



ÉCOLE SUPÉRIEURE D'AGRICULTURE
55, rue Rabelais – B.P. 30748
49 007 ANGERS CEDEX 1
TEL. : 02.41.23.55.55
FAX. : 02.41.23.55.00



INRA-URFM
Unité de Recherche des Forêts Méditerranéennes
Domaine Saint-Paul - Site Agroparc
228, route de l'Aérodrome
84 140 AVIGNON

Cartographie des services écosystémiques des forêts du Mont Ventoux

- Evaluation de la séquestration du carbone et de l'offre en habitat -



Charlotte MONNERIE
IM1 Promotion 115

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

AUTEUR : Charlotte MONNERIE

Promotion 115

Signalement du rapport : Cartographie des services écosystémiques des forêts du Mont Ventoux.

35 pages, 27 figures, 7 tableaux, X annexes

Mots-clé : Forêts, services écosystémiques

RÉSUMÉ D'AUTEUR

Face aux changements globaux (climat, usages, demande), les forêts méditerranéennes se trouvent impactées. Dans ce contexte, le projet européen INFORMED a pour objectif d'analyser la résilience des forêts méditerranéennes sous l'angle du maintien des services écosystémiques et de leurs bénéfices économiques. En effet, l'évaluation économique des services écosystémiques est un support pour la gouvernance du système, permettant de choisir les meilleures options futures de gestion. Au sein de ce projet, ma mission a pour but de faire un état des lieux des services écosystémiques du massif forestier du Ventoux. L'étude porte sur l'évaluation de la séquestration du carbone et de l'offre en habitat (biodiversité).

La méthodologie adoptée se base sur la carte de végétation de la BD FORET® de l'Institut National de l'information géographique et forestière (IGN). Les résultats sont présentés sous forme de cartes, réalisées à partir du logiciel libre de Système d'Information Géographique QGIS©.

- Pour l'évaluation de la séquestration du carbone, nous avons calculé le stock de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire, dans la matière organique morte ainsi que dans le sol, à partir des données d'inventaire de l'IGN.
- Pour l'évaluation de l'offre en habitat, nous avons superposé les aires de protection et de conservation présentes sur la zone d'étude, afin d'évaluer la richesse de biodiversité. Nous avons ensuite affecté un indice de richesse, afin d'améliorer la précision du travail.

D'une manière générale, les résultats montrent que les forêts du Mont Ventoux séquestrent moins de carbone par rapport aux forêts françaises, mais présentent une biodiversité globalement plus riche. Par la suite, ce travail servira de données d'entrées pour l'évaluation économique réalisée par le LEF (Laboratoire d'Economie Forestière). Enfin, ce même travail sera réalisé et comparé aux scénarios futurs établis. De cette manière, les résultats du projet INFORMED permettront d'adapter la gestion forestière suivant la perspective d'évolution des forêts, afin de limiter les effets des changements globaux.

ABSTRACT

Faced with the global changes (climate, use, demand), Mediterranean forests are impacted. In this context, the European project INFORMED aims to analyze the resilience of Mediterranean forests in terms of the maintenance of ecosystem services and their economic benefits. Indeed, the economic valuation of ecosystem services is a support for the governance of the system to choose the best future management options. Within this project, my mission is to make an inventory of the ecosystem services of the forest of Ventoux. The study focuses on assessing carbon sequestration and supply habitat (biodiversity).

The methodology is based on the vegetation map BD FORET® of the National Institute of Geographic and Forest Information (NGI). The results are presented in map view, made from the free software of Geographic Information System QGIS©.

- For the assessment of carbon sequestration, we calculated the carbon stock in the aerial and root biomass, in dead organic matter and soil, from the inventory of NGI data.
- For the evaluation of habitat, we superimposed the protection and conservation areas present in the study area to assess biodiversity wealth. We then assigned a wealth index to improve the accuracy of the work.

In general, the results show that the forests of Mont Ventoux sequester less carbon compared to French forests, but have a richer overall biodiversity. Subsequently, this work will serve as input data for economic evaluation by the LEF (Laboratory of Forest Economy). Finally, the same work will be performed and compared to future scenarios prepared. In this way, the results of the project will INFORMED adapt forest management according to forest development of perspective, to limit the effects of global changes.

Remerciement

Je tiens à remercier l'Unité de Recherche Ecologie des Forêts Méditerranéennes (URFM) de l'INRA de m'avoir accueillie durant ces 13 semaines de stage, et tout particulièrement Hendrik DAVI, mon maître de stage, et Florence COURDIER qui m'ont encadrée tout au long du stage. Je remercie aussi François LEFEBVRE, coordinateur du projet INFORMED, et Éric RIGOLOT, directeur de l'unité, pour le soutien qu'ils m'ont apportée dans la réalisation de mon étude.

Mes remerciements vont naturellement à toute l'équipe de l'URFM,
pour leur accueil et leur gentillesse.

Je tiens à remercier, plus particulièrement, Didier BETORED pour son aide sur le logiciel QGIS.

Je remercie aussi Anthony ROUX du SMAEMV (Syndicat Mixte d'Aménagement et d'Équipement du Mont Ventoux) et Laetitia TUFFERY du LEF (Laboratoire d'Économie Forestière), pour leur expertise et leur aide précieuse dans la réalisation de mon étude.

Merci d'avoir fait de ce stage, une réussite !

Une très belle expérience, qui m'a permis d'apprendre beaucoup sur le domaine forestier.

Sommaire

Introduction	1
Présentation générale	2
Contexte général	2
Présentation de la structure d'accueil	2
Contexte de l'étude	3
Présentation du projet INFORMED	5
Travail bibliographique	9
La notion de services écosystémiques	9
La typologie des services écosystémiques	9
L'approche socio-écologique	11
L'évaluation économique des services écosystémiques	13
Présentation de la zone d'étude : le Ventoux	15
Généralités	15
Présentation de la base de données	17
La végétation de la zone du Ventoux : les étages bioclimatiques	21
Evaluation du service de séquestration du carbone	25
Matériels	26
Méthode	30
Carbone stocké dans la biomasse hors sol et en sous-sol	30
Carbone stocké dans la matière organique morte	34
Carbone stocké dans le sol	35
Résultats et discussion/analyse critique	37
Estimation du stock de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire	37
Estimation du stock de carbone dans la matière organique	45
Estimation du stock de carbone dans le sol	49
Synthèse globale	51
Evaluation du service de l'offre en habitat	53
Matériels	55
Méthode	55
Résultats et discussion/analyse critique	59
Perspectives et conclusion	61

Introduction

En 2005, l'évaluation des écosystèmes (MEA : Millenium Ecosystem Assessment) montre que les conséquences de la dégradation des écosystèmes par les activités humaines ont entraîné une diminution de près de 60% des services écologiques au cours des 50 dernières années. Actuellement, le changement d'occupation des sols, la pollution, la surexploitation, le tourisme et le changement climatique sont les principales menaces affectant les écosystèmes. L'impact des activités humaines sur les écosystèmes se répercute sur les fonctionnalités, et donc sur les services écologiques rendus.

Formulé à l'origine par des chercheurs en écologie soucieux d'alerter le public et les décideurs sur l'accélération sans précédent de la disparition d'espèces végétales et animales, le concept de service écosystémique met en évidence – dans une conception occidentale naturaliste du rapport homme-nature – les biens matériels ou immatériels fournis aux humains par les écosystèmes et permet d'évaluer leur importance en termes économiques. Cette notion a induit un cadre de pensée, reliant écologie et économie, permettant la perspective d'une évaluation monétaire des fonctions sociales et environnementales de la forêt, et donc celle de leur valorisation économique.

Dans ce contexte, le projet européen INFORMED a pour but d'évaluer l'impact de la gestion sur la résilience des forêts méditerranéennes. La résilience est ici définie comme la capacité à maintenir un certain niveau de services écosystémiques face aux changements globaux (climat, usage et demande). Pour cela, des scénarios intégrant le changement climatique et l'évolution des politiques publiques et économiques sont construits. L'évaluation des services écosystémiques, notamment économique par la méthode des coûts-bénéfices, va permettre d'orienter la gestion des espaces forestiers en fonction des différents scénarios établis.

Au sein de ce projet, ma mission est d'établir un état des lieux des services écosystémiques des massifs forestiers du Ventoux. Mon étude porte sur deux services écosystémiques : la séquestration du carbone et l'habitat (richesse de biodiversité). L'objectif de ce travail est de quantifier et qualifier spatialement ces deux services écosystémiques, à l'échelle du Ventoux. L'utilisation du logiciel libre de Système d'Information Géographique QGIS© nous a permis de présenter les résultats sous forme de cartes.

Dans ce rapport, nous présentons de façon détaillée la méthodologie adoptée pour l'évaluation des services écosystémiques de la séquestration du carbone et de l'offre en habitat, ainsi que les résultats obtenus. Pour finir, nous avons fait une analyse critique des résultats, afin d'améliorer la précision de travail et proposer de nouvelles pistes de réflexion.

Présentation générale

Question : Cartographie des services écosystémiques des forêts du Mont Ventoux

Contexte

Présentation de la structure d'accueil

L'Institut National de la Recherche Agronomique, (INRA), est un organisme français de recherche placé sous la double tutelle du Ministère de la Recherche et du Ministère de l'Agriculture. Fondé en 1946, il est aujourd'hui le premier institut de recherche agronomique en Europe et le deuxième dans le monde pour ses publications en sciences agricoles et en sciences végétales et animales. De façon générale, l'INRA mène des recherches sur des questions qui nous concernent tous, comme l'alimentation, l'agriculture et l'environnement.

Le centre INRA Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) se place au 4ème rang national parmi les 17 centres INRA. Il rassemble 1000 agents, dont 700 agents permanents, répartis dans 26 unités, localisés sur 10 sites.

L'Unité de Recherche Ecologie des Forêts Méditerranéennes (URFM), basé sur le site d'Avignon, mène des recherches pluridisciplinaires en écologie pour aller vers une gestion durable des écosystèmes forestiers méditerranéens, et ce, dans le contexte du changement climatique. L'Unité est constituée de trois équipes : biologie des populations et évolution (arbres et insectes), écologie fonctionnelle et dynamique des communautés, et enfin physique et écologie du feu. Ces trois équipes travaillent en étroite collaborations pour (1) évaluer les risques que font peser le changement climatique sur les écosystèmes forestiers du pourtour méditerranéen et (2) déterminer les potentialités d'adaptation naturelles et anthropiques.

L'URFM développe également ses recherches dans quatre domaines appliqués : la gestion forestière, la conservation des ressources génétiques, la prévention des incendies et la protection contre les ravageurs. Enfin, l'Unité gère plusieurs projets de recherche, nationaux et internationaux, en partenariat avec d'autres organismes de recherches ou établissements publics.

Pour finir, l'URFM est composée de 11 chercheurs, 4 doctorants et post-doctorants, 6 ingénieurs, 3 assistants ingénieurs, 15 techniciens et de stagiaires.

Contexte de l'étude

Le bassin méditerranéen représente près de 8 % de la population mondiale, avec une surface forestière de 85 millions d'hectares, soit environ deux pour cent de la surface forestière mondiale.

Pour le Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer (MEEM), la forêt méditerranéenne apparaît de plus en plus comme le lieu par excellence de la diversité des usages et des espèces dans la perspective actuelle des changements globaux, climatiques et sociétaux.

La multifonctionnalité de forêts méditerranéennes :

Il est maintenant largement reconnu que les forêts fournissent à la société un grand nombre de biens et de services. Cette multifonctionnalité s'exprime tout particulièrement dans les écosystèmes forestiers de type méditerranéen, puisque ces derniers produisent une faible quantité de bois. Ainsi, au-delà de leurs caractéristiques spécifiques et de leur fonctionnement biologique propre, les forêts méditerranéennes sont source de richesses et de bénéfices au travers de la fourniture de biens et services très variés (Figures 1 et 2) :

- Produits forestiers ligneux (bois d'œuvre + bois énergie)
- Produits forestiers non ligneux (liège, champignons, truffes, châtaignes, miel, chasse)
- Protection de l'eau (qualité) et des sols (érosion)
- Séquestration du carbone
- Biodiversité (habitats, espèces endémiques)
- Récréation (loisirs, tourisme ...)

Véritable « hotspot » de biodiversité, les écosystèmes forestiers et autres espaces boisés méditerranéens jouent un rôle écologique important dans la région, mais constituent aussi un facteur fondamental dans le développement des populations. Depuis toujours, ces forêts ont été exploitées pour leurs différents usages et appréciées pour les multiples biens et services qu'elles procurent. Les biens et services écosystémiques sont souvent cruciaux pour de nombreux autres secteurs économiques de la région (agriculture et alimentation, conservation des eaux et des sols, fourniture d'eau potable, tourisme, énergie). Néanmoins, ces services écosystémiques sont dépendants du type de forêt, de sa structure et de sa gestion. Autrement dit, c'est seulement si un écosystème forestier est en bonne santé, avec une gestion durable, qu'il peut fournir des biens et services de qualité au bien-être humain.

Les changements globaux et menaces sur les services écosystémiques :

Bien qu'elles aient conservées un haut niveau de biodiversité, les forêts méditerranéennes sont particulièrement affectées par les changements globaux : perturbations liées au réchauffement climatique et aux activités humaines (changement des utilisations du sol et évolution des modes de vie



Figure 1 : Chênes lièges en forêt méditerranéenne

Source : <http://missglouglou.blog.lemonde.fr>



Figure 2 : Sylvo-pastoralisme en forêt méditerranéenne

Source : <http://www.suds-en-ligne.ird.fr>

notamment). Même s'il existe une grande différence des dynamiques actuelles entre les rives Nord et Sud de la Méditerranée au niveau anthropique, la région méditerranéenne apparaît comme l'une des régions européennes les plus impactée par le changement climatique : augmentation des températures, intensification des sécheresses estivales et diminution des précipitations (Figure 3).

Ces changements rapides hypothèquent l'avenir des écosystèmes forestiers et autres espaces boisés méditerranéens (perte de biodiversité, augmentation des risques de feux de forêts, dégradation des bassins versants et accentuation des processus de désertification) et remettent en cause la fourniture durable de ces multiples biens et services en faveur des populations. Enfin, une bonne gestion des espaces naturels permettrait d'atténuer ces effets.

Aujourd'hui, face aux changements globaux, la « durabilité » du développement est un enjeu majeur. De cette manière, des travaux de recherche portant sur la résilience¹ et la capacité d'adaptation des forêts face à ces phénomènes sont nécessaires.

Présentation du projet INFORMED

La mission menée durant ces 13 semaines était intégrée à un projet de recherche euro-méditerranéen : INFORMED (INtegrated research on FOrest Resilience and Management in the mEDiterranean). Le projet INFORMED, coordonné par François Lefèbre de l'INRA-URFM, associe 15 partenaires de 10 pays des rives Nord et Sud de la Méditerranée combinant des compétences en écologie, en gestion forestières et en économie. Le projet de recherche INFORMED a pour but de développer une approche pluridisciplinaire afin d'évaluer l'impact de différentes options de gestion sur la résilience des forêts méditerranéennes face aux changements globaux (climat, usage et demande).

Le projet INFORMED a pour objectif de :

- produire des scénarios de changements globaux spécifiquement dédiés aux forêts méditerranéennes.
- développer l'approche basée sur les processus de la biodiversité et la réponse fonctionnelle des forêts méditerranéennes aux perturbations.
- développer l'évaluation intégrée des services écosystémiques et de leurs dynamiques basées sur les fonctions des écosystèmes et leur évaluation économique.
- évaluer les stratégies de gestion adaptative des forêts, de la politique et des options de gouvernance pour leur impact attendu sur la résilience.

¹ La résilience d'un système est sa capacité à absorber les perturbations d'origine naturelle ou humaine et à se réorganiser de façon à maintenir ses fonctions et sa structure.

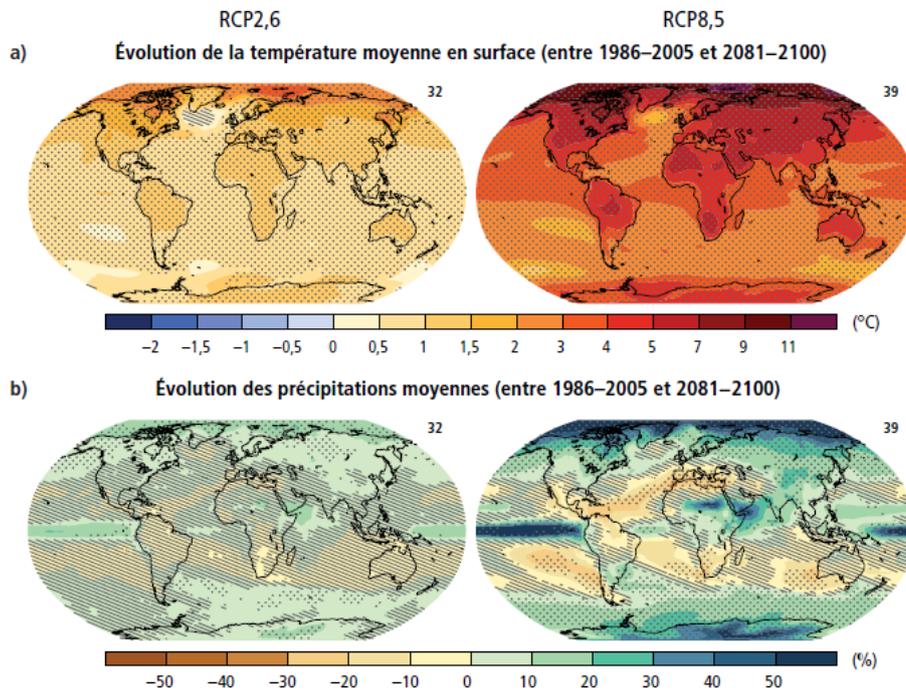


Figure 3 : Évolution de la température moyenne en surface (a) et évolution des précipitations moyennes (b) pour la période 2081–2100 par rapport à la période 1986–2005, selon les scénarios RCP2,6 (à gauche) et RCP8,5 (à droite).

Source : GIEC. *Changements climatiques 2014. Rapport de synthèse.*

Zoom sur les scénarios RCP:

Les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) sont quatre scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en Gaz à Effet de Serre (GES) au cours du XXI^e siècle, établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Les RCP comprennent un scénario strict d'atténuation (RCP2,6), deux scénarios intermédiaires (RCP4,5 et RCP6,0) et un scénario d'émissions très élevées de GES (RCP8,5).

Dans ce projet, cinq études de cas ont été définies : Catalonia (Espagne), Ventoux (France), Aïn Snoussi (Tunisie), Castillian Plateau (Espagne) et Slovenska Istra (Slovénie), où le cadre de travail intégré de la résilience sera développé. Ces lieux ont été choisis en fonction des types de forêts, des biens socio-économiques, des scénarios de changement global, des échelles d'étude et des disponibilités des données et modèles en écologie, gestion et économie.

Dans l'évaluation des services écosystémiques, le projet INFORMED impose l'étude de trois services : la production de bois d'œuvre (ou de liège en Tunisie), la séquestration du carbone et la protection contre l'érosion des sols. Ensuite, chaque site d'étude peut choisir des services écosystémiques additionnels suivant les caractéristiques de la région. Pour la région du Ventoux, quatre services supplémentaires ont été définis : la production de bois énergie, l'habitat (biodiversité), le récréatif (pratiques nature) et le sylvo-pastoralisme.

Au sein de ce projet, l'intérêt de ma mission est de réaliser un état des lieux actuel pour les services écosystémiques de séquestration du carbone et de biodiversité. Ce travail a permis de qualifier et quantifier spatialement ces deux services écosystémiques à l'échelle du massif forestier du Ventoux. Le schéma 4 présente la démarche et l'intégration de ma mission dans le projet INFORMED.

Suite à cette cartographie, un travail d'évaluation économique sera réalisé par le LEF (Laboratoire Economique Forestier), à Nancy (AgroParisTech-INRA). Mon étude servira de support de travail pour cette évaluation, fournissant les données d'entrées nécessaires au modèle économique INVEST. Enfin, suivant les scénarios établis (horizons 2030, 2050 et 2100), des perspectives d'évolution des cartes des écosystèmes et des services écosystémiques rendus seront réalisées.

Au final, cette étude permettra d'analyser la résilience des forêts méditerranéennes sous l'angle du maintien des services écosystémiques et de leurs bénéfices économiques. Les résultats de cette étude permettront de comparer différentes options de gestion forestière visant à limiter les effets des changements globaux, suivant différents scénarios de changements.

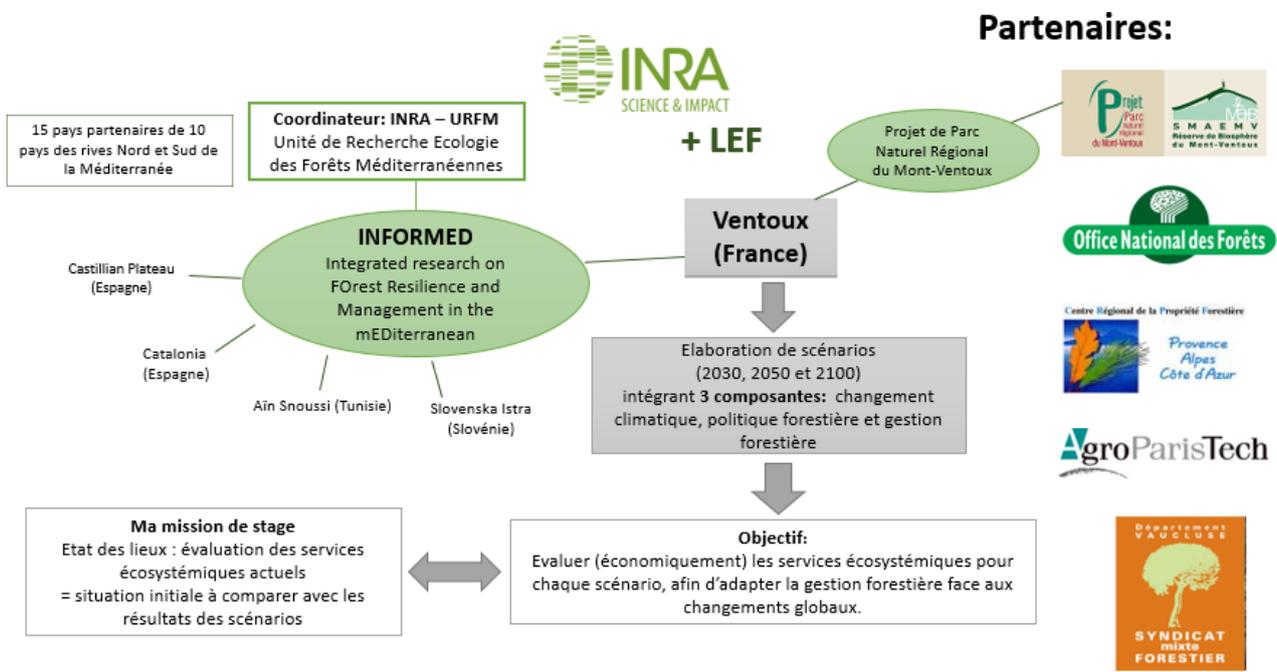


Figure 4 : Présentation du projet INFORMED et de ma mission
Source personnelle

Travail bibliographique

De plus en plus populaire dans la littérature, la notion de services écosystémiques se définit comme étant les « bénéfices que l'homme retire des écosystèmes ». Aujourd'hui, face aux changements globaux, l'identification et l'évaluation des services écosystémiques devient un réel enjeu.

La notion de services écosystémiques

La notion de services écosystémiques est apparue dans les années 1980 sous l'impulsion de biologistes de la conservation de la Nature, tels que Ehrlich et Mooney (1983), afin d'attirer l'attention au niveau mondial sur la perte de biodiversité et la dégradation des écosystèmes. A la fin des années 90, le concept s'est considérablement enrichi grâce aux travaux économiques de Costanza (1997) ou de Daily (1997), avec le développement de l'économie écologique, intégrant notamment les paiements pour les services écosystémiques (évaluation économique). Mais cette notion de services écosystémiques a véritablement pris de l'ampleur suite à la publication du Rapport sur l'Évaluation des Ecosystèmes pour le Millénaire (ou MEA pour Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005)), puis dans un second temps avec plusieurs initiatives récentes telles que la démarche TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), la plateforme IPBES (Intergovernmental Panel on Biodiversity and Ecosystem Services) ou des rapports institutionnels comme celui de la FAO. Maintenant popularisé, ce concept souligne la dépendance du bien-être humain envers les écosystèmes. Il a très vite servi de support théorique à des études sur les relations entre la biodiversité à différentes échelles et les sociétés qui en dépendent. Cette notion de services écosystémiques a permis de développer une nouvelle approche interdisciplinaire où la gouvernance socio-économique et la connaissance des processus environnementaux sont interconnectées (Martinez-Harms et Balvanera, 2012 ; Vihervaara et al., 2010).

La typologie des services écosystémiques

Les services écosystémiques sont définis comme « tous les biens et les services générés par les écosystèmes qui contribuent, directement ou indirectement, au bien-être des humains ».

Les services écosystémiques se répartissent en quatre catégories (Figure 5) :

- les **services de support ou fonctions écologiques**, ne représentent pas des services à proprement parler mais sont la condition nécessaire à la production de toutes les autres fonctions.

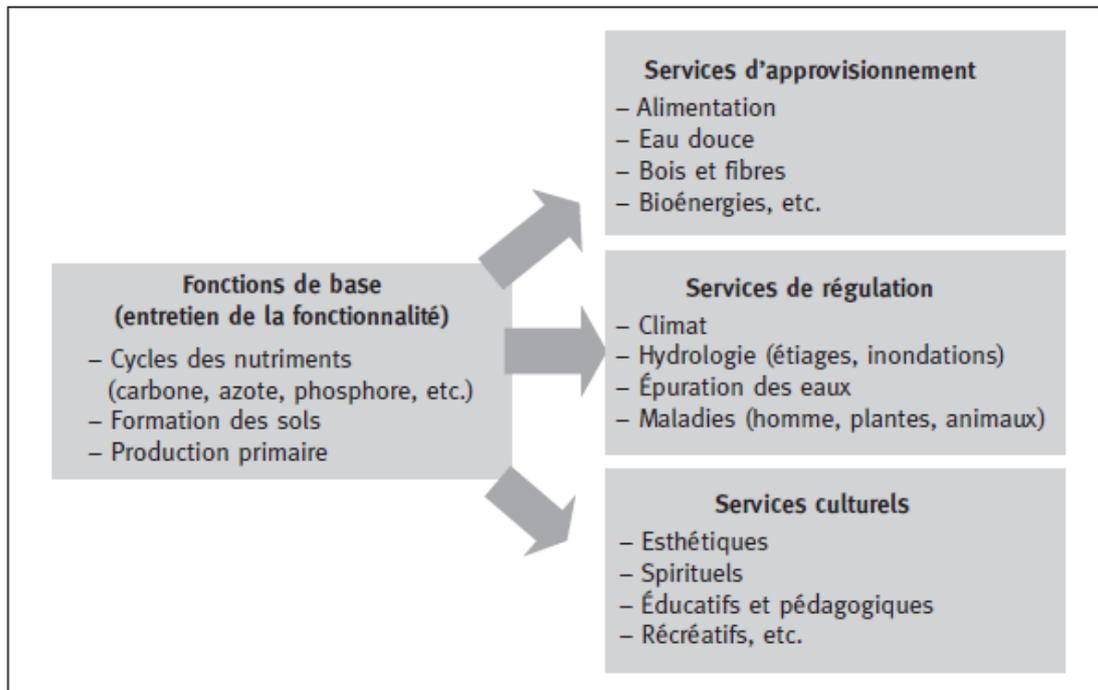


Figure 5 : Classification des services écosystémiques

Source : Millenium Ecosystem Assessment (MEA), 2005

- les **services d’approvisionnement**, représentent tous les biens directement prélevés dans les milieux naturels milieux naturels et cultivés : production de biens (produits agricoles, bois, chasse, pêche, etc.)
- les **services de régulation**, correspondent à des fonctions écologiques dont nous retirons certains bénéfices indirects (régulation des pollutions, des maladies, cycle de l’eau, stabilisation du climat, etc.)
- les **services culturels**, renvoient aux différentes valeurs de non-usage qui peuvent être attribuées aux milieux naturels et cultivés (valeurs récréatives, esthétiques, éducatives, spirituelles ou encore morales)

Dans notre cas, nous avons étudié les services écosystémiques de séquestration du carbone et d’habitat. La séquestration du carbone est considérée comme un service de régulation, alors que l’habitat est un service de support. Etant donné que les services de support sont difficiles à monétariser, il est intéressant d’étudier ces deux services écosystémiques dans le même temps.

Il est important de bien différencier les fonctions écologiques (processus biologiques de fonctionnement et de maintien des écosystèmes) des services écosystémiques (bénéfices retirés par l’homme des ressources naturelles produites par les écosystèmes), comme indiqué sur la figure 6. Le concept de services étant à l’interface entre l’homme et son environnement, l’approche socio-écologique a été proposée comme cadre conceptuel d’étude sur les services écosystémiques.

L’approche socio-écologique : cadre conceptuel d’étude des services écosystémiques

Le concept de système socio-écologique est un système intégré et complexe dans lequel interagissent les humains et la nature. Ce concept insiste sur le fait que les interactions sociales et écologiques sont liées et qu’il est nécessaire de les aborder ensemble pour comprendre et éventuellement gérer le système qu’elles forment (Figure 7). Cette approche socio-écologique a été proposée comme cadre conceptuel dans de nombreuses études (Chapin et al., 2000; Collins et al., 2011; Diaz et al., 2011; Koellner, 2008; MEA, 2005; Stevenson, 2011).

Au sein du projet INFORMED, les forêts méditerranéennes sont considérées comme des modèles de systèmes socio-écologiques (système intégrée couplant l’Homme et la nature) où interfèrent dynamiques écologiques, décisions de gestion et de gouvernance.

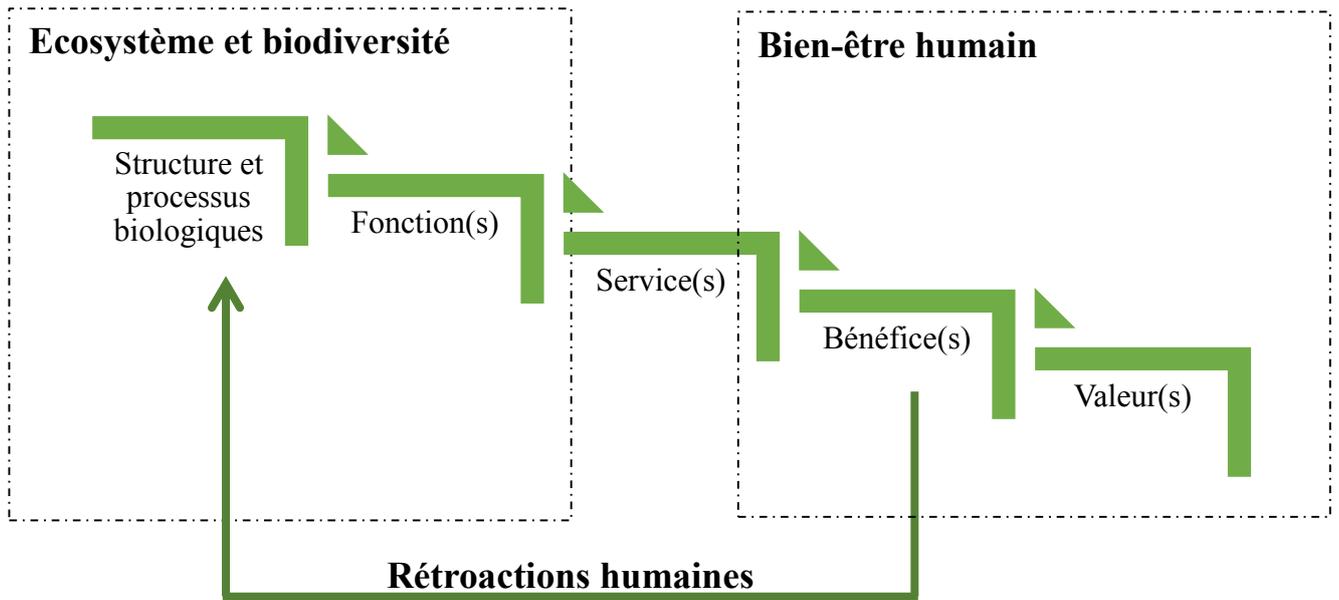


Figure 6 : Chaîne d'interrelations entre l'écosystème et le bien-être humain
 Source personnelle, adaptée de Haines-Young et Potschin, 2010

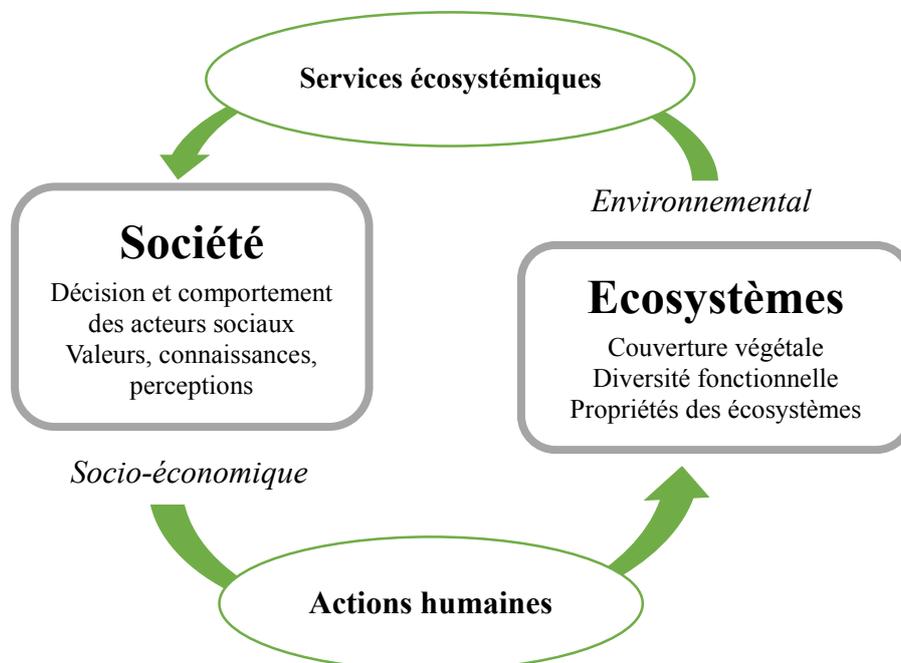


Figure 7 : Cadre conceptuel : système socio-écologique
 Source personnelle, adaptée de Diaz et al. (2011) et Moran et al. (2005)

La figure 8, présentée dans le projet INFORMED, souligne que :

- d'une part, le changement global (réchauffement climatique et activités humaines) modifie le contexte général d'un système socio-écologique au sein duquel la gestion forestière influence la biodiversité et les fonctions de l'écosystème, déterminant les services écosystémiques. Autrement dit, le changement global a des conséquences sur les services écosystémiques des forêts.
- d'autre part, l'évaluation économique des services écosystémiques peut aider le système de gouvernance à choisir les futures options de gestion les plus appropriées.

L'évaluation économique des services écosystémiques

Avec l'étude des services écosystémiques, la valeur des écosystèmes a été réduite aux seuls bénéfices qu'elle procure aux êtres humains. Mais aujourd'hui, la tendance est à l'évaluation économique de cette valeur et à l'élaboration d'outils de conservation fondés sur ce type d'évaluation. Cette évaluation économique permet de faciliter la mise en place de nouveaux outils de conservation, se basant sur les mécanismes de marché d'offre et de demande (calcul de coût-bénéfice).

Dans ce type de travail, l'objectif est de donner aux décideurs publics et privés les éléments nécessaires pour intégrer la protection de la biodiversité à la définition de leurs priorités d'action par une évaluation du poids des biens et services rendus par les écosystèmes dans le développement de l'activité économique et du bien-être humain. Autrement dit, la notion de services écosystémiques a permis de relégitimer la protection de l'environnement, en démontrant la richesse et le bien-être humain que les écosystèmes rendent.

Néanmoins, outre la justification de la conservation de la biodiversité, le concept de services écosystémiques et de leur évaluation économique ont un intérêt beaucoup plus large. En effet, l'évaluation économique est aussi et surtout un moyen permettant de comparer quantitativement des services écosystémiques, quelquefois très différents, dans la même unité. Dans ce sens, l'évaluation économique est un outil pour la gouvernance du système, permettant de choisir les meilleures options de gestion pour le futur.

Pour conclure, l'évaluation économique permet d'orienter les décisions politiques concernant la protection et la gestion des espaces naturels.

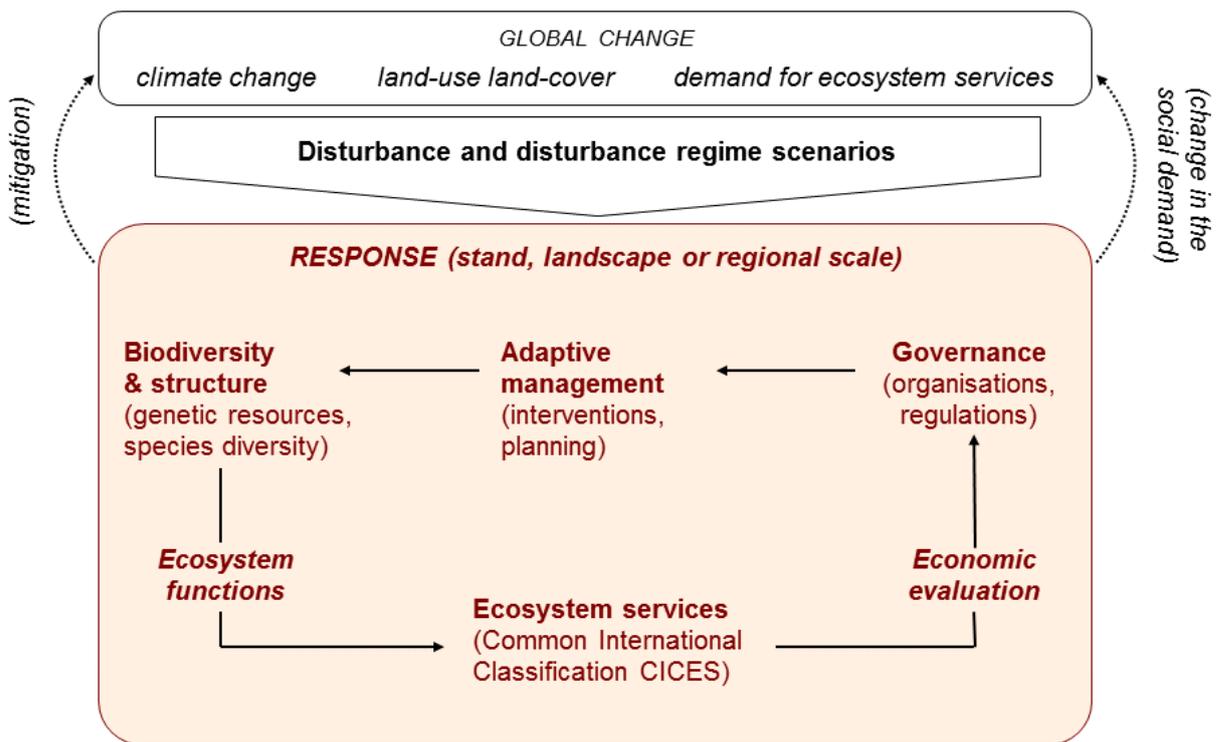


Figure 8 : Schéma conceptuel, approche socio-écologique (projet INFORMED)

Source : <http://www6.inra.fr/informed-foresterra/Projet-en-bref2/Schema-conceptuel>

Présentation de la zone d'étude² : le Ventoux

La zone choisie pour l'étude correspond au contour du projet de Parc Naturel Régional (PNR) du Mont Ventoux. Culminant à 1 912 mètres, le mont Ventoux est le plus haut sommet vaclusien (Figure 9). Il se situe dans le nord du département de Vaucluse, en région Provence Alpes Côte d'Azur. Surnommé le Géant de Provence, ce massif est un symbole pour la Provence, en raison de ses particularités géographiques, topologiques, géologiques et climatiques. Le site a un fort attrait touristique, accueillant chaque année plus de 550 000 visiteurs.

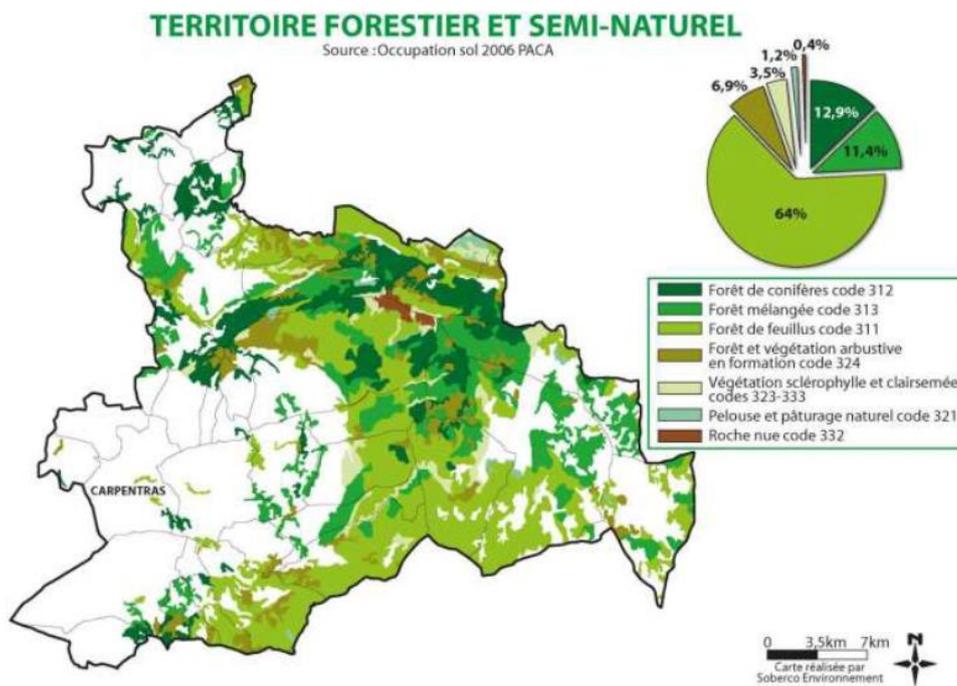
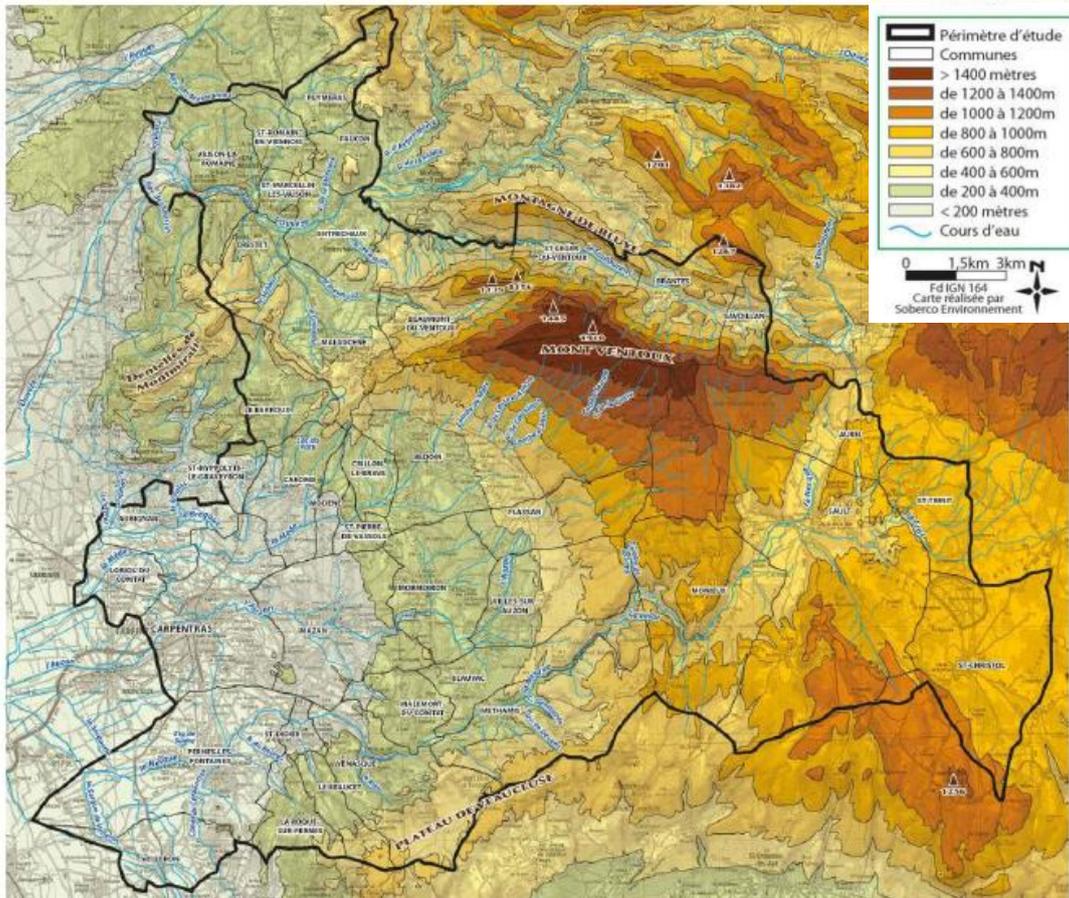
Généralités

Le projet de PNR concerne 40 communes du Vaucluse, atteignant une superficie totale de 987 km². De façon contrastée, le territoire du Ventoux est divisé en trois zones distinguées : environ **57,7 %** du territoire est occupé par des milieux forestiers et semis-naturels, particulièrement autour du massif du Ventoux et des Monts de Vaucluse. 33,7 % est occupé par les terres agricoles (principalement vignes, vergers, céréales) à l'ouest du territoire et 8,6 % du territoire est artificialisé, principalement dans l'aire urbaine de Carpentras et de Vaison-la-Romaine (Annexe I).

Les milieux forestiers sont répartis de manière assez hétérogène sur les différentes entités du territoire (Figure 10). Dans la plaine, les zones urbaines et agricoles ne laissent que peu de place aux milieux forestiers. Seuls quelques forêts subsistent, au niveau des affleurements calcaires au pied des Dentelles de Montmirail, de la plaine comtadine et des collines du pays vaisonnois. A partir d'environ 300 mètres d'altitude, les forêts s'installent sur les versants du Ventoux et sur les Monts de Vaucluse.

Néanmoins, ce paysage riche et diversifié, caractéristique de la Provence, est le fruit d'une histoire forestière tourmentée. En effet, ravagées par les activités humaines (élevage et production de bois principalement) depuis le Moyen-Age, les forêts du Ventoux ont fait l'objet d'un large programme de reboisement, dès 1861, à la suite du vote d'une loi destinée au Restauration des Terrains de Montagne (RTM). Ces plantations se sont poursuivies au XXème siècle dans un but de restauration forestière et de lutte contre l'érosion des sols, puis dans un second temps, dans un objectif de production ligneuse. Aujourd'hui, sur le territoire, peu d'espaces sont susceptibles d'être colonisés par les forêts, tant la politique de reboisement a été menée avec vigueur et a dynamisé les processus

² Le terme « zone d'étude » correspond uniquement à la composante forestière du projet du Parc Naturel Régional du Mont Ventoux.



d'expansion naturelle des forêts. Ces dix dernières années, aucune évolution significative des superficies forestières n'a été observée, seule la maturation des forêts et leur composition ont évolué.

Le Ventoux, ayant donc fait l'objet des opérations RTM (Figure 11), est une zone forestière dominée par les forêts publiques, gérées par l'Office National des Forêts (ONF). Toutefois, sur le territoire du projet de Parc, environ 55% de la surface forestière (soit environ 30 000 ha) relève d'un régime privé. Ces forêts privées sont situées en périphérie du massif, aux abords des zones habitées et cultivées, sur le bas des versants et dans les piémonts ouest. A l'est du territoire, les propriétés sont de grandes surfaces, majoritairement supérieures à 25 ha. Au contraire, à l'ouest, dans le Comtat Venaissin, les forêts privées sont de petites tailles et très morcelées, peu favorable à la gestion sylvicole. Concilier une exploitation des forêts avec la sauvegarde de ces écosystèmes est le principal défi d'une gestion durable des forêts.

Pour étudier les forêts du Ventoux, nous avons travaillé, avec le logiciel de Système d'Information Géographique QGIS© Version 2.14, à partir de bases de données, sous forme de différentes couches : Modèle Numérique de Terrain (MNT) et cartes de végétation notamment. Ces cartographies nous permettent de décrire les différents types de formation végétale forestières et/ou naturelles présents sur la zone d'étude.

Présentation de la base de données : Carte de végétation, BD FORET®

Aujourd'hui, bien qu'il existe de nombreuses sources présentant une carte de végétation de la zone du Mont Ventoux, nous avons fait le choix de travailler avec les données forestières de l'Institut National de l'information géographique et forestière³ (IGN).

Zoom sur l'IGN, l'Inventaire Forestier National

Cet institut public est chargé de l'inventaire permanent des ressources forestières nationales. Les données que collecte l'inventaire forestier permettent de connaître l'état, l'évolution dans le temps et les potentialités de la forêt française. Jusqu'en 2004, l'inventaire forestier était exécuté de manière cyclique dans chaque département administratif, tous les 12 ans environ. Depuis, l'IGN procède à l'inventaire selon un sondage spatial systématique annuel sur l'ensemble de la France.

La cartographie forestière (BD FORET®), produite par l'IGN, offre une représentation spatiale de la forêt, des espaces naturels et semi-naturels (landes, garrigues, maquis, pelouses alpines, etc...). Cette base de données est considérée comme le référentiel des espaces forestiers. Elle permet

³ Depuis 1^{er} janvier 2012, l'Inventaire National des Forêts (IGN) a fusionné avec l'Institut Géographique National (IGN) au sein de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN).

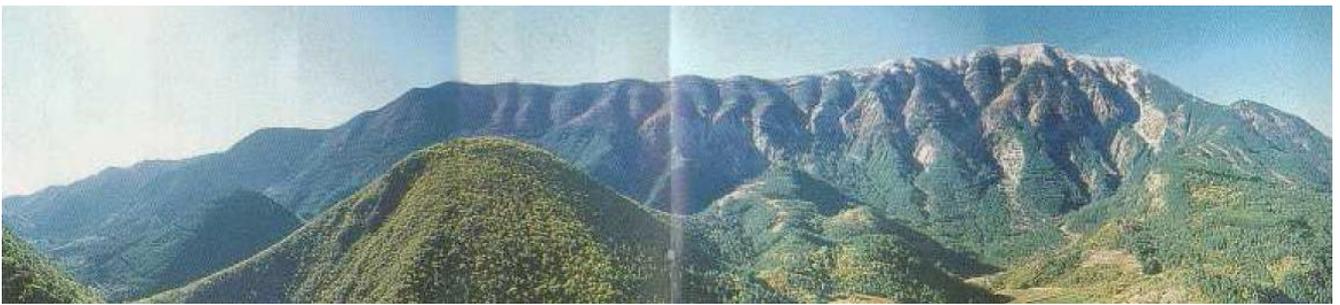
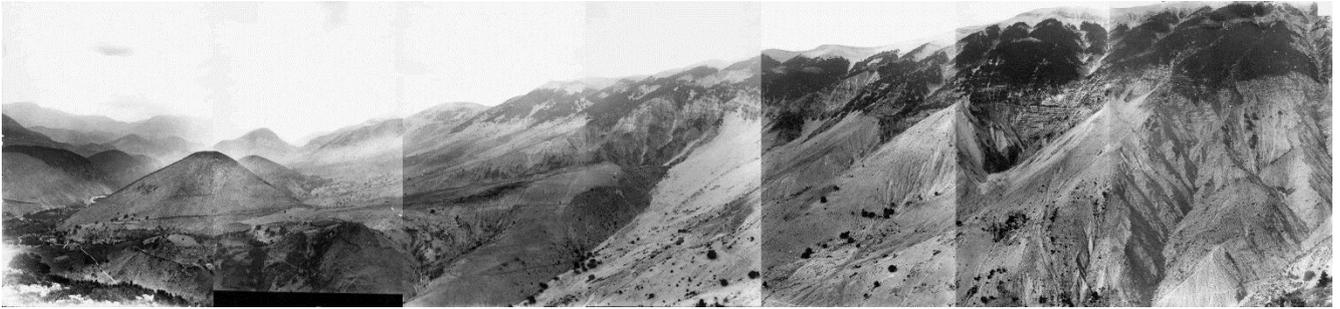


Figure 11 : Massif du Mont Ventoux à la fin du XIXème siècle (en haut) et aujourd'hui (en bas)
Source : ONF

de connaître les peuplements forestiers, d'en estimer leur ressource et de les localiser sur le territoire. La BD FORET, en parfaite cohérence avec la couche végétation de la BD TOPO® du RGE (Référentiel Géographique à Grande Echelle), est réalisée grâce à l'utilisation semi-automatique d'outils d'analyse d'images, de Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de contrôles sur le terrain. La production de l'inventaire est établie par photo-interprétation d'images en infrarouge couleurs de la BD ORTHO®. La densité de végétation et la composition sont renseignées pour chaque espace forestier supérieur à 0.5 ha. La nomenclature repose sur quatre niveaux : la couverture du sol, la densité du couvert, la composition du peuplement et les essences.

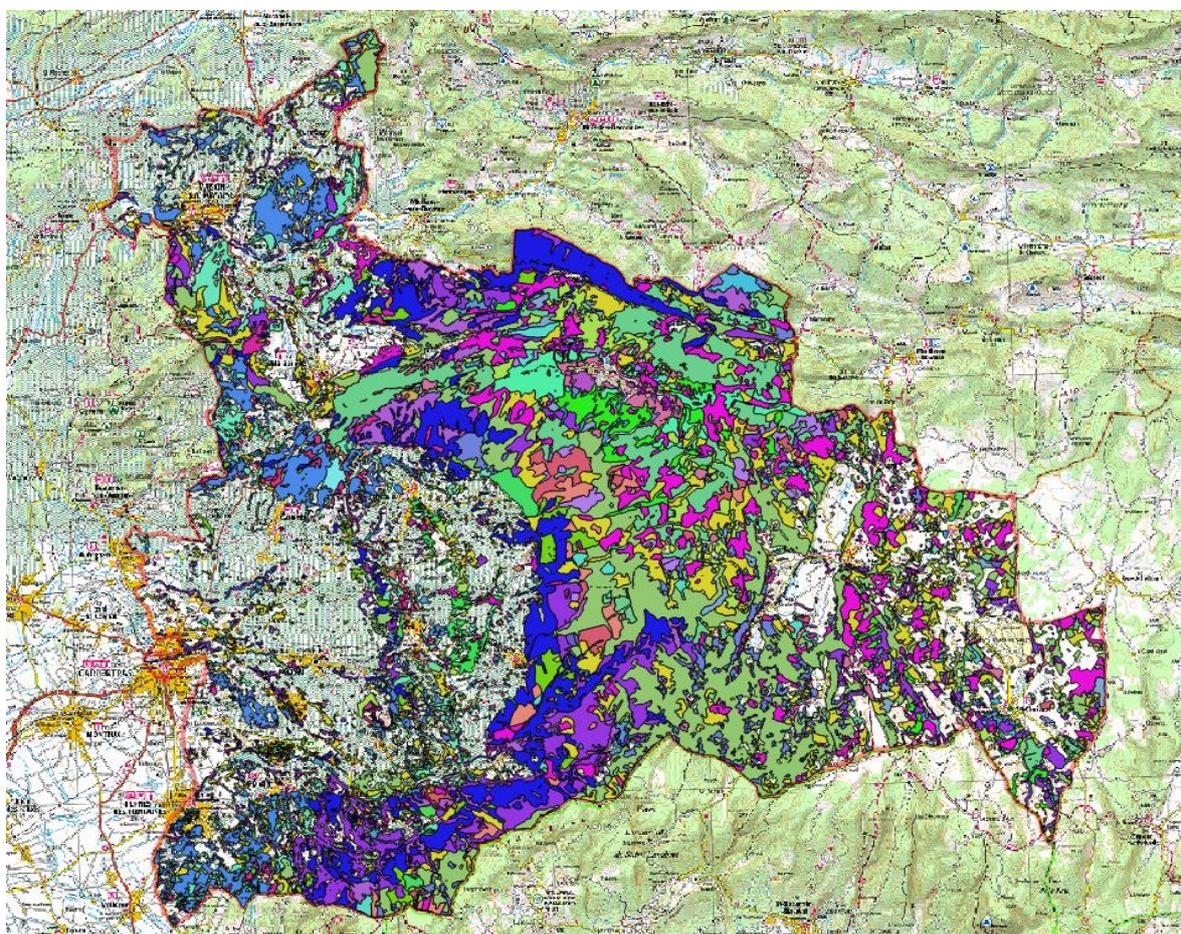
Ces dernières années, un partenariat entre l'IGN, les Communes forestières, le Centre Régional de l'Information GÉographique de la région PACA (CRIGE) et les membres de son pôle forêt a permis de définir une nomenclature "enrichie", par rapport à la nomenclature "standard" de l'IGN, répondant ainsi aux spécificités méditerranéennes. La nouvelle nomenclature est déclinée en 75 postes, dont 53 spécifiques à la forêt méditerranéenne :

- Ajout d'essences régionales en forêt fermée
- Précision des essences forestières en forêt ouverte
- Distinction des types de landes

Cette cartographie forestière peut donc répondre à de nombreuses problématiques, telles que la gestion des espaces, la valorisation forestière, la biodiversité, la gestion des risques, l'aménagement du territoire, etc. Dans notre cas, nous nous sommes servis de cette cartographie (version 2_CRIGE PACA) comme support de travail (Figure 12).

Les espaces décrits par la BD FORET® version 2 sont essentiellement les espaces naturels et semi-naturels, tels que les :

- Forêts fermées, couvert arboré supérieur à 40 %
- Forêts ouvertes, couvert arboré compris entre 10 % et 40 %
- Landes (maquis, garrigues ...), couvert des ligneux bas supérieur à 25 %
- Formations herbacées (pelouses alpines, pelouses pastorales...), couvert des ligneux bas inférieur à 25 %.



- Forêt fermée de chêne pubescent
- Forêt fermée de chêne vert
- Forêt fermée mélangée d'autres feuillus et conifères
- Forêt fermée de plusieurs feuillus sans qu'une essence ne soit pure
- Forêt fermée mélangée d'autres pins et feuillus
- Forêt fermée de pin laricio ou pin noir pur ou en mélange
- Forêt fermée de pin d'Alep
- Forêt fermée mélangée de pin d'Alep et feuillus
- Forêt ouverte de chêne vert
- Forêt fermée de plusieurs pins sans qu'une essence ne soit pure
- Forêt ouverte de chênes décidus
- Forêt fermée de hêtre
- Forêt ouverte d'autres feuillus
- Forêt fermée de pin à crochets ou pin cembro pur ou en mélange
- Forêt fermée mélangée de chêne vert et conifères

Figure 12 : Carte de végétation (BD FORET® version 2) de la zone d'étude, avec les 15 premiers libellés.

Données IGN, QGIS©

Sur la zone du Ventoux, il y a 85 % de forêts fermées et 11 % de forêts ouvertes. Les 4 % restants représentent les landes et les formations herbacées. Ces espaces sont décrits suivant 55 libellés⁴ présentés en annexe II. De ce fait, près de 30 % des espaces forestiers étudiés sont des forêts fermées de Chêne pubescent ou de Chêne vert (Figure 13). Les 10 % qui suivent représentent des forêts fermées mélangées d'autres feuillus (hors Chêne vert) et conifères. Ces forêts mélangées peuvent être précisées suivant un gradient altitudinal.

Pour notre étude, nous avons évalué chacun des types d'espaces (forêts fermées, forêts ouvertes, landes et formations herbacées) décrits dans la base de données BD FORET®, mais pour un côté pratique, nous avons regroupé ces espaces sous le terme : **forêt**.

La végétation de la zone du Ventoux : les étages bioclimatiques

En complément, nous avons réalisé un travail sous QGIS©, afin de définir des classes de végétation suivant l'altitude, l'exposition et la pente. Grâce à ce travail, nous avons pu attribuer un nouveau champ à la carte initiale de l'IGN, précisant l'étage de végétation (suivant l'altitude et l'exposition). Ce nouveau champ nous permettra d'affiner certain type de végétation défini par l'IGN.

En effet, sur la zone du Ventoux, il existe un fort gradient altitudinal qui offre un étagement bioclimatique surprenant. Après la plaine, cinq réels étages se succèdent (Figure 14) :

- **La plaine** (0-300m), présentant une grande hétérogénéité dans la composition forestière, les essences principalement sont le pin d'Alep, le chêne vert et le chêne pubescent.

- **L'étage méditerranéen** (adret : 300-800m / ubac : 300-600m), surnommé « étage du chêne vert ». Cet étage sous influence méditerranéenne voit la prépondérance du chêne vert typique des forêts méditerranéennes, résistant aux fortes chaleurs et aux périodes de sécheresse. Dans le cortège floristique du chêne vert se trouvent le pin d'Alep et le chêne Kermès, amateurs de chaleur et donc plus abondants dans les altitudes inférieures de cet étage.

- **L'étage supra-méditerranéen** (adret : 800-1200m / ubac : 600-1000m), surnommé « étage du chêne blanc ». Le chêne blanc, ou chêne pubescent, s'épanouit dans des milieux plus frais et humides que le chêne vert, ce qui explique sa présence à cet étage bioclimatique. Le pin noir et le pin sylvestre,

⁴ Le libellé correspond au type de formation végétale forestière et/ou naturelle.



Figure 13 : Diagramme des différents types de végétation présents sur la zone d'étude
Données IGN

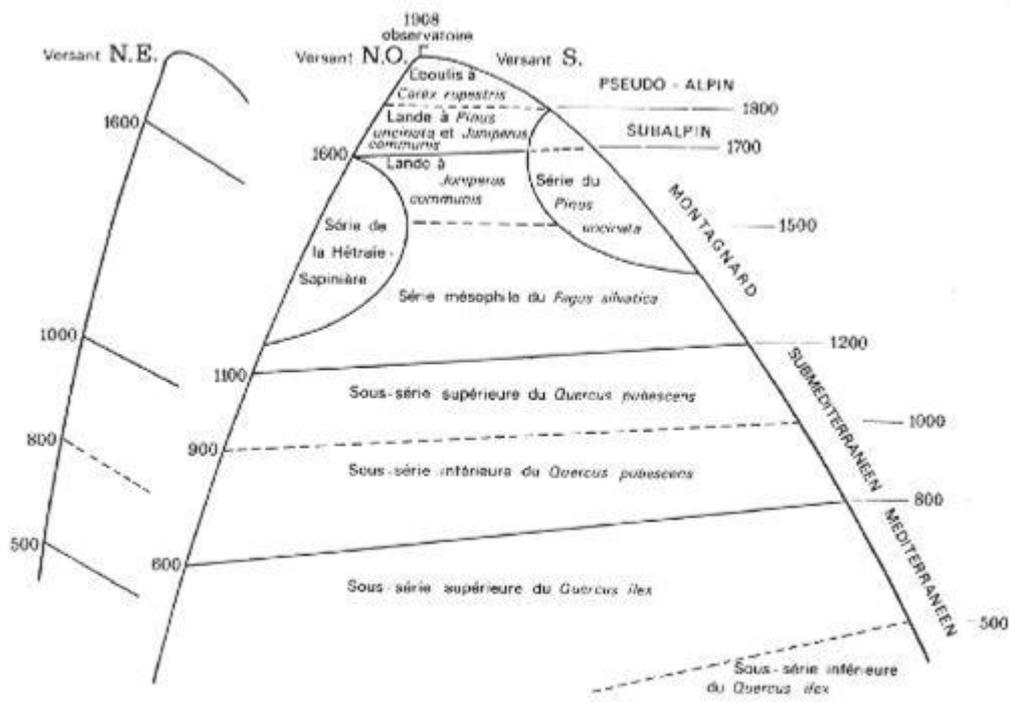


Figure 14 : Schéma de l'étagement bioclimatique du Mont Ventoux

Source : <http://www.geographie.ens.fr>

dont la présence se renforce avec l'altitude, accompagnent la présence du chêne pubescent et se substituent ainsi progressivement au pin d'Alep. Enfin, notons la présence remarquable du cèdre d'Atlas, introduit par les campagnes de reforestation des années 1860 entre 800 et 1000m, et qui forme la plus grande cédraie de France.

- **L'étage montagnard** (adret : 1200-1700m / ubac : 1000-1600m), surnommé « étage du hêtre ». Le hêtre commence à s'implanter dans les combes de l'étage précédent, pour finir par supplanter le chêne pubescent aux altitudes supérieures à 1000m. Cet étage se divise en deux sous étages :

- le **montagnard inférieur** (adret : 1200-1400m / ubac : 1000-1200m) caractérisé par la multiplication du pin sylvestre.

- le **montagnard supérieur** (adret : 1400-1700m / ubac : 1200-1600m) où le pin à crochets se substitue progressivement au pin sylvestre.

- **L'étage subalpin** (adret 1700-1800m / ubac : 1600-1800m), surnommé « étage du pin à crochets ». Les pins à crochets forment des bois de plus en plus clairs, constitués d'individus malmenés par la rudesse des conditions : couverture neigeuse, moyennes annuelles oscillant entre 4 et 6°C, avec des maximales estivales dépassant péniblement les 10°C.

- **L'étage pseudo-alpin** : Les pins à crochets épars et rachitiques laissent peu à peu place à une calotte pierreuse dénuée de toute végétation permanente, donnant au sommet du Ventoux son aspect lunaire. Cet environnement peu clément voit toutefois la prolifération de nombreuses fleurs au printemps.

Ainsi, le Mont Ventoux nous offre une richesse floristique impressionnante, déclinée en différents étages définis principalement par la température, mais aussi par la nutrition minérale et la disponibilité en eau absorbable. La carte ci-jointe, réalisée sur QGIS©, représente ces étages bioclimatiques sur la zone d'étude (Figure 15).

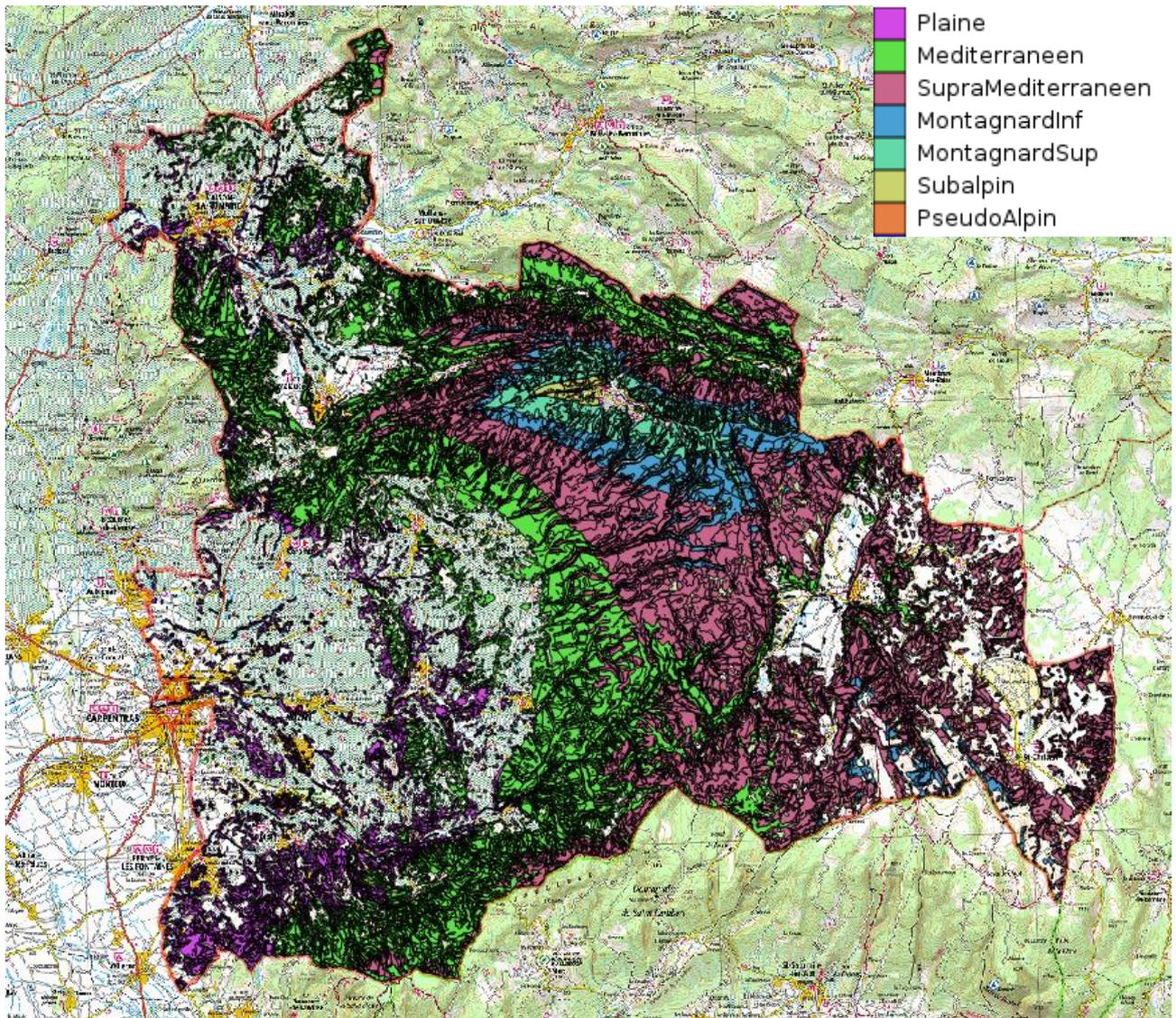


Figure 15 : Carte de végétation avec les étages bioclimatiques

Données IGN, QGIS©

Evaluation du service de séquestration du carbone

La séquestration du carbone par les écosystèmes forestiers est devenue en quelques années un enjeu majeur de la politique environnementale internationale, dans l'optique d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre. En effet, de par leur rôle de fixation et de stockage de carbone, les forêts contribuent fortement à la régulation du climat.

Zoom sur le changement climatique

Le changement climatique est dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, engendrées par les activités humaines, modifiant la composition de l'atmosphère de la planète. Plusieurs gaz à effet de serre voient leur concentration augmentée, mais le dioxyde de carbone (CO₂) est de loin le plus important.

Le rôle des écosystèmes forestiers :

Tous les végétaux, y compris les arbres et les autres plantes forestières, utilisent la photosynthèse pour absorber le CO₂ et le transformer en différents composés organiques qui constituent le matériel végétal comme le bois, l'écorce les feuilles ou les racines. En raison de la longue durée de vie de la plupart des arbres et de leurs dimensions relativement importantes, les forêts sont de véritables réserves de carbone.

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et d'autres comités scientifiques estiment que les forêts absorbent jusqu'à 25% du CO₂ atmosphérique. Les forêts emmagasinent de 20 à 100 fois plus de carbone par unité de surface que les terres cultivées. Lorsque les forêts et les autres écosystèmes sont perturbés et que les plantes meurent, le CO₂ est à nouveau libéré dans l'atmosphère. Le GIEC estime que 10 à 20 % du CO₂ libéré provient du changement d'utilisation des terres, en particulier de la dégradation et de la diminution de la forêt tropicale. Par conséquent, la conservation du carbone dans les forêts existantes (ou du moins la réduction du rythme de libération de CO₂) peut réduire de façon significative les émissions du gaz à effet de serre.

En même temps, l'accroissement de la quantité de CO₂ absorbée par les forêts, grâce à la plantation ou à la replantation d'arbres, peut accélérer l'absorption du CO₂, réduisant ainsi la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Les études antérieures :

De nombreuses études ont été menées afin d'évaluer la séquestration du carbone dans les écosystèmes forestiers. Au niveau national, Dupouey (2000) évaluait que les forêts françaises séquestraient 2 000 MtC (millions de tonnes de carbone). Le carbone séquestré par les forêts est réparti entre quatre grands compartiments : la biomasse aérienne et racinaire, le sol et la matière organique morte.

La figure 16 montre que, dans un écosystème forestier, plus de la moitié (57 %) du stock de carbone est compris dans la litière et les sols (jusqu'à 30 cm de profondeur), et seulement 43 % dans la biomasse (tiges, racines et feuilles). Dans la littérature, suivant les sources bibliographiques, ces pourcentages peuvent varier en fonction des types de peuplements pris en compte, de leur âge, des conditions de station, etc.

Toujours au niveau national, le projet CARBOFOR a permis de comparer les réponses des écosystèmes à un scénario climatique régionalisé 1960-2100 en termes de cycle du carbone, de biogéographie et de vulnérabilité aux pathogènes majeurs. Le Laboratoire d'Etudes des Ressources Forêt-Bois (LERFoB) de l'INRA, ainsi que l'IGN ont notamment proposé une nouvelle méthode de calcul des stocks de carbone dans la biomasse ligneuse à l'échelle nationale.

A plus petite échelle, dans le cadre du projet FORSEE, Colin (2004) a travaillé sur l'évaluation des stocks et des flux de carbone de l'écosystème forestier en Aquitaine. Son étude a été réalisée à partir des données d'inventaires de l'IGN et des résultats du projet CARBOFOR.

A l'échelle de la zone d'étude du Ventoux, notre objectif est de mettre au point une méthode fiable et reproductible d'évaluation de la séquestration du carbone par les forêts. Il s'agit d'estimer les stocks de carbone pour chacun des compartiments de l'écosystème forestier, à partir des données de l'IGN. Ce travail est une première approche, permettant de faire l'état des lieux de la situation actuelle et de recenser les points de blocages, afin d'améliorer la méthodologie.

L'objectif de ce travail est de réaliser une carte représentant le stock de carbone moyen, pour chaque type de végétation.

Matériels :

Pour cette étude, bien que l'INRA possède ses propres données d'inventaire sur la zone du Ventoux, nous avons fait le choix de travailler uniquement avec les données de l'IGN. Plusieurs différences entre l'IGN et l'INRA expliquent ce choix, notamment en termes de :

- Méthode d'inventaire. Pour l'IGN, l'inventaire est fait selon une démarche d'échantillonnage, de façon aléatoire, alors qu'à l'INRA, les placettes sont choisies selon leurs caractéristiques.
- Méthode de calcul des volumes. Pour l'IGN, le volume est calculé à partir de tarifs de cubage établis pour différentes espèces, à deux ou trois entrées : circonférence à 1,30 m, hauteur totale (et hauteur de découpe). Ces tarifs de cubage sont confidentiels.

Ces différences pourraient entraîner des biais dans nos résultats, si nous considérons les données des deux instituts. L'IGN ayant davantage d'arbres inventoriés, nos calculs sont basés sur leurs données d'inventaire. De plus, étant donné que nous nous servons de la cartographie réalisée par l'IGN (BD

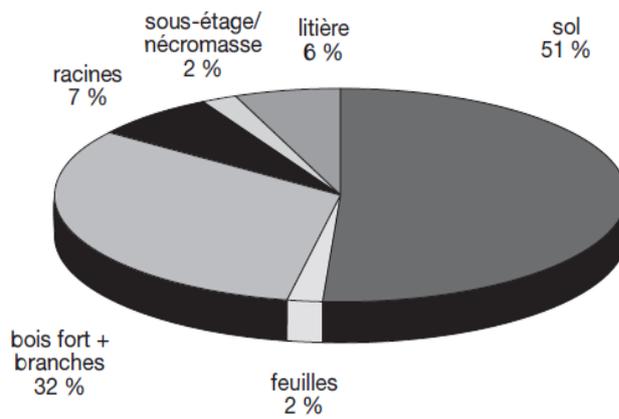


Figure 16 : Répartition du carbone des forêts françaises dans les différents compartiments

Source : DUPOUEY J-L., PIGNARD G., BADEAU V. et al., *Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises*, 2000

FORET® version 2) comme base de travail, nous avons jugé cohérent de travailler avec les données d'inventaires du même institut. Néanmoins, une fois la méthodologie définie et testée, il pourrait être intéressant de valider ce travail sur une zone plus précise et de réaliser ce travail avec des données d'inventaires supplémentaires.

Utilisations des données, IGN : méthode d'inventaire⁵

L'échantillonnage par l'IGN des forêts s'effectue à plusieurs niveaux emboîtés (Figure 17). Le premier basé sur la photo-interprétation aboutit à la BD FORET® décrit précédemment. Les autres niveaux font l'objet de relevés de terrain. Le niveau 2 correspond au levé « forêt » issu des couvertures de sol boisé (fermée, ouverte ou peupleraie) que l'on dénommera ci-dessous « données d'inventaire » de l'IGN.

Les points d'inventaires (placettes) sont repérés par leurs coordonnées géographiques et leur situation sur la photographie aérienne. Ces placettes font l'objet de nombreuses observations concernant le peuplement forestier, la végétation et les conditions stationnelles (pente, exposition, sol, etc.). Sur chaque placette inventoriée, l'équipe de l'IGN effectue également des mesures dendrométriques sur les arbres (hauteur, diamètre, etc.). Le volume de bois fort est calculé par l'IGN pour les arbres vivants et morts, suivant les tarifs de cubage établis pour différentes espèces.

Les tiges dont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) est inférieur à 7,5 cm ne sont pas recensées. Les surfaces des placettes varient suivant la taille des arbres recensés :

- les arbres de diamètre supérieur à 37,5 cm (gros bois et très gros bois, GB) dans un rayon de 15m
- les arbres de diamètre 22,5-37,5 cm (moyens bois, MB) dans un rayon de 9m
- les arbres de diamètre 7,5-22,5 cm (petits bois, PB) dans le rayon de 6 m

Le tableau 1 ci-joint résume les informations liées aux arbres (vivants et morts) inventoriés par l'IGN, néanmoins les différents types de données disponibles sont détaillés dans l'annexe III. Nous supposons que les inventaires réalisés par l'IGN, entre 2005 et 2014, sont représentatifs de la zone d'étude. Les données brutes sont téléchargeables sur le site de l'IGN : <http://inventaire-forestier.ign.fr>.

Au cours de cette étude, nous avons travaillé sur le logiciel libre de Système d'Information Géographique QGIS© Version 2.14. Nous avons également utilisé la base de données CARMEN (CARTographie du Ministère de l'Environnement) et les fonds de cartes IGN.

⁵ Des informations complémentaires sont disponibles sur le site de l'IGN <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/140916-2p-newmetho.pdf>

Méthode : Calcul du stock de carbone

Le carbone, étant réparti dans quatre principaux compartiments, nous présenterons la démarche indépendamment pour chacun des compartiments.

Carbone stocké dans la biomasse hors sol et en sous-sol

Le terme biomasse correspond au poids sec (matière sèche) constant pour un séchage à 65°C. La biomasse des arbres s'entend comme la somme de la biomasse aérienne et de la biomasse racinaire.

- La biomasse hors sol (aérienne) représente la biomasse ligneuse (tronc + branches) et la biomasse des feuilles.
- La biomasse en sous-sol (racinaire) correspond à toutes les racines (fines incluses)

- 1)** Dans un premier temps, nous avons ramené le volume calculé (V , en m^3) par l'IGN pour chaque arbre, à un volume par unité de surface (V' , en m^3/ha). Ce calcul a été fait en tenant compte de la surface de la placette suivant le type de bois (PB, MB et GB), vu précédemment.

$$V' = \frac{V}{S} \times 10\,000$$

Surface d'un cercle, formule : $S = \pi R^2$ (en m^2). R est le rayon de la placette considérée, exprimé en m.

- 2)** Pour chaque arbre inventorié, nous avons ensuite calculer le stock de carbone dans la biomasse (aérienne et racinaire) par unité de surface.

Pour cela, deux approches sont proposées pour estimer le stock de C d'un arbre à partir des données d'inventaire (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, 2003), l'une à l'aide d'équations allométriques et l'autre de facteurs d'expansion. Nous avons choisi la seconde méthode requérant uniquement le volume de bois calculé par l'IGN.

En utilisant la méthode des facteurs d'expansion, nous faisons l'hypothèse, d'une part, que le bois des troncs contient une large part de carbone et, d'autre part, que la biomasse des branches et des racines est proportionnelle à celle des troncs.

La formule appliquée, ainsi que les données d'entrée nécessaires pour le calcul sont présentées ci-joint.

Formule, calcul du stock de carbone :

- **Dans la biomasse aérienne (tige + branches) : $C = V' \times D \times tC \times (1 + FEB)$**
- **Dans la biomasse racinaire : $C = V' \times D \times tC \times FEB$**

Où C est la masse de carbone (en kg/ha)

V' est le volume (en m³/ha)

D est la densité du bois (en kg/m³)

tC est le taux de carbone moyen (sans unité), soit 0,475 (Source : Données génériques, CARBOFOR)

FEB est le facteur d'expansion des branches (sans unité)

Dans notre cas, nous avons utilisés des facteurs d'expansion génériques provenant d'une recherche bibliographique. Nous nous sommes appuyés sur les synthèses de Cannell (1982) et Vogt et al. (1996). Nous retiendrons donc comme facteur d'expansion branches 1,25 pour les feuillus quelques soit leur âge, 1,43 pour les jeunes conifères et 1,16 pour les conifères âgés (en se basant sur les valeurs médianes) et 1,24 comme facteur d'expansion racines.

Le tableau 2 présente les densités de bois que nous avons utilisées pour le calcul.

Pour le carbone des feuilles, nous avons fait un calcul indépendant pour chacune des essences à partir des données de l'INRA. Nous avons fait l'hypothèse que pour un arbre donné son stock de carbone dans les feuilles équivaut à celui dans les fines racines.

3) Ensuite, nous avons sommé le stock de carbone (aérien et racinaire indépendamment) par essence et par placette IGN. Etant donné que sur le Mont Ventoux, les peuplements sont rarement purs, la démarche se complique. Pour contrer ce problème méthodologique et pouvoir extraire les stockages de carbone par espèce, nous avons ramené nos valeurs de stock de carbone à une surface terrière de 100% (correspondant à un peuplement pur). Enfin, pour chaque espèce, nous avons fait la moyenne des valeurs de stock de carbone (ramenée à 100%) de toutes les placettes présentant cette espèce. Le calcul est détaillé en annexe IV, avec l'exemple du Cèdre.

Il est à noter que plus le nombre de placettes est important, plus le résultat est fiable (n placettes permet d'avoir n valeurs pour le calcul de la moyenne).

4) La dernière étape consiste à attribuer pour chaque type de végétation défini par l'IGN, une valeur de stock de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire. Pour ce faire, nous avons repris les définitions de la nomenclature de l'IGN afin de déterminer les proportions des essences dans les différents types de végétation.

Pour les forêts fermées « pures », n'ayant qu'une espèce prépondérante avec un taux de couvert supérieure à 75 %, nous avons attribué la valeur moyenne pour l'espèce considérée (calculée précédemment).

Pour les forêts fermées « mélangées », nous avons attribué la proportion de 62,5 % pour l'espèce (ou la famille d'espèce) majoritaire et 37,5 % pour le reste. Ces proportions ont été

ESSENCE	DENSITE DU BOIS
CHENE PUBESCENT	550
CHENE VERT	840
HETRE	649
PIN SYLVESTRE	502
PIN NOIR D'AUTRICHE	440
PIN A CROCHETS	598
PIN D'ALEP	545
SAPIN PECTINE	490
CEDRE DE L'ATLAS	529
AUTRES ESSENCES (FEUILLUS) *	546
AUTRES ESSENCES (CONIFERES) *	438

** Source : Données génériques, CARBOFOR*

Tableau 2 : Densités du bois par espèce, exprimées en kg/m³

Source : INRA-URFM

déterminées à partir de la nomenclature de l'IGN, spécifiant un taux de couvert compris entre 50 et 75 % pour l'espèce (ou la famille d'espèce) majoritaire.

Par ailleurs, nous avons précisé certaines « forêts mélangées » de type autres feuillus et conifères, autres pins et feuillus ... grâce aux étages de végétation réalisés. En effet, certaines essences sont spécifiquement inféodées à des étages bioclimatiques :

- Plaine + Méditerranéen : Pin d'Alep + Chêne vert
- Supra-méditerranéen : Pin sylvestre, Pin noir, Cèdre + Chêne pubescent
- Montagnard Inférieur : Pin sylvestre + Hêtre
- Montagnard Supérieur + : Pin à crochets + Hêtre

Il y a initialement 55 types de végétation décrit par l'IGN, mais avec les précisions apportées, nous obtenons 74 classes de végétation sur la zone d'étude.

Carbone stocké dans la matière organique morte

La matière organique morte regroupe tous les bois morts et la litière. Dans notre cas, le carbone stocké dans la litière est comptabilisé avec le sol.

Dans cette partie, il est important de distinguer :

- Le bois mort sur pied : arbre ne présentant aucun signe de vie au-dessus de 1,30 m, et toujours sur pied, cassé ou non au niveau de son tronc ou de son houppier.
- Le chablis : arbre déraciné sous l'action de différents agents naturels (vent, foudre, neige, chute d'un autre arbre) ou pour des raisons qui lui sont propres (vieillesse, pourriture, mauvais enracinement), sans intervention de l'homme.
- Le bois mort au sol : pièce de bois (branche ou tronc) détachée de sa souche naturellement ou artificiellement, ou arbre chablis mort, en contact ou non avec le sol, avec toutes les branches qui lui sont restées attachées.

Jusqu'en 2008, l'IGN n'a inventorié que le bois mort sur pied de moins de cinq ans et les chablis. Depuis 2008, l'établissement réalise également des observations et des mesures pour estimer le bois mort sur pied de plus de cinq ans et le bois mort au sol.

- 1) De la même façon que pour les arbres vivants, la première étape est de ramener le volume calculé par l'IGN pour chaque arbre mort inventorié, à une unité de surface (V' , en m^3/ha).

- 2) Ensuite, nous avons fait la somme des volumes d'arbres morts par placette, avant d'en faire la moyenne pour chaque type de forêt (fermée ou ouverte).
- 3) Pour finir, nous avons calculé le stock de carbone dans la matière organique morte, en appliquant la formule présentée ci-joint.

Pour les arbres morts, nous n'avons pas utilisé de facteurs d'expansion, négligeant ainsi les branches et les racines dans notre résultat.

En ce qui concerne la densité du bois morts, il existe peu de références dans la littérature. Les valeurs trouvées dans la littérature sont très variables (entre 20 et 60 % de la densité initiale) (Köster, 2015, Seedre 2013). Nous avons donc opté pour une valeur moyenne de 40 % de la densité initiale. Ces valeurs sont attribuées suivant le type de forêt (ouverte ou fermée). Les landes et les formations herbacées sont considérées comme des forêts ouvertes.

Carbone stocké dans le sol

Le carbone stocké dans le sol correspond au carbone organique et minéral. La litière peut être comptée soit dans la matière organique morte, soit dans le sol. Dans notre cas, celle-ci sera évaluée dans le compartiment du sol.

La formule utilisée pour le calcul du carbone dans le sol est présentée ci-joint. D'après les données de l'IGN et de l'INRA, la profondeur moyenne de sols sur le massif forestier du Ventoux est de 40 cm et le taux d'éléments grossiers moyen est de 48 %.

Cependant, dans notre cas, ne disposant pas de taux de carbone fiable pour la zone du Ventoux, nous avons été contraints d'attribuer une valeur de stock de carbone de référence pour les sols forestiers français. D'après Dupouey (2000), les sols forestiers français séquestrent en moyenne 92 tC/ha (litière et humus inclus) dans les 40 premiers centimètres du sol.

Ainsi, pour chaque type de végétation, nous avons réussi à estimer le stock de carbone dans la biomasse (aérienne et souterraine), la matière organique morte et le sol.

Formule, calcul du stock de carbone :

Dans la matière organique morte : $C = V' \times D \times tC$

Où C est la masse de carbone (en kg/ha)

V' est le volume (en m³/ha)

D est la densité du bois (en kg/m³)

tC est le taux de carbone moyen (sans unité), soit 0,475 (Source : Données génériques, CARBOFOR)

Formule, calcul du stock de carbone :

Dans le sol : $SCO = tC \times Da \times EP \times (1 - EG)$

Où SCO est le stock de carbone organique (en kg/m²)

tC est le taux de carbone (sans unité)

Da est la densité apparente, soit 1,07 en g/cm (Source : URFM-INRA)

EP est l'épaisseur moyenne du sol (en m)

EG est le taux d'éléments grossiers (sans unité)

Résultats et discussion/analyse critique

Suivant l'échelle d'étude et l'objectif final, la précision attendue varie. Dans le cadre du projet INFORMED, du fait que l'outil économique (INVEST) utilisé se base normalement sur une échelle européenne, le travail demandé sur le Ventoux n'avait pas besoin d'une précision très fine. Néanmoins, au-delà du projet INFORMED, cette démarche est intéressante pour l'INRA, c'est pour cela que nous avons essayé de réaliser un travail le plus précis possible. Dans cette partie, nous exposons donc les résultats obtenus ainsi que quelques pistes afin d'améliorer la méthodologie. Enfin, les points que nous allons aborder, sont certainement des causes aux différences observées entre les valeurs obtenues et les valeurs nationales/régionales.

Estimation du stock de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire

Pour le calcul du stock de carbone dans la biomasse, nous avons notamment différencié les types d'essence et de forêt (fermées et ouvertes). Néanmoins, le stock de carbone varie aussi selon l'âge, le type de peuplement (taillis, futaie, etc...).

De façon générale, sur la zone d'étude, les forêts séquestrent 27,40 t C/ha en moyenne, dans la biomasse aérienne et racinaire. En ce qui concerne les forêts fermées, ce stock de carbone dans la biomasse est de 30,93 t C/ha en moyenne. Pour la moyenne nationale, la quantité de carbone contenue dans la biomasse aérienne et souterraine est de 59 t C/ha (Dupouey et al., 2000). Le rapport Carbofor donne une moyenne de 71 t C/ha (76 t C/ha pour les feuillus, 62 t C/ha pour les résineux) (Loustau, 2004). En comparaison avec la forêt française, la valeur obtenue pour la forêt du Ventoux est nettement inférieure.

Les figures 18 et 19 présentent le stock de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire, pour les espèces les plus représentatives sur la zone d'étude, suivant le type de forêt. L'ensemble des résultats (par espèce) est retranscrit dans l'annexe V et VI.

De façon générale, les conifères, et notamment les pins, séquestrent plus de carbone dans leur biomasse que les feuillus. Ceci peut s'expliquer par des volumes et des densités de bois plus importantes chez les résineux que chez les feuillus. En forêt ouverte, cette tendance est moins évidente. Mais, n'ayant peu d'échantillons pour ce type de forêt, le résultat peut être biaisé.

Le Pin noir et le Pin à crochets sont les arbres qui séquestrent le plus de carbone dans la zone d'étude, respectivement 39,174 et 48,065 t C/ha (biomasse aérienne). Ces valeurs s'expliquent par le

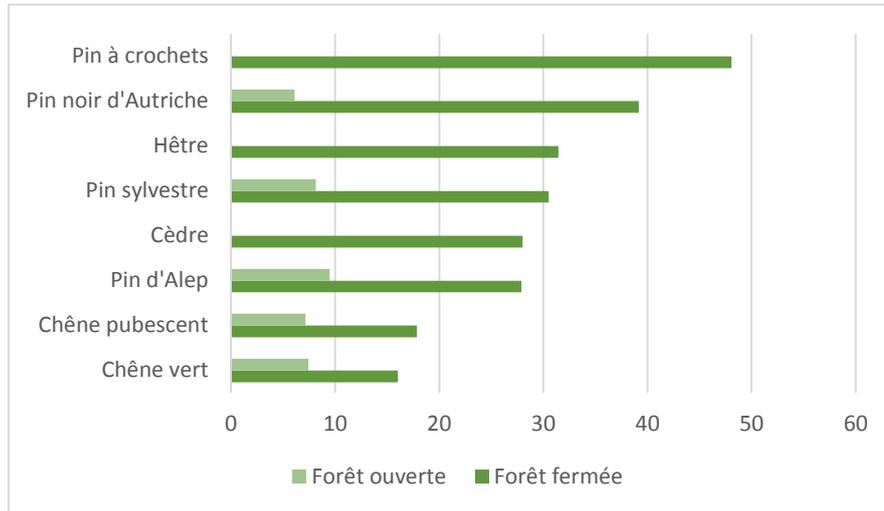


Figure 18 : Diagramme des stocks de carbone dans la biomasse aérienne pour les essences principales suivant le type de forêt, en t C/ha

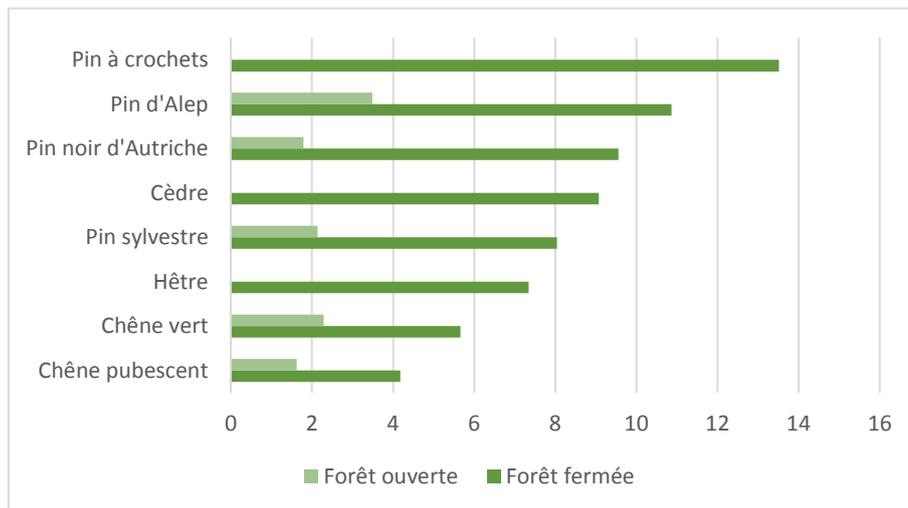


Figure 19 : Diagramme des stocks de carbone dans la biomasse racinaire pour les essences principales suivant le type de forêt, en t C/ha

fait que le Pin noir détient le volume le plus élevé (0,67 m³) et le Pin à crochets la plus forte densité de bois (598 kg/m³), parmi les résineux inventoriés par l'IGN. Chez les feuillus, le Hêtre se trouve en premier position, avec un stock de carbone dans sa biomasse aérienne de 31,439 t C/ha. En comparaison, même si le Chêne vert a la plus grande densité de bois (840 kg/m³), il séquestre seulement 17,843 t C/ha, dû à son faible volume sur pied (0,02 m³ pour le Chêne vert et 0,06 m³ pour le Hêtre). En moyenne sur la France, les peuplements à plus fort stock par unité de surface sont les sapinières (87 t C/ha) et les hêtraies (84 t C/ha).

Enfin, la figure 20 montre la variabilité des valeurs de stocks de carbone obtenues avec les données IGN, suivant le type de végétation, pour les forêts fermées du Ventoux. D'une manière cohérente avec nos données, ce sont les forêts fermées de Pin à crochets qui séquestrent le plus de carbone, avec une valeur de 61,58 t C/ha. L'annexe VIII présente l'ensemble des résultats de séquestration suivant le type de végétation (libellé).

Pour conclure, les valeurs obtenues en termes de séquestration de carbone dans la biomasse (aérienne et racinaire) sont largement inférieures aux références nationales. Différents points sont discutables et peuvent expliquer ces résultats :

- **La méthode de calcul :**

En effet, pour le calcul du stock de carbone dans la biomasse des arbres vivants, nous nous sommes basés sur la méthode des facteurs d'expansion. Néanmoins, aucune des évaluations des stocks de carbone des forêts françaises publiées à ce jour n'ont été réalisées avec les mêmes coefficients. Au niveau Européen, le facteur d'expansion total varie de 1,14 à 2 suivant les zones géographiques. Cette variation est dû à la méthode de mesure mais aussi à de nombreux facteurs naturels ou anthropiques (Pignard et Dupouey, 2002). En effet, l'hétérogénéité des milieux, des localisations géographiques, des essences, des âges et des pratiques sylvicoles conduit à une grande multiplicité des jeux de coefficients disponibles. Les coefficients évoluent également dans le temps en raison des modifications du climat qui affectent la forme des arbres (ou leur proportion de branches) et surtout des pratiques sylvicoles. (Dupouey, 2001). Cette variabilité constitue donc une source d'erreur importante dans nos calculs.

Les tableaux 3 et 4 ci-contre présentent quelques estimations de facteurs d'expansion présents dans différentes références bibliographiques. Pearson et al. (2005) donnent une valeur standard de 1,2 pour le facteur d'expansion des branches.

Le projet CARBOFOR a établi ses facteurs d'expansion, à partir des tarifs de cubage volume aérien construits par le LERFoB (données IGN) et d'une synthèse bibliographique (Cannell, 1982 et

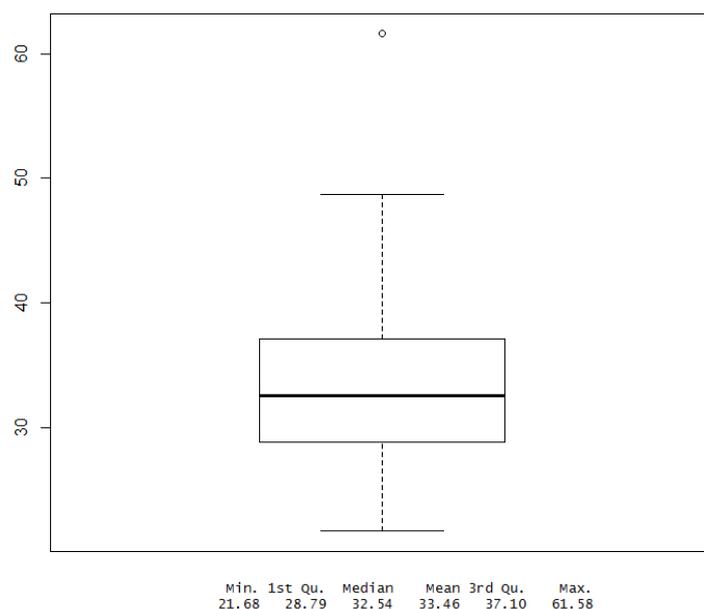


Figure 20 : Diagramme en boîte des stocks de carbone dans la biomasse (aérienne et racinaire) par surface, suivant le type de végétation, exprimés en t C/ha, en forêt fermée

	CANNELL. 1982	AGRIGES. 1999	CITEPA. 1999	IGD. 2000	CARBOFOR. 2004
Feuillus	1.25	1.304	1.25	1.4	1.611
Résineux	1.43 (jeunes) - 1.16 (âgés)	1.125	1.25	1.3	1.335

Tableau 3 : Comparaison des différents facteurs d'expansion branches (FEB)

	CANNELL. 1982 / VOGT. 1996	AGRIGES. 1999	CITEPA. 1999	IGD. 2000	CARBOFOR. 2004
Feuillus	1.24	1.19	1.28	1.143	1.28
Résineux	1.24	1.235	1.28	1.154	1.3

Tableau 4 : Comparaison des différents facteurs d'expansion racines (FER)

Sources :

AGRIGES, estimation calculée par l'IFN et l'INRA en conclusion du projet AGRIGES

CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique)

IGD (Indicateurs de Gestion Durable des forêts françaises), IGN

Vogt, 1996). Il aurait donc été intéressant de travailler avec ces facteurs ci. Mais, il se trouve que les facteurs d'expansion CARBOFOR sont globalement supérieurs aux autres références bibliographiques. D'après les commentaires du projet CARBOFOR, les tarifs de cubage du LERFoB sont la principale cause de cette réévaluation. De ce fait, nous avons préféré travailler uniquement sur la synthèse bibliographique (Cannell, 1982 et Vogt, 1996).

Pour notre étude, nous avons donc attribué des facteurs d'expansion (calculés à l'échelle nationale) pour les feuillus et les résineux (jeunes et âgés). Cependant, il serait encore plus précis de définir des facteurs d'expansion propres à la zone méditerranéenne. Dans l'idéal, il faudrait également attribuer un facteur d'expansion pour chaque essence, suivant son âge et son type de peuplement.

En ce qui concerne la teneur en carbone, celle-ci peut varier entre 45 et 55 %, suivant les sources bibliographiques. Les causes de variation du taux de carbone dans la biomasse sont mal connues. La plupart des estimations utilisent une valeur moyenne de 45, 47,5 ou 50 % (Matthews, 1993), ce qui peut entraîner 10 % de différence sur le résultat final. Mais des valeurs plus éloignées encore, entre 40 et 55 %, sont souvent mesurées. Des recherches supplémentaires sont nécessaires afin de mieux estimer ce paramètre. Pour notre étude, nous avons fixé un taux de carbone moyen à 0,475.

Enfin, les densités de bois proviennent des données de l'INRA. L'URFM, étant spécialisée dans l'étude des forêts méditerranéennes, les valeurs de densité sont applicables à la zone d'étude. L'INRA possède des données pour les principales essences de la zone du Ventoux. Pour les autres, nous avons utilisé des valeurs de densité génériques provenant du projet CARBOFOR.

- **Les volumes des arbres inventoriés (en m³) :**

Le volume des arbres varie principalement en fonction de l'espèce, de l'âge du peuplement, mais aussi du type de forêt. Le tableau 5 présente les volumes moyens pour les espèces les plus représentatives sur la zone d'étude. Ces volumes calculés par l'IGN, sont globalement faibles. L'annexe VII présente l'ensemble de ces données.

Pour illustrer cette idée, nous mentionnerons deux exemples :

- Pour le Sapin pectiné, nous n'avons qu'un seul arbre inventorié par l'IGN, bien que l'espèce soit très bien représentée sur le terrain (notamment sur le versant Nord du Mont Ventoux). Le volume de ce Sapin pectiné est de 0,01 m³, avec une circonférence de 25,0 cm et une hauteur de 4,9 m. Ces valeurs sont très faibles comparées à la normale. Cet arbre n'est pas représentatif de la population de Sapin pectiné sur la zone du Ventoux.
- Pour le Chêne vert, nous avons 246 arbres inventoriés. Le volume moyen est 0,02 m³, avec une circonférence de 34,4 cm et une hauteur de 4,8 m (hauteur de référence 15-20 m). Bien

ESSENCE	VOLUME
CHENE PUBESCENT	0.0896
CHENE VERT	0.0249
HETRE	0.0637
PIN SYLVESTRE	0.2673
PIN NOIR D'AUTRICHE	0.6720
PIN A CROCHETS	0.5164
SAPIN PECTINE	0.0100
CEDRE DE L'ATLAS	0.2578
PIN D'ALEP	0.3715

Tableau 5 : Volumes moyens par espèce, exprimés en m²

Source : IGN

que nous ayons 246 arbres inventoriés pour cette essence, les valeurs moyennes restent faibles pour ce type d'arbre.

Ainsi, à moins que la zone du Ventoux ait une forte proportion de petits arbres par rapport à la moyenne, il se peut que les données d'inventaires de l'IGN soient sous-estimées ou bien récoltées dans des zones ouvertes peu représentatives du massif forestier du Ventoux. Enfin, étant donné que le stock de carbone est directement lié au volume, ces petits volumes peuvent expliquer en partie les faibles valeurs de séquestration de carbone dans la biomasse.

Autres remarques :

Il se peut aussi que des points inventoriés par l'IGN comportent des espèces peu représentatives. Par exemple, une placette ayant uniquement de l'Olivier d'Europe, n'est pas représentative des forêts du Ventoux.

- Les volumes par unité de surface (en m³/ha) :

Sur notre zone d'étude, les forêts fermées ont un volume sur pied d'arbres vivants en moyenne de 70,9 m³/ha. Notre valeur est légèrement inférieure à la donnée de référence pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, de 88 m³/ha (IGN, 2016). La figure 21 montre la variabilité des valeurs de volumes obtenues avec les données IGN, pour les forêts fermées du Ventoux. Cependant, les forêts méditerranéennes sont caractérisées par une production forestière faible dû aux conditions du milieu sévères (faibles précipitations notamment). Il est donc normal que pour la zone du Ventoux, nous obtenions des volumes par unité de surface – et donc, de valeurs de séquestration de carbone dans la biomasse – inférieures à la moyenne nationale. Par conséquent, même si, les volumes des arbres inventoriés (en m³) semblent particulièrement faibles, le volume par unité de surface reste cohérent pour la région méditerranéenne.

D'une manière logique, le volume moyen par unité de surface est nettement plus faible pour les forêts ouvertes, avec une moyenne de 23,85 m³/ha.

- La non prise en compte de la végétation en sous-étage :

Enfin, pour le calcul du stock de carbone dans la biomasse, nous n'avons pas tenu compte de la végétation en sous-étage. En effet, lors des relevés d'inventaire, les tiges dont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) est inférieur à 7,5 cm ne sont pas recensées par l'IGN. Par conséquent, les jeunes

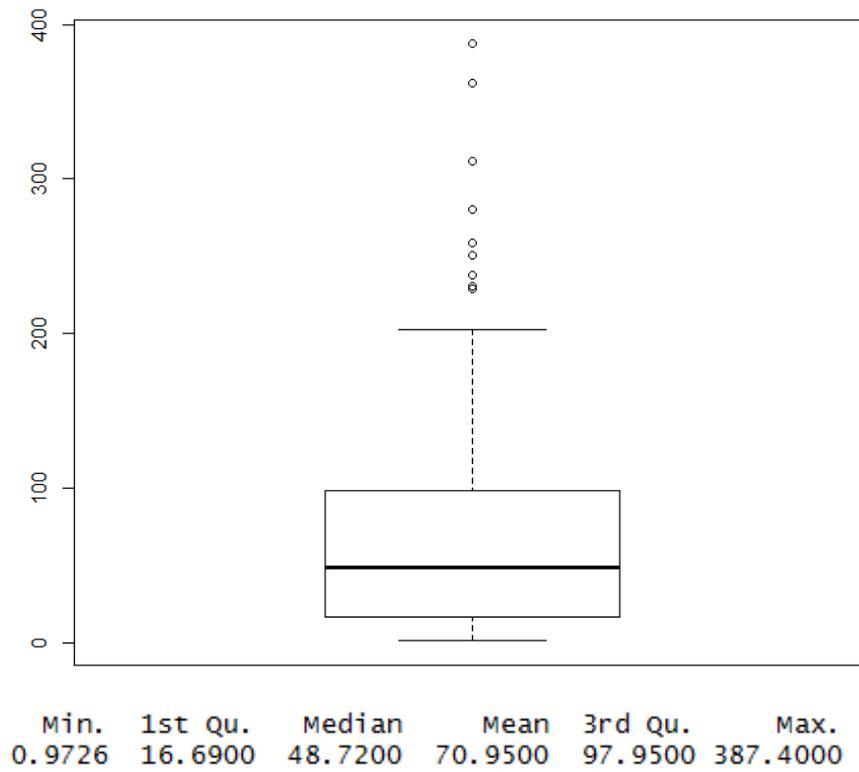


Figure 21 : Diagramme en boîte des volumes par surface, exprimés en m³/ha, en forêt fermée

peuplements (régénérations, reboisements artificiels ou spontanés) ne sont donc pas pris en compte dans nos calculs, pouvant entraîner un léger biais dans nos résultats. Ce problème d'échantillonnage est d'autant plus important en zone méditerranéenne, où les formations de type lande, maquis et garrigues, à diamètre moyen faible, occupent de grandes surfaces. D'après la littérature, la végétation en sous-étage (comprenant les arbustes de diamètre à 1,30 m inférieur à 7,5 cm et la végétation herbacée) peut représenter jusqu'à 50 t/ha.

Ces quatre points pourraient donc avoir une influence sur le résultat final.

Ainsi, afin d'affiner nos résultats, il pourrait être intéressant, par exemple, de croiser les données de l'IGN avec celles de l'ONF. En effet, dans le cadre de l'aménagement des forêts publiques, l'ONF inventorie ses ressources en bois disponibles et délimite pour cela des Unités d'Analyses (UA) : entité homogène en termes de fertilité et de structure forestière. Pour chacune de ces UA, nous disposons notamment des données sur les espèces dominantes présentes, l'âge, le type de peuplements forestiers, le traitement et le volume de bois sur pied. Cette base de données de l'ONF, étant très riche et très complète sur les forêts publiques, permettrait certainement de rééquilibrer et/ou valider les valeurs obtenues dans le cadre de notre étude. Dans ce sens, il serait envisageable de sous-échantillonner une zone d'étude pour laquelle on dispose de ces données d'aménagements. Il s'agirait alors de mener en parallèle notre propre démarche à partir des données de l'IGN puis à partir des données d'inventaire des UA.

Néanmoins, avant d'entreprendre ce travail, il serait judicieux de s'assurer que les volumes des arbres soient calculés de la même manière dans les deux jeux de données. Autrement dit, que les tarifs de cubage utilisés pour calculer les volumes soient identiques entre l'IGN et l'ONF pour chaque espèce.

Dans l'idéal, il aurait été intéressant de comparer ces différentes données, dans le but de valider une carte de végétation la plus fiable que possible.

Estimation du stock de carbone dans la matière organique

Volumes d'arbres morts :

Généralement, le bois mort sur pied (et chablis) représente 5 % du volume de bois vivant sur pied (IGN, 2012). Néanmoins, dans la littérature, cette valeur peut osciller entre 5 et 30% du volume de bois sur pied (Muller et Liu, 1991, Spetich et al.1999, Siitonen, 2001). La moyenne de bois mort

sur pied (et chablis) est de 8 m³/ha au niveau national, mais seulement de **3 m³/ha** pour la région méditerranéenne.

Pour le bois mort au sol, la tendance est la même, la quantité moyenne en France est de 17 m³/ha, tandis qu'elle est de **7 m³/ha** pour la région Méditerranéenne. La quantité de bois mort (sur pied et au sol) varie fortement d'une région à une autre (IGN, 2012). Globalement, la région méditerranéenne contient peu de volume à l'hectare de bois mort, certainement du fait du faible volume à l'hectare de bois vivant sur pied de cette région (88 m³/ha) et de la nécessité de maintenir un sol dégagé pour limiter les incendies. En comparaison, les Vosges possèdent un volume de bois vivant de 204 m³/ha, avec une quantité de bois mort de 39 m³/ha.

Dans notre cas, le volume moyen de bois morts est de 7,91 m³/ha pour les forêts fermées et de 2,05 m³/ha pour les forêts ouvertes, si nous considérons les années d'inventaires de 2005 à 2014. Pour les forêts fermées, la valeur moyenne obtenue sur la zone du Ventoux, est donc inférieure aux références régionales. Plusieurs points peuvent expliquer cette différence :

Tout d'abord, un changement de protocole a eu lieu en 2008. En effet, si nous nous basons seulement sur les données 2008-2014 (inventaire du bois mort sur pied et au sol), le volume de bois morts est de 9,91 m³/ha. Alors que si nous prenons uniquement les données 2005-2007 (inventaire du bois mort sur pied, de moins de cinq ans), le volume de bois mort est de 4,37 m³/ha. Ceci montre bien, que le fait d'avoir pris en compte les années 2005-2007, au cours desquelles l'inventaire du bois mort au sol et sur pied (de plus de cinq ans) n'était pas effectué, biaise légèrement nos résultats.

De plus, il se peut que l'IGN ait sous-estimé la quantité de bois mort sur certaines placettes. Pour 11 placettes (sur 69 en forêts fermées), nous avons un volume de bois mort très faible, compris 0,20 et 1 m³/ha. La figure 22 montre la variabilité des valeurs de volumes de bois morts obtenues avec les données IGN, pour les forêts fermées du Ventoux.

Pour finir, le diamètre, les conditions d'exploitabilité, la propriété (privée ou publique) et l'essence sont des facteurs ayant une influence sur le volume de bois mort. En général, les forêts privées ont un volume de bois morts supérieur aux forêts publiques, et les petits bois sont plus vulnérables que les gros. Ainsi, pour améliorer la précision de notre travail, en plus de différencier forêt fermée et forêt ouverte, il serait particulièrement intéressant de distinguer les forêts publiques des forêts privées, ainsi que les types de végétation. Néanmoins, pour faire un travail de cette sorte, la base de données doit être assez complète pour pouvoir différencier chaque type de végétation.

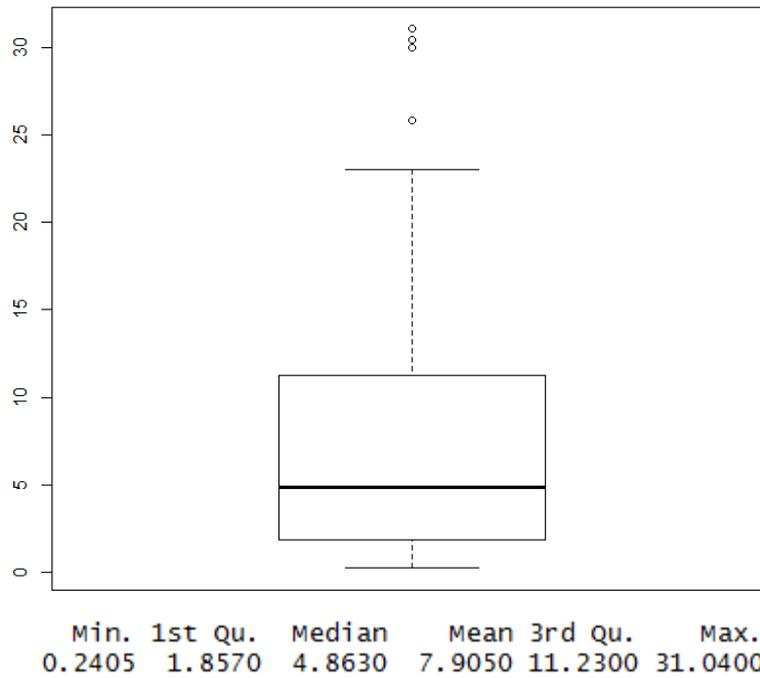


Figure 22 : Diagramme en boîte des volumes de bois morts par surface, exprimés en m³/ha, en forêt fermée

Stock de carbone dans les bois morts :

Tout d'abord, les résultats du calcul du stock de carbone dans les bois mort sont présentés ci-contre :

Forêt fermée	0,837
Forêt ouverte	0,217

Tableau 6 : Résultats des stocks de carbone dans les bois morts suivant le type de forêts, exprimés en t C/ha.

Pour le calcul du stock de carbone dans les bois morts, rappelons que nous avons appliqué une formule, nécessitant comme données d'entrée notamment la densité et le taux de carbone du bois mort.

Pour la densité du bois mort, les données dans la littérature ne sont pas abondantes et qui plus est, très variables (entre 20 et 60 % de la densité initiale). En effet, de la même manière que pour les arbres vivants, la densité des bois mort est très variable d'une espèce à une autre, mais surtout varie suivant la date de mort de l'arbre et de son taux de décomposition. Son taux de décomposition est fonction du climat, de l'essence et de l'activité microbienne principalement. Dans notre cas, ces données n'étant pas disponibles, nous avons généralisé notre valeur de densité du bois mort pour tous les arbres.

Nous avons donc opté pour la moyenne de 40 % de la densité initiale.

Densité du bois morts = 40 % de la densité initiale

Pour l'estimation de densité initiale (arbres vivants), n'ayant pas le type d'essence pour tous les bois morts, nous avons été contraints de généraliser la densité du bois pour l'ensemble des données, malgré le fait que la densité varie suivant les espèces.

Densité initiale = 557, soit densité du bois morts = 222,8

Pour le taux de carbone, d'après la littérature, il varie très peu à la mort de l'arbre. Nous avons donc gardé le même taux de carbone pour les arbres morts que pour les arbres vivants. Néanmoins, au cours de sa décomposition, le taux de carbone du bois diminue. Cette variation n'est pas prise en compte dans nos calculs.

Finalement, toutes ces estimations, que nous avons pu faire pour la densité et le taux de carbone de bois mort, peuvent influencer le résultat final.

Pour finir, en termes d'amélioration, il serait intéressant d'intégrer à ce travail les îlots de vieux bois. Depuis 2013, une trame vieux bois a été mise en place sur différentes zones forestières du Ventoux (Figure 23). L'objectif est de mettre en œuvre une gestion multifonctionnelle des forêts publiques, alliant la production de bois, l'accueil du public et les paysages, la conservation de la biodiversité et la protection contre l'érosion. La conservation de vieux arbres et de bois mort participe à cet objectif, en constituant notamment une trame bénéfique à de très nombreuses espèces, favorisant ainsi la biodiversité. Ces îlots de vieux bois sont de trois types : les îlots de sénescence, les îlots de vieillissement et les îlots Natura 2000. Dans la zone du Ventoux, outre la trame vieux bois, il existe également des espaces protégés, tels que la Réserve de Biosphère (RBI), favorisant le maintien des bois morts. Afin d'augmenter le niveau de précision de notre travail, ils seraient aussi intéressant de prendre en compte ces zones de protection.

Estimation du stock de carbone dans le sol

Du fait que nous avons attribué une valeur de référence pour la séquestration de carbone par les sols forestiers, nous n'avons aucune comparaison à faire avec les données nationales.

Pour notre étude, par manque de données disponibles (teneurs en carbone), nous avons été contraints à utiliser une valeur de référence nationale. Cette généralisation peut entraîner un biais dans nos résultats. Néanmoins, il existe une base de données nationales sur les sols, coordonnée par INFOSOL de l'INRA d'Orléans et aussi une cartographie au 250 000^{ème} réalisé par le Canal de Provence (Réseau des mesures de la qualité des sols). Bien que nous ayons contacté ces deux structures, nous n'avons pas eu le temps de récolter leurs données avant la rédaction de ce rapport. Des droits d'accès permettraient également d'accéder aux bases de données GISSOL (Groupement d'intérêt scientifique Sol) et Carbone France. Par ailleurs, pour un travail plus précis, il serait intéressant d'utiliser leurs données.

En ce qui concerne les valeurs de profondeur et de pierrosité du sol, les données d'inventaires de l'INRA et de l'IGN se complètent, malgré que la pierrosité soit légèrement sur-estimée par l'INRA et/ou sous-estimée par l'IGN.

Qui plus est, le carbone du sol reste très souvent sous-estimé car la quantité de carbone du sol est mesuré dans la plupart des études jusqu'à 30 à 40 cm de profondeur au maximum. Or, les horizons profonds contiennent également une quantité non négligeable de carbone, de l'ordre d'au moins 1/3 du stock total de carbone du sol d'après Liski & al. (2002).

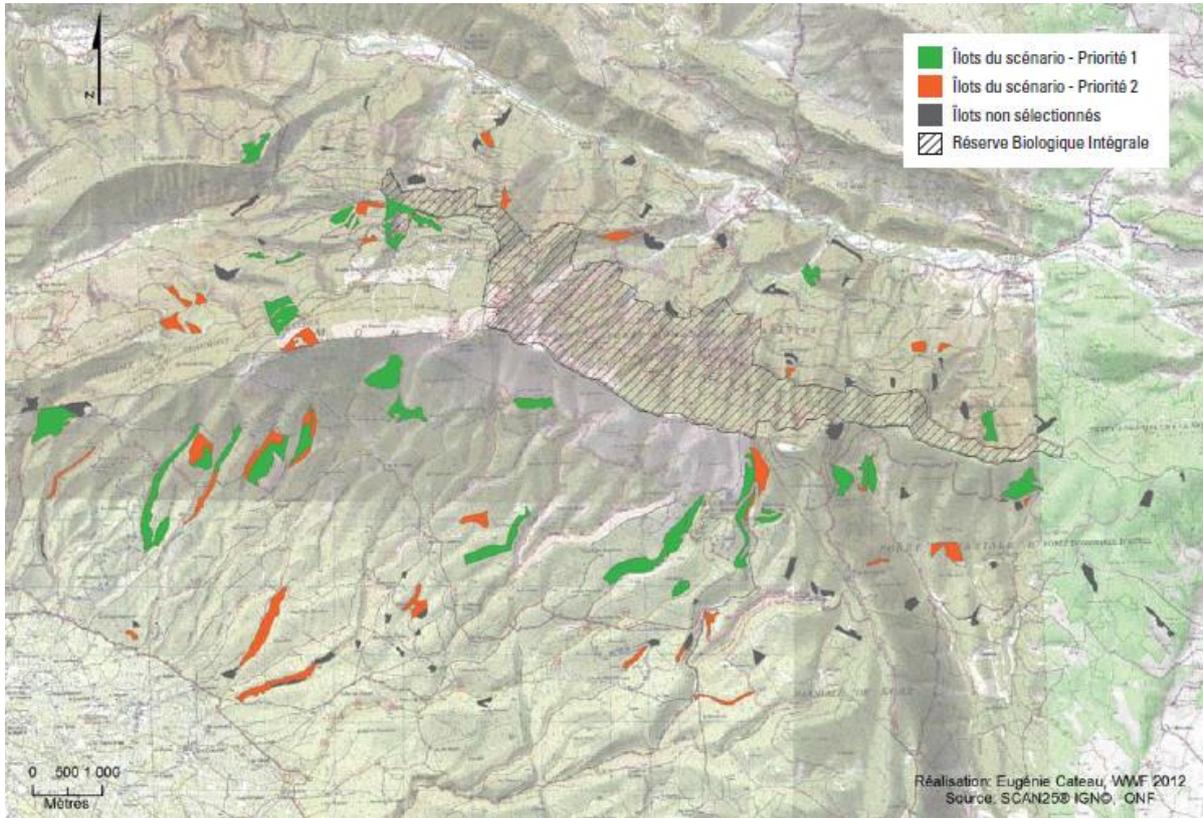


Figure 23 : Réseaux d'îlots de vieux bois sur la zone du Ventoux

Source : CATEAU E., PARROT M., REYNA K et al., Réseau d'îlots de vieux bois.

Éléments de méthode et test dans les forêts publiques du Mont-Ventoux, 2013

Pour finir, le carbone dans le sol varie fortement en fonction de l'essence dominante de la station, en lien avec le type d'humus, et de la profondeur considérée. En effet, la litière comprend 11 % de ce stock, la couche 0-10 cm en comprend 47 %, la couche 10-20 cm 28 % et la couche 20-30 cm 16 % (Dupouey & al., 2000). Ce stock varie aussi, mais plus minoritairement, en fonction du type de sol (texture et structure). Dans l'idéal, ceci signifie qu'il faudrait récolter des données de teneur en carbone pour chacun des types de végétation, de sol et d'humus suivant la profondeur.

Synthèse globale

D'une façon générale, les forêts du Mont Ventoux et des alentours séquestrent $6,9.10^{10}$ tonnes de carbone, soit en moyenne 120 t C/ha. (L'ensemble de nos résultats est retranscrit dans l'annexe VIII). D'après les références bibliographiques, la moyenne nationale est de 138 t C/ha (Dupouey, IGN). Bien que notre résultat soit en dessous de la moyenne nationale, il reste tout à fait cohérent pour la région méditerranéenne.

Néanmoins, le sol (litière incluse) possède 79,90 % du carbone présent sur la zone du Ventoux. Cette valeur est relativement élevée, comparée aux données nationales (57 %). Au contraire, le carbone dans la biomasse aérienne et racinaire représente une part relativement faible comparée aux données nationales, respectivement 15,16 % (34 %) et 4,40 % (7 %).

Dans la zone d'étude, nous avons pris en compte les forêts (fermées et ouvertes), ainsi que les landes, les formations herbacées et pastorales. Etant donné, que les forêts ouvertes et autres espaces naturels ouverts (landes, formations herbacées et pastorales ...) ont un taux de couvert faible, et donc une biomasse moins importante, ceci peut expliquer une partie de la différence entre les valeurs obtenues pour la zone du Ventoux et les valeurs nationales.

La figure 24 présente les résultats de séquestration de carbone par les écosystèmes forestiers du Ventoux. Dans notre étude, nous avons calculé les séquestrations de carbone suivant les différents types de végétation, au nombre de 74 sur la zone du Ventoux. Globalement, les stocks de carbone les plus élevés se situent sur les versants du Mont Ventoux. Les forêts de ce massif sont plus denses que les forêts en plaine. En revanche, sur la partie sommitale du Ventoux, le stock de carbone est très faible.

Nous avons ensuite réalisé un travail sur les zones de protection et de conservation des espaces naturels forestiers, afin d'évaluer le service écosystémique de l'habitat.

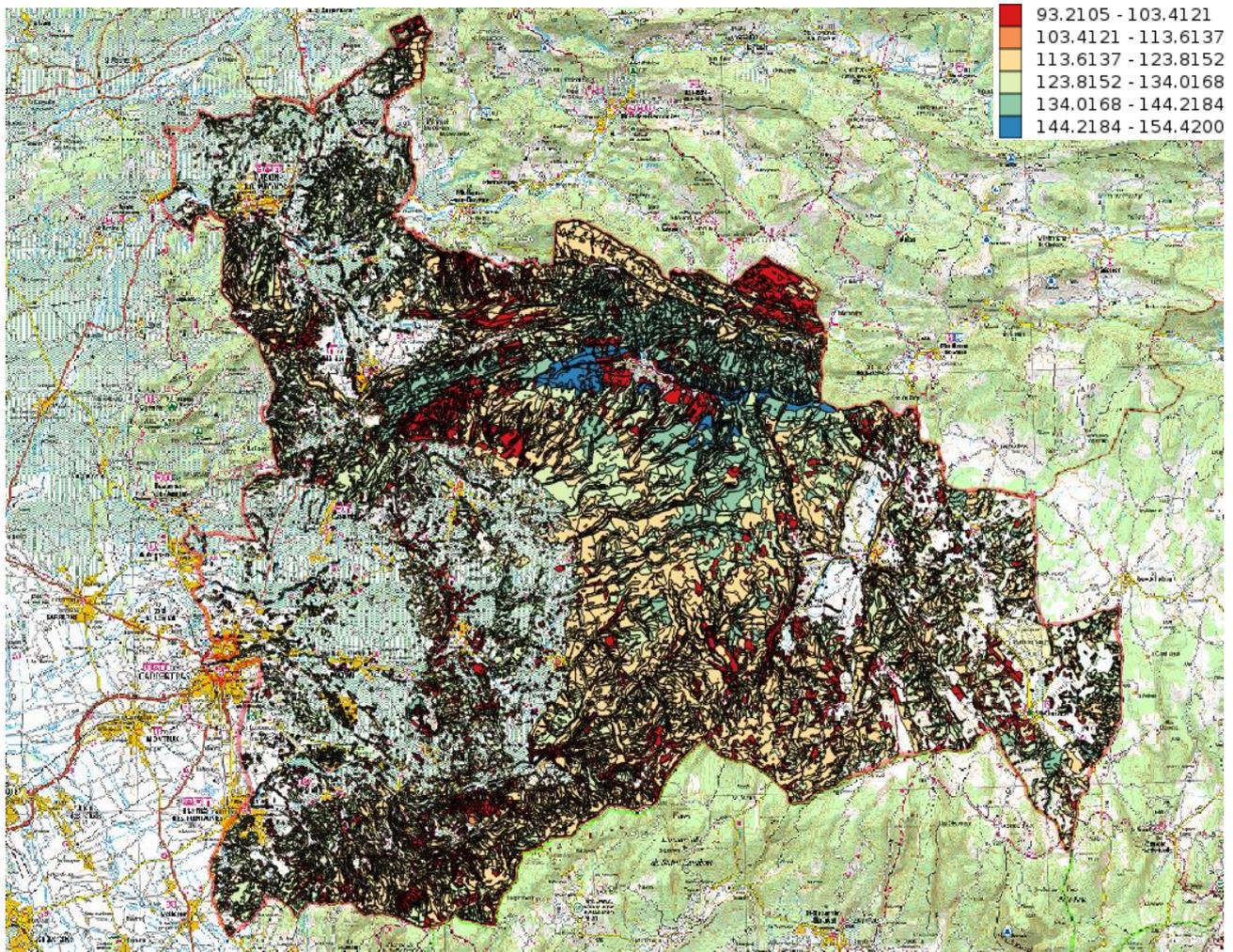


Figure 24 : Carte finale de la séquestration de carbone dans les forêts du Mont Ventoux, exprimée en t C/ha
QGIS©

Evaluation du service de l'offre en habitat

L'offre en habitat traduisant la richesse de biodiversité, est un service support pour l'écosystème. En effet, la production de services écologiques et l'état de la biodiversité sont très souvent liés : si la biodiversité est dégradée ce sont généralement tous les services rendus par la forêt qui sont touchés, et par conséquent le bien-être humain. Ainsi, la préservation de la richesse biologique des écosystèmes forestiers, au-delà de la conservation d'un patrimoine naturel, est une condition essentielle au maintien sur le long terme des forêts et des services qu'elles rendent.

Le Ventoux, une biodiversité exceptionnelle :

Le massif du Ventoux est un véritable concentré de biodiversité, constituant un patrimoine unique. Ce territoire accueille une grande diversité d'habitats naturels, liée à un contexte bioclimatique et géomorphologique unique. De par son gradient altitudinal et sa situation géographique intermédiaire entre la région alpine et méditerranéenne, le zone du Ventoux présente une étonnante diversité de milieux, abritant de nombreuses espèces végétales et animales endémiques, dont certaines constituent de vraies raretés.

Etudes antécédentes :

Tout d'abord, à l'échelle régionale, le Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE) est un outil d'aménagement, visant notamment à déterminer la Trame Verte et Bleue (TVB) au niveau du territoire. Il existe 5 sous-trames : milieux forestiers, milieux semi-ouverts, milieux ouverts, zones humides et eaux courantes. La figure 25 correspond à la sous-trame forestière identifiée dans le cadre du SRCE. L'objectif principal de cette évaluation environnementale est de favoriser la conservation et le déplacement des espèces sur le long terme. Dans un premier, ce travail nécessite l'identification des continuités écologiques susceptibles de garantir les échanges, pour ensuite proposer un plan d'action stratégique.

Lors de l'étude préalable à la Trame Verte et Bleu en 2012, le Conseil Général 84 a montré qu'il existe une grande connaissance naturaliste sur le département vauclusien. Les zones les plus prospectées sont principalement situées autour du mont Ventoux, en termes de relevés floristiques ou faunistiques. En effet, plus de 2 000 observations floristiques ont été réalisées depuis les années 2000 sur notre zone d'étude. De plus, de nombreux lieux d'inventaire, associés aux zonages naturels (Na

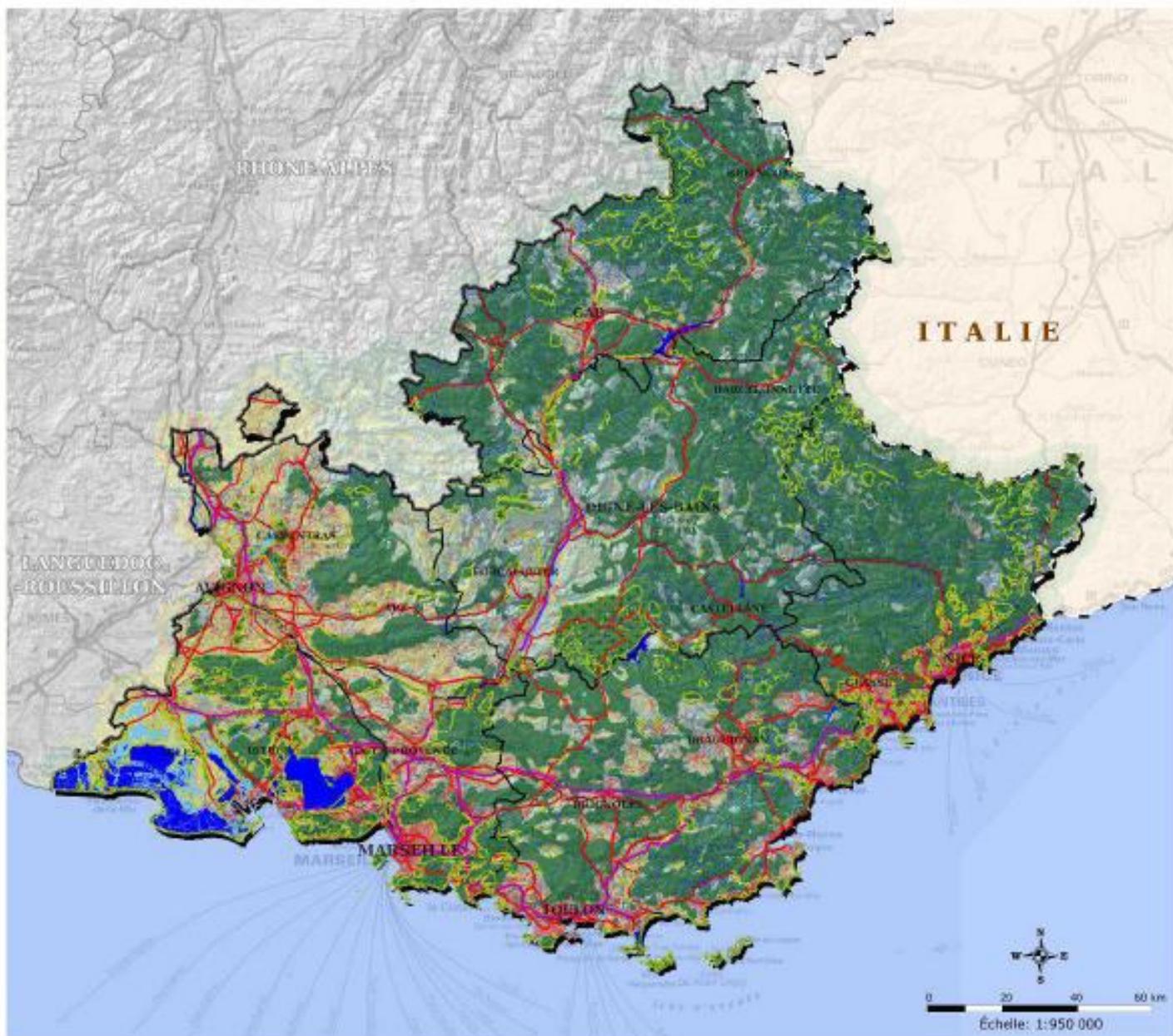


Figure 25 : Sous-trame forestière identifiée dans le cadre du SRCE PACA
 Source : Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE), Diagnostic & Plan d'action stratégique, 2014

tura 2000, APPB, ZNIEFF...) offrent un degré de connaissance supplémentaire, et permettent de disposer de relevés abondants sur des secteurs d'intérêt particulier (le mont Ventoux, les gorges de la Nesque, les zones humides du plateau de Sault...).

Qui plus est, dans le cadre du projet de PNR du Mont Ventoux, le Syndicat Mixte d'Aménagement et d'Équipement du Mont Ventoux (SMAEMV) a notamment réalisé des diagnostics environnementaux sur la zone d'étude. Ils ont réalisé des cartes regroupant les différents espaces protégés, gérés et inventoriés sur la zone du Ventoux (Figure 26, Annexe IX). De cette manière, pour l'état des lieux que nous avons réalisé, nous nous sommes basés sur les travaux déjà effectués par le SMAEMV.

Dans notre cas, l'objectif est de réaliser une carte de l'offre en habitat sur les espaces forestiers de notre zone d'étude.

Matériels

Pour parvenir à cet objectif, de la même façon que pour l'étude de la séquestration du carbone, nous avons travaillé sur le logiciel libre de Système d'Information Géographique QGIS© Version 2.14, à partir de la carte de végétation de l'IGN (BD FORET® version 2). Nous avons donc pris en compte uniquement les espaces forestiers (et/ou naturelles) comme définies par l'IGN. Nous avons également utilisé la base de données CARMEN (CARtographie du Ministère de l'Environnement) et les fonds de cartes IGN.

En plus, pour cette étude, nous avons travaillé en relation avec le SMAEMV, par l'intermédiaire d'Anthony Roux, chargé de mission Biodiversité et Espaces Naturels au SMAEMV. Grâce à ce partenariat avec le projet INFORMED, nous avons pu bénéficier des données et de l'expertise du SMAEMV.

Méthode

Tout d'abord, pour ce travail, nous avons identifié tous les espaces protégés, gérés et inventoriés existants sur la zone du Ventoux. Pour notre étude, nous avons évalué chacun de ces espaces, mais pour un côté pratique, nous avons regroupé ces espaces sous le terme : **zones de protection.**

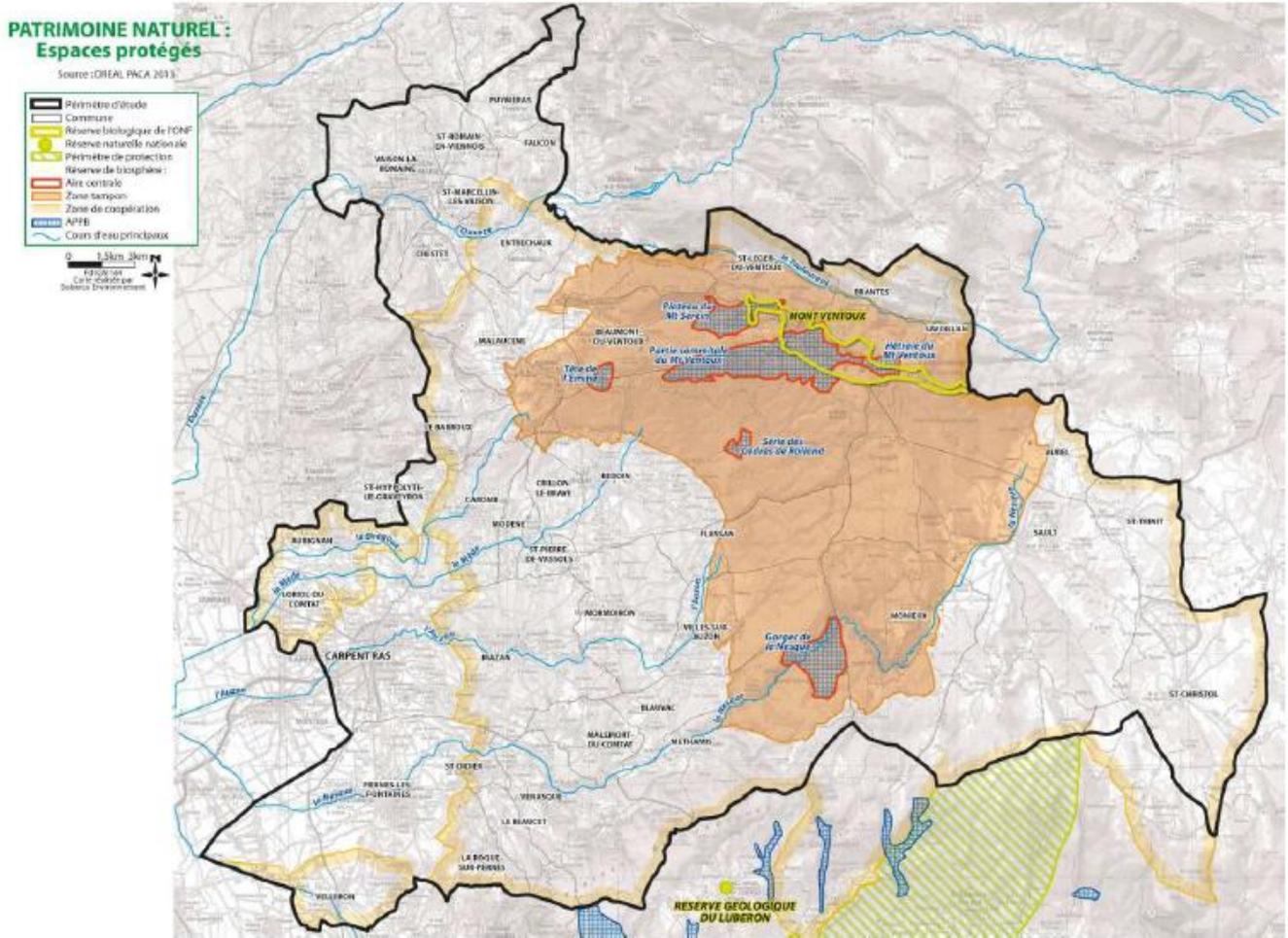


Figure 26 : Carte des espaces protégés sur la zone sur la zone du projet de PNR du Mont Ventoux
Source : SMAEMV, *Projet du Parc naturel régional du Mont-Ventoux. Diagnostic du territoire, 2014*

Sur la zone du Ventoux, il existe neuf zones de protection majoritaires :

- Réserve de Biosphère (aires centrales, zone tampon et zone de coopération)
- Arrêtés Préfectoraux de Protection de Biotope (APPB)
- Réserve Biologique Intégrale (RBI)
- Natura 2000
- Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique I et II (ZNIEFF I et II)
- Zones d'Intérêt Biologique (ZIB)
- Espaces Naturels Sensibles (ENS)
- Trame Verte et Bleue (TVB) : réservoirs de biodiversité et corridors écologiques

Chacune de ces zones est détaillée en annexe X. Les sites classés et inscrits n'ont pas été pris en compte dans l'étude, puisqu'ils sont définis plus par rapport à des critères paysager et historique qu'écologique. De plus, étant donné que les APPB sont les aires centrales de la Réserve de Biosphère, ces derniers ont été fusionnés afin de ne pas les compter deux fois.

Nous avons ensuite considéré que les aires de protection, de conservation ou même d'inventaire témoignent d'une source de biodiversité intéressante. En effet, les espaces protégées et conservées sont définies suivant la valeur de la faune et de la flore qu'ils contiennent. Ainsi, ces espaces sont la preuve d'une grande diversité biologique du milieu considéré. Nous sommes donc partis du fait que plus il y a de zone de protection sur un espace considéré, plus celui-ci a une riche biodiversité et par conséquent une grande importance en termes d'offre en habitat. De cette manière, nous avons réalisé un travail de superposition des zones de protection sur la zone d'étude, à l'aide de QGIS©, afin d'évaluer le service écosystémique de l'offre en habitat.

Cependant, il est évident que toutes les zones de protection n'ont pas les mêmes objectifs de protection et/ou conservation, et donc n'ont pas la même valeur en termes de richesse écologique. Pour cela, nous avons défini un barème « à dire d'expert » pour classer les zones de protection suivant leur importance du point de vue de la biodiversité. Ce barème a été réalisé avec Anthony Roux, chargé de mission Biodiversité et Espaces Naturels au SMAEMV. Les indices utilisés vont de 1 (faible protection) à 3 (forte protection). Le tableau 7 présente le barème que nous avons affecté à chacune des zones de protection.

	1	2	3
Réserve de Biosphère			
○ aires centrales			■
○ zone tampon		■	
○ zone de coopération	■		
RBI			■
Natura 2000			■
ZNIEFF			
○ I		■	
○ II	■		
ZIB			
○ 1-2		■	
○ 3-4	■		
ENS		■	
TVB			
○ réservoirs de biodiversité			■
○ corridors écologiques		■	

Tableau 7 : Indices de richesse de biodiversité

Résultats et discussion/analyse critique

La figure 27 présente les résultats du service écosystémique de l'habitat par les écosystèmes forestiers sur la zone du Ventoux. Le barème va de 0 (biodiversité très pauvre) à 17 (biodiversité très riche). Ce score correspond à la somme des indices de toutes les zones superposées.

Sur la zone d'étude, 96 % des espaces forestiers appartiennent au moins à une aire de protection. Il est à noter que certaines zones, comme par exemple le sommet du Mont Ventoux, possédant une aire de protection (Natura 2000), ne sont pas prises en compte sur la carte. Ceci s'explique par le fait que nous avons étudié uniquement les espaces forestiers (et/ou naturelles) définies par l'IGN.

Parmi les espaces forestiers protégés, environ 9 % ont une note de richesse d'habitat de 10 sur 17. De façon générale, les zones ayant un niveau de biodiversité le plus fort se situent sur les hauteurs du Mont Ventoux et sur les Monts de Vaucluse.

Cette carte confirme bien la diversité des habitats qu'offrent la zone du Ventoux. Sachant que le degré de connaissance sur la biodiversité est relativement important sur le Mont Ventoux, nous pouvons penser que notre démarche est fiable et nos résultats cohérents. Néanmoins, le barème a été spécifiquement défini pour cet étude, il s'agit d'un parti pris.

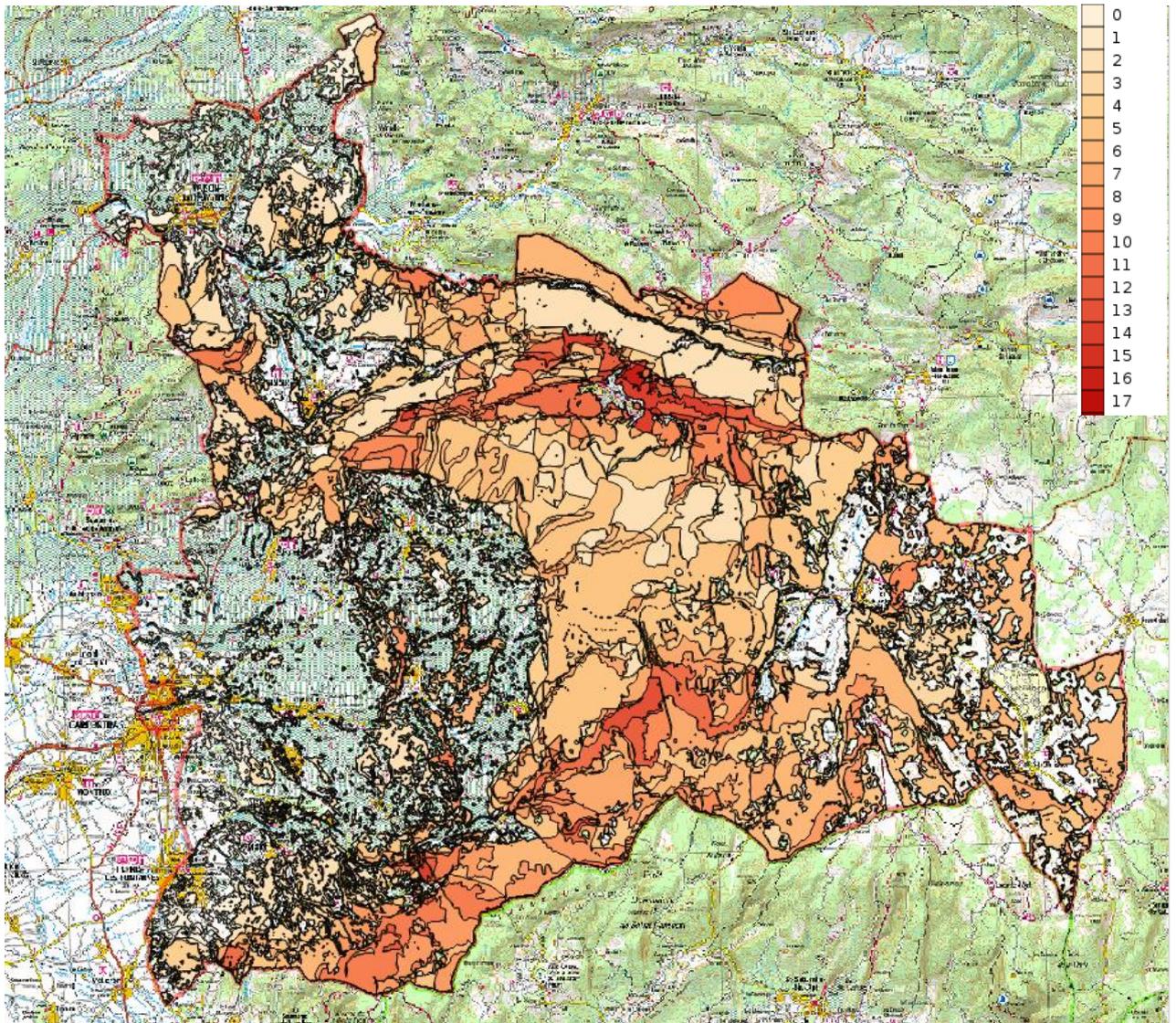


Figure 27 : Carte finale de l'offre en habitat dans les forêts du Mont Ventoux
QGIS©

Perspectives et conclusion

La réalisation de ces deux cartes, résultant de l'étude de la séquestration du carbone et de l'habitat, a permis de faire un état des lieux actuel sur la zone du Ventoux. Les résultats montrent que les massifs forestiers du Ventoux séquestrent globalement peu de carbone par rapport aux forêts françaises. Ceci s'explique notamment par la faible productivité caractérisant les forêts méditerranéennes. Il se peut également que nous ayons sous-estimés certains compartiments forestiers dans les calculs de séquestration de carbone. Enfin, la méthode adoptée se base sur des estimations pouvant être très variables suivant la fertilité de la station, l'essence et la localisation géographique principalement.

En ce qui concerne l'habitat, la zone du Ventoux présente une biodiversité globalement riche, même si le massif forestier du Mont Ventoux possède une plus forte protection que les forêts de plaine. Toutefois, bien que le Ventoux possède une biodiversité exceptionnelle, celle-ci est tout de même menacée. En effet, les changements globaux en cours, et en particulier le réchauffement climatique, constituent une nouvelle menace pour les écosystèmes forestiers, dont les conséquences sont déjà visibles.

Sur le territoire du Ventoux, des évolutions de l'état de la végétation sont déjà observées, telles que l'installation du Chêne Pubescent dans les formations de Pin Noir ou le Pin Sylvestre, le retour du hêtre sous les pins ou dans les chênaies ou l'installation du sapin pectiné sous le pin sylvestre ou le mélèze. De plus, les pins et sapins subissent des dépérissements, qui sont directement corrélés aux variations constantes du climat et conjointement à une augmentation de la fréquence des événements extrêmes. Cependant, certains chercheurs voient en ces phénomènes de dépérissement un processus évolutif d'adaptation, comme une réponse au changement climatique et une sélection naturelle des espèces résistantes.

Suite dans le projet INFORMED :

Les deux cartes réalisées vont servir de support pour l'évaluation économique qui sera effectuée par le LEF. Ces deux cartes seront donc étudiées ensemble, puisqu'ici, l'objectif n'est pas de monétariser la richesse de biodiversité. La même démarche sera ensuite réalisée par l'équipe du projet INFORMED pour les scénarios futurs. La prédiction de l'état de végétation dans les scénarios se fera à l'aide de matrice de transition « à dire d'expert ». Il conviendra alors de comparer les résultats des évaluations économiques entre l'actuel et les scénarios futurs. Ceci permettra alors d'établir des perspectives d'évolution des cartes des écosystèmes et des services écosystémiques rendus. L'évaluation économique des services écosystémiques servira de support dans le choix des

meilleures options futures de gestion. Au final, les résultats de cette étude permettront d'adapter la gestion forestière suivant la perspective d'évolution des forêts, afin de limiter les effets des changements globaux.

Analyse personnelle :

Ayant pour projet de travailler dans le milieu forestier, j'ai décidé d'effectuer mon stage Recherche et Innovation au sein de l'Unité de Recherche Ecologie des Forêts Méditerranéennes (URFM) de l'INRA, à Avignon.

Passionnée par le milieu forestier, et plus particulièrement par la gestion forestière, j'ai pu apprendre énormément dans mon domaine de prédilection. Ce stage de 13 semaines m'a permis de découvrir les forêts méditerranéennes, mais aussi les sujets actuels de recherche forestière, ce qui est très enrichissant pour mon projet professionnel.

De plus, ma mission de stage sur l'évaluation des services écosystémiques du Mont Ventoux, a été très intéressante et stimulante. Tout au long de ce stage, j'ai aussi pu rencontrer divers professionnels qui ont su partager leurs connaissances et leurs savoir-faire dans le domaine forestier. A travers ce stage, j'ai également pu participer à des journées sur le terrain, me permettant de découvrir d'autres projets de recherche.

D'une manière générale, ce stage dans la recherche m'a plu. L'ambiance et les conditions de travail à l'URFM sont très bonnes. Néanmoins, pour ma part, ma mission de stage était trop axée « bureau ». A l'avenir, j'aimerais travailler davantage sur le terrain.

Pour finir, ce stage a été aussi l'occasion de découvrir le Mont Ventoux, ainsi que la belle région de la Provence.

Pour moi, ce stage restera une expérience formidable, mais surtout très enrichissante et passionnante pour mon cursus d'étude.

L'URFM a été le lieu de stage idéal pour apprendre sur les forêts méditerranéennes !

Table des figures et des tableaux

Figures :

Figure 1 : Chênes lièges en forêt méditerranéenne	4
Figure 2 : Sylvopastoralisme en forêt méditerranéenne	4
Figure 3 : Évolution de la température moyenne en surface (a) et évolution des précipitations moyennes (b) pour la période 2081–2100 par rapport à la période 1986–2005, selon les scénarios RCP2,6 (à gauche) et RCP8,5 (à droite)	6
Figure 4 : Présentation du projet INFORMED et de ma mission	8
Figure 5 : Classification des services écosystémiques	10
Figure 6 : Chaîne d'interrelations entre l'écosystème et le bien-être humain	12
Figure 7 : Cadre conceptuel : système socio-écologique	12
Figure 8 : Schéma conceptuel, approche socio-écologique (projet INFORMED)	14
Figure 9 : Carte du relief sur la zone du projet de PNR du Mont Ventoux	16
Figure 10 : Carte de la végétation sur la zone du projet de PNR du Mont Ventoux	16
Figure 11 : Massif du Mont Ventoux à la fin du XIX ^{ème} siècle et aujourd'hui	18
Figure 12 : Carte de végétation (BD FORET® version 2) de la zone d'étude	20
Figure 13 : Diagramme des différents types de végétation présents sur la zone d'étude	22
Figure 14 : Schéma de l'étagement bioclimatique du Mont Ventoux	22
Figure 15 : Carte de végétation avec les étages bioclimatiques	24
Figure 16 : Répartition du carbone des forêts françaises dans les différents compartiments	27
Figure 17a : Echantillon complet systématique dans l'espace et dans le temps	29
Figure 17b : Echantillon annuel à plusieurs niveaux emboîtés	29
Figure 18 : Diagramme des stocks de carbone dans la biomasse aérienne pour les essences principales suivant le type de forêt, en t C/ha	38
Figure 19 : Diagramme des stocks de carbone dans la biomasse racinaire pour les essences principales suivant le type de forêt, en t C/ha	38
Figure 20 : Diagramme en boîte des stocks de carbone dans la biomasse (aérienne et racinaire) par surface, suivant le type de végétation, exprimés en t C ³ /ha, en forêt fermée	40
Figure 21 : Diagramme en boîte des volumes par surface, exprimés en m ³ /ha, en forêt fermée	44
Figure 22 : Diagramme en boîte des volumes de bois morts par surface, exprimés en m ³ /ha, en forêt fermée.....	47
Figure 23 : Réseaux d'îlots de vieux bois sur la zone du Ventoux	50
Figure 24 : Carte finale de la séquestration de carbone dans les forêts du Mont Ventoux, exprimée en t C/ha	52
Figure 25 : Sous-trame forestière identifiée dans le cadre du SCRE PACA	54
Figure 26 : Carte des espaces protégés sur la zone du projet de PNR du Mont Ventoux	56
Figure 27 : Carte finale de l'offre en habitat dans les forêts du Mont Ventoux	60

Tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des informations liées aux arbres inventoriés par l'IGN	29
Tableau 2 : Densités du bois par espèce, exprimées en kg/m ³	33
Tableau 3 : Comparaison des différents facteurs d'expansion branches (FEB)	40
Tableau 4 : Comparaison des différents facteurs d'expansion racines (FER)	40
Tableau 5 : Volumes moyens par espèce, exprimés en m ²	42
Tableau 6 : Résultats des stocks de carbone dans les bois morts suivant le type de forêts	48
Tableau 7 : Indices de richesse de biodiversité	58

Bibliographie

- DUFOUR S., ARNAULD DE SARTRE X., CASTRO-LARRAÑAGA M., LE CLE'CH S., OSZ-WALD J., Chapitre 9 : Cartographie, services écosystémiques et gestion environnementale : entre neutralité technicienne et outil d'empowerment, *Political ecology des services écosystémiques*, Bruxelles, PIE Peter Lang, 2014, p. 225-245.
- LE CLE'CH S., DUFOUR S., JOHAN OSZWALD J., GRIMALDI M., JEGOU N., Chapitre 8 : Spatialiser des services écosystémiques, un enjeu méthodologique et plus encore, *Political ecology des services écosystémiques*, Bruxelles, PIE Peter Lang, 2014, p. 205-223.
- LEGAY M. et LADIER J., La gestion forestière face aux changements climatiques : premières orientations d'adaptation en forêt publique. Le cas des forêts méditerranéennes, *Forêt méditerranéenne*, vol. XXIX, n° 2, 2008, p. 221-234.
- MARESCA B., Etude exploratoire pour une évaluation des services rendus par les écosystèmes en France. Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de Vie (CREDOC), 2009, 30p.
- LIAGRE L., Projet « Planification nationale sur la diversité biologique et mise en œuvre en Algérie du Plan Stratégique de la Convention sur la Diversité Biologique 2011-2020 et des Objectifs d'Aichi », 2015, 65p.
- MEDDEE (2009). Evaluation des services rendus par les écosystèmes en France. Etude exploratoire, synthèse.
- LAVOREL S., Évaluer et cartographier les écosystèmes et les services écosystémiques. Evaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE), séminaire 2014.
- GOURC J., Les aménagements forestiers des forêts publiques du mont Ventoux, *Forêt méditerranéenne*, vol. XXVIII, n° 4, 2007, p. 349-358.
- GAUTHIER O., La forêt méditerranéenne : un modèle de forêt multifonctionnelle, *Forêt méditerranéenne*, vol. XXX, n° 4, 2009, p. 319-322.
- LAMARQUE P., Une approche socio-écologique des services écosystémiques : Cas d'étude des prairies subalpines du Lautaret. Thèse : Université de Grenoble, 2012, 283 p.
- DECHEZLEPRÊTRE Q., Evaluation économique des services écosystémiques, perspectives pour la forêt de fontainebleau. Mémoire de fin d'étude : Université de Versailles, 2013, 109 p.
- GRARD M., Le rôle des politiques publiques dans les services écosystémiques des prairies de montagne. Mémoire de fin d'étude : IEP Paris, 2010, 73 p.
- BARITEAU M., AFXANTIDIS D., BONNIER J., La multifonctionnalité des paysages, La forêt méditerranéenne : un modèle pour comprendre la place et l'usage de la forêt dans les territoires, *Revue forestière française*, vol. LX, n° 5, 2008, p. 563-570.
- DUCLERCQ M., MAVSAR R., VARELA E. et al., Méthodes et outils d'évaluation socio-économique des biens et services rendus par les écosystèmes boisés méditerranéens, Plan Bleu, projet FFEM, 130 p.

KARAVELLAS D., LIARICOS C., REGATO P., Les forêts méditerranéennes menacées par le changement climatique, WWF, IUCN, communiqué de presse, 2008, 2 p.

TEEB, The economics of ecosystems and biodiversity for national and international policy makers, Rapport de synthèse, 2009, 41p.

COURBAUD B., KUNSTLER G., MORIN X., CORDONNIER T., La montagne, laboratoire du changement climatique, Quel futur pour les services écosystémiques de la forêt alpine dans un contexte de changement climatique ?, *Revue de géographie alpine*, vol. 98, n° 4, 2010, 11 p.

CHEVASSUS-AU-LOUIS B., Services écosystémiques : une introduction, Les services écologiques des forêts : définition des concepts, origine et typologies, *Revue forestière française*, vol. LXIV, n° 3, 2012, p. 213-224.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. — Washington, DC : Island Press, 2005.

TISSERAND F., Services rendus par les écosystèmes forestiers et scénarios de valorisation au profit des propriétaires. Le cas des services liés à l'eau. Mémoire de fin d'étude : AgroParisTech, Nancy, 2011, 54 p.

AMIAUD B., CARRERE P., La multifonctionnalité de la prairie pour la fourniture de services écosystémiques, *Fourrages*, n° 211, 2012, p. 229-238.

MONTAGNE C., Jean-Luc PEYRON J-L, Alexandra NIEDZWIEDZ A., La valeur économique totale de la forêt méditerranéenne française, *Forêt méditerranéenne*, vol. XXVI, n° 4, 2005, p. 287-298.

IGN, BD Forêt® Version 2. Descriptif de contenu, 2014, 49 p.

DUPOUEY J-L., PIGNARD G., BADEAU V. et al., Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises, *Revue forestière française*, vol. LII, numéro spécial, 2000, p. 139-154.

SAUGIER B., Bilan carboné des écosystèmes forestiers, *Revue forestière française*, vol. LI, n° 2, 1999, p. 239-253.

LACHAT T., BRANG P., BOLLIGER M. et al., Bois mort en forêt, Formation, importance et conservation, *Notice pour le Patricien-WSL*, n° 52, 2014, 12 p.

COSTANZA R. et al., 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, vol. 387, 1997, p.253-260

DAILY G.C., 1997, Nature's services : societal dependence on natural ecosystems, Washington D.C., Island Press

VALLAURI D., ANDRE J., BLONDEL J., Le bois mort, un attribut vital de la biodiversité de la forêt naturelle, une lacune des forêts gérées, 2002, 34 p.

COLIN A., Evaluation des stocks et des flux de carbone liés à l'activité forestière en Aquitaine. Projet FORSEE. Rapport final, 2004, 88 p.

DUPOUEY J-L., PIGNARD G., Gestion durable des forêts, Quelques problèmes posés par l'évaluation des stocks et flux de carbone forestiers au niveau national, *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4, 2001, p. 294-300.

BADEAU V., DAMBRINE E., WALTER C., Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique, *Etude et gestion des sols*, vol. 6, n° 3, 1999, p. 165-180.

GRINAND C., RAJAONARIVO A., BERNOUX M. et al., Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar, *Etude et gestion des sols*, vol. 16, n° 1, 2009, p. 23-33.

DELEUZE C., MORNEAU F., RENAUD J-P. et al., Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station, *Rendez-vous Techniques*, ONF, n° 44, 2014, p. 22-32.

REVERCHON F., Planter une forêt en région Provence-Alpes-Côte d'Azur pour compenser les émissions de gaz à effet de serre, *Forêt méditerranéenne*, vol. XXVIII, n° 3, 2007, p. 229-236.

COLIN A., DERRIÈRE N., La forêt française : un puits de carbone ? Son rôle dans la limitation des changements climatiques, *L'IF*, IFN, n° 7, 2005, 8 p.

DERRIERE N., WURPILLOT S., VIDAL C., Le bois mort en forêt, *L'IF*, IGN, n° 29, 2012, 8 p.

IGN, Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, Notice méthodologique, 2015, 232 p.

IGN, Résultats d'inventaire forestiers : méthodologie, Pour bien comprendre les résultats publiés, 2016, 37 p.

LOUSTAU D., Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Projet CARBOFOR. Rapport final, 2004, 138 p.

ROSSI M., ANDRE J., VALLAURI D., Le carbone forestier en mouvements. Éléments de réflexion pour une politique maximisant les atouts du bois. Rapport REFORA, 2015, 54 p.

CATEAU E., PARROT M., REYNA K., ROUX A., ROSSI M., BRUCIAMACCHIE M., VALLAURI D., Réseau d'îlots de vieux bois. Éléments de méthode et test dans les forêts publiques du Mont-Ventoux. Rapport final, 2013, 66 p.

MARIS V., Quelle(s) valeur(s) pour la biodiversité ? De la nature aux services écosystémiques, Une commodification de la biodiversité, *Revue critique d'écologie politique*, n° 38, 2011, 4 p.

Comité français de l'UICN, Panorama des services écologiques fournis par les milieux naturels en France, volume 1 : Contexte et enjeux, Paris, 2012, 48 p.

SMAEMV (Syndicat Mixte d'Aménagement et d'Équipement du Mont-Ventoux), Avant-projet de Charte du Parc Naturel Régional du Mont-Ventoux, 2014, 111 p.

SMAEMV, Projet de Parc naturel régional du Mont-Ventoux. Diagnostic du territoire, 2014, 144 p.

SCRE, Schéma Régional de Cohérence Ecologique, Diagnostic & Plan d'action stratégique, 2014, 113 p.

GIEC, 2014: Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

MARIEN J-N., BILLAND A., Les systèmes socio-écologiques forestiers méditerranéens face aux changements globaux. Quelques questions posées par la filière bois énergie au Maroc, *Forêt méditerranéenne*, vol. XXX, n° 4, 2009, p. 297-300.

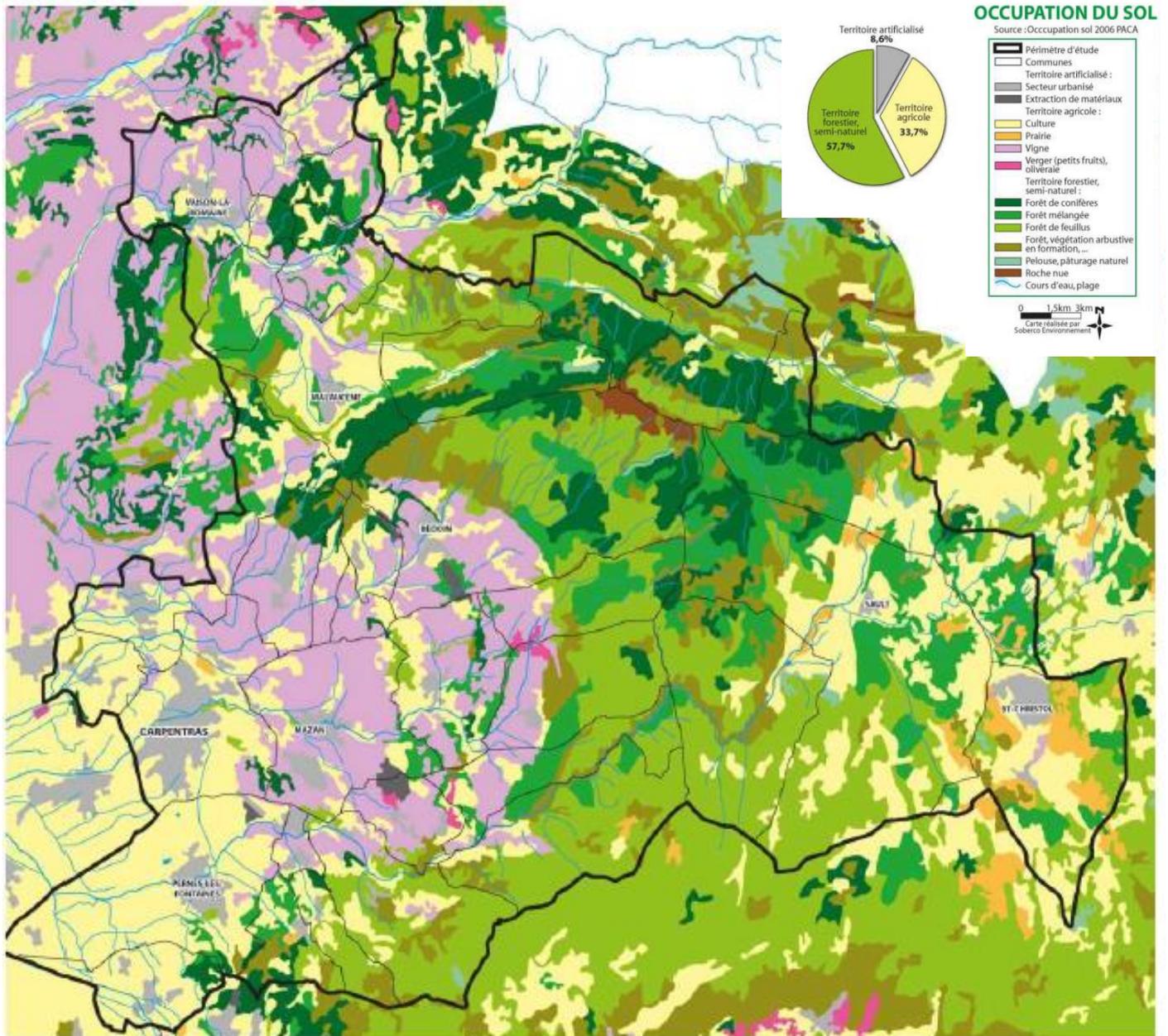
Sites internet :

- <http://www6.inra.fr> (projet INFORMED)
- <http://www.smaemv.fr/>
- <http://www.ipcc.ch>
- <http://www.developpement-durable.gouv.fr>
- <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/>

ANNEXES

ANNEXE I : Occupation du sol sur la zone d'étude	1
ANNEXE II : Liste des libellés décrivant la zone d'étude	2
ANNEXE III : Type de données IFN disponibles	3
ANNEXE IV : Détail du calcul pour le stock de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire, cas du Cèdre de l'Atlas	5
ANNEXE V : Résultats des stocks de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire par essence, en forêt fermée (en t C/ha)	7
ANNEXE VI : Résultats des stocks de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire par essence, en forêt ouverte (en t C/ha)	9
ANNEXE VII : Données moyennes des arbres inventoriés par l'IGN	10
ANNEXE VIII : Données des stocks de carbone dans les forêts du Mont Ventoux (en t C/ha), suivant les différents types de végétation (libellé)	11
ANNEXE IX : Carte des espaces gérés et inventoriés	12
ANNEXE X : Zones de protection et de conservation de la biodiversité	13

ANNEXE I : Occupation du sol sur la zone d'étude



Source : SMAEMV, Projet du Parc naturel régional du Mont-Ventoux. Diagnostic du territoire, 2014

ANNEXE II : Liste des libellés décrivant la zone d'étude

Libellé	Surface en km ²	Pourcentage	Pourcentage pondéré
1 Forêt fermée de chêne pubescent	103,29	18,05	18,05
2 Forêt fermée de chêne vert	58,19	10,17	28,22
3 Forêt fermée mélangée d'autres feuillus et conifères	56,38	9,85	38,07
4 Forêt fermée de plusieurs feuillus sans qu'une essence ne soit pure	50,20	8,77	46,84
5 Forêt fermée mélangée d'autres pins et feuillus	44,84	7,84	54,68
6 Forêt fermée de pin laricio ou pin noir pur ou en mélange	37,72	6,59	61,27
7 Forêt fermée de pin d'Alep	34,63	6,05	67,32
8 Forêt fermée mélangée de pin d'Alep et feuillus	16,89	2,95	70,27
9 Forêt ouverte de chêne vert	16,72	2,92	73,19
10 Forêt fermée de plusieurs pins sans qu'une essence ne soit pure	13,41	2,34	75,54
11 Forêt ouverte de chênes décidus	13,29	2,32	77,86
12 Forêt fermée de hêtre	10,30	1,80	79,66
13 Forêt ouverte d'autres feuillus	9,20	1,61	81,27
14 Forêt fermée de pin à crochets ou pin cembro pur ou en mélange	8,91	1,56	82,82
15 Forêt fermée mélangée de chêne vert et conifères	8,64	1,51	84,33
16 Lande (zone phytogéographique)	7,90	1,38	85,71
17 Forêt ouverte de pins mélangés ou autres pins purs	7,86	1,37	87,09
18 Forêt ouverte mélangée d'autres feuillus et conifères	6,93	1,21	88,30
19 Forêt fermée de cèdre	6,90	1,21	89,50
20 Forêt fermée mélangée de cèdre et de feuillus	6,89	1,20	90,71
21 Forêt fermée de pin sylvestre	5,52	0,96	91,67
22 Forêt fermée de plusieurs conifères (pins >=25% et conifères autres que pins >=25%)	5,30	0,93	92,60
23 Lande ligneux bas >= 25% (<2ha)	4,54	0,79	93,39
24 Forêt fermée mélangée de pin maritime et feuillus	4,48	0,78	94,18
25 Forêt fermée mélangée d'autres conifères et feuillus	3,66	0,64	94,82
26 Forêt fermée de feuillus purs en lots (<2ha)	3,35	0,59	95,40
27 Lande, en dessous de la limite altitudinale de la végétation forestière (hors zone phytogéographique)	2,78	0,49	95,89
28 Forêt ouverte mélangée d'autres pins et feuillus	2,68	0,47	96,36
29 Forêt ouverte de pin d'Alep	2,16	0,38	96,73
30 Dlais de cultures, au voisinage de terrains agricoles, récemment abandonné et embroussaillé.	2,09	0,37	97,10
31 Formation herbacée ligneux bas < 25% (<2ha)	1,97	0,34	97,44
32 Forêt ouverte mélangée de pin d'Alep et feuillus	1,91	0,33	97,78
33 Formation pastorale, en dessous de la limite altitudinale de la végétation forestière (hors zone phytogéographique)	1,81	0,32	98,09
34 Forêt fermée de pin maritime	1,68	0,29	98,39
35 Coupe ou incident ou régénération naturelle	1,50	0,26	98,65
36 Formation pastorale (zone phytogéographique)	1,17	0,20	98,85
37 Forêt fermée de plusieurs autres conifères autres que pins	1,05	0,18	99,04
38 Forêt ouverte mélangée de chêne vert et conifères	0,90	0,16	99,19
39 Forêt fermée mélangée de conifères prépondérants et feuillus en lots (essence non discriminée)	0,86	0,15	99,34
40 Lande, au-dessus de la limite altitudinale de la végétation forestière (hors zone phytogéographique)	0,86	0,15	99,50
41 Forêt fermée mélangée de feuillus prépondérants et conifères en lots (essence non discriminée)	0,80	0,14	99,63
42 Forêt fermée de conifères en lots (<2ha)	0,69	0,12	99,75
43 Forêt ouverte d'autres conifères mélangés ou purs	0,45	0,08	99,83
44 Forêt fermée de sapin ou d'épica pur ou en mélange	0,29	0,05	99,88
45 Forêt ouverte mélangée d'autres conifères et feuillus	0,14	0,02	99,91
46 Forêt fermée d'un autre conifère autre que pin, sapin, épica, douglas, mélèze ou cèdre	0,12	0,02	99,93
47 Forêt ouverte mélangée de pin maritime et feuillus	0,12	0,02	99,95
48 Forêt ouverte incident	0,08	0,01	99,96
49 Formation pastorale, au-dessus de la limite altitudinale de la végétation forestière (hors zone phytogéographique)	0,06	0,01	99,97
50 Forêt fermée de chataignier	0,05	0,01	99,98
51 Forêt fermée de chêne-lige	0,04	0,01	99,99
52 Forêt ouverte de pin maritime	0,03	0,01	99,99
53 Forêt fermée de mélèze	0,02	0,00	100,00
54 Forêt fermée d'un autre feuillu (autre que les feuillus distingués précédemment)	0,01	0,00	100,00
55 Peupleraie	0,01	0,00	100,00
Total	572,25	100,00	-

ANNEXE III : Type de données IFN disponibles

Données « placette » :

	définition	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
idp	identifiant du point d'inventaire										
x193	coordonnées géographiques										
y193	coordonnées géographiques										
dep	département										
ser	sylvocorégion										
csa	couverture du sol										
uta1	utilisation du sol										
uta2	utilisation du sol										
tm2	taille de massif										
plisi	présence de lisière										
sver	structure verticale										
elisi	exposition de la lisière										
sfo	structure forestière										
gest	traces de gestion dans l'intention d'exploiter										
incid	indicateur d'incident récent										
peupnr	indicateur de peuplement non recensable										
dc	type de coupe										
dcespar1	espèce arborée coupée majoritaire										
dcespar2	espèce arborée coupée secondaire										
tplant	type de plantation										
tpespar1	espèce arborée plantée majoritaire										
tpespar2	espèce arborée plantée secondaire										
dist	distance de débardage										
iti	itinéraire de débardage										
pentexp	indicateur de pente maximale de débardage										
portance	indicateur de portance du sol										
asperite	indicateur d'aspérité										
cam	classe d'âge mesuré										
acces	accessibilité										
pentn	classe de pente d'exploitation										
portn	nature du terrain										
esspre	essence principale										
cac	classe d'âge										
ess_age_1	essence sur laquelle repose l'âge										

Données « arbres vivants » :

	définition	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
idp	identifiant du point d'inventaire										
a	identifiant de l'arbre										
veget	état de végétation										
simplif	indicateur d'arbre simplifié										
acci	accident de l'arbre										
espar	espèce arborée										
ori	origine de l'arbre										
lib	taux de couvert libre de l'arbre										
forme	forme du houppier										
tige	forme de la tige										
mortb	mortalité de branches dans le houppier										
sfgui	présence de gui										
sfgeliv	présence de gélivure										
sfped	blessure ou pourriture de pied										
sfforge	dorge et balais de sorcière sur sapins										
sfcoeur	pourriture à cœur										
c13	circonférence à 1,30 m (cm)										
ir5	accroissement radial sur 5 ans (mm)										
htot	hauteur totale (m)										
hdec	hauteur à la découpe (m)										
decoupe	type de découpe										
qualite	qualité de l'arbre										
q1	taux de qualité 1										
q2	taux de qualité 2										
q3	taux de qualité 3										
r	taux de rebut										
lfsd	longueur de fût sans défaut (m)										
age	âge à 1,30 m										
v	volume de l'arbre										
w	coefficient de pondération de l'arbre										

Données « arbres morts » :

	définition	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
idp	identifiant du point d'inventaire										
a	identifiant de l'arbre										
espar	espèce arborée										
ori	origine de l'arbre										
veget	état de végétation										
datemort	date présumée de la mort										
c13	circonférence à 1,30 m (cm)										
c0	circonférence "à la souche" (cm)										
v	volume de l'arbre										
w	coefficient de pondération de l'arbre										

Données « écologiques » :

	définition	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
idp	identifiant du point d'inventaire										
xi93	coordonnées géographiques										
yi93	coordonnées géographiques										
dep	département										
ser	syvoécorégion										
dateco	date de la description écologique										
obsdate	observation sur les aérés climatiques										
topo	position topographique										
obstopo	observation sur le relevé topographique										
pent2	(plus grande) pente de la placette (%)										
expo	exposition de la placette (gr)										
masque	masque opposé (gr)										
humus	type d'humus										
obspedo	observation sur le relevé pédologique										
roche	type de roche-mère										
obsroc	observation sur la roche										
affroc	indice d'affleurement rocheux										
afpla	indice d'affleurement rocheux en place										
cailloux	charge en éléments grossiers										
cai40	charge en éléments grossiers dans les 40 premiers centimètres										
text2	texture de l'horizon inférieur										
text1	texture de l'horizon supérieur										
prof2	profondeur de l'horizon inférieur										
prof1	profondeur de l'horizon supérieur										
obsprof	observation sur la profondeur de sondage										
pcalc	profondeur d'apparition de la carbonatation										
pcalf	profondeur d'apparition de la carbonatation forte										
pox	profondeur d'apparition des taches d'oxydation										
pnseuidn	profondeur d'apparition du nseuidn										
pgley	profondeur d'apparition du gley										
obshydr	observation sur l'hydromorphie										
tsol	type de sol										
lign1	taux de couvert des ligneux bas										
lign2	taux de couvert des ligneux haut										
herb	taux de couvert des herbacées et mousses										
obsveget	observation sur le relevé de la végétation										
mousse	taux de couvert des mousses										
obsriv	présence de ruisseau										
obsriv2	type d'unité hydrographique										
distriv	distance entre la placette et l'unité hydrographique										
deniviv	dénivelé entre la placette et l'unité hydrographique										

Légende



Données disponibles



Données mises à jour (évolution)



Données non disponibles

Définition Données intéressantes pour l'étude

ANNEXE IV : Détail du calcul pour le stock de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire, cas du Cèdre de l'Atlas.

Pour chaque essence nous avons réalisé ce type de tableau croisé :

N° placette	Cèdre de l'atlas		Proportion du Cèdre de l'Atlas dans chacune des placettes (en pourcentage de surface terrière)
	Somme de Ckg/ha racinaire	Somme de Ckg/ha aérienne	
121544	2487.729985	12150.00198	65.16%
254598	175.9632966	1048.447976	3.97%
258177	239.94995	1429.701785	17.03%
368618	783.8365032	4670.359165	69.17%
421030	504.7835984	2439.787392	8.59%
452838	4276.44133	25480.46293	79.42%
751327	527.8898899	3145.343927	100.00%
903373	881.3095051	4259.662608	30.40%
910218	2232.707623	10791.42018	24.47%
961786	213.2888444	1270.846031	2.50%
Total général	12323.90053	66686.03397	1.97%

Par exemple, la placette N° 121544 possède 65.16 % de Cèdre de l'Atlas. Ce pourcentage est calculé à partir de la surface terrière. Ces Cèdres stockent dans leur biomasse aérienne 12 150.0 kgC /ha et dans leur biomasse racinaire 2 487.7 kgC /ha.

Ensuite, nous avons ramené les valeurs de stock de carbone à une proportion de 100 % (considéré comme un peuplement pur).

Cèdre de l'Atlas				
213,288844	8515,72881	1270,84603	50739,5508	0,02504646
175,963297	4429,11828	1048,44798	26390,1631	0,03972874
504,783598	5875,18643	2439,78739	28396,734	0,08591789
239,94995	1408,95611	1429,70179	8395,03017	0,17030335
2232,70762	9124,77835	10791,4202	44103,0954	0,24468623
881,309505	2898,77385	4259,66261	14010,7403	0,30402838
2487,72998	3817,97449	12150,002	18646,873	0,65158371
783,836503	1133,22247	4670,35916	6752,11713	0,69168811
4276,44133	5384,41853	25480,4629	32082,1604	0,79422528
527,88989	527,88989	3145,34393	3145,34393	1
	4311,60472		23266,1814	

Moyenne des valeurs de stock de carbone ramenées à 100 %

Stock de carbone dans la biomasse racinaire
Stock de carbone dans la biomasse aérienne

Par exemple, pour le Cèdre de l'Atlas, pour la première ligne (soit la première placette), nous avons une proportion de 0.025 de Cèdre de l'Atlas, soit 2.5 %. Sur cette placette, les Cèdres stockent dans leur biomasse aérienne 1270.85 C kg/ha et dans leur biomasse racinaire 213.29 C kg/ha. Si nous considérons que cette placette est pure (100 % de Cèdre de l'Atlas), les Cèdres stockeraient dans leur biomasse aérienne 50739.55 C kg/ha et dans leur biomasse racinaire 8515.73 C kg/ha. Pour ce calcul, nous supposons que le stock de carbone dans la biomasse d'une espèce est proportionnel à sa proportion en termes de surface terrière, dans une placette considérée.

ANNEXE V : Résultats des stocks de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire par essence, en forêt fermée (en t C/ha)

Essence	Nombre de placettes	Aérienne	(+ feuilles)	Total
Pin à crochets	8	43.4471944	4.61749375	48.0646881
Frêne oxyphylle	1	39.8418058	1.0862083	40.9280141
Pin noir d'Autriche	33	36.889785	2.28381403	39.173599
Erable champêtre	1	31.8873069	1.39023268	33.2775396
Hêtre	9	29.819125	1.61954156	31.4386666
Pin sylvestre	43	27.7881113	2.72210172	30.510213
Cèdre	10	23.2661814	4.75889368	28.0250751
Pin d'Alep	23	21.2119229	6.67722326	27.8891462
Poirier commun	1	21.6318953	1.45560685	23.0875022
Peuplier blanc	2	20.3127959	1.14338531	21.4561812
Alisier blanc	10	20.1889912	1.01028219	21.1992734
Sapin pectiné	1	13.8329218	6.90509149	20.7380132
Chêne pubescent	91	16.9117512	0.930941	17.8426922
Olivier d'Europe	1	15.3751935	2.16609355	17.5412871
Nerprun purgatif	1	15.5666076	1.45560685	17.0222144
Robinier faux acacia	1	15.4363131	1.45560685	16.8919199
Erable à feuilles d'obier	2	15.3592347	0.92312233	16.282357
Chêne vert	45	12.8247799	3.19616864	16.0209486
Orme champêtre	1	13.9578931	1.59599793	15.553891
Génévrier commun	5	12.6406443	2.1716381	14.8122824
Génévrier oxycèdre	3	12.567631	2.1716381	14.7392691
Erable de Montpellier	6	10.1418832	1.37146339	11.5133466
Cormier	1	3.44967298	1.56500768	5.01468067
Alisier torminal	1	3.95690318	1.01028219	4.96718536
Noisetier coudrier	1	1.74853257	1.3697691	3.11830167
Moyenne conifères		23.955549	4.03848677	27.9940358
Moyenne pins		32.3342534	4.07515819	36.4094116
Moyenne feuillus		16.9653344	1.45560685	18.4209413
Moyenne générale		19.2022031	2.28212842	21.4843315

Essence	Nombre de placettes	Racinaire	(+ fines racines)	Total
Pin à crochets	8	8.90121443	4.617493749	13.5187082
Pin d'Alep	23	4.1919809	6.677223265	10.8692042
Pin noir d'Autriche	33	7.27713838	2.283814031	9.56095241
Sapin pectiné	1	2.32160924	6.905091493	9.22670074
Cèdre	10	4.31160472	4.758893684	9.07049841
Frêne oxyphylle	1	7.64962672	1.086208301	8.73583502
Pin sylvestre	43	5.32185915	2.722101718	8.04396087
Erable champêtre	1	6.12236293	1.390232678	7.51259561
Hêtre	9	5.725272	1.619541563	7.34481356
Chêne vert	45	2.46235775	3.19616864	5.65852639
Poirier commun	1	4.1533239	1.455606847	5.60893075
Olivier d'Europe	1	2.95203716	2.166093549	5.11813071
Peuplier blanc	2	3.90005682	1.143385314	5.04344213
Alisier blanc	10	3.87628631	1.010282186	4.8865685
Nerprun purgatif	1	2.98878866	1.455606847	4.44439551
Robinier faux acacia	1	2.96377211	1.455606847	4.41937896
Génévrier commun	5	2.12150673	2.1716381	4.29314483
Génévrier oxycèdre	3	2.10925276	2.1716381	4.28089086
Orme champêtre	1	2.67991547	1.595997932	4.2759134
Chêne pubescent	91	3.24705623	0.930941	4.17799723
Erable à feuilles d'obier	2	2.94897306	0.923122332	3.87209539
Erable de Montpellier	6	1.94724158	1.371463394	3.31870498
Cormier	1	0.66233721	1.565007681	2.22734489
Alisier torminal	1	0.75972541	1.010282186	1.7700076
Noisetier coudrier	1	0.33571825	1.369769099	1.70548735
Moyenne conifères		4.56952079	4.038486767	8.60800756
Moyenne pins		6.42304822	4.075158191	10.4982064
Moyenne feuillus		3.25734421	1.455606847	4.71295106
Moyenne générale		3.67724072	2.282128421	5.95936914

ANNEXE VI : Résultats des stocks de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire par essence, en forêt ouverte (en t C/ha)

Essence	Nombre de placettes	Aérienne	(+ feuilles)	Total
Pin d'Alep	2	7.25090038	2.22574109	9.47664147
Pin sylvestre	4	7.25090038	0.90736724	8.15826762
Chêne vert	7	6.37977282	1.06538955	7.44516237
Chêne pubescent	7	6.85048346	0.31031367	7.16079712
Pin noir d'Autriche	4	5.34557192	0.76127134	6.10684326
Moyenne conifères		6.6157909	1.29812656	7.91391745
Moyenne pins		6.6157909	1.29812656	7.91391745
Moyenne feuillus		6.61512814	0.68785161	7.30297975
Moyenne générale		6.61552579	1.05401658	7.66954237

Essence	Nombre de placettes	Racinaire	(+ fines racines)	Total
Chêne vert	7	1.26472534	2.22574109	3.49046643
Pin sylvestre	4	1.22491638	1.06538955	2.29030593
Pin noir d'Autriche	4	1.23529919	0.90736724	2.14266642
Chêne pubescent	7	1.02694269	0.76127134	1.78821403
Pin d'Alep	2	1.31529282	0.31031367	1.62560649
Moyenne conifères		1.17565574	1.29812656	2.4737823
Moyenne pins		1.17565574	1.29812656	2.4737823
Moyenne feuillus		1.2701046	0.68785161	1.95795621
Moyenne générale		1.21343528	1.05401658	2.26745186

ANNEXE VII : Données moyennes des arbres inventoriés par l'IGN

Essence	Volume (m³)	Circonférence (cm)	Hauteur (m)
Chêne pubescent	0.0896	46.2089	7.5792
Chêne vert	0.0249	34.4024	4.7630
Hêtre	0.0637	40.1053	7.2389
Robinier faux acacia	0.0120	25.0000	8.8000
Olivier d'Europe	0.0581	53.6000	4.7857
Noisetier coudrier	0.0203	29.6667	7.9000
Alisier torminal	0.0150	28.0000	6.2000
Pin sylvestre	0.2673	70.4895	10.0772
Pin noir d'Autriche	0.6720	95.7964	14.1186
Pin à crochets	0.5164	100.8261	10.9913
Sapin pectiné	0.0100	25.0000	4.9000
Cèdre de l'Atlas	0.2578	60.8462	8.4308
Frêne oxyphylle	0.1927	58.6667	14.7333
Orme champêtre	0.0100	24.0000	8.4000
Tilleul à grandes feuilles	0.2690	76.0000	12.0000
Erable champêtre	0.0740	51.0000	8.3000
Erable de Montpellier	0.0192	29.8462	6.1846
Erable à feuilles d'obier	0.0730	42.5000	8.6000
Merisier	0.0170	29.0000	6.0500
Alisier blanc	0.0369	36.7576	7.1320
Cormier	0.0375	40.0000	6.9500
Poirier commun	0.0297	38.6667	5.0000
Peuplier blanc	0.1017	45.8571	13.2857
Neprun purgatif	0.0080	24.0000	3.4000
Pin d'Alep	0.3715	85.3143	11.2652
Genévrier commun	0.0176	29.6667	4.1556
Genévrier oxycèdre	0.0232	33.1667	4.0000

ANNEXE VIII : Données des stocks de carbone dans les forêts du Mont Ventoux (en t C/ha), suivant les différents types de végétation (libellé)

Libellé	Etage bioclimatique	Biomasse aérienne	Biomasse racinaire	Bois morts	Sol	Surface en km²
1 Forêt fermée de chêne pubescent		17,8427	4,1780	0,8370	92,0000	103,2850
2 Forêt fermée de chêne vert		16,0209	5,6585	0,8370	92,0000	58,1856
Forêt fermée mélangée d'autres feuillus et conifères						56,3801
3	Plaine	21,9814	6,8096	0,8370	92,0000	
4	Méditerranéen	21,9814	6,8096	0,8370	92,0000	
5	Supra-méditerranéen	23,0628	6,0361	0,8370	92,0000	
6	Montagnard inférieur	28,0070	7,0842	0,8370	92,0000	
7	Montagnard Supérieur et +	32,9442	8,6239	0,8370	92,0000	
8 Forêt fermée de plusieurs feuillus sans qu'une essence ne soit pure		18,4209	4,7130	0,8370	92,0000	50,2003
Forêt fermée mélangée d'autres pins et feuillus						44,8391
9	Plaine	29,0787	8,5592	0,8370	92,0000	
10	Méditerranéen	29,0787	8,5592	0,8370	92,0000	
11	Supra-méditerranéen	28,7880	7,4035	0,8370	92,0000	
12	Montagnard inférieur	30,0716	7,8198	0,8370	92,0000	
13	Montagnard Supérieur et +	38,3002	10,3861	0,8370	92,0000	
14 Forêt fermée de pin laricio ou pin noir pur ou en mélange		39,1736	9,5610	0,8370	92,0000	37,7190
15 Forêt fermée de pin d'Alep		27,8891	10,8692	0,8370	92,0000	34,6284
Forêt fermée mélangée de pin d'Alep et feuillus						16,8883
16	Plaine	23,7536	8,7911	0,8370	92,0000	
17	Méditerranéen	23,7536	8,7911	0,8370	92,0000	
18 Forêt ouverte de chêne vert		7,4452	2,2903	0,2168	92,0000	16,7226
19 Forêt fermée de plusieurs pins sans qu'une essence ne soit pure		36,4094	10,4982	0,8370	92,0000	13,4057
20 Forêt ouverte de chênes décidus		7,1608	1,6256	0,2168	92,0000	13,2911
21 Forêt fermée de hêtre		31,4387	7,3448	0,8370	92,0000	10,2967
22 Forêt ouverte d'autres feuillus		7,3030	1,9580	0,2168	92,0000	9,1955
23 Forêt fermée de pin à crochets ou pin cembro pur ou en mélange		48,0647	13,5187	0,8370	92,0000	8,9102
Forêt fermée mélangée de chêne vert et conifères						8,6439
24	Plaine	20,4814	7,4005	0,8370	92,0000	
25	Méditerranéen	20,4814	7,4005	0,8370	92,0000	
26	Supra-méditerranéen	21,7977	6,8444	0,8370	92,0000	
27 Lande (zone phytogéographique)		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	7,8986
28 Forêt ouverte de pins mlangs ou autres pins purs		7,9139	2,4738	0,2168	92,0000	7,8631
29 Forêt ouverte mélangée d'autres feuillus et conifères		7,5321	2,1514	0,2168	92,0000	6,9336
30 Forêt fermée de cèdre		28,0251	9,0705	0,8370	92,0000	6,8971
Forêt fermée mélangée de cèdre et de feuillus						6,8917
31	Plaine	23,8385	7,6669	0,8370	92,0000	
32	Méditerranéen	23,8385	7,6669	0,8370	92,0000	
33	Supra-méditerranéen	24,2826	7,3060	0,8370	92,0000	
34	Montagnard inférieur	27,5966	8,0779	0,8370	92,0000	
35 Forêt fermée de pin sylvestre		30,5102	8,0440	0,8370	92,0000	5,5221
36 Forêt fermée de plusieurs conifères (pins >=25% et conifères autres que pins >=25%)		27,9940	8,6080	0,8370	92,0000	5,3031
37 Lande ligneux bas >= 25% (<2ha)		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	4,5431
Forêt fermée mélangée de pin maritime et feuillus						4,4761
38	Plaine	23,7536	8,7911	0,8370	92,0000	
39	Méditerranéen	23,7536	8,7911	0,8370	92,0000	
40	Supra-méditerranéen	24,1976	8,4302	0,8370	92,0000	
Forêt fermée mélangée d'autres conifères et feuillus						3,6626
41	Plaine	23,8191	7,3778	0,8370	92,0000	
42	Méditerranéen	23,8191	7,3778	0,8370	92,0000	
43	Supra-méditerranéen	24,2632	7,0170	0,8370	92,0000	
44	Montagnard inférieur et +	27,5772	7,7889	0,8370	92,0000	
45 Forêt fermée de feuillus purs en lots (<2ha)		18,4209	4,7130	0,8370	92,0000	3,3477
46 Lande, en dessous de la limite altitudinale de la végétation forestière (hors zone phytogéographique)		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	2,7829
47 Forêt ouverte mélangée d'autres pins et feuillus		7,6848	2,2803	0,2168	92,0000	2,6809
48 Forêt ouverte de pin d'Alep		9,4766	3,4905	0,2168	92,0000	2,1640
49 Dlais de cultures, au voisinage de terrains agricoles, récemment abandonné et embroussaillé		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	2,0907
50 Formation herbacée ligneux bas < 25% (<2ha)		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	1,9662
51 Forêt ouverte mélangée de pin d'Alep et feuillus		8,6615	2,9158	0,2168	92,0000	1,9114
52 Formation pastorale, en dessous de la limite altitudinale de la végétation forestière (hors zone phytogéographique)		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	1,8099
53 Forêt fermée de pin maritime		27,8891	10,8692	0,8370	92,0000	1,6758
54 Coupe ou incident ou régénération naturelle		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	1,4990
55 Formation pastorale (zone phytogéographique)		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	1,1712
56 Forêt fermée de plusieurs autres conifères autres que pin		24,3815	9,1486	0,8370	92,0000	1,0453
57 Forêt ouverte mélangée de chêne vert et conifères		7,6209	2,3591	0,2168	92,0000	0,9046
58 Forêt fermée mélangée de conifères prépondérants et feuillus en lots (essence non discriminée)		24,4041	7,1474	0,8370	92,0000	0,8644
59 Lande, au dessus de la limite altitudinale de la végétation forestière		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	0,8630
60 Forêt fermée mélangée de feuillus prépondérants et conifères en lots (essence non discriminée)		22,0109	6,1736	0,8370	92,0000	0,7958
61 Forêt fermée de conifères en lots (<2ha)		27,9940	8,6080	0,8370	92,0000	0,6863
62 Forêt ouverte d'autres conifères mélangés ou purs		7,9139	2,4738	0,2168	92,0000	0,4450
63 Forêt fermée de sapin ou d'épicéa pur ou en mélange		20,7380	9,2267	0,8370	92,0000	0,2850
64 Forêt ouverte mélangée d'autres conifères et feuillus		7,6848	2,2803	0,2168	92,0000	0,1371
65 Forêt fermée d'un autre conifère autre que pin, sapin, épicéa, douglas, mélèze ou cèdre		27,9940	8,6080	0,8370	92,0000	0,1172
66 Forêt ouverte mélangée de pin maritime et feuillus		8,6615	2,9158	0,2168	92,0000	0,1159
67 Forêt ouverte incident		0,7670	0,2267	0,2168	92,0000	0,0790
68 Formation pastorale, au-dessus de la limite altitudinale de la végétation forestière		2,1484	0,5959	0,2168	92,0000	0,0617
69 Forêt fermée de châtaigner		18,4209	4,7130	0,8370	92,0000	0,0501
70 Forêt fermée de chêne-lige		18,4209	4,7130	0,8370	92,0000	0,0395
71 Forêt ouverte de pin maritime		9,4766	3,4905	0,2168	92,0000	0,0324
72 Forêt fermée de mélèze		28,0251	9,0705	0,8370	92,0000	0,0240
73 Forêt fermée d'un autre feuillu (autre que les feuillus distingués précédemment)		18,4209	4,7130	0,8370	92,0000	0,0113
74 Peupleraie		21,4562	5,0434	0,8370	92,0000	0,0063
						572,2462

ANNEXE X : Zones de protection et de conservation de la biodiversité

- **Réserve de biosphère**, créée en 1990 :

Aire centrale : 2 126 ha, représentent des écosystèmes représentatifs de l'originalité écologique de la Réserve de Biosphère et dispose d'enjeux de protection associés. Elles font l'objet d'un arrêté préfectoral de protection de biotope. Au total, six zones ont été délimitées :

Partie sommitale du Mont Ventoux (963 ha)

Plateau du Mont Serein (409 ha)

Hêtraie du Mont Ventoux (98 ha)

Série de cèdres de Rolland (58 ha)

Tête de l'Emine (81 ha)

Gorges de la Nesque (517 ha)

Zone tampon : 26 830 ha, correspond à l'espace forestier du Mont Ventoux.

Zone de coopération : 90 000 ha (dont 82 240 ha sur le territoire de projet du PNR).

- **Réserve biologique intégrale (RBI)**, forêt domaniale du Ventoux et du Toulourenc

- **6 Arrêtés préfectoraux de protection de biotope** :

Partie sommitale du Mont Ventoux (963 ha)

Plateau du Mont Serein (409 ha)

Hêtraie du Mont Ventoux (98 ha)

Série de cèdres de Rolland (58 ha)

Tête de l'Emine (81 ha)

Gorges de la Nesque (517 ha)

- **15 Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique I (ZNIEFF I)**. 20 171 ha sur la zone PNR, soit 20.4 % de la surface totale du ZNIEFF I

Pelouses du Mont Serein (59.9 ha)

Les Sorgues (60.9 ha)

Gypses de Mormoiron/Blauvac (114.4 ha)

Saint-Amand et Arfuyen (199.6 ha)

Pinède à pin à crochets des Costières du mont Ventoux (235.6 ha)

Crêtes des monts de Vaucluse, du col de Murs au col de la Ligne (238.7 ha)

Ocres de Bédoin/Mormoiron (446.2 ha)

Crêtes du mont Ventoux (723.1 ha)

Pelouses et combes du flanc occidental du mont Ventoux (824.3 ha)

Combes septentrionales des Monts de Vaucluse, de Vaulongue à Saint-Gens (1489.2 ha)

Hêtraie sapinière et hêtraie mésophile du mont Ventoux (1664.3 ha)

La Nesque (1804.7 ha)

Hêtraie sèche du mont Ventoux (1838.5 ha)

Hauts plateaux des Monts de Vaucluse (3745.0 ha)

Plateau d'Albion (6711.9 ha)

- 7 Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique II (ZNIEFF II). 45

778 ha sur la zone PNR, soit 46.2 % de la surface totale du ZNIEFF II

Bassin de Monieux/Sault (1640.4 ha)

Bluye et Geine (1976.6 ha)

Dentelles de Montmirail (1843.4 ha)

Le Toulourenc (553.5 ha)

L'Ouvèze (162.1 ha)

Mont Ventoux (23902.8 ha)

Monts de Vaucluse (15699.6 ha)

- 4 sites Natura 2000 (3 Zones spéciales de conservation. ZSC et un site d'intérêt communautaire. SIC), plus de 5800 ha :

L'Ouvèze et le Toulourenc. 1247 ha (ZSC). 17 habitats d'intérêt communautaire

Le Mont Ventoux. 3140 ha (ZSC). 15 habitats d'intérêt communautaire

Les gorges de la Nesque. 1233 ha (ZSC). 16 habitats d'intérêt communautaire + 4 habitats d'intérêt communautaire prioritaire

La Sorgue et l'Auzon. 233 ha (SIC). 11 habitats d'intérêt communautaire

Tous ces sites possèdent un Document d'Objectifs (DOCOB)

- 5 Espaces Naturels Sensibles (ENS)

Le lac du Paty (264 ha)

La forêt départementale de Venasque (10 ha)

La pérégrine et le ravin du défend (111 ha)

La zone humide de belle île (25 ha)

La forêt départementale du Groseau (24 ha)

- 8 Zones d'intérêt biologique (ZIB)

Comtat Venaissin

Coteaux du Ventoux

Dentelles de Montmirail

Mont Ventoux

Monts de Vaucluse

Pays Voconce

Plateau de Sault

Vallée du Toulourenc

- Trame verte et bleue. SRCE (Schéma Régional de Cohérence Ecologique)

Réservoirs de biodiversité, il s'agit principalement des milieux forestiers du Ventoux, des Monts de Vaucluse et d'une partie des Dentelles de Montmirail, des milieux ouverts et semi-ouverts du plateau de Sault, des Gorges de la Nesque, mais également les cours d'eau et les zones humides : l'Ouvèze, la Nesque et l'Auzon.

Corridors écologiques