	30,04	20,63	8,92	11,71
09	41,75	28,49	29,91	21,45	10,84	10,61
11	30,13	19,36	21,98	14,83	6,95	7,88
12	30,15	17,84	20,35	14,14	5,89	8,24
13	7,16	4,30	5,36	3,40	1,16	2,24
26	29,43	18,37	20,33	13,66	4,86	8,80
30	21,30	12,43	15,64	9,64	2,66	6,97
34	21,82	13,57	16,26	10,53	4,11	6,42
38	57,92	43,25	39,15	31,17	17,05	14,12
48	28,10	17,99	19,70	13,59	6,01	7,58
66	17,11	10,87	12,62	8,17	3,59	4,58
81	34,80	24,08	24,76	18,59	9,71	8,88
83	26,35	15,64	20,19	12,10	3,89	8,21
84	6,14	3,47	4,35	2,67	0,74	1,94
TOTAL	464,33	303,64	328,64	229,32	103,19	126,14

Analyse de la ressource disponible et de l'usage (enquête annuelle de branche)

Le rapport IGN/ADEME de 2017 a rappelé les évolutions récentes des forêts dans la région PACA avec en 30 ans une augmentation de 26% des surfaces forestières et de 56% du stock de bois sur pied (Cuny et Colin, 2017). Ce constat à l'échelle nationale est valide pour l'ensemble du bassin d'approvisionnement. Ces accroissements résultent d'une dynamique de déprise agricole et pastorale, couplée à une sous gestion d'une grande partie des forêts et en particulier des forêts privées (Roche, 2009). L'effet positif de l'augmentation du CO₂ et des températures a également légèrement dopé la productivité de manière transitoire. (Rathgeber et al., 1999 ; Roche, 1994).

Dans cette étude, nous n'avons pas réalisé de suivi temporel *a posteriori* de l'évolution de la ressource sur le bassin. Il est également difficile de prévoir si le rythme d'extension des surfaces forestières et d'accumulation de biomasse va se poursuivre au même rythme. Il est probable que la vitesse d'accroissement des surfaces forestières se réduise dans un futur proche, tandis que les effets négatifs du changement climatique pourraient impacter les territoires les plus méditerranéens et montagnards. Dans le cas de cette étude et sur la période 2017-2035, nous avons préféré

considérer, à titre conservatoire, les surfaces forestières comme constantes. D'autant que les jeunes peuplements en expansion ne seront pas encore en état d'être exploités dans 18 ans.

A. La ressource disponible

L'estimation de la ressource disponible se base sur la fraction du stock sur pied qui peut être récoltée de manière préférable sans dégrader le stock. Une approche est de considérer l'accroissement biologique des peuplements et de ne récolter qu'au maximum 100% de cet accroissement en volume. Le taux de récolte par rapport à l'accroissement biologique est appelé le Taux de prélèvement.

Par ailleurs, il convient de considérer la dimension spatiale de l'exploitation forestière, en ce sens qu'il n'est possible de récolter chaque année qu'une fraction de la surface disponible afin de garantir la disponibilité de nouvelles surfaces chaque année, et que le temps retour sur les parcelles initialement exploitées ait laissé le temps au peuplement de se régénérer. Ainsi si chaque année 1% des surfaces sont exploitées, il faudra 100 ans pour revenir sur la parcelle initiale (dans l'hypothèse d'une récolte à 100% de la biomasse). Dans la réalité, selon les peuplements et les essences forestières, les temps de retour et d'interventions varient généralement entre 30-40 ans (taillis de chênes) et 70 à 90 ans pour des peuplements de conifères (sapin, épicéa). Il est à noter que sur les futaies plusieurs interventions se succèdent généralement avec des coupes d'éclaircies tous les 20 ans par exemple et des coupes de régénération tous les 100 ans par exemple.

Nous avons fait l'hypothèse que sur l'ensemble de la zone, le temps minimum de rotation serait de 40 ans. Ce qui fait qu'il est souhaitable au maximum d'exploiter 2,5% de la surface dans une hypothèse d'une récolte de la totalité de la ressource. Le taux souhaitable serait certainement de l'ordre de 2% avec une pression de récolte de 70 à 80% du stock sur pied sur les peuplements exploités.

Si l'on considère 10% de pertes techniques lors de la récolte. Il est alors possible d'estimer la ressource disponible annuellement selon l'équation :

*Ressource disponible = (0.025*surface exploitable*Volume BF*pression de récolte)-10% de perte technique*

Avec pression de récolte = 80%

Ce calcul nous permet d'obtenir un volume de bois fort disponible de **5,47 Mm³/an** ce qui correspond à environ **4,1 Mt/an**.

Dans l'étude IGN/ADEME, la ressource disponible était exprimée en fonction de la surface gérée et du taux moyen de prélèvement, en suivant les hypothèses de ce rapport avec une surface de 8% et un taux de prélèvement de 31%, nous avons abouti à un volume de bois fort disponible de **6,56 Mm³/an**, soit **4.9 Mt/an**.

Nous pouvons voir dans la table 9 que la ressource disponible est très variable selon les départements avec une variation entre 0,06 Mm³/an pour le Vaucluse à 0.78 Mm³ pour l'Isère, avec une moyenne de 0,32 Mm³ par département.

Table 9 : Estimation de la ressource disponible par département

Départements	Surface Forêt hors modalité 1 (ha)	Surface Forêt exploitable (ha)	V BF Brut (Mm3)	V BF Brut Exploit Exploitable (Mm3)	V BF Dispo technique (Mm3/an) Hypothèses Irstea	V BF Dispo technique (Mm3/an) Hypothèses IGN
04 - Alpes-de-Haute-Provence	414206	410187	25,0	18,3	0,33	0,40
05 - Hautes-Alpes	254788	249516	25,2	17,1	0,31	0,37
06 - Alpes-Maritimes	250159	242748	20,1	11,0	0,20	0,24
07 - Ardèche	321021	320912	29,2	27,5	0,49	0,59
09 – Ariège	242169	237659	40,5	28,5	0,51	0,62
11 - Aude	244898	244200	21,4	19,4	0,35	0,42
12 – Aveyron	303191	302826	19,5	17,8	0,32	0,39
13 - Bouches-du-Rhône	137423	137345	4,4	4,3	0,08	0,09
26 - Drôme	339801	336852	22,5	18,4	0,33	0,40
30 - Gard	269664	269545	13,2	12,4	0,22	0,27
34 - Hérault	272255	271877	14,4	13,6	0,24	0,29
38 – Isère	293614	285408	59,9	43,2	0,78	0,93
48 - Lozère	239767	239416	18,8	18,0	0,32	0,39
66 - Pyrénées-Orientales	181717	180513	14,0	10,9	0,20	0,23
81 – Tarn	188262	188223	24,8	24,1	0,43	0,52
83 - Var	407946	407642	16,0	15,6	0,28	0,34
84 - Vaucluse	119095	119014	3,6	3,5	0,06	0,08
Total/moyenne	4479976	4443883	372,67	303,64	5,47	6,56

Afin d'évaluer l'usage réel de la ressource, nous avons utilisé les données de l'enquête annuelle de branche de novembre 2017 par département qui permet d'approcher les volumes de bois fort tige récoltés et commercialisés. Il faut noter que ces valeurs sont une sous-estimation de la quantité récoltée car reposant sur une base déclarative, ne prenant pas en compte les récoltes réalisées par les propriétaires pour leur propre consommation et concernant en partie des volumes de bois rond.

L'enquête annuelle sur la branche d'activité Exploitation forestière (EAB) permet d'observer les volumes de bois récoltés par essence et par destination (bois d'œuvre, de bois d'industrie et de bois énergie). Ces données proviennent du site Agreste du Ministère de l'Agriculture.

L'EAB indique que **le volume de bois récolté sur le bassin d'approvisionnement est de 3,78 Mm³ en 2016** (table 10). Ce qui peut être comparé aux 5,47 Mm³/an que nous avons estimé disponibles. Il resterait en première approximation **entre 1.69 Mm³/an (Irstea) et 2.78 Mm³/an (IGN)** de ressources en bois mobilisables par an sur le bassin d'approvisionnement.

La prise en compte de l'EAB nous permet d'estimer le taux de prélèvement par rapport à la production biologique minorée de la mortalité annuelle (table 10). Selon les données de l'IGN **le taux de prélèvement moyen serait de 26% sur la zone d'étude**. Ce taux variant entre 10% pour les Pyrénées Orientales et 106% pour le Tarn. Le taux du Tarn doit être considéré au regard de dépérissements importants (taux de mortalité de 50%) qui ont conduit à mobiliser beaucoup de ressources au regard de la productivité biologique.

Table 10 : Tableau de synthèse de la production biologique, de la ressource disponible, de la ressource utilisée et des taux de prélèvement (données IGN et Irstea).

Départements	KITS IGN						IRSTEA						
	Production biologique Mm3/an	Mortalité Mm3/an	Taux de mortalité	EAB Mm3/an	Taux de prélèvement	Surface Forêt exploitable (ha)	V BF Brut Exploitable (Mm3)	V BF Dispo technique (Mm3/an) Hypothèses Irstea	Production biologique V BF tot m3/ha/an	Production biologique Exploitable Mm3/an	Taux de stock récolté /an (EAB majoré / V BF Brut)	% de Surface à exploiter pour EAB majoré	Disponibilité Complémentaire = V BF Dispo tech - EAB majoré Mm3
04 - Alpes-de-Haute-Provence	0,8	0,2	25%	0,26	43%	410187	18,3	0,33	1,89	0,78	1,57%	1,96%	0,071
05 - Hautes-Alpes	0,6	0,2	33%	0,13	34%	249516	17,1	0,31	2,33	0,58	0,88%	1,09%	0,174
06 - Alpes-Maritimes	0,4	0,2	50%	0,07	36%	242748	11,0	0,20	2,66	0,64	0,73%	0,91%	0,127
07 - Ardèche	1,5	0,3	20%	0,26	22%	320912	27,5	0,49	2,37	0,76	1,05%	1,32%	0,234
09 - Ariège	1,1	0,3	27%	0,21	26%	237659	28,5	0,51	2,88	0,68	0,82%	1,03%	0,302
11 - Aude	0,9	0,1	11%	0,23	29%	244200	19,4	0,35	2,29	0,56	1,32%	1,65%	0,119
12 - Aveyron	1,1	0,3	27%	0,25	32%	302826	17,8	0,32	2,61	0,79	1,58%	1,98%	0,067
13 - Bouches-du-Rhône	0,2	0,04	20%	0,09	56%	137345	4,3	0,08	2,05	0,28	2,31%	2,89%	0,000
26 - Drôme	0,9	0,2	22%	0,18	26%	336852	18,4	0,33	1,73	0,58	1,10%	1,38%	0,148
30 - Gard	0,7	0,2	29%	0,11	22%	269545	12,4	0,22	1,55	0,42	0,99%	1,24%	0,113
34 - Hérault	0,7	0,1	14%	0,21	35%	271877	13,6	0,24	1,66	0,45	1,73%	2,16%	0,034
38 - Isère	1,9	0,3	16%	0,42	26%	285408	43,2	0,78	3,07	0,88	1,08%	1,36%	0,356
48 - Lozère	1,1	0,1	9%	0,41	41%	239416	18,0	0,32	2,41	0,58	2,52%	3,15%	0,000
66 - Pyrénées-Orientales	0,4	0,1	25%	0,03	10%	180513	10,9	0,20	1,96	0,35	0,31%	0,39%	0,165
81 - Tarn	1,2	0,6	50%	0,64	106%	188223	24,1	0,43	2,77	0,52	2,94%	3,67%	0,000
83 - Var	0,7	0,1	14%	0,18	30%	407642	15,6	0,28	1,50	0,61	1,27%	1,59%	0,103
84 - Vaucluse	0,3	0,04	13%	0,09	35%	119014	3,5	0,06	1,45	0,17	2,90%	3,63%	0,000
Total/moyenne	14,5	3,38	23%	3,78	36%	4443883	303,64	5,47	2,19	9,64	1,48%	1,85%	2,01

L'EAB nous permet également d'estimer le pourcentage de surfaces exploitées pour récolter ce volume de biomasse. Dans ce cas, nous avons fait 2 hypothèses : 1. L'EAB doit être majorée de 10% de pertes techniques. 2. La pression de récolte est de 80%.

Ce qui permet d'obtenir un **pourcentage de surface exploitée annuellement de 1,85%** en moyenne sur le bassin d'approvisionnement (entre 0,39% et 3,15%) ce qui est conforme à nos hypothèses utilisées pour évaluer la ressource disponible. On obtiendrait un temps moyen de retour sur exploitation de 54 ans, ce qui est compatible avec la composition des forêts du territoire.

B. Evolution de la ressource disponible sur la période 2018-2035

Evaluer l'évolution future des ressources forestières est très complexe et nécessite de faire un certain nombre d'hypothèses sur l'évolution de nombreux paramètres : stabilité du climat, stabilité de la productivité biologique, variation des surfaces forestières, dynamiques forestières, évolution des pratiques de gestion et de la demande, etc.

Afin de rester dans une approche conservative, nous avons fait les hypothèses suivantes :

1. Stabilité de la surface forestière sur cette période : la période est courte et les accrus forestiers ne seraient pas encore en âge d'exploitation.
2. Stabilité de la productivité biologique : une autre hypothèse nécessite des modèles de dynamique de croissance complexes en interaction avec la gestion et le climat.
3. Stabilité du taux de mortalité : idem hypothèse 2

Nous avons pris en compte 3 scénarios :

1. Tendancieriel : maintien de la récolte conforme aux valeurs de l'EAB 2017 soit 3,78 Mm³/an
2. UNIPER : scénario tendancieriel + volumes consommés par la chaudière de P4B, soit 208 000 m³/an (env. 156 Kt/an) de 2018 à 2020, puis une croissance linéaire pour atteindre 549 000 m³/an (env. 412 Kt/an) à partir de 2026.

3. UNIPER + EAB+ : scénario Uniper majoré d'une croissance de la demande en bois provenant de la filière de 1,1% par an pour aller de 3,78 à 4.55 Mm³/an en 2035 hors Uniper et 5,10 Mm³/an en incluant la consommation de P4B. Ce taux de croissance est conforme au scénario Dynamique BIBE proposé par l'étude IGN/ADEME de 2017.

Pour l'ensemble des scénarios nous avons considéré un pourcentage constant de surfaces exploitées annuellement de 2.5% et une pression de récolte de 80% par unité de surface exploitée ce qui reste bien en deçà de la production biologique.

Le calcul de l'accroissement annuel de la ressource en Bois Fort disponible a été effectué selon le schéma présenté ci-dessous (figure 20). L'accroissement annuel de la ressource bois fort est une fraction l'accroissement annuel en biovolume total en appliquant un ratio (Bois Fort exploitable/bois fort total) et un taux de Bois fort disponible par département. Le ratio par département permet de prendre en compte des spécificités locales dans la structure des peuplements et la structure des territoires.

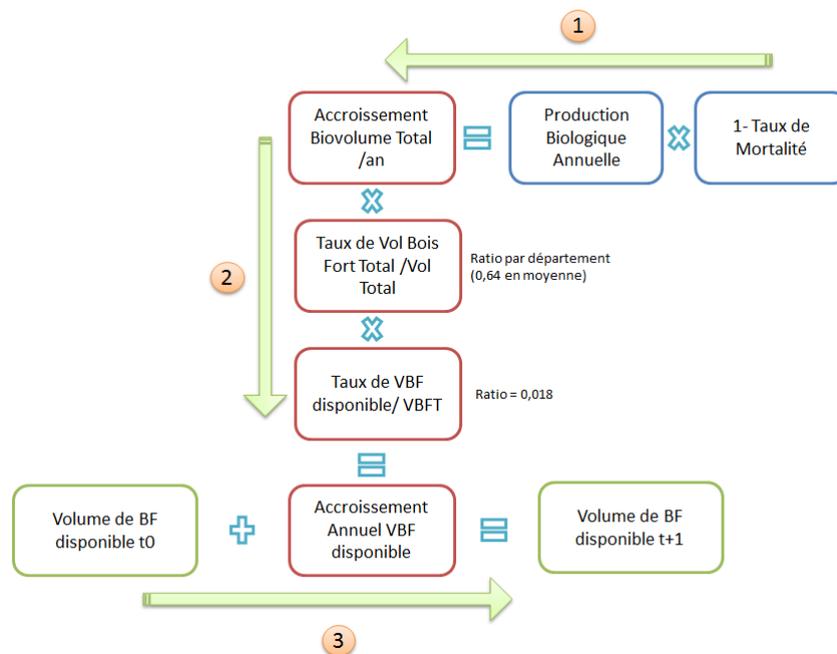


Figure 20 : détail du calcul de l'accroissement annuel en volume de bois fort disponible

On peut observer (table 12) que **quel que soit le scénario considéré la ressource supplémentaire disponible après prélèvement continuerait de croître sur la période 2018-2035** : +1,47 Mm³/an pour le scénario tendanciel, + 1.13 Mm³ pour le scénario UNIPER et + 0.35 Mm³ pour le scénario UNIPER+EAB+.

La figure 20 montre un décrochage après 2020 lors du passage à un régime de consommation normale de bois forestiers par la centrale thermique P4B.

Table 12 : ressource annuelle complémentaire disponible après prélèvement selon les trois scénarios en Mm3/an.

Année	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Disponibilité Totale (Mm3/an)	5,55	5,64	5,72	5,81	5,90	5,98	6,07	6,16	6,24	6,33	6,41	6,50	6,59	6,67	6,76	6,85	6,93	7,02
Consommation P4B (Mm3/an)	0,208	0,208	0,208	0,265	0,322	0,379	0,435	0,492	0,549	0,549	0,549	0,549	0,549	0,549	0,549	0,549	0,549	0,549
Taux de Consommation P4B	3,75%	3,69%	3,63%	4,56%	5,45%	6,33%	7,17%	7,99%	8,79%	8,67%	8,56%	8,44%	8,33%	8,23%	8,12%	8,02%	7,92%	7,82%
S1 : Tendancier (Mm3/an)	1,77	1,86	1,94	2,03	2,12	2,20	2,29	2,37	2,46	2,55	2,63	2,72	2,81	2,89	2,98	3,06	3,15	3,24
S2 : UNIPER (Mm3/an)	1,56	1,65	1,73	1,76	1,79	1,82	1,85	1,88	1,91	2,00	2,08	2,17	2,26	2,34	2,43	2,52	2,60	2,69
S3 : UNIPER + EAB+ (Mm3/an)	1,56	1,61	1,65	1,64	1,62	1,61	1,60	1,58	1,57	1,61	1,65	1,69	1,73	1,77	1,80	1,84	1,88	1,92

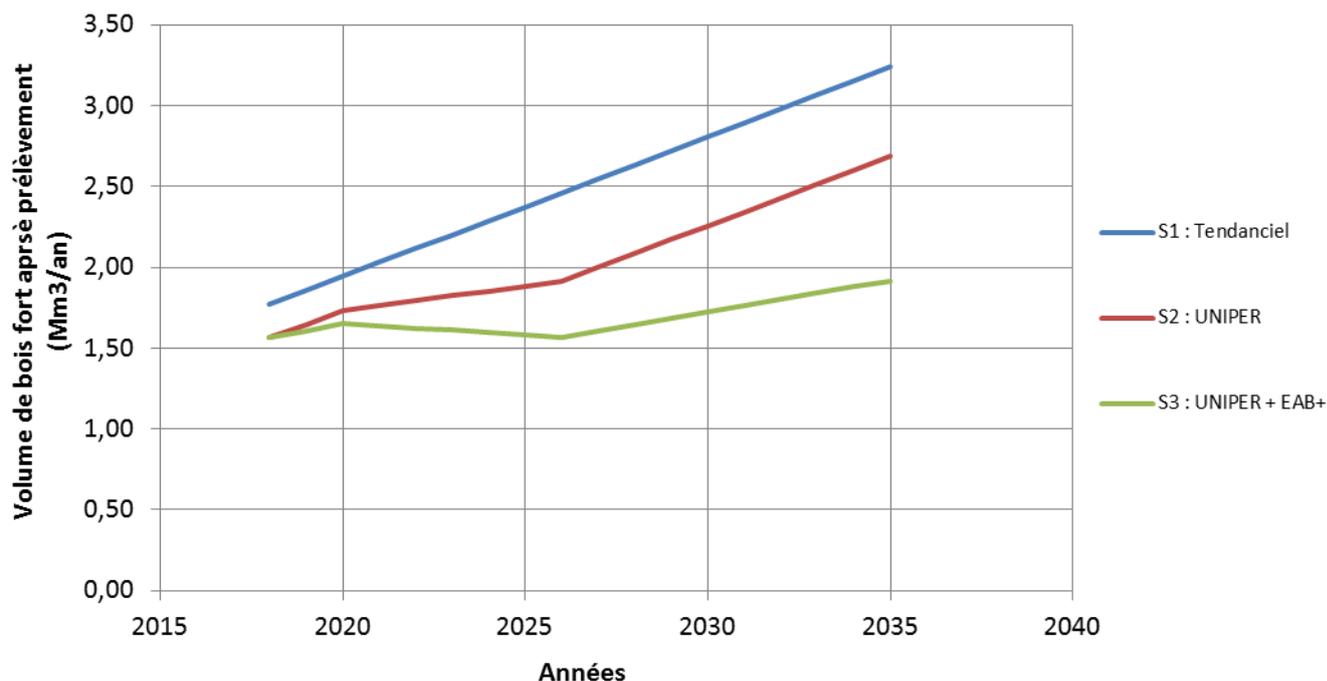


Figure 20 : Evolution temporelle des disponibilités complémentaires en bois fort après prélèvement selon les trois scénarios (Tendancier, UNIPER, UNIPER+EAB+).

Conclusions

Notre étude montre que les forêts présentes sur le bassin d’approvisionnement de la centrale thermique P4B d’Uniper France Power ont des ressources disponibles en quantité suffisante pour les besoins d’alimentation en bois forestier de la centrale.

- **Nous avons estimé la ressource disponible exploitable annuellement à 5,47 Mm³/an de bois fort.**
- Après récolte des ressources actuellement consommées par les différents acteurs économiques soit **3,78 Mm³/an** majoré d’un coefficient de perte technique de 10%, il **resterait entre 1.69 et 2.78 Mm3/an de ressource bois disponible après exploitation.**
- L’essentiel des ressources complémentaires mobilisables se concentrerait sur les départements de l’Isère, de l’Ariège, de l’Ardèche, des Hautes-Alpes, des Pyrénées Orientales et de la Drôme.

- Les départements des Bouches-du-Rhône, de la Lozère, du Tarn et du Vaucluse n'auraient pas de disponibilités complémentaires immédiates sans augmentation du taux de surfaces exploitées et de la pression de récolte.
- Dans des conditions de stabilité de la croissance forestière, l'accroissement de la biomasse issue de la production biologique en bois fort exploitable conduirait à un **accroissement d'ici 2035 de la biomasse complémentaire disponible entre 1,47 Mm³/an à demande constante et 0,35 Mm³/an en cas de fonctionnement en régime normal de la centrale de Gardanne avec en parallèle une hausse annuelle de 1,1% de la demande** (soit une augmentation de 20% de la demande sur la période hors la consommation de la centrale et de +36% avec).

Il convient de noter que ces hypothèses ne prennent pas en compte le changement climatique et son possible impact sur le taux de mortalité et de productivité biologique. Nous n'avons pas considéré également l'évolution des surfaces incendiées annuellement, dont une partie peut être néanmoins utilisée en tant que bois énergie.

Une contrainte supplémentaire à l'exploitation est le morcellement de la propriété foncière privée dans certaines portions du territoire qui rend difficile la mobilisation de la ressource.

Il est à noter que nous n'avons également pas considéré l'accroissement en surface des forêts qui serait susceptible d'accroître les ressources dans le futur.

Références bibliographiques

- Baccini, A., Friedl, M.A., Woodcock, C.E., Warbington, R., 2004. Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. *Geophys. Res. Lett.* 31.
- Cuny, H. et Colin, A. 2017. Disponibilités en bois des forêts de Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) à l'horizon 2035. Tome 1 : méthode et résultats. Rapport d'étude IGN DRINE/ADEME. 62 pages.
- Deleuze, C., Morneau, P., Renaud, J.P., Vivien, Y., Rivoire, M. et al.. Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. *Rendez-vous Techniques ONF*, 2014, pp.22-32.
- Fernández-Manso, O., Fernández-Manso, A., Quintano, C., 2014. Estimation of aboveground biomass in Mediterranean forests by statistical modelling of ASTER fraction images. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 31, 45–56.
- Gemmell, F.M., 1995. Effects of Forest Cover, Terrain, and Scale on Timber Volume Estimation With Thematic Mapper Data in a Rocky-Mountain Site. *Remote Sens. Environ.* 51, 291–305.
- Inventaire Forestier National, 2011. Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles. *L'IF N°28*, pp. 8.
- Longuetaud, F., Piboule, A., 2013. Crown plasticity reduces inter-tree competition in a mixed broadleaved forest. *Eur. J. For. Res.* 132, 621–634.
- Rathgeber, C., Guiot, J., Roche, P.K., Tessier, L., 1999. *Quercus humilis* increase of productivity in the Mediterranean area. *Ann. For. Sci.* 56, 211–219.
- Roche, P., 1994. Structuration de la végétation et organisation du paysage en Provence calcaire: approche spatiale et hiérarchique.
- Roche, P.K., 2009. Forêts méditerranéennes : au confluent de l'homme et du climat. *Histoire* 301–306.
- Tan, K., Piao, S., Peng, C., Fang, J., 2007. Satellite-based estimation of biomass carbon stocks for northeast China's forests between 1982 and 1999. *For. Ecol. Manage.* 240, 114–121.
- Tomppo, E., Olsson, H., Ståhl, G., Nilsson, M., Hagner, O., Katila, M., 2008. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sens. Environ.* 112, 1982–1999.
- Vallet P., Dhôte J.F., Le Moguédec G., Ravart M., Pignard G., 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, vol. 229, n° 1-3, pp. 98-110

ANNEXE 1 : Typologie de l'accessibilité physique pour la mobilisation du bois sur le bassin d'approvisionnement d'UNIPER

Distance	Pente					Code	Légende
	0-30	30-45	45-60	60-100	>100		
<150m	TF	F	F	TD	I	E1	Très Facile
150-500m	TF	F	D	TD	I	E2	Facile
500-1000m	F	D	TD	TD	I	E3	Difficile
1000-2000m	D	D	TD	TD	I	E4	Très Difficile
>2000m	TD	TD	TD	I	I	I	Inexploitable physiquement

Critère DISTANCE:

- 0-150 m : distance maximale de débardage avec le treuil d'un skidder à l'aval (en remontant le bois situé à l'aval de la traîne ou piste)
- 0-500 m : distance confortable de débardage skidder ou porteur
- 500-1000 m : distance acceptable de débardage porteur, rallonge du temps nécessaire
- 1000-2000 m : distance comportant une augmentation importante du temps de débardage
- >2000 m : distance de débardage incompatible avec la logique d'enchaînement des phases de production d'un chantier forestier normale

Critère PENTE :

- 0-30% : Pente confortable de débardage skidder ou porteur
- 30-45% : Pente acceptable de débardage skidder ou porteur ; pour les pentes les plus fortes perspectives de porteur treuillé
- 45-60% : Débardage skidder plus compliquée, perspective de porteur treuillé, et possibilité de câble aérien
- 60-100% : Débardage par câble aérien (complication significative de l'organisation du chantier)
- >100% pente incompatible avec l'intervention d'un bûcheron en condition de sécurité maîtrisables = non exploitable

Critère ITINERAIRE de DEBARDAGE

- critère non retenu, car information interne IGN, non disponible

Critère PORTANCE du TERRAIN

- critère non retenu, car information géographique non disponible

Critère ECONOMIQUE

- Les typologies TF, F, D, sont compatibles avec les conditions actuelles du marché et de la filière (c'est à dire : ressource disponible, actions de mobilisation insuffisantes, demande forte de la part des exploitants, prix figés et fixés par les industriels)
- Les typologies TD sont techniquement exploitables à condition d'augmenter significativement le prix de vente du bois (+50 et jusqu'à +100% du prix bord de route)
- Peut-être un critère simple pour identifier une Ressource Supplémentaire

Rappel des techniques de débardage retenues :

- Skidder : Tracteur forestier équipé de treuil de débusquage et pouvant évoluer jusqu'à des pentes de 60% ; le treuil permet de remonter des bois dans des pentes <100% sur des courtes distances (<150 m).
- Porteur : Tracteur forestier équipé de panier de transport et grue de chargement, pouvant évoluer jusqu'à des pentes de 45% (débardage à la descente).
- Porteur treuillé : En perspective des dernières évolutions du marché : engin accroché par un câble à un treuil synchronisé avec son avancement dans la pente
- Câble aérien : Système de débardage basé sur un câble acier tendu au-dessus de la zone à débarder et pouvant accrocher les bois sous la ligne ; peut être opérationnel avec des pentes minimales de 45%.

ANNEXE 2 : Code des SER/Département

CODE_DEPT	NOM_DEPT	FID_Uniper	codeser	NomSER	Surface (en ha)	05	HAUTES-ALPES	22 H22	Alpes internes du Nord	424
30	GARD	-1	58		58		ISERE	22 H22	Alpes internes du Nord	114600
04	ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	-1	212		212		VAUCLUSE	23 H30	Alpes externes du Sud	8932
11	AUDE	-1	247		247		ISERE	23 H30	Alpes externes du Sud	16318
05	HAUTES-ALPES	-1	257		257		VAR	23 H30	Alpes externes du Sud	30532
34	HERAULT	-1	309		309		ALPES-MARITIMES	23 H30	Alpes externes du Sud	55819
09	ARIEGE	-1	311		311		HAUTES-ALPES	23 H30	Alpes externes du Sud	190407
66	PYRENEES-ORIENTALES	-1	786		786		DROME	23 H30	Alpes externes du Sud	27298
13	BOUCHES-DU-RHONE	-1	1139		1139		ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	23 H30	Alpes externes du Sud	327830
06	ALPES-MARITIMES	-1	1189		1189		ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	24 H41	Alpes intermédiaires du Sud	78437
83	VAR	-1	1373		1373		ALPES-MARITIMES	24 H41	Alpes intermédiaires du Sud	17190
06	PYRENEES-ORIENTALES	0-1	70		70		DROME	25 H41	Alpes intermédiaires du Sud	17
13	BOUCHES-DU-RHONE	1-1	348		348		ISERE	25 H41	Alpes intermédiaires du Sud	52054
07	ARDECHE	2 C52	Plaines et piémonts alpins	72	72		HAUTES-ALPES	25 H41	Alpes intermédiaires du Sud	97724
26	DROME	2 C52	Plaines et piémonts alpins	74416	38		ISERE	26 H42	Alpes internes du Sud	136
38	ISERE	2 C52	Plaines et piémonts alpins	410809	06		ALPES-MARITIMES	26 H42	Alpes internes du Sud	58282
38	ISERE	3 E10	Premier plateau du Jura	237	04		ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	26 H42	Alpes internes du Sud	97862
38	ISERE	4 E10	Premier plateau du Jura	27654	05		HAUTES-ALPES	26 H42	Alpes internes du Sud	274014
09	ARIEGE	5 F30	Coteaux de la Garonne	113636	09		ARIEGE	27 I11	Marches pyrénéennes	59115
11	AUDE	5 F30	Coteaux de la Garonne	122761	66		PYRENEES-ORIENTALES	28 I12	Pyénées cathares	3746
81	TARN	5 F30	Coteaux de la Garonne	292503	11		AUDE	28 I12	Pyénées cathares	80075
81	TARN	6 F40	Causse du Sud-Ouest	40226	09		ARIEGE	28 I12	Pyénées cathares	82389
12	AVEYRON	6 F40	Causse du Sud-Ouest	43880	66		PYRENEES-ORIENTALES	29 I13	Corbières	13998
12	AVEYRON	7 G22	Plateaux granitiques du centre du Massif central	60	11		AUDE	29 I13	Corbières	62791
07	ARDECHE	7 G22	Plateaux granitiques du centre du Massif central	31830	66		PYRENEES-ORIENTALES	30 I21	Haute chaîne pyrénéenne	114
48	LOZERE	7 G22	Plateaux granitiques du centre du Massif central	215588	09		ARIEGE	30 I21	Haute chaîne pyrénéenne	235572
07	ARDECHE	8 G22	Plateaux granitiques du centre du Massif central	37	66		PYRENEES-ORIENTALES	31 I22	Pyénées catalanes	369
48	LOZERE	9 G30	Massif central volcanique	98	11		AUDE	32 I22	Pyénées catalanes	401
07	ARDECHE	9 G30	Massif central volcanique	38476	09		ARIEGE	32 I22	Pyénées catalanes	12
48	LOZERE	10 G30	Massif central volcanique	29127	66		PYRENEES-ORIENTALES	32 I22	Pyénées catalanes	203955
12	AVEYRON	10 G30	Massif central volcanique	37198	84		HERAULT	33 I10	Garrigues	5869
38	ISERE	11 G42	Monts du Vivarais et du Pilat	61	26		DROME	34 I10	Garrigues	124
26	DROME	11 G42	Monts du Vivarais et du Pilat	105	64		VAUCLUSE	34 I10	Garrigues	120694
07	ARDECHE	11 G42	Monts du Vivarais et du Pilat	217454	34		HERAULT	34 I10	Garrigues	120694
81	TARN	12 G50	Ségala et Châtaigneraie auvergnate	8429	07		ARDECHE	34 I10	Garrigues	161838
48	LOZERE	13 G50	Ségala et Châtaigneraie auvergnate	9762	11		GARD	34 I10	Garrigues	278991
81	TARN	13 G50	Ségala et Châtaigneraie auvergnate	99317	09		AUDE	35 I21	Roussillon	16
12	AVEYRON	13 G50	Ségala et Châtaigneraie auvergnate	450278	66		PYRENEES-ORIENTALES	35 I21	Roussillon	173346
30	GARD	14 G60	Grands Causses	27377	07		ARDECHE	36 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	154
34	HERAULT	14 G60	Grands Causses	44290	26		DROME	36 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	8774
48	LOZERE	14 G60	Grands Causses	144207	66		PYRENEES-ORIENTALES	36 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	15594
12	AVEYRON	14 G60	Grands Causses	234617	84		VAUCLUSE	36 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	118396
34	HERAULT	15 G70	Cévennes	1	30		GARD	36 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	148460
12	AVEYRON	15 G70	Cévennes	1	13		BOUCHES-DU-RHONE	36 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	213004
07	ARDECHE	15 G70	Cévennes	105266	11		HERAULT	36 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	321382
48	LOZERE	15 G70	Cévennes	118301	58		ISERE	36 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	33249
30	GARD	15 G70	Cévennes	132727	07		ARDECHE	37 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	42
12	AVEYRON	16 G80	Haut-Languedoc et Lévézou	26469	26		DROME	37 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	251
11	AUDE	16 G80	Haut-Languedoc et Lévézou	30440	13		BOUCHES-DU-RHONE	37 I22	Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	186623
34	HERAULT	16 G80	Haut-Languedoc et Lévézou	130959	13		BOUCHES-DU-RHONE	39 I23	Provence calcaire	0
81	TARN	16 G80	Haut-Languedoc et Lévézou	137673	06		ALPES-MARITIMES	40 I23	Provence calcaire	3806
12	AVEYRON	17 G80	Haut-Languedoc et Lévézou	84554	84		VAUCLUSE	40 I23	Provence calcaire	20
38	ISERE	18 H10	Préalpes du Nord	58884	04		ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	40 I23	Provence calcaire	99362
26	DROME	18 H10	Préalpes du Nord	60037	13		BOUCHES-DU-RHONE	40 I23	Provence calcaire	141475
38	ISERE	19 H10	Préalpes du Nord	39583	83		VAR	40 I23	Provence calcaire	291132
38	ISERE	20 H21	Alpes externes du Nord	1346	06		ALPES-MARITIMES	41 I24	Secteurs niçois et préligure	329932
38	ISERE	21 H21	Alpes externes du Nord	65993	83		VAR	42 I30	Maures et Esterel	77720
05	HAUTES-ALPES	22 H22	Alpes internes du Nord	424	83		VAR	43 I30	Maures et Esterel	579
38	ISERE	22 H22	Alpes internes du Nord	114600	83		VAR	44 I30	Maures et Esterel	1212
84	VAUCLUSE	23 H30	Alpes externes du Sud	8932	83		VAR	45 I30	Maures et Esterel	951
38	ISERE	23 H30	Alpes externes du Sud	16318	06		ALPES-MARITIMES	45 I30	Maures et Esterel	3956
83	VAR	23 H30	Alpes externes du Sud	30532	06		ALPES-MARITIMES	46 I30	Maures et Esterel	164
06	ALPES-MARITIMES	23 H30	Alpes externes du Sud	55819	83		VAR	47 I30	Maures et Esterel	20302
05	HAUTES-ALPES	23 H30	Alpes externes du Sud	196047	04		ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	48 I40	Préalpes du Sud	176630
26	DROME	23 H30	Alpes externes du Sud	27298	06		ALPES-MARITIMES	48 I40	Préalpes du Sud	39
04	ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	23 H30	Alpes externes du Sud	327830	83		VAR	48 I40	Préalpes du Sud	38911
06	ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	24 H41	Alpes intermédiaires du Sud	78437	07		ARDECHE	49 I40	Préalpes du Sud	58573
06	ALPES-MARITIMES	24 H41	Alpes intermédiaires du Sud	177190	26		DROME	49 I40	Préalpes du Sud	0
26	DROME	25 H41	Alpes intermédiaires du Sud	17	04		ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	49 I40	Préalpes du Sud	49961
38	ISERE	25 H41	Alpes intermédiaires du Sud	52054	84		VAUCLUSE	49 I40	Préalpes du Sud	53630
										131213

Annexe 3 : modèles régressifs

Régression Volume TOT

Regression Analysis: Vtot versus NDVI100com; pann100m; ...

The regression equation is

$$\text{Log10}(V_{\text{tot}}) = 0,196 + 0,000759 \text{ NDVI100com} + 0,000276 \text{ pann100m} - 0,0185 \text{ traspfr} + 0,000073 \text{ mnt}_{100\text{m}} + 0,0104 \text{ Cover} + 0,0539 \text{ hmoy100m}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,19586	0,04813	4,07	0,000
NDVI100com	0,0007586	0,0002108	3,60	0,000
pann100m	0,00027577	0,00003547	7,78	0,000
traspfr	-0,01854	0,01071	-1,73	0,083
mnt_100m	0,00007314	0,00001384	5,29	0,000
Cover	0,0103907	0,0001945	53,42	0,000
hmoy100m	0,053879	0,001559	34,57	0,000

S = 0,334505 R-Sq = 46,7% R-Sq(adj) = 46,7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	793,62	132,27	1182,10	0,000
Residual Error	8085	904,66	0,11		
Total	8091	1698,28			

Source	DF	Seq SS
NDVI100com	1	181,87
pann100m	1	109,15
traspfr	1	3,40
mnt_100m	1	0,68
Cover	1	364,81
hmoy100m	1	133,71

Régression Biomasse totale

Regression Analysis: BiomasseTot versus NDVI100com; pann100m; ...

The regression equation is

$$\text{Log10}(\text{BiomasseTot}) = 0,0718 + 0,000817 \text{ NDVI100com} + 0,000259 \text{ pann100m} + 0,0132 \text{ tmin100m} + 0,000112 \text{ mnt}_{100\text{m}} + 0,0101 \text{ Cover} + 0,0551 \text{ hmoy100m}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,07181	0,04841	1,48	0,138
NDVI100com	0,0008165	0,0002141	3,81	0,000
pann100m	0,00025935	0,00003752	6,91	0,000
tmin100m	0,013182	0,003686	3,58	0,000
mnt_100m	0,00011246	0,00001803	6,24	0,000
Cover	0,0101398	0,0001980	51,21	0,000
hmoy100m	0,055148	0,001582	34,87	0,000

S = 0,339550 R-Sq = 44,8% R-Sq(adj) = 44,8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	757,57	126,26	1095,12	0,000
Residual Error	8085	932,15	0,12		
Total	8091	1689,72			

Source	DF	Seq SS
NDVI100com	1	175,57
pann100m	1	93,25

```
tmin100m    1    1,05
mnt_100m    1    0,05
Cover       1  347,49
hmoy100m   1  140,15
```

Régression Biomasse BF BO

Régression Biomasse BF BO

Regression Analysis: BiomasseBFT_SBO versus ndvil100m; tmin100m; ...

The regression equation is

$$\text{Log10(BiomasseBFT_SBO)} = - 1,78 + 0,00144 \text{ ndvil100m} + 0,0144 \text{ tmin100m} - 0,0535 \text{ traspfr} + 0,000436 \text{ mnt_100m} + 0,0108 \text{ Cover} + 0,136 \text{ hmoy100m}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-1,77800	0,07616	-23,35	0,000	
ndvil100m	0,0014389	0,0003890	3,70	0,000	1,3
tmin100m	0,014430	0,007198	2,00	0,045	3,8
traspfr	-0,05350	0,02210	-2,42	0,016	1,0
mnt_100m	0,00043569	0,00003365	12,95	0,000	3,9
Cover	0,0107677	0,0003977	27,07	0,000	1,2
hmoy100m	0,136035	0,003276	41,53	0,000	1,3

S = 0,692003 R-Sq = 38,1% R-Sq(adj) = 38,1%

PRESS = 3878,16 R-Sq(pred) = 38,04%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	2387,52	397,92	830,96	0,000
Residual Error	8085	3871,65	0,48		
Lack of Fit	7734	3786,28	0,49	2,01	0,000
Pure Error	351	85,37	0,24		
Total	8091	6259,17			

Régression Volume Bois Fort

Regression Analysis: V_7 versus pann100m; traspfr; ...

The regression equation is

$$\text{Log10(VBF)} = - 0,135 + 0,000288 \text{ pann100m} - 0,0290 \text{ traspfr} + 0,000109 \text{ mnt_100m} + 0,0116 \text{ Cover} + 0,0697 \text{ hmoy100m}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-0,13468	0,03258	-4,13	0,000	
pann100m	0,00028801	0,00003838	7,50	0,000	2,9
traspfr	-0,02901	0,01162	-2,50	0,013	1,0
mnt_100m	0,00010888	0,00001503	7,24	0,000	2,8
Cover	0,0116050	0,0001975	58,76	0,000	1,0
hmoy100m	0,069726	0,001682	41,46	0,000	1,2

S = 0,363515 R-Sq = 50,0% R-Sq(adj) = 50,0%

PRESS = 1070,08 R-Sq(pred) = 49,94%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	1069,26	213,85	1618,33	0,000
Residual Error	8086	1068,51	0,13		
Lack of Fit	7735	1042,32	0,13	1,81	0,000
Pure Error	351	26,19	0,07		
Total	8091	2137,77			

7399 rows with no replicates

Régression Biomasse Bois Fort

Regression Analysis: BiomasseBFT_TOT versus pann100m; traspfr; ...

The regression equation is

$$\text{Log10(BiomasseBFT_TOT)} = -0,27108 + 0,00022066*\text{pann100m} - 0,02065*\text{traspfr} \\ + 0,0006278*\text{NDVI100com} + 0,00010437*\text{mnt_100m} + 0,0108298 \text{ Cover} + \\ 0,069561*\text{hmoy100m}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-0,27108	0,05196	-5,22	0,000	
pann100m	0,00022066	0,00003829	5,76	0,000	2,9
traspfr	-0,02065	0,01156	-1,79	0,074	1,0
NDVI100com	0,0006278	0,0002275	2,76	0,006	1,3
mnt_100m	0,00010437	0,00001494	6,99	0,000	2,8
Cover	0,0108298	0,0002100	51,58	0,000	1,2
hmoy100m	0,069561	0,001683	41,34	0,000	1,2

S = 0,361109 R-Sq = 48,4% R-Sq(adj) = 48,4%

PRESS = 1056,10 R-Sq(pred) = 48,31%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	988,72	164,79	1263,71	0,000
Residual Error	8085	1054,28	0,13		
Lack of Fit	7734	1027,10	0,13	1,71	0,000
Pure Error	351	27,18	0,08		
Total	8091	2043,00			

7399 rows with no replicates