

Université De Franche-Comté
U.F.R des Sciences du Langage, de l'Homme et de la Société
École Doctorale "Langages, Espaces, Temps, Sociétés"
Laboratoire ThéMA, UMR 6049 du CNRS

Approche géographique des approvisionnements en plaquettes forestières des chaufferies du secteur collectif/tertiaire

**Application au Pays Loue-Lison et à la Communauté d'agglomération du Grand
Besançon**

Hélène Avocat

Sous la direction de Marie-Hélène de Sède-Marceau
et Daniel Joly

Introduction générale

Le bois-énergie, fer de lance de la politique française sur les énergies renouvelables

Les énergies non renouvelables (essentiellement gaz, pétrole et uranium) représentent 80 % de l'énergie consommée dans le monde (Agence internationale de l'énergie atomique). Cependant, le spectre de l'amenuisement prochain de ces gisements, ainsi que les problèmes environnementaux et géopolitiques liés à leur usage tendent à remettre en cause cette prévalence. Les politiques et directives énergétiques mettent l'accent sur la sécurisation des approvisionnements et la diversification du bouquet énergétique. Or, la diversification des sources d'énergies primaires implique le développement d'énergies alternatives et renouvelables, disponibles localement. En France, un grand nombre de dispositifs sont mis en place à différents niveaux d'échelle en faveur du développement de la filière bois-énergie : appels d'offres de la Commission de Régulation de l'Énergie, appels d'offres de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), programme 1000 chaufferies bois pour le milieu rural etc.

Une forte augmentation de la demande en plaquettes forestières dans le secteur collectif/tertiaire

La mise en place en 1994 du premier *plan bois-énergie et développement local* sous l'égide de l'ADEME, marque le début d'une augmentation rapide et importante du nombre de chaufferies bois et de la puissance installée dans le secteur collectif/tertiaire. En Franche-Comté, nous sommes ainsi passés de moins de 10 chaufferies collectives en 1990, à près de 350 en 2008.

Si la filière s'est d'abord développée en valorisant les produits connexes de scierie et déchets industriels banals, l'augmentation de la demande est telle que ces produits (par ailleurs valorisés à d'autres finalités) ne peuvent pas satisfaire la consommation des sites. La plaquette forestière (bois déchiqueté) apparaît dès lors comme un combustible préférentiel. L'approvisionnement des chaufferies en plaquettes forestières devient une préoccupation majeure pour l'ensemble des acteurs de la filière forêt-bois.

L'approvisionnement des chaufferies, un problème géographique

Dans le cadre de ces travaux, nous nous sommes intéressés aux approvisionnements en plaquettes forestières, c'est-à-dire :

- aux flux de plaquettes forestières depuis les lieux de production (forêts), jusqu'aux lieux de consommation,

- et à la modélisation de bassins d’approvisionnement, c’est-à-dire les zones dans lesquelles se trouvent les ressources ligneuses susceptibles d’alimenter les chaufferies.

Nous nous sommes plus spécifiquement intéressés à la composante spatiale des approvisionnements, une variable qui pour l’heure a peu d’importance en raison de systèmes de tarification n’incitant pas forcément à la minimisation des distances de transport. Néanmoins, cette variable spatiale pourrait jouer un rôle important si les coûts de transport venaient à augmenter. D’autre part, dans une optique de durabilité de la filière et de développement local, la minimisation des impacts environnementaux liés aux transports, et à la valorisation des ressources locales apparaissent fondamentales.

Compte tenu de la répartition spatiale des chaufferies et de l’évolution de la demande, un plusieurs questions émergent, relatives à l’organisation des approvisionnements, et à la durabilité de la filière :

- Où s’approvisionne-t-on à l’heure actuelle ? Cherche-t-on à valoriser des ressources de proximité alors que l’un des arguments avancé par les promoteurs de la filière bois-énergie est justement la valorisation de ressources locales ?
- Existe-t-il une relation entre la taille des bassins d’approvisionnement et la puissance des chaufferies ?
- Quelles quantités de biomasse peut-on durablement et localement mobiliser à des fins énergétiques sans porter préjudice aux autres usages du bois ? Comment quantifier ces potentiels à l’échelle locale ?
- Existe-t-il des concurrences spatiales entre les différents bassins d’approvisionnement ?

Pour apporter des éléments de réponse à ces interrogations, nous avons opté pour deux approches. La première est celle des interactions spatiales, fondée sur l’analyse de données de traçabilité, et visant à comprendre l’organisation actuelle des approvisionnements. La seconde approche consiste à modéliser de manière exploratoire des bassins d’approvisionnement locaux et durables.

Les terrains d’étude : la communauté d’agglomération du grand Besançon, et le Pays Loue-Lison

Nous avons restreint notre zone d’étude à deux territoires, contigus mais contrastés : une communauté d’agglomération urbaine, et un pays rural. Malgré un nombre sensiblement équivalent de chaufferies (une vingtaine dans chaque territoire), la puissance installée est quatre fois plus importante dans la communauté d’agglomération. Ces deux territoires sont

caractérisés par d'importants taux de boisement (environ 50%), ce qui pourrait laisser supposer *a priori* un important potentiel dendroénergétique. Cependant, l'évolution future de la demande en bois-énergie, modérée dans le pays Loue-Lison, mais très importante dans la communauté d'agglomération du grand Besançon (puisque la demande doublera à moyen terme, accentuant la polarisation bisontine), soulève un certain nombre d'interrogations quant à l'approvisionnement des chaufferies.

Démarche générale

Cette recherche est structurée en trois parties. En premier lieu viennent la définition de la problématique et un état des lieux de la filière bois-énergie franc-comtoise. La deuxième partie présente le cadre méthodologique. La troisième partie présente et discute les résultats obtenus (figure 1).

La partie 1 propose une réflexion conceptuelle et théorique sur la filière bois-énergie et les approvisionnements. Après avoir décrit les différentes composantes de la filière bois-énergie, l'analyse se recentre sur les mutations qu'elle connaît depuis les 25 dernières années, pour ensuite s'interroger sur la structuration actuelle des approvisionnements, le fonctionnement de la filière et ses limites. Nous mettons notamment l'accent sur les concepts de proximité, de concurrence spatiale, et de durabilité, qui forment le fil directeur de ce travail.

La deuxième partie est consacrée à l'élaboration d'un protocole méthodologique. Dans un premier temps, les approvisionnements sont considérés comme des interactions spatiales entre les espaces boisés et les chaufferies, et sont appréhendés au moyen de données de traçabilité, qui renseignent sur l'origine des combustibles et les quantités de plaquettes forestières acheminées. Ceci nous permet de cartographier l'intensité et la portée des flux, et de mettre en évidence le rôle des caractéristiques spatiales dans l'organisation actuelle des approvisionnements. Dans un second temps, nous proposons une méthodologie visant à modéliser des bassins d'approvisionnement théoriques, satisfaisant les contraintes de durabilité et de valorisation des ressources de proximité. Une telle démarche implique préalablement de quantifier la fraction énergisable des ressources ligneuses, pour un territoire donné.

Enfin, la troisième partie est dédiée à l'application de ce protocole, et à l'analyse des résultats obtenus sur les deux terrains d'étude.

L'approche par les interactions spatiales repose sur l'analyse de données de traçabilité réelles à destination de deux sites : la chaufferie de Planoise, localisée à Besançon, et le site de Fertans (Pays Loue-Lison). Un modèle d'interaction simple de type gravitaire est d'abord testé, partant du postulat que l'intensité des interactions décroît avec l'éloignement,

conformément à la nécessité de minimiser les impacts environnementaux liés au transport. Un modèle explicatif est ensuite mis en place afin de mettre en évidence une relation entre l'importance des flux et des caractéristiques spatiales des lieux de production : l'éloignement, la masse boisée, la structure du couvert boisé (fragmentation) et la pente.

La modélisation exploratoire de bassins d'approvisionnement locaux et durables passe par trois étapes : la première est de connaître la répartition spatiale de la biomasse ligneuse aérienne et des types de peuplements. Ce qui est fait en établissant une relation entre des valeurs d'indices de végétation issus de l'imagerie satellitaire, et des valeurs de biomasse renseignées dans les données d'inventaire forestier et la bibliographie. La seconde étape propose une simulation, sur une zone donnée, de la croissance des peuplements et une estimation des prélèvements possibles. La troisième et dernière étape consiste enfin à modéliser des bassins d'approvisionnement optimisés selon des critères de durabilité et de proximité.

À l'issue de ces recherches, les résultats attendus sont :

- théoriques et conceptuels, avec une contribution de géographe à une problématique par nature pluridisciplinaire ;
- thématiques, par une meilleure connaissance du fonctionnement et de l'organisation spatiale de la filière, sur l'offre et la demande, et sur les approvisionnements ;
- méthodologiques, avec la mise en place d'une démarche d'analyse et de modélisation transférable à d'autres espaces.

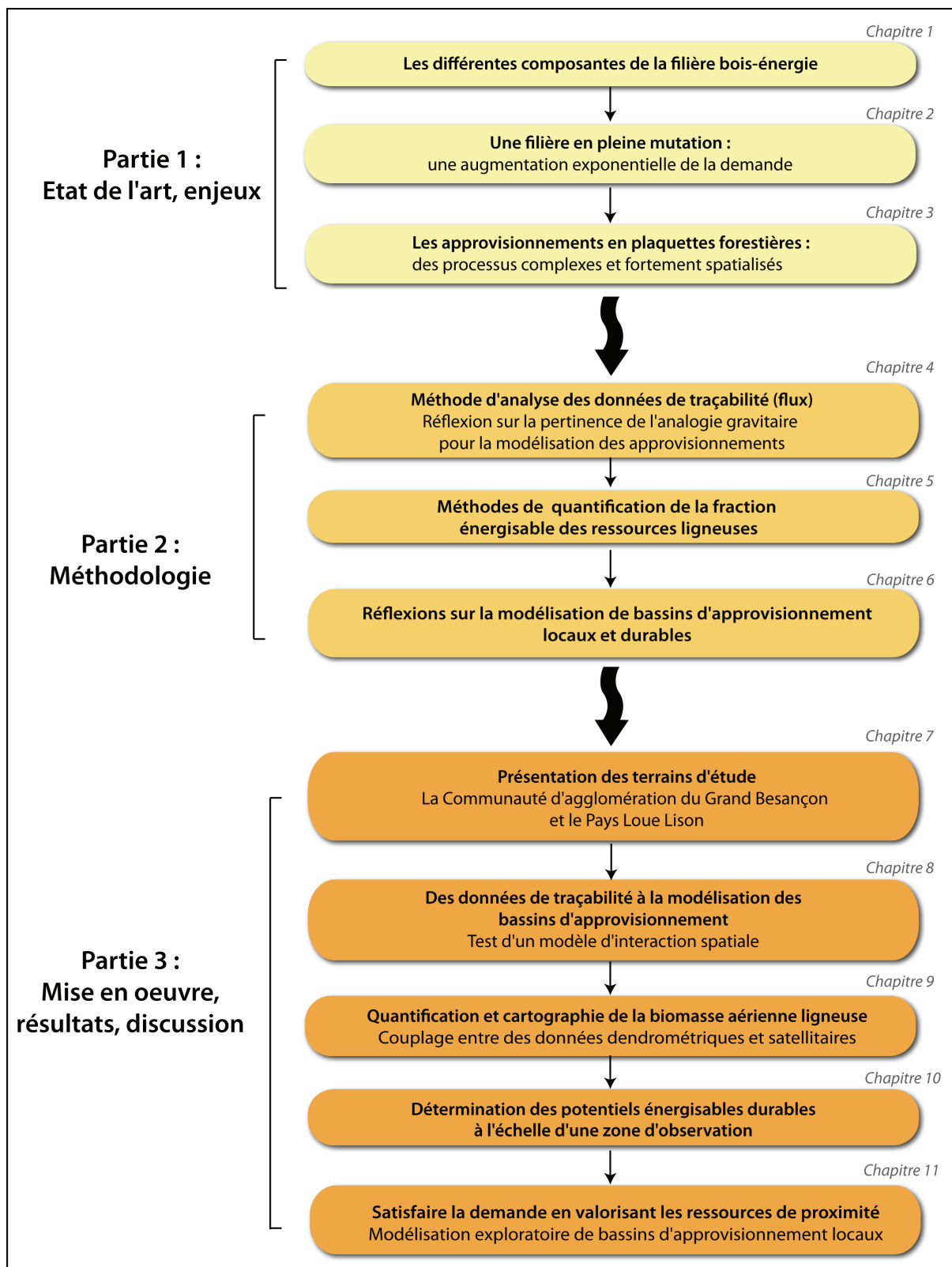
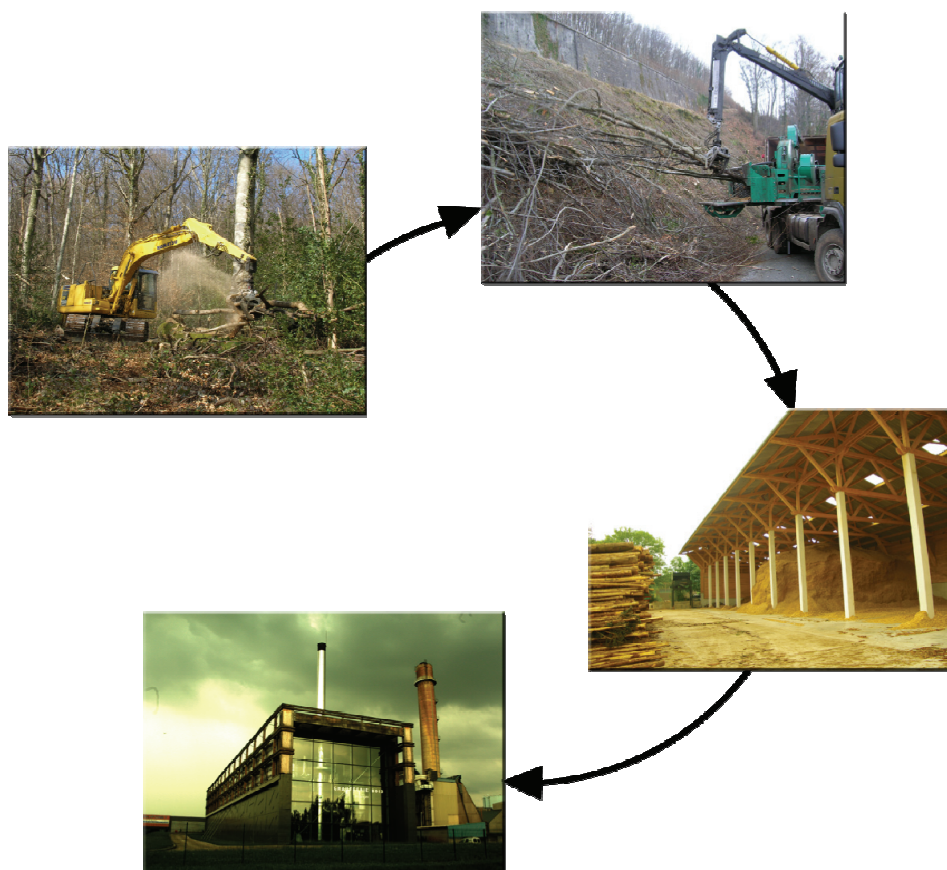


Figure 1 : synopsis de la thèse

Partie 1

Enjeux et problématiques liés à la valorisation énergétique de la biomasse ligneuse et aux approvisionnements en plaquettes forestières



Introduction de la partie 1

Le bois-énergie (ou dendroénergie) se réfère au « type de bioénergie utilisant l'élément de la biomasse constitué par le bois » et à « toutes les applications du bois en tant que combustible » (source : www.techno-science.net¹). En filigrane de cette définition se profilent d'ores et déjà les caractéristiques d'une énergie complexe, multiforme et ambivalente, tant au niveau de la forme des combustibles que des usages auxquels on la destine. Ainsi, bien que le bois-énergie ait été l'une des premières sources d'énergies utilisées par les sociétés humaines, on le classe parfois à l'heure actuelle dans la catégorie des « énergies nouvelles² » (Sénat, 2006) qui ont le vent en poupe. L'objectif de cette première partie est de rendre compte de cette complexité, de cette ambivalence et de ces mutations.

Dans le chapitre 1, nous donnons des éléments de définition relatifs au bois-énergie. Sont abordés les différents types de combustibles bois, ainsi que les différentes valorisations énergétiques possibles. La filière est également abordée en termes d'offre et de demande, traitant successivement des espaces producteurs de bois-énergie, puis du volet consommation, abordé sous l'angle des chaufferies dans le secteur collectif/tertiaire.

Le chapitre 2 met l'accent sur les enjeux liés au fort développement de la filière bois-énergie. Bien que cette dernière présente d'indéniables atouts, son important développement dans un contexte de crise énergétique, et d'urgence à trouver des solutions de substitution aux énergies fossiles, soulève également de nombreux questionnements. De fait, nous nous interrogeons sur la pertinence d'un développement important de la filière bois-énergie comme réponse aux enjeux économiques, politiques et environnementaux liés à la prévalence des énergies fossiles. Une analyse du paysage dendroénergétique franc-comtois est ensuite effectuée.

Enfin, le chapitre 3 est consacré aux processus d'approvisionnement, qui, de par leur situation à l'interface des lieux de production et de consommation, cristallisent l'ensemble des enjeux de la filière : économie, environnement, aménagement, transport, etc. Leur inscription éminemment spatiale, se traduisant par des flux, en font un objet d'étude préférentiel pour les géographes.

¹ Consulté le 4 décembre 2007.

² Conféré CIEN, Centre International des Énergies Nouvelles. www.cien.org. Cette dénomination d'énergie nouvelle à propos de l'énergie-bois n'est à mon avis pas appropriée ; le caractère « nouveau » s'appliquant surtout pour la désignation de nouvelles technologies émergeant dans le domaine.

Chapitre 1

A propos de la dendroénergie

Le bois-énergie ou dendroénergie (du grec « dendros » signifiant « arbre ») se définit littéralement comme la valorisation énergétique de la fraction de la biomasse constituée par le bois. Elle est caractérisée par une multitude de combustibles, issus de gisements naturels (espaces boisés) ou industriels (déchets résultant de la transformation du bois), et valorisables de différentes manières (chaleur, électricité, carburants). La filière dendroénergétique s'inscrit au sein de la filière bois, c'est-à-dire l'ensemble des acteurs, des activités et des installations chargés de cultiver, couper, transporter, transformer et recycler le bois ; de la source (forêt ou espaces boisés non forestiers) aux usagers finaux. Ces activités sont complémentaires, les produits des uns constituant la matière première des autres. Dans un premier temps, les exploitants forestiers gèrent et récoltent les grumes (troncs ébranchés et écimés), qu'ils vendent aux scieries et aux industries des panneaux (INSEE, 2008). Les déchets produits lors de la transformation de la matière ligneuse peuvent être valorisés énergétiquement (on parle alors de gisement industriel). Mais le bois peut également être exploité directement à des fins énergétiques sous forme de plaquettes forestières ou de bois bûche, et les valorisations énergétiques sont diversifiées : chaleur, électricité, carburants.

1. Dendroénergies et dendrocombustibles

1.1. Les différents types de combustibles bois

Selon les sources, la typologie des grandes classes de gisements peut différer. Mais globalement, une dichotomie naturel/industriel transparaît (cf. figure 6). Selon HESPUL³, trois types de combustibles apparaissent nettement : le bois-bûche, les granulés et le bois déchiqueté. Cette scission se justifie selon ses auteurs par la correspondance avec certains secteurs : ainsi le bois-bûche et les granulés conviennent particulièrement aux installations individuelles, la différence se faisant au niveau du degré d'automatisation de l'installation. Le bois déchiqueté (plaquettes forestières) conviendrait quant à lui davantage à un usage collectif. Cette adéquation entre combustible et secteur s'explique en partie par le facteur « puissance » de l'installation, qui détermine le matériel constitutif de la chaufferie et *a fortiori* le type de combustible toléré. Nous scindons ici les classes de combustibles selon le type de gisement dont ils sont issus et les usages auxquels on les destine.

1.1.1 Les combustibles issus des gisements naturels : bois-bûche et plaquettes forestières

Le bois-bûche et la plaquette forestière sont des combustibles issus d'une valorisation énergétique directe (c'est-à-dire exploités ou récoltés spécifiquement à des fins énergétiques).

→ **Le bois-bûche** est le combustible bois le plus utilisé par les particuliers, et provient de trois sources d'approvisionnement : des propriétés de l'utilisateur ; de l'affouage ou de la propriété d'autrui ; de l'achat dans des réseaux officiels ou de circuits informels. Il s'agit le plus souvent de rondins ou de quartiers empilés (figure 2), pour une durée de séchage atteignant jusqu'à trois ans (les bûches doivent en effet atteindre 25 % d'humidité avant de pouvoir être brûlées). On préfère généralement les bûches de bois dur, qui ont un meilleur rendement calorifique. En termes d'usage, cette forme de combustible est concurrent (ou complémentaire) de la plaquette forestière, puisqu'il s'agit des deux seuls types de combustibles issus directement de la forêt (les autres combustibles étant constitués des déchets résultant de la transformation du bois).

³ Association spécialisée dans le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.

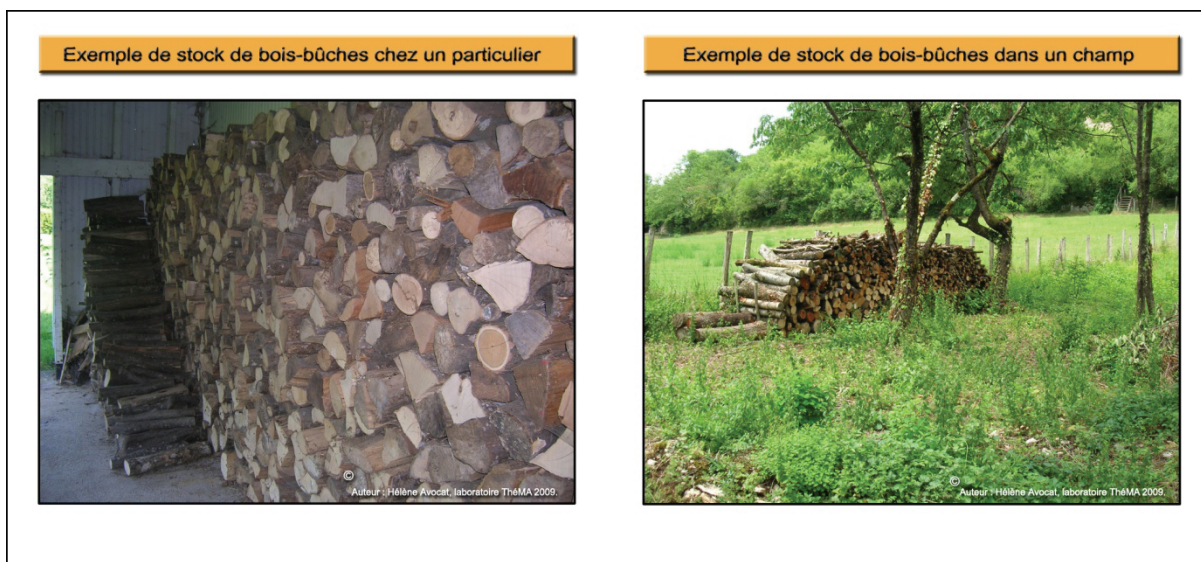


Figure 2 : bois-bûche

→ **La plaquette forestière** (figure 3) est « un combustible obtenu par broyage ou déchiquetage de tout ou partie des végétaux ligneux issus de peuplements forestiers [ou non forestiers] et de plantations n’ayant subi aucune transformation », c’est-à-dire directement à l’issue des différentes opérations sylvicoles (exploitation forestière, élagage, défrichage etc.) » (FCBA, 2008).

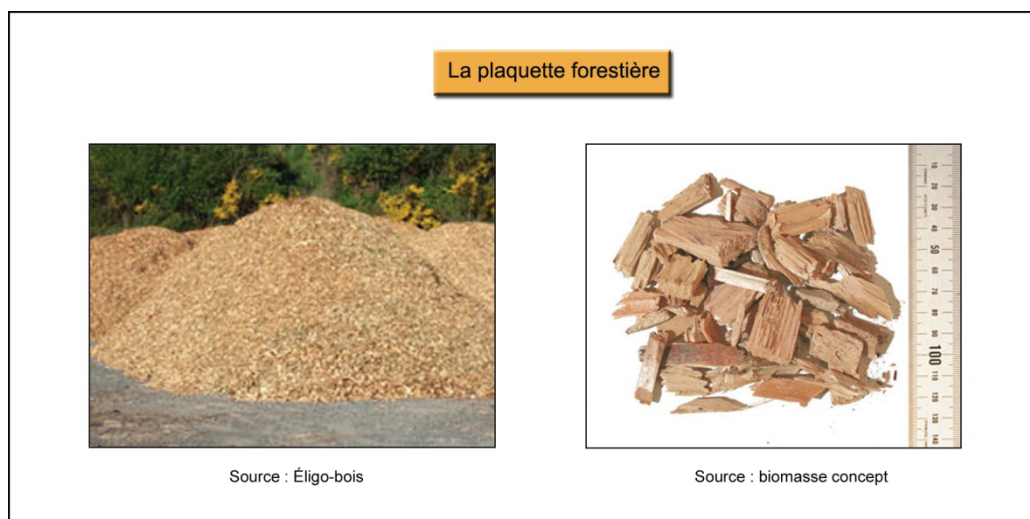


Figure 3 : plaquettes forestières

Elle est issue de l’exploitation forestière ou récoltée spécifiquement sur des parcelles (TCR et TTCR notamment). La matière ligneuse à l’origine des plaquettes forestières peut-être d’origine « bocagère et urbaine (bois d’élagage urbains, y compris la partie ligneuse des refus de crible issus du compostage de déchets verts) » (FCBA, 2008). Eligo-bois ajoute que « la plaquette forestière permet une valorisation de bois traditionnellement non utilisés comme les arbres mal conformés ou encore les cimes ». La plaquette forestière est majoritairement utilisée dans les chaufferies de puissance petite à moyenne et parfois chez les

particuliers. Selon l'ITEBE, « l'approvisionnement en plaquettes forestières entre dans un processus allant de l'abattage des arbres au déversement des plaquettes dans un silo » (figure 4). Après la définition des modalités de gestion des parcelles forestières et le marquage des arbres qui s'en suit, les différentes étapes de production de la plaquette forestière sont les suivantes.

- L'abattage des arbres, qui peut se faire de manière manuelle ou mécanisée selon les conditions locales, l'état des ressources ligneuses, le régime forestier, etc.
- Le façonnage, ensemble d'opérations consistant à enlever les grosses branches et la cime des arbres abattus puis à les découper en billes marchandes prêtes subir une première transformation.
- Le débardage, qui consiste ensuite à transporter les arbres abattus, écimés et ébranchés depuis leur lieu de découpe vers une route ou un lieu de dépôt provisoire.
- L'ensemble de la matière ligneuse qui n'est pas destinée à des fins industrielles est ensuite déchiquetée de manière à obtenir un combustible homogène ; puis transportée et séchée.

Selon la configuration de la demande, le transport et le séchage pourront se faire en flux tendu ou au contraire nécessiter la mise en place de plateformes de stockage intermédiaires (pouvant bénéficier à plusieurs installations). Selon les besoins il est en effet possible de déchiqueter du bois vert (taux d'humidité de l'ordre de 50 %) ou du bois sec coupé en fin d'hiver et déchiqueté après l'été (humidité de 30 à 35 %).



Figure 4 : processus de production de la plaquette forestière

Source : Institut des bioénergies (ITEBE)

Selon le FCBA, les plaquettes forestières sont caractérisées par des paramètres "normatifs" (humidité, taux de cendre et granulométrie) devant être considérés par les producteurs de plaquettes forestières en fonction du matériel installé, et des paramètres "informatifs" (taux de chlore et quantité d'énergie disponible par unité de masse). Ce dernier paramètre nous intéresse particulièrement dans la mesure où la puissance de la chaufferie détermine la quantité d'énergie et *a fortiori* la quantité de combustible à mobiliser. Une corrélation très nette est ainsi observable entre la puissance et la consommation des installations. En revanche, selon la même source, « **la provenance (c'est-à-dire la zone géographique de production du produit), n'est pas un critère de classement** ». Le problème de l'origine géographique des combustibles est traité dans le chapitre 3, consacré aux enjeux inhérents au développement du bois-énergie et à la structuration des approvisionnements dans une optique de développement local. Le rôle de la plaquette forestière étant potentiellement conséquent pour le tissu économique local, nous avons choisi de nous y intéresser.

1.1.2. Les combustibles issus des gisements industriels

Les secteurs de la première et de la deuxième transformation produisent des quantités importantes de déchets : dosses, délignures, chutes de tronçonnage, sciures et écorces (cf. figure 6). La plupart trouvent des débouchés auprès des industriels de la trituration pour la fabrication de pâte à papier et de panneaux, ce qui explique que leur valorisation à des fins énergétique pose parfois problème. Les écorces peuvent quant à elle trouver des débouchés dans le secteur énergétique, à condition que la chaufferie soit équipée en conséquence : elles contiennent en effet des quantités importantes de tanins qui posent de grosses contraintes en termes d'équipement matériel et entraînent un surcoût d'investissement et de maintenance (mais qui est compensé par le faible coût des combustibles).

De coût nettement moindre par rapport aux autres combustibles bois, les bois de rebut sont très prisés. Néanmoins, leur qualité variable ne les rend pas toujours aptes à une valorisation énergétique. Les bois souillés, traités ou adjuvantés sont en effet envoyés en centre d'enfouissement ou trouvent un débouché dans l'industrie du panneau de particules. Les détails concernant les matières ligneuses utilisables en chaufferie sont listées dans la rubrique n°2910 des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

1.1.3. Les bois non traités valorisés par voie de densification : briquettes et granulés

Obtenus par compaction de sciures fournies par les industries de la première transformation du bois, les briquettes et granulés (figure 5) sont essentiellement utilisés dans le secteur domestique. Leur faible taux d'humidité (moins de 8%) associé à une densité élevée en font des combustibles performants.

Figure 5 : granulés de bois

Source ADEME



Alors que les briquettes viennent en appoint ou en remplacement du bois bûche, les granulés sont utilisés dans des installations à alimentation automatique. En dépit de sa facilité d'utilisation, le granulé est très onéreux, ce qui un frein à son utilisation massive, même si les frais d'investissement et d'entretien de la chaufferie sont moins importants qu'avec d'autres combustibles (Zamblera et Garnier, 2002).

1.1.4. Le charbon de bois

Obtenu par carbonisation du bois en atmosphère contrôlée (c'est-à-dire en l'absence d'oxygène), le charbon de bois est dépourvu d'humidité et de toute matière végétale ou organique. Il est constitué uniquement de carbone et de quelques minéraux. Son pouvoir calorifique est nettement supérieur à celui de la matière ligneuse brute. Utilisé dans le secteur métallurgique jusqu'au début du XXème siècle (Corbion, 2003), puis pendant la Seconde Guerre mondiale comme combustible dans les gazogènes des véhicules suite à la pénurie de pétrole, le charbon de bois est aujourd'hui très peu utilisé. La figure 6 récapitule l'ensemble des dendrocombustibles et leurs principales caractéristiques :

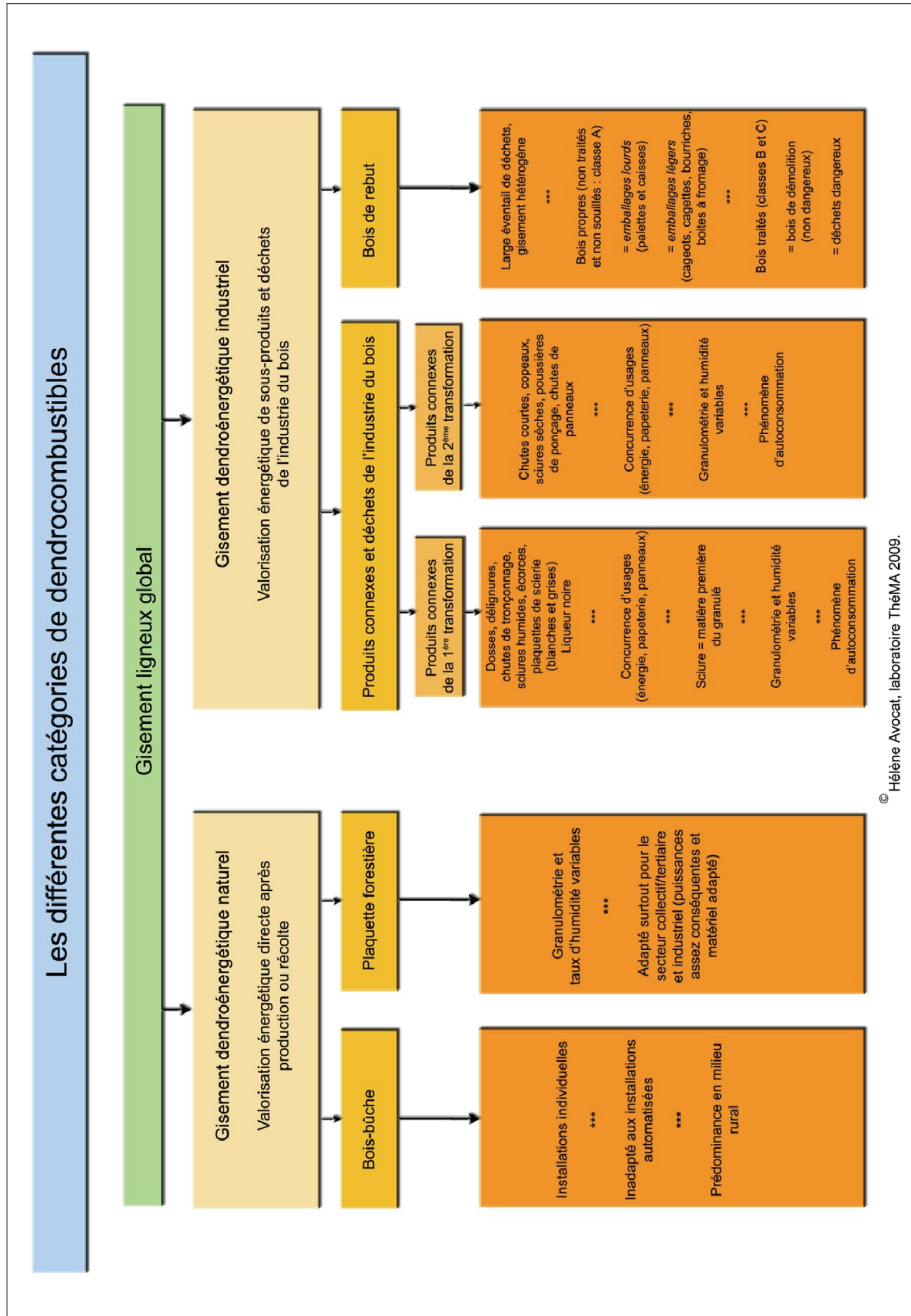


Figure 6 : les différentes catégories de combustibles bois

1.2. Les techniques de production et les valorisations énergétiques possibles

1.2.1. La production d'énergie thermique

L'utilisation du bois pour la production de chaleur (énergie thermique) est un phénomène ancien : les premières traces de foyer remontent aux alentours de – 500 000 ans. De même, la combustion du bois à des fins de production de chaleur pour le chauffage, la cuisine etc. est un processus universellement utilisé. Dans certaines zones rurales des pays en voie de développement, la contribution énergétique de la biomasse s'échelonne de 60 à plus de 90 % du bilan énergétique global et ce presque intégralement à des fins de production d'énergie calorifique pour la cuisson des aliments et le chauffage des logements (Schenkel et Temmerman, 2002). Dans les pays développés, nous distinguons deux types d'installations : les installations individuelles d'une part (poêles, inserts, etc.) généralement utilisées en base pour le chauffage des logements ; et les installations de puissance plus importantes, reliées ou non à un réseau de chaleur et dont l'énergie calorifique sert au chauffage des habitations et à la production d'eau chaude sanitaire. Ce type de valorisation énergétique reste le plus répandu en France, malgré les incitations au développement de la cogénération.

1.2.2. La cogénération

La cogénération est un processus produisant conjointement (en même temps et dans la même installation) de l'énergie thermique (chaleur) et de l'énergie mécanique (électricité). La mise en place de dispositifs concernant l'efficacité énergétique a eu pour corollaire le développement de nouvelles techniques pour accroître les rendements. En maximisant la production d'électricité au détriment de la chaleur "considérée en l'espèce comme résiduelle" (Oremus, 1997), la cogénération répond à ces exigences. La chaleur produite lors du processus cogénérateur peut être utilisée sous forme de vapeur, d'eau chaude ou d'air chaud, pour des usages industriels ou collectifs (Umberto, 2003). L'électricité est quant à elle soit utilisée sur place sur le site producteur, soit revendue à un tarif préférentiel.

La cogénération peut être une solution d'avenir en raison des économies d'énergie liées à une meilleure exploitation de l'énergie contenue dans le combustible (moins de consommation de combustible) d'une part, et des externalités positives qu'elle génère *via* la diminution des GES et de la pollution thermique d'autre part. Cependant, beaucoup d'installations ne sont pas encore au point, notamment en termes d'efficacité et de rentabilité. Actuellement, la Commission de Régulation de l'Énergie lance des appels d'offres pour le développement de centrales de cogénération de forte puissance. Néanmoins aucune de ces centrales n'est pour

l'heure opérationnelle en Franche-Comté. Par conséquent, nous ne les considérons pas dans le cadre de ces travaux.

1.2.3. Les « ligno-carburants »

Carburants produits à partir de bois ou du moins de matière ligno-cellulosique⁴, les ligno-carburants se classent dans la catégorie des biocarburants, réalisés à partir de ressources biologiques non alimentaires. Bien que ces technologies soient appelées à se développer (notamment en raison de la controverse que suscitent les agrocarburants de première génération), l'insuffisante maturité technologique de la filière ainsi que le manque de rentabilité économique expliquent pour l'heure qu'elle ne soit pratiquement pas développée. D'autre part, "malgré les potentialités de développement de la filière bois-énergie, le bois reste une ressource limitée qui est destinée à d'autres usages que celui de l'énergie, ce qui signifie que pour produire plus, il faudra développer des cultures énergétiques. Or, un accroissement de la production implique la mobilisation de nouvelles terres et donc une concurrence le plus souvent avec les productions alimentaires (qui est le facteur limitatif de la première génération d'agrocarburants" (Mérenne-Schoumaker, 2010). Cette absence des lignocarburants du marché dendroénergétique français justifie également que nous ne nous y intéressions pas dans le cadre de ces travaux.

2. Le gisement ligneux et les espaces producteurs : le bois-énergie côté offre

2.1. Arbres et matière ligneuse

Selon la terminologie de l'IFN (Inventaire Forestier National), « un arbre est un végétal ligneux ayant une tige nue et non ramifiée dès la base, de cinq mètres ou susceptible d'atteindre cette dimension à maturité in situ ». En dessous de cette cote, il est question d'arbuste voire d'arbrisseau, de sous-arbrisseau et de liane (en dessous de quatre mètres) : on parle également d'espèces ligneuses non arborescentes. Les arbres sont caractérisés par une essence forestière (terme désignant généralement une espèce d'arbre, une sous-espèce ou une variété). Les arbres et espèces ligneuses non arborescentes peuvent tous deux trouver des débouchés dans le domaine énergétique. D'un point de vue morphologique et structurel, un arbre se décompose en différentes parties (figure 7) :

⁴ Selon l'Association Forêt Cellulose (2005), la matière ligneuse est constituée de bois, cultures ligneuses, cultures agricoles à vocation énergétique, résidus agricoles et forestiers et une partie des déchets industriels et ménagers

- tout d'abord le système racinaire qui permet à l'arbre de se ravitailler dans le sol en eau et nutriments essentiels à sa croissance
- ensuite le tronc qui est véritablement la partie « centrale » de l'arbre et qui se compose du fût (partie de l'arbre entre les premières branches et le sol) et de la couronne (partie de l'arbre de la première branche à la cime) ;
- la cime, ou houppier, est constituée d'un enchevêtrement de branches dites « maîtresses », lorsqu'elles constituent l'ossature de la cime de l'arbre (c'est-à-dire si elles partent du tronc) ou secondaires si elles supportent des rameaux⁵.

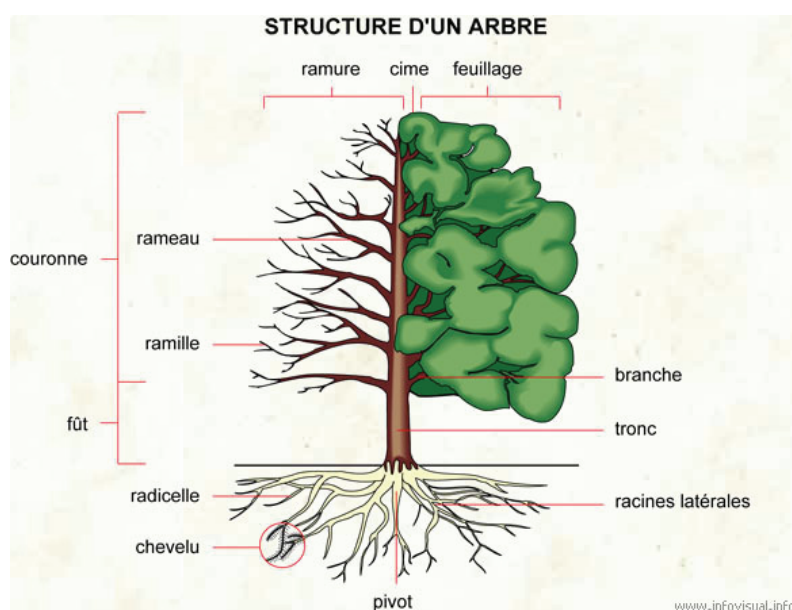


Figure 7 : les parties de l'arbre

Source : infovisual

Le tronc est utilisé prioritairement par les entreprises de l'industrie du bois (bois d'oeuvre et bois d'industrie). Si le diamètre est insuffisant ou la qualité impropre à une valorisation dans le domaine industriel, le tronc peut-être valorisé à des fins énergétiques, comme bois-bûche ou broyé en plaquette forestière. Les rémanents de l'exploitation forestière (branches et feuilles) peuvent quant à eux être valorisés énergétiquement par broyage (à condition toutefois d'en laisser une certaine quantité à terre pour permettre la formation d'humus et l'enrichissement des sols (ADEME, 2006)).

Le tronc, les branches et les racines des plantes ligneuses sont constitués d'un ensemble de tissus résistants, composés d'environ 50 % de carbone, 42 % d'oxygène, 6 % d'hydrogène, 1 % d'azote et 1 % d'éléments divers.

⁵ www.univers-nature.com consulté le 2 juillet 2009.

Selon l'institut technologique FCBA (1998), la matière ligneuse est caractérisée par trois paramètres fondamentaux :

- son taux d'humidité, qui est le « rapport exprimé en % de la masse d'eau sur la masse de bois anhydre » ;
- sa rétractabilité qui traduit « son aptitude à diminuer ou augmenter ses dimensions lorsque son humidité varie » ;
- sa masse volumique, variable avec le degré d'humidité.

Ces caractéristiques sont d'une importance fondamentale pour les industriels de la première et deuxième transformation, ainsi que pour les fournisseurs de combustibles bois qui doivent répondre à un cahier des charges précis en ce qui concerne les paramètres physico-chimiques des dendrocombustibles à livrer. L'humidité du combustible est un paramètre clé pour la définition qualitative du combustible (avec la granulométrie) et la tolérance des chaufferies à cette humidité va conditionner la mise en place d'infrastructures de stockage et de séchage.

2.2. Les espaces boisés forestiers : caractéristiques morphologiques et dendrométriques

Si le terme de forêt est intuitivement utilisé pour désigner les espaces producteurs de matière ligneuse, il ne recouvre cependant pas la réalité complexe inhérente à la morphologie des espaces boisés. Une forêt (ou massif forestier) est une étendue boisée de densité variable, constituée de plusieurs arbres et d'espèces associées. D'un point de vue botanique, une forêt est une formation végétale caractérisée par un important peuplement arborescent, mais également par la présence d'arbustes, de plantes basses, épiphytes, etc. Écosystème offrant de nombreux habitats à des espèces végétales et animales, cet espace se caractérise notamment par un certain nombre de paramètres :

- la surface,
- la densité (nombre de tiges par unité de surface/volume)
- la hauteur des arbres,
- le taux de recouvrement (le couvert représente la projection verticale des houppiers au sol et donne l'importance relative des espèces arborescentes au sein d'un peuplement).
- la production⁶ (accroissement biologique)

⁶ A ne pas confondre avec la production au sens d'exploitation.

La structure forestière est déterminée par une ou plusieurs essences ainsi que par les modes de gestion qui y sont associés (futaie, régulière ou irrégulière, taillis, ou taillis sous futaie etc.). Il s'agit d'un paramètre important, car la valorisation à des fins énergétiques diffère sensiblement selon la nature des structures de peuplement et les modalités d'exploitation qui en découlent. Les espaces boisés présents sous le qualificatif d'**autre forêt** sont des forêts pour lesquelles la fonction de production est nulle ou accessoire. Selon l'IFN, il s'agit des « forêts inexploitable, des forêts dont le rôle de protection interdit que des coupes y soient faites ou encore des espaces verts boisés à but esthétique, récréatif ou culturel ». Les **forêts de production** sont, quant à elles, des « forêts disponibles pour la production de bois, c'est-à-dire où l'exploitation du bois est possible (sans considération de rentabilité économique) et compatible avec d'éventuelles autres fonctions. Les peupleraies, qui sont des formations arborescentes caractérisées par des plantations à cycles courts et une sylviculture spécifique sont classées parmi les forêts de production ». Le protocole d'inventaire étant différent de celui des autres forêts explique qu'elles soient parfois exclues des résultats des relevés en dépit de leur appartenance à la catégorie des forêts de production.

Parmi les espaces boisés assimilables à la surface forestière, nous pouvons citer les bois et boqueteaux, de superficie respective supérieure à 4 ha d'une part, et comprise entre 50 ares et 4 ha d'autre part. Ces formations arborescentes comportent des arbres capables d'atteindre une hauteur supérieure à 5 mètres à maturité in situ et un couvert de plus de 10 %. Leur valorisation peut être problématique en raison de leur faible superficie, et de l'absence de plans de gestion. Le potentiel dendroénergétique de ces zones est donc délicat à déterminer. Il en va de même pour les arbres hors forêt (arbres isolés, haies, pâturages boisés) et les espaces agroforestiers.

2.3. Les arbres hors forêt et les espaces agroforestiers

2.3.1. Des espaces hétérogènes et fortement différenciés

Les arbres hors forêt (néologisme apparu en 1995) se définissent « par rapport à la forêt et par défaut » (Bellefontaine et al., 2001), et concernent « les arbres sur des terres n'appartenant pas à la catégorie des terres boisées qui incluent les forêts (ou terres forestières) et les autres terres boisées » (FAO). En d'autres termes, ces arbres sont localisés sur :

- des espaces agricoles (arbres isolés, alignements parmi des terres cultivées ou pâturées),

- des espaces artificialisés (allées, parcs, jardins etc. des milieux urbain et périurbain),
- et les espaces nus (dunes, anciennes carrières, etc.)

Parmi ces espaces boisés non forestiers⁷ potentiellement exploitables à des fins énergétiques, nous pouvons en citer un certain nombre, dont les caractéristiques morphologiques et les capacités productives diffèrent énormément : bosquets, haies et autres alignements, arbres isolés etc. Ainsi, « la filière peut également se fournir en bois d'élagage, issu de l'aménagement des espaces verts des collectivités territoriales, du nettoyage des bords de route ou de l'entretien des haies et des espaces agricoles par les agriculteurs notamment » (Poupeau et al., 2009). Leur potentiel énérgisable est très difficile à déterminer en raison d'une carence de données qui rend à la base difficile une estimation de la ressource ligneuse globale. Les espaces boisés non forestiers répondent en effet à différents enjeux qui complexifient l'estimation de leur valeur énergétique (fonctions productives avec les vergers, arbres des champs et autres systèmes agroforestiers, de protection paysagères et écologiques, et ornementales, comme c'est le cas pour les arbres à proximité des habitations, des parcs, ou des villes) (Bellefontaine et al., 2001).

Morphologiquement parlant, on distingue trois types de ligneux hors forêt, faisant référence aux trois grands types de formes utilisées dans la sémantique géographique : le ponctuel, le linéaire et le surfacique. Ce constat est corroboré par (Alexandre et al., 1999) : « en terme d'organisation spatiale, ils [les arbres hors forêt] sont soit dispersés sans continuum (arbres situés sur les terres agricoles et pastorales), soit en alignement à continuum linéaire (bordures de parcelles, de routes, de canaux, le long des cours d'eau, autour des lacs, dans les villes), soit en agrégats de dimension réduite présentant un continuum spatial (arbres regroupés en bosquets, parcs urbains) ». Cette hétérogénéité et ce fort morcellement de la ressource rendent difficile l'estimation des ressources des arbres hors forêt⁸ et *a fortiori* leur exploitation (à des fins énergétiques ou non). Seul un travail précis à l'échelle locale permettrait d'estimer précisément la valeur énergétique de ces ressources. Cela pose la question de la finesse de l'échelle à laquelle nous travaillons.

Les arbres hors forêts⁹ ne faisant pas l'objet d'une exploitation « industrielle » pour le bois d'œuvre en raison de leur faible densité, nous partons de l'hypothèse que leur mobilisation peut se faire uniquement à des fins énergétiques, et par conséquent qu'il n'y a pas la même compartimentation que pour les ressources forestières : la totalité du volume de l'arbre peut être considérée comme valorisable sous forme de plaquettes forestières ou de bûches.

⁷ Également présents dans la littérature sous le terme de « ligneux hors forêt ».

⁸ En dépit de la volonté de généralisation de méthodes d'inventaire comme l'enquête Teruti.

⁹ L'ancienne méthode de l'IFN incluait dans les ligneux hors forêt les haies et alignements d'arbres, ainsi que les arbres épars. Ces derniers ne sont plus comptabilisés dans la nouvelle méthode. Nous considérons dans les arbres hors forêt les zones boisées non cartographiées par l'IFN (zones de prébois notamment).

2.3.2. Les espaces agroforestiers et taillis à courte révolution

Selon le Centre Agroforestier Mondial, l'agroforesterie se définit comme « un système dynamique de gestion des ressources naturelles reposant sur des fondements écologiques qui intègre des arbres dans les exploitations agricoles et le paysage rural et permet ainsi de diversifier et de maintenir la production afin d'améliorer les conditions sociales, économiques et environnementales de l'ensemble des utilisateurs de la terre ». En l'occurrence, il s'agit d'introduire des rangées d'arbres dans des surfaces dédiées à la production agricole, animale (sylvo-pastoralisme) ou végétale (agrosylviculture), dans le but d'accroître les rendements et de bénéficier de la complémentarité de ces deux types de productions (Amiot, 2008). L'obtention d'une parcelle agroforestière peut également se faire par intervention (éclaircie notamment) sur des parcelles boisées. Par extension, les espaces agroforestiers sont des parcelles dont l'occupation du sol est marquée par la présence conjointe de ressources ligneuses (moins de 100 arbres à l'hectare) et de terres agricoles. Là encore nous pouvons noter une grande hétérogénéité dans la composition de ces espaces, due à des taux de boisement et des configurations très hétérogènes.

La production de bois dans les terrains agroforestiers est généralement marquée par la production de bois d'œuvre, bien que leur prise en considération pose problème en regard de la réglementation fiscale agricole dont dépendent les espaces agroforestiers. Ainsi selon les chambres d'agriculture (2008), deux logiques peuvent être appliquées : « soit l'arbre est un facteur de production, et l'on se situe dans une logique d'immobilisation, soit l'arbre est considéré comme un produit en tant que tel, ce qui correspond à une logique de stock. Dans le cas de l'agroforesterie, les arbres doivent être considérés comme une immobilisation, car ils font partie intégrante du système de production et ils sont destinés à rester durablement sur l'exploitation ». La production de bois n'est donc pas une finalité en tant que telle. Liagre (2008) s'insère dans ce raisonnement en s'interrogeant sur le bien-fondé de la production de biomasse à des fins énergétiques ou industrielles en agroforesterie, dans un contexte où « la biomasse agricole et forestière [qui] a le vent en poupe » engendre une forte augmentation de la demande. Il insiste notamment sur le fait que le principe de l'agroforesterie (qui est de profiter de la complémentarité entre les arbres et les cultures) ne peut être obtenu « que pour de faibles densités d'arbres ». L'association d'arbres à large espacement et de cultures intercalaires productrices de biomasse, telles des taillis à courte ou très courte révolution / rotation (TCR ou TTCR, cf. figure 8), permet néanmoins selon l'auteur de produire conjointement du bois-énergie et du bois de qualité, en se rapprochant du « schéma forestier classique de taillis sous futaie, mais dans une variante cultivée plus intensive, avec des arbres de haut jet alignés ».

Ce deuxième point est particulièrement intéressant, car l'émergence des grosses installations fortement consommatrices et l'apparition concomitante des grosses sociétés

d'approvisionnement dont le but est de sécuriser au maximum la fourniture de combustibles (tant au niveau de la quantité que de la stabilité des prix dans le temps), confèrent à ces ressources une dimension nouvelle. La fin de la jachère obligatoire imposée par l'Union Européenne en 2008 devrait également modifier la donne, en autorisant la culture de TCR ou de TTCR sur des terres agricoles (cultures dédiées). Les centrales de cogénération de forte puissance mises en place sous l'égide de la Commission de Régulation de l'Energie mobilisent également ce type de ressources.

À titre indicatif, les entreprises Solvay et Dalkia ont prévu dans le plan d'approvisionnement de la centrale de cogénération de Tavaux (Jura) la mise en culture de 400 hectares de TTCR de terres agricoles de jachères, qui contribueraient à hauteur de 4 % des 279 500 tonnes annuelles d'équivalent biomasse nécessaires au fonctionnement de l'installation (Dalkia France, 2007). Ces cultures seraient coupées tous les trois ans dans le cadre d'un cycle de 12 ans soit quatre rotations. Les espèces préférentiellement utilisées sont l'eucalyptus, le saule, le peuplier, le bouleau, l'aulne, le robinier faux acacia et le genêt d'Espagne (Damien, 2008).

Figure 8 : taillis à très courte rotation

Taillis de peupliers
Savigny-sur Ardres, Marne
© INRA A.Gavaland



La problématique est différente de celle de l'agroforesterie, dans la mesure où les cultures dédiées sont intensives sur de grands espaces (jusqu'à 15000 tiges par hectare). Selon l'ADEME ("les 1000 mots-clés du bois-énergie"), « à l'image de l'agriculture, la plantation, l'entretien et l'exploitation sont extrêmement mécanisés, voire automatisés : c'est pourquoi on parle d'agroforesterie. La productivité des TCR (8 à 15 t de matière sèche/ha/an) est deux à dix fois supérieure à celle des boisements classiques ». Aussi est-il compréhensible que les TCR, de part leur facilité d'exploitation (topographie plane des terres agricoles) et leurs bons rendements suscitent beaucoup d'engouement. Cependant, « il semble qu'ils sont intéressants seulement si l'objectif énergétique s'accompagne d'un but d'aménagement du territoire » (d'après M. Douard, directeur de l'ITEBE, Champvans, décembre 2007, cité dans (CSTB, 2008)).

En dépit d'un certain nombre d'atouts apparents en matière d'aménagement du territoire (valorisation de terres en friche, épuration des sols, épandage de boues résiduelles...), ce type de plantations provoque à l'heure actuelle beaucoup de controverses, quant aux conséquences de coupes à blanc vis-à-vis de la conservation de la biodiversité notamment, ainsi que par rapport aux enjeux fonciers que leur développement ne manquerait pas de générer. À notre sens, un des dangers des TCR serait une colonisation des terres agricoles en jachères sans perspectives d'aménagement au détriment des ressources forestières existantes, dont l'exploitation est un enjeu majeur en termes d'aménagement du territoire.

Pour l'heure, il n'existe pas à notre connaissance, de plantations de TCR ou de TTCR en Franche-Comté. Bien que les importantes centrales de cogénération résultant de l'appel d'offre de la Commission de Régulation de l'Énergie prévoient le recours à ce type de ressources dans le cadre de leurs plans d'approvisionnement, l'incertitude qui plane sur ces projets, d'une part, et les réserves émises précédemment d'autre part, nous conduisent à ne pas considérer ce gisement dans le cadre de ces travaux.

2.3.3. Les pré-bois, ou pâturages boisés

À l'image de l'urbain et du rural, la frontière entre ce qui est défini comme de la forêt et ce qui ne l'est pas est très floue (cf. remarque précédente sur les terres en reboisement). Le gisement ligneux constitué par les arbres hors forêt est à ce jour largement méconnu (Bellefontaine et al., 2001). Cela est particulièrement vrai pour les pré-bois, ces espaces de transition entre les espaces boisés et les prairies, également appelées « pâturages boisés » dont l'évaluation (ou la place) dans les classifications d'occupation des sols pose problème. Définis par (Fernex, 2007) comme un « assemblage complexe de communautés herbacées (prairie, pelouse, ourlet), arbustives (fourré, manteau, buisson) et arborescentes (arbres isolés ou en bosquets plus ou moins denses) », les pré-bois présentent de fait une très forte hétérogénéité tant au niveau du taux de boisement que de la nature des peuplements. Ainsi, « la nature et l'importance relative de ces composants, qui déterminent son aspect, sa composition et son dynamisme peuvent varier considérablement d'un pâturage boisé à l'autre. Il n'y a donc pas un pâturage boisé mais plusieurs types de pâturages boisés » (Gallanda et Gillet, 1999). Le rapport PATUBOIS en distingue 4 types selon leur taux de boisement (1% : pâturages non boisés, 20% : pâturages peu boisés, de 20 à 70% : pâturages très boisés, > 70% : bois pâturés).

Pour l'heure il n'existe aucune cartographie, aucune étude, aucun inventaire précis de ce type de ressources. Bien qu'elle soit largement méconnue, l'Office fédéral du développement territorial suisse affirme que le pâturage boisé (dont les caractéristiques présentent des similitudes avec les pré-bois franc-comtois) « présente un potentiel bois-énergie important [...] et sous-exploité ».

La forte hétérogénéité qui caractérise les espaces producteurs de bois-énergie (tant au niveau de l'emprise spatiale que des caractéristiques ligneuses) est un frein important à sa connaissance et *a fortiori* à sa gestion et son exploitation. Jusqu'à présent non considérés dans les études de potentiel de biomasse, les arbres hors forêts n'en constituent pas moins un intéressant gisement énergétique. En effet, ces ressources en général peu valorisées dans l'industrie du bois en raison des contraintes d'exploitation et du manque de rentabilité économique résultant de leur dispersion, nous conduisent à nous interroger sur leur potentiel énergétique, qui pourrait être très intéressant dans une optique de valorisation des ressources locales. Les enjeux liés à la valorisation de ces ressources (quels que soient les usages), sont très diversifiés et pourraient avoir des retombées locales non négligeables en matière d'aménagement.

2.4. Le gisement ligneux franc-comtois

Première région française grâce à une superficie boisée avoisinant les 705 000 hectares, la Franche-Comté apparaît comme une région propice au développement du bois-énergie.

2.4.1. Un taux de boisement important, une majorité de forêts publiques

« Verte Franche-Comté, Franche-Comté des forêts... Si la quasi-totalité des régions françaises insistent sur leur aspect rural et verdoyant pour renforcer leur image et leur politique touristique, bien peu sont, à ce propos, aussi bien dotées que la Franche-Comté » (Gresser, 1990). En témoignent les figures 9 et 10.

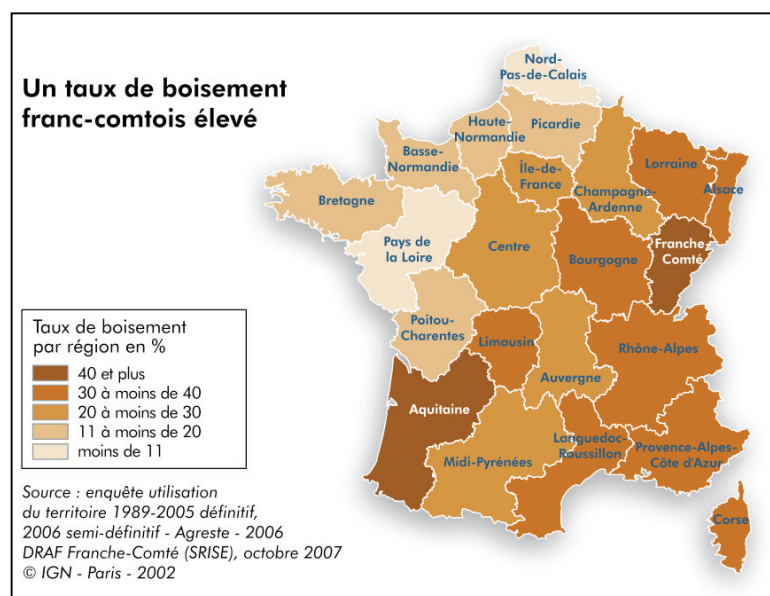


Figure 9: les taux de boisement des régions françaises

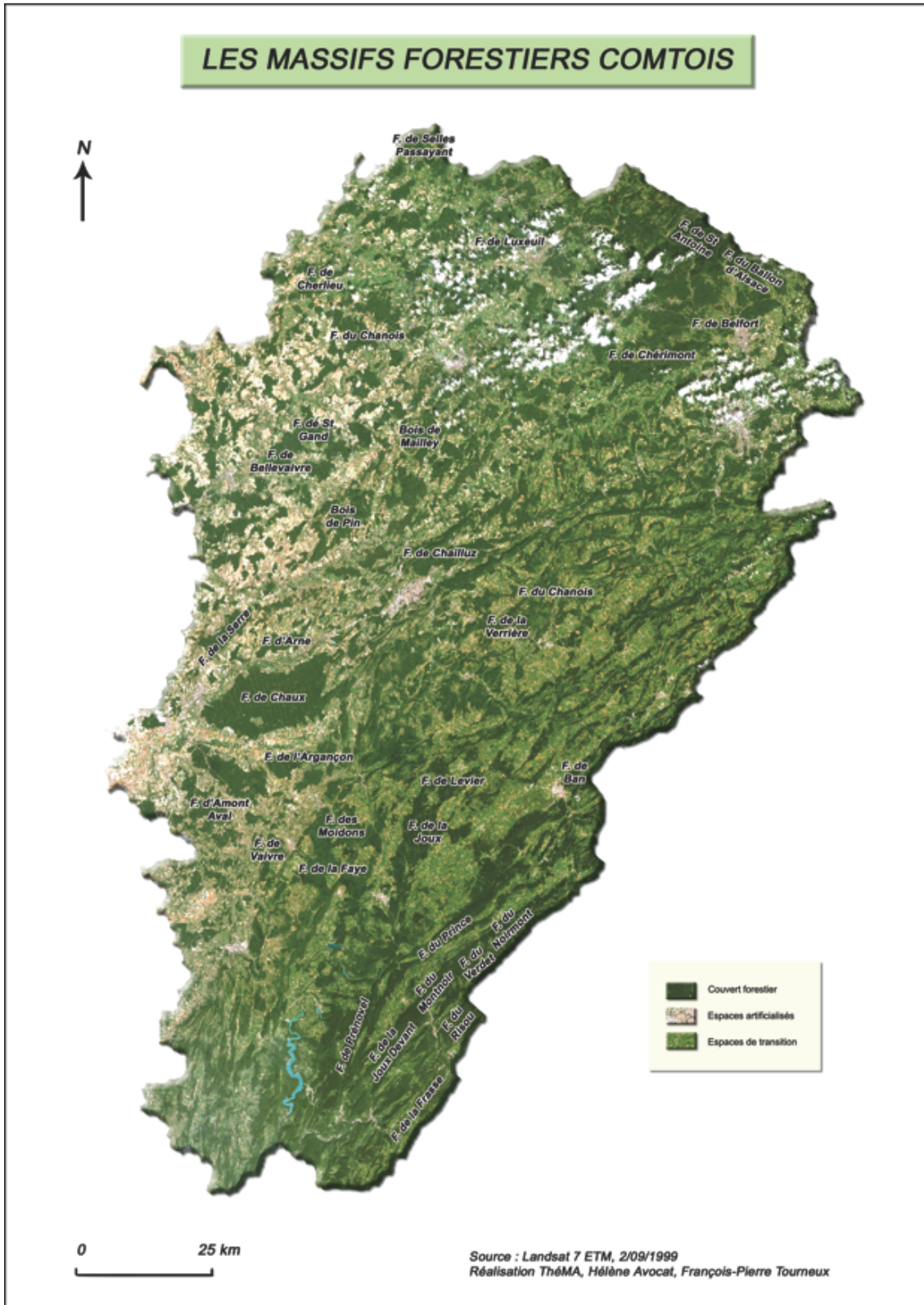


Figure 10 : les massifs forestiers comtois

Avec 44 % de la superficie régionale couverte par les forêts (tableau 1), la Franche-Comté est l'une des premières régions forestières françaises (la moyenne nationale est de 28,6%). Elle

dispute la première place à l'Aquitaine, jusqu'alors en tête¹⁰. Selon l'INSEE (2008), « toutes essences confondues, la Franche-Comté possède 143 millions de m³ de matériel sur pied soit 7% du total national alors qu'elle ne couvre que 3% du territoire français ». Et « sur 1780 communes comtoises, 280 seulement ont moins du cinquième de leur territoire en forêt [et] dans plus de 500, le taux de boisement est supérieur à 50%. La forêt représente parfois en certains secteurs plus des 9 dixièmes de la superficie communale », (Gresser, 1990).

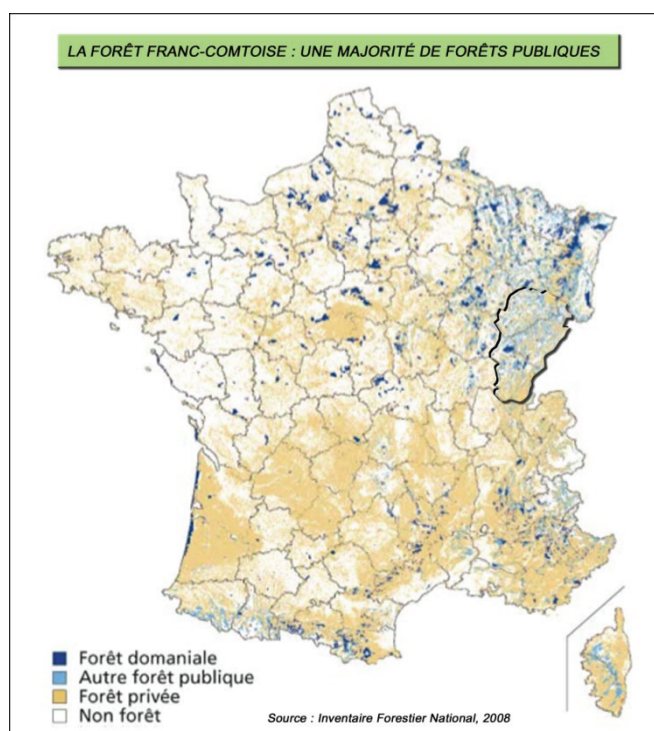
Taux de boisement (en %)	
Doubs	43,1
Jura	46,3
Haute-Saône	42,2
Territoire de Belfort	41,2
Franche-Comté	43,7
France métropolitaine	28,3

Tableau 1 : les taux de boisements par départements

Source : IFN 2008

Si la Franche-Comté se distingue des autres régions françaises par l'importance de son couvert boisé, elle diffère également par le statut de ses forêts. Selon l'ADIB¹¹, 55 % de la forêt relève du domaine public, et 45 % du domaine privé.

Figure 11 : forêts privées versus forêts publiques



À l'échelle nationale, la situation est inversée : les trois quarts de la forêt française appartiennent en effet à des propriétaires privés, alors que l'ONF gère les quatre millions d'hectares restants de forêts publiques (figure 11). Cette carte n'est cependant pas très

¹⁰ Les sources divergent à ce sujet, le taux de boisement de l'Aquitaine ayant visiblement diminué depuis la dernière tempête, la Franche-Comté serait dès lors la première région française par son taux de boisement.

¹¹ Association régionale pour le développement de la forêt et des industries du bois en Franche-Comté

significative, vu son échelle, car elle ne donne à voir que les gros massifs, alors que beaucoup de forêts publiques sont de dimension modeste. En Franche-Comté l'ONF gère ainsi plus de la moitié du patrimoine forestier de la région, soit 400000 hectares, dont 90 % appartiennent aux communes. Dans le cadre d'une volonté de valorisation énergétique des ressources ligneuses par une collectivité, cette caractéristique peut être un atout : ainsi « les forêts de l'État constituant 5% seulement des espaces boisés, c'est la forêt communale qui domine, presque à égalité avec la forêt privée, ce qui constitue une originalité par rapport aux autres grandes régions forestières, et permet d'importantes synergies (ADIB, 2008). Selon l'IFN, on recense en Franche-Comté près de 160 000 propriétaires forestiers gérant 303 000 hectares. La forêt privée comtoise, composée à 70% de parcelles de moins de 25 hectares (contre 52% au niveau national) reste très morcelée. Quatre parcelles sur dix font moins de quatre hectares, ce qui est une contrainte pour leur valorisation et leur exploitation (que ce soit à des fins énergétiques ou non).

2.4.2. Caractéristiques et répartition spatiale des peuplements

La forêt comtoise est caractérisée par une grande diversité, aussi bien dans la répartition et la configuration spatiale des peuplements que des essences. Les caractéristiques du couvert forestier nous intéressent fortement dans la mesure où elles conditionnent les potentiels énergisables.

2.4.2.1. Les disparités spatiales du couvert forestier franc-comtois

Caractéristiques intrinsèques de la région, les surfaces boisées font partie de l'identité franc-comtoise. Certaines forêts publiques sont particulièrement réputées, tant pour leur importance que leur richesse écologique et paysagère. Pensons notamment à la forêt de Chaux, qui constitue la deuxième plus grande forêt feuillue de France avec une superficie supérieure à 20 000 hectares, ou à la forêt de Joux, dans le Jura qui est l'une des plus belles sapinières de France.

Néanmoins, selon Gresser (1990), « la plupart des forêts comtoises sont cependant de plus petite taille, discontinues, entamées de clairières nombreuses, réseau de parcelles boisées de formes complexes, aux lisières des finages communaux (figure 12). Elles se fragmentent ainsi en parcelles de quelques centaines d'hectares, disséminées au milieu des terres de cultures et de pâturages ». L'emprise spatiale des zones boisées est donc très hétérogène. La figure 13 met en évidence l'hétérogénéité et la complexité du couvert forestier dans le secteur au sud-ouest d'Ornans.



Figure 12 : clairière au sein d'un bois

Source : Hélène Avocat 2010. Commune de Besançon

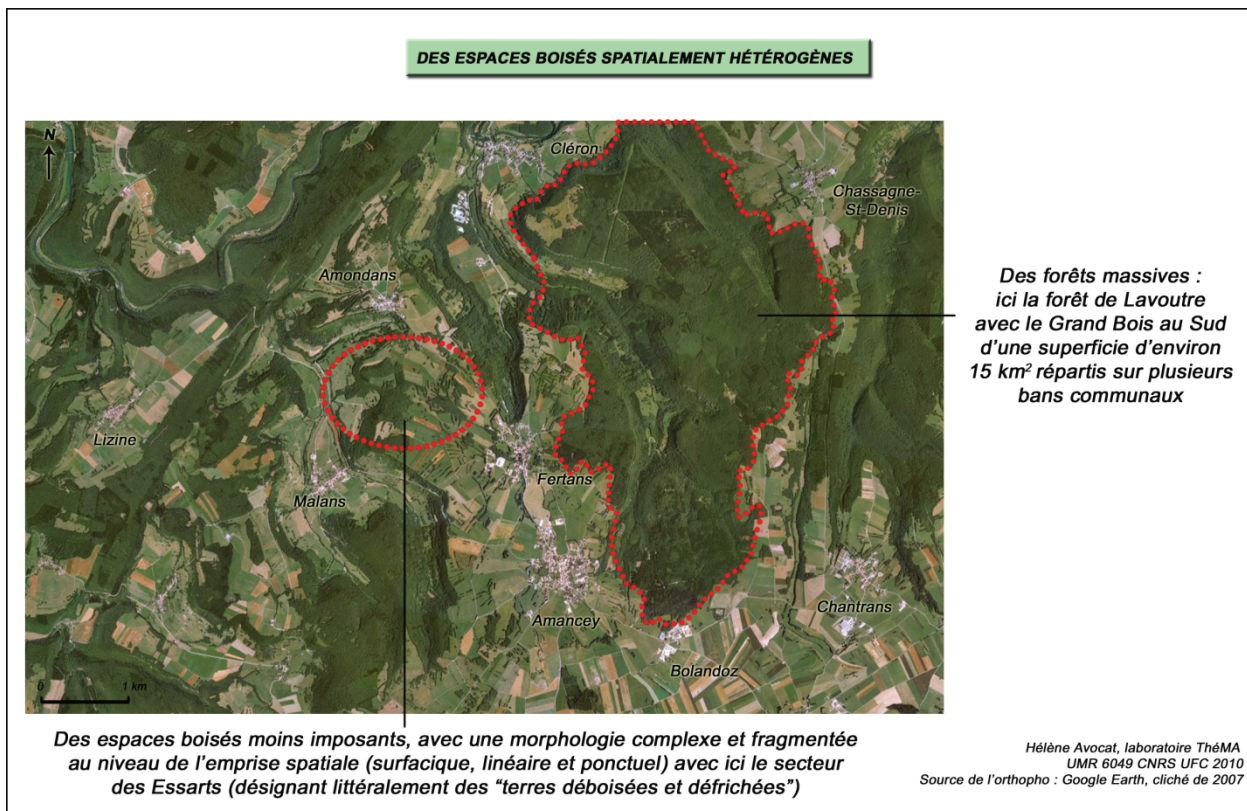


Figure 13 : image satellitale des environs d'Ornéans

2.4.2.2. Diversité et caractéristiques des peuplements

La diversité et les caractéristiques des peuplements dépendent à la fois du milieu naturel (géologie, topographie et climat), et de facteurs anthropiques, ces caractéristiques influençant notablement le potentiel énérgisable.

Les conditions pédologiques (intrinsèquement liées à la nature lithologique du substrat) ont une influence directe sur les caractéristiques des boisements. Ainsi le massif de la Serre ou les Vosges Saônoises sont très boisés, notamment en raison de l'acidité de leurs sols (liée à un substrat gréseux, schisteux ou granitique), peu propices aux cultures. A l'inverse, les plaines alluviales nées d'apports alluviaux récents sont généralement des terres à vocation agricole (sauf si le drainage ne s'effectue pas correctement et que l'eau stagne dans les formations superficielles du sol).

Les secteurs de pente forte, ayant un substrat pédologique mince sont en général colonisés par la forêt. Les difficultés techniques inhérentes à l'exploitation et à la mobilisation de la matière ligneuse dans des zones à la topographie accidentée expliquent également l'importance de la forêt dans ces secteurs. Seuls les plus hauts sommets semblent moins propices à l'implantation et au développement forestier, peut-être en raison de la vitesse des vents et des rigueurs hivernales, mais aussi en raison du maintien d'activités pastorales.

Quant aux conditions climatiques, elles sont plutôt propices à la présence de la forêt (la Franche-Comté étant caractérisée par un climat semi-continentale (Joly, 2010)). Les précipitations abondantes toute l'année compensent en général avantageusement les effets négatifs de la sécheresse estivale relative.

- ***L'étagement forestier***

Dans les basses plaines (200-300 mètres d'altitude) les chênes pédonculés ou rouvres dominent. On trouve également, en proportion moindre, des hêtres, charmes, merisiers, érables etc. Sur les pentes du premier plateau (350-400 mètres), le chêne pubescent domine. Sur le premier plateau, jusqu'à 650 m débute l'étagement montagnard inférieur. Les formations boisées restent largement représentées par les chênes et les hêtres. Les pentes, entre les premiers et seconds plateaux, marquent une coupure dans les peuplements forestiers comtois : les conifères y trouvent de meilleures conditions de développement et deviennent de fait majoritaires face aux feuillus. Ces derniers sont largement représentés par les hêtres. Sur le deuxième plateau (de 800 à 1000 mètres d'altitude) les résineux deviennent ultra majoritaires, et les épicéas se partagent les peuplements avec les sapins. Sur la Haute-Chaîne, au-dessus de 1000 mètres, le sapin se raréfie au profit de l'épicéa, plus apte à supporter les conditions climatiques devenues très rigoureuses. Les plus hauts sommets sont caractérisés par des pelouses d'altitude.

- ***Deux grandes zones forestières***

L'isohypse de 650-700 mètres d'altitude marque ainsi la séparation en deux zones forestières inégalement réparties sur le territoire franc-comtois :

- D'un côté vers l'Ouest et les secteurs de basse altitude sont couverts aux trois quarts par les feuillus ;
- Alors qu'à l'Est les zones d'altitude sont colonisées par les résineux.

- ***Les essences majoritaires et les modes de gestion***

Si l'environnement naturel explique en partie la structure actuelle des boisements, le facteur anthropique doit également être considéré, car la forêt est aussi conditionnée par les modes d'exploitation : taillis simple, taillis-sous-futaie ou futaie. Selon l'IFN, un taillis est « un peuplement issu de rejets de souches ou de drageons, comprenant plusieurs tiges ». Il s'agit du mode de traitement forestier le plus élémentaire, mais aussi du plus contraignant pour la forêt en raison de la périodicité des coupes rases tous les 20 à 25 ans effectuées sur l'ensemble de la parcelle qui empêche la croissance de gros arbres. Les résineux ayant plus de mal à produire des rejets, ce mode de traitement favorise des espèces comme le chêne. Les taillis sont des peuplements denses, plutôt bas et formés de touffes issues des anciennes souches (figure 14). Les taillis simples sont préférentiellement utilisés à des fins énergétiques (bois de feu notamment).



Figure 14 : exemple de formation de taillis

Source : Hélène Avocat, 2010
Commune de Besançon

À l'inverse, la futaie est « un peuplement issu de graines ou de plants, et dont la majorité des arbres ont le même âge » (définition du CRPF). Ce mode de gestion se caractérise par la présence d'arbres de taille importante, à haut rendement (figure 15).

Figure 15 : arbres abattus à finalité de bois d'œuvre en futaie

Source : Hélène Avocat, 2008
Commune de Besançon



On distingue deux grands types de futaies : les futaies régulières ou équiennes formées d'arbres à peu près du même âge, et les futaies irrégulières ou jardinées comportant des arbres et bouquets d'arbres de tous âges et de toutes dimensions. Leur traitement est beaucoup plus complexe qu'une futaie régulière, car les interventions ne se font pas sur les individus de la parcelle, mais chaque arbre ou chaque bouquet d'arbres est traité séparément. En Franche-Comté, les futaies régulières sont surtout représentées sur les plateaux moyens du Jura et les Vosges Saônoises. Le taillis-sous-futaie, qui est constitué par une strate de hauts arbres au dessus de taillis coupés régulièrement, est le mode de gestion dominant dans la plupart des forêts de feuillus de plaine. Néanmoins il existe de fortes variations selon la distribution des strates dans les forêts.

Bien que de nombreuses essences soient présentes sur l'ensemble du ban régional, la Franche-Comté se caractérise par une prédominance de feuillus (69%), dont la part est un peu plus élevée qu'au niveau national (INSEE, 2008). Le chêne, essence majoritaire dans la région, représente 35% des feuillus. Son importance continue de s'accroître, même si sa progression est moindre que celle de la hêtraie, qui représente 19% des surfaces boisées. Selon l'IFN, la Haute-Saône détient à elle seule 56 % des chênes et 45% du total des feuillus en Franche-Comté, alors que le Doubs et le Jura se partagent équitablement l'autre moitié des feuillus. Dans les Vosges Saônoises cristallines, les taillis de feuillus représentent presque un tiers des forêts feuillues. Les taillis simples n'occupent ailleurs qu'une proportion réduite. La prépondérance du taillis sous-futaie de feuillus a pour corolaire un faible volume global en comparaison aux forêts de conifères des seconds plateaux ou des sapinières domaniales du Doubs. Il convient néanmoins de préciser que les modes de gestion ont une influence considérable sur la définition des potentiels énergétiques. Ainsi, le taillis aura davantage de débouchés énergétiques que la futaie, dont les ressources sont traditionnellement exploitées pour le bois d'œuvre.

En ce qui concerne les résineux, ils occupent près d'un tiers de la forêt régionale avec essentiellement des sapins et des épicéas. Ces deux essences sont très largement majoritaires,

puisqu'elles représentent 94% du volume de résineux sur pied, et constituent les essences prépondérantes sur plus de 200 000 hectares, soit 30% de la surface boisée franc-comtoise. Le sapin est très présent dans le Haut-Jura et sur le deuxième plateau du Jura, l'épicéa l'est davantage dans les pentes intermédiaires jurassiennes et les Vosges cristallines. Les formations résineuses sont dans la plupart des cas des futaies pleines, résultats de politiques de reboisement.

La figure 16, élaborée d'après la cartographie forestière de l'IFN récapitule ces différents éléments.

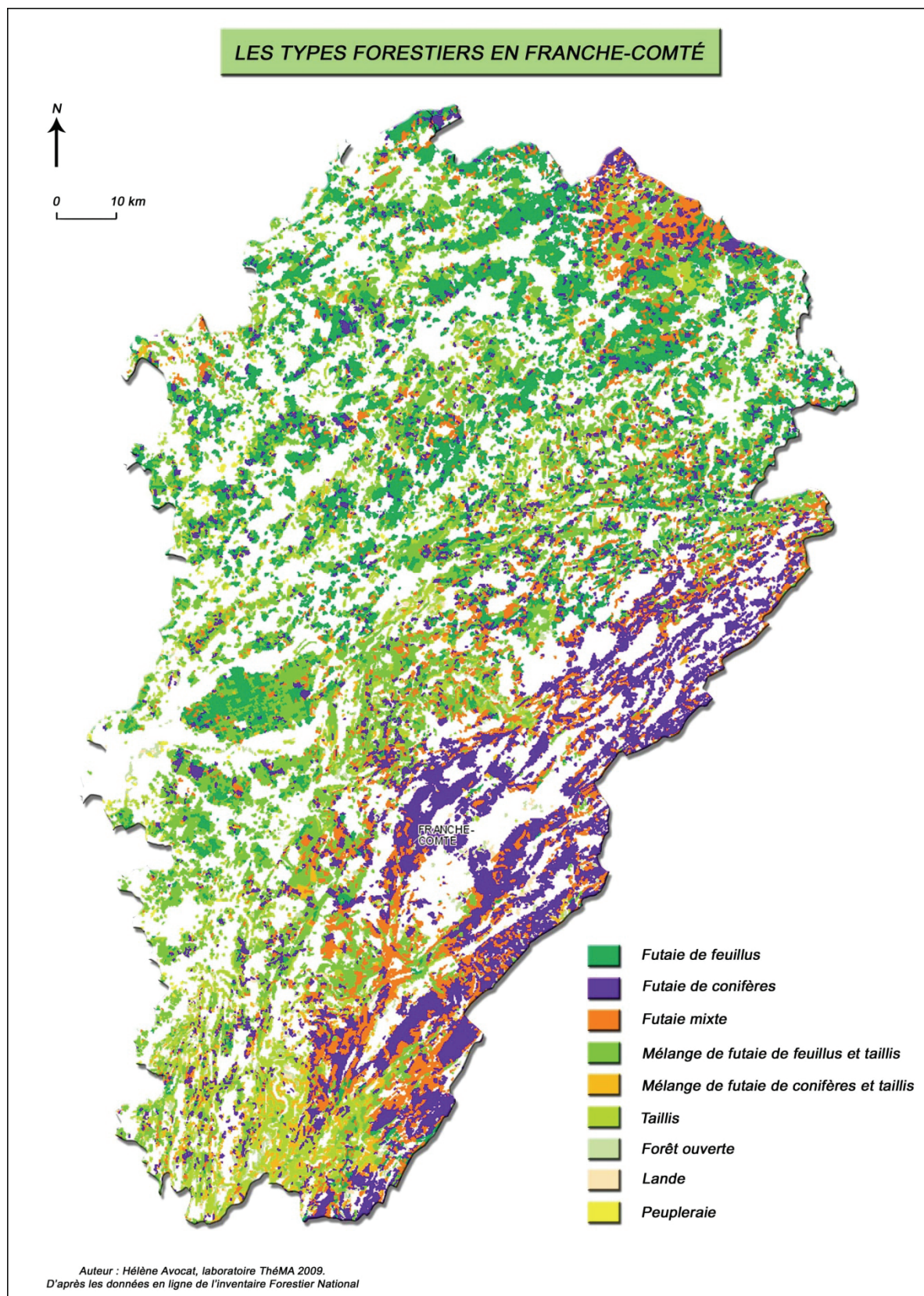


Figure 16 : les types forestiers en Franche-Comté

2.4.3. Une forêt en extension et sous-exploitée : un important potentiel bois-énergie

Avec une progression annuelle de 0,07 %, soit 500 hectares (INSEE, 2008), la forêt comtoise s'accroît sensiblement. Cette extension des surfaces boisées est due à la conjonction de deux facteurs : d'une part en raison de l'utilisation d'autres énergies que le bois, et d'autre part à cause de la diminution des surfaces agricoles (abandon des exploitations non rentables et augmentation des rendements). L'extension des surfaces boisées corrélée à des prélèvements inférieurs aux quantités de bois régénérées chaque année conduit au constat d'une sous-exploitation de la forêt comtoise. Les causes de cette sous-exploitation sont multiples (Ballu, 2007) :

- techniques (contraintes liées à l'accessibilité dans les secteurs topographiquement accidentés),
- morphologiques (contraintes induites par le fort morcellement du parcellaire),
- sociologiques (propriétaires forestiers favorisant le « prix de la tranquillité » à une gestion soutenue de leurs bois),
- administratives et juridiques (des instruments réglementaires sont mis en place pour lutter contre la surexploitation, mais paraissent inapplicables pour agir sur la sous-exploitation).

Selon l'INSEE (2008), « en Franche-Comté le volume sur pied moyen est ainsi estimé à environ 200 m³ de bois à l'hectare et la pousse naturelle à environ 7,5 m³/ha par an. Plus de 2,5 millions de m³ de bois ne sont pas exploités à ce jour dans la région ». Si les données d'accroissement avancées par l'INSEE (2008), sont en adéquation avec les données issues de la bibliographie pour des conditions stationnelles similaires, en revanche le volume sur pied est largement sous-estimé. Selon les tables de production de N. Decourt, un volume de 200 m³ à l'hectare correspond à des peuplements feuillus d'une soixantaine d'années, voire nettement plus jeune pour des espèces comme le douglas ou l'épicéa. Selon les mêmes sources, cette sous-exploitation est plus importante dans le Territoire de Belfort et en Haute-Saône (dans une moindre mesure), et l'est moins dans le Doubs et le Jura malgré un accroissement naturel plus élevé. La sous-exploitation est particulièrement forte pour les résineux. Autre fait notable : à ces volumes non valorisés s'ajoute une valorisation insuffisante des rémanents pouvant trouver des débouchés dans le domaine énergétique. Ce constat est intéressant dans un contexte d'augmentation de la demande en plaquettes forestières produites à partir de rémanents d'exploitation.

3. Le bois-énergie côté demande

Chaque chaufferie est caractérisée par un certain nombre de paramètres : date de mise en service, type de combustible, consommation, secteur type, puissance, type de contrat d'exploitation, etc. Selon Pouët (2007), les paramètres clés d'une chaufferie sont « la puissance maximale nécessaire » et « les besoins d'énergie ». Ces deux paramètres déterminent les quantités de bois consommées (plus la puissance de la chaufferie est importante, plus l'installation est énergivore) ; et la tolérance à certains types de combustibles.

3.1. Éléments constitutifs d'une chaufferie bois

Selon Pouët (2007), une chaufferie bois automatique est un ensemble de production de chaleur comprenant quatre éléments essentiels, adaptés à l'utilisation d'un combustible solide (figure 17) :

- un silo de stockage ;
- un système d'extraction et de transfert du bois vers le générateur de chaleur ;
- un générateur de chaleur,
- et un système d'épuration des rejets gazeux et d'évacuation des cendres.

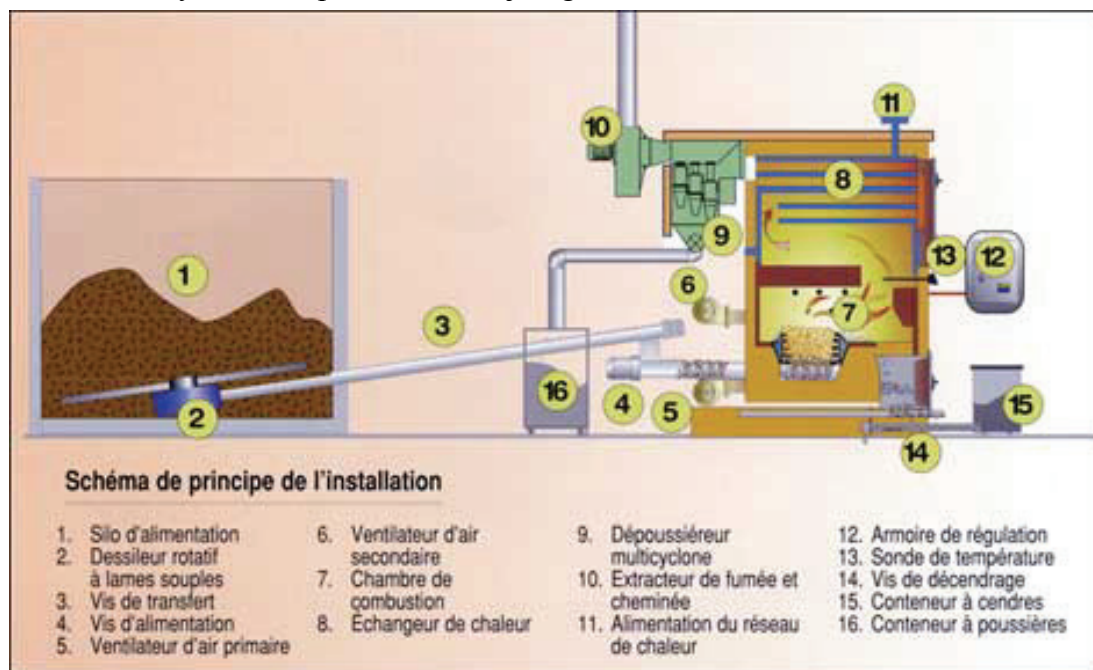


Figure 17 : éléments constitutifs d'une chaufferie bois

Source : bioforet

Le silo de stockage constitue la réserve tampon pour l'alimentation de l'installation, et ne doit pas être confondu avec le stockage dont dispose le fournisseur de combustible en forêt ou sur plateforme, et qui est assimilé à une rupture de charge dans une optique d'approvisionnement classique. Une fois le combustible livré et stocké dans le silo, il est acheminé par le biais de

mécanismes de dessilage et de convoyage vers la chambre de combustion (foyer). Après la combustion, les fumées sont traitées et les cendres collectées.

3.2. Secteurs types

Les consommateurs de bois-énergie se scindent en quatre secteurs-types : domestique, industriel, collectif/tertiaire, et agricole.

Le secteur domestique concerne « uniquement les ménages qui utilisent à titre individuel du bois ou des déchets de bois pour le chauffage de leur habitat, que ce soit en combustible principal (en base), ou en association avec d'autres combustibles, en appoint régulier ou exceptionnel » (DGEMP). Le combustible utilisé est majoritairement du bois-bûche. L'évolution récente des appareils a néanmoins pour corollaire une augmentation de l'utilisation de granulés. Dans ce secteur sont également comptabilisées les installations de chauffage individuelles au bois en immeuble collectif (cette configuration est néanmoins relativement rare avec moins de 4 % du parc des appareils à l'échelle nationale – DGEMP). Le secteur domestique étant vraiment spécifique avec de très petites puissances et des circuits d'approvisionnements souvent non conventionnels (surtout en ce qui concerne le bois-bûche), nous ne le considérerons dans le cadre de ces travaux, que comme concurrent du secteur collectif pour l'exploitation du gisement.

Les entreprises sont également consommatrices de bois-énergie, notamment les industries du bois de première et deuxième transformation, fonctionnant en grande partie sur l'autoconsommation de leurs déchets et autres produits connexes. À l'échelle de la Franche-Comté la proportion de chaufferies industrielles hors industries du bois s'élève à 10 % du total des chaufferies industrielles et concerne des établissements de nature très variée : fromageries, entreprises de transport, de travaux publics etc.

Le secteur collectif/tertiaire « recouvre quant à lui l'ensemble du chauffage collectif par chaudière bois, avec ou sans réseau de chaleur, pour l'habitat (résidences, HLM) et le tertiaire (bureaux, bâtiments administratifs, hôpitaux, écoles...) » (actu-environnement). Selon Pouët (2007), « pour des chaufferies collectives dans le secteur de l'habitat et du tertiaire, on distingue deux grandes familles de projets selon les besoins à satisfaire : ceux du maître d'ouvrage stricto sensu, et ceux de plusieurs usagers distincts du maître d'ouvrage » (et qui impliquent la création d'un réseau de chaleur). Ce secteur recouvre des gammes de puissances très variées, s'échelonnant de 30 kW pour le « petit collectif » à plusieurs MW pour les grosses chaufferies urbaines avec réseau de chaleur. En Franche-Comté les puissances s'échelonnent de 0,02 à 6 MW. Les politiques incitatives mises en place durant les deux dernières décennies ont eu pour corollaire un fort développement du bois-énergie dans les

bâtiments collectifs et tertiaires (ADEME, 2006). Ce secteur est le plus gros consommateur de plaquettes forestières.

Enfin, le secteur agricole peut également être amené à utiliser le bois pour le chauffage de serres maraîchères et horticoles essentiellement, mais aussi dans le secteur de l'élevage (poulaillers, porcheries) et les ateliers de transformation (fromagerie, boulangerie). Les agriculteurs peuvent également mettre en place une chaufferie bois pour le chauffage de leurs maisons individuelles ou de petits réseaux collectifs (Adhume). Ce secteur est très peu représenté en Franche-Comté par rapport aux autres (cinq chaufferies à l'échelle de la région). La figure 18 récapitule l'ensemble des types de maîtrise d'ouvrage en fonction des grands secteurs types.

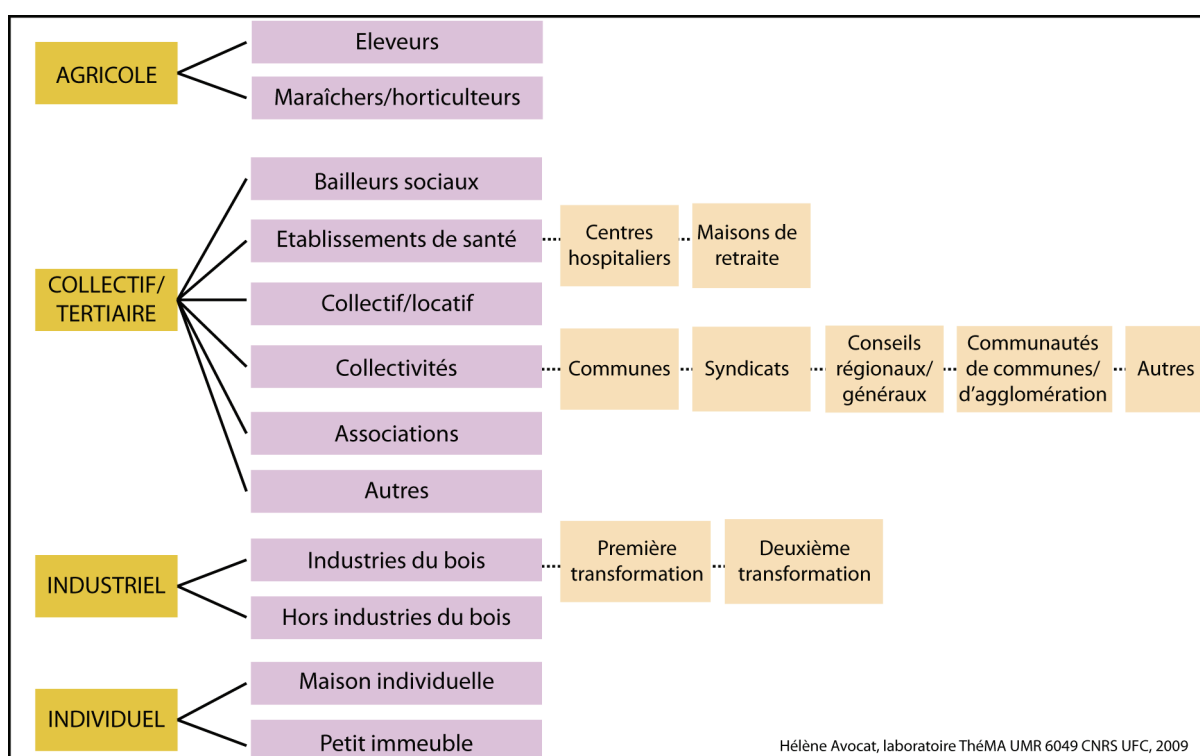


Figure 18 : typologie des maîtrises d'ouvrages et secteurs types

Nous ne considérons ici que l'approvisionnement des installations des secteurs collectif/tertiaire et industriel hors industrie du bois, ne fonctionnant pas en auto-alimentation¹², car ce sont les secteurs dont la croissance est la plus rapide, et qui soulèvent le plus d'interrogations. La figure 19 récapitule l'ensemble des éléments abordés dans ce chapitre en recadrant les aspects traités dans le cadre de ces travaux.

¹² Les industries du bois disposant d'une chaufferie peuvent parfois néanmoins faire l'appoint avec un apport extérieur en combustible. Cela est néanmoins peu fréquent, et la proportion de combustibles exogène, est en général infime.

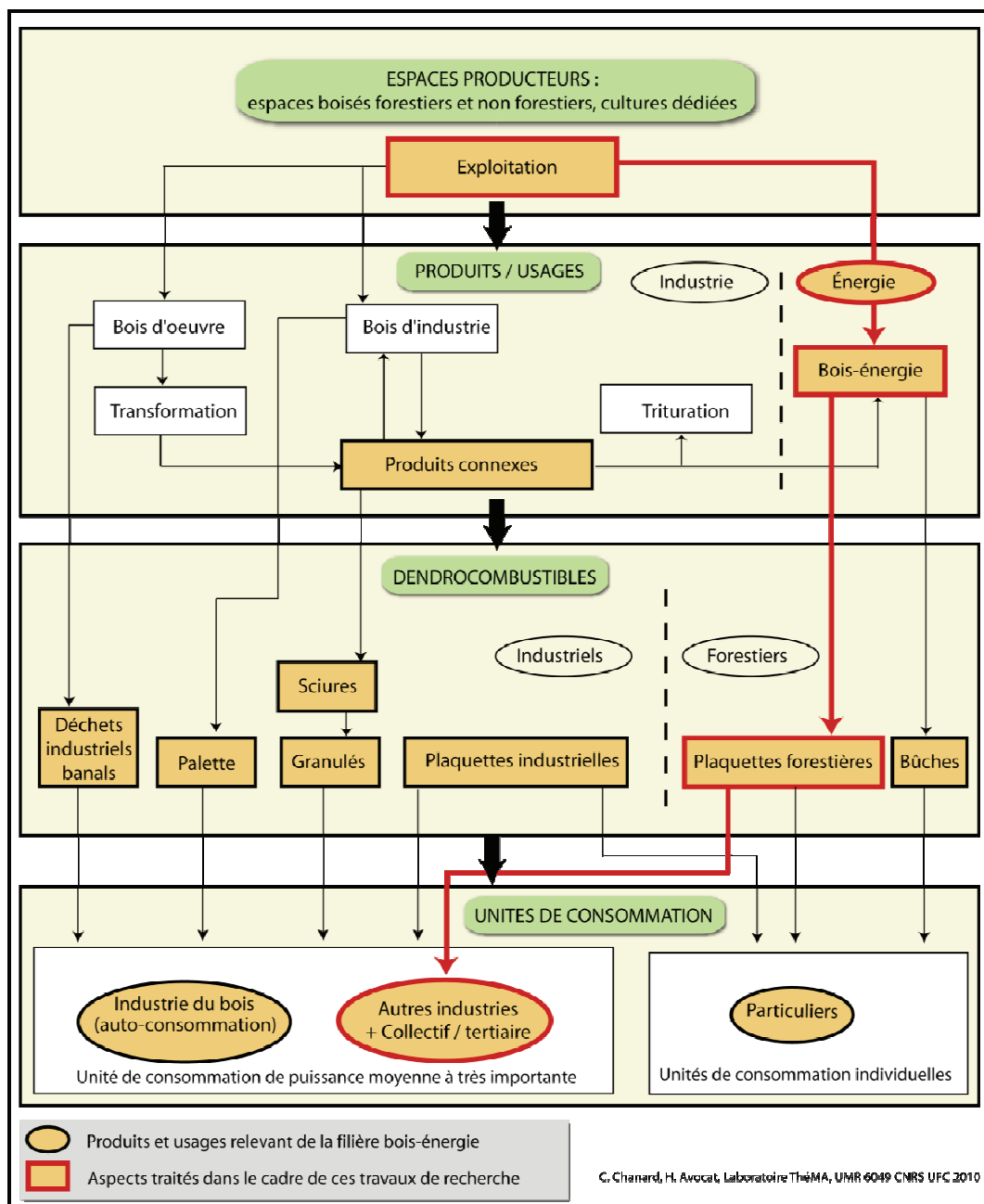


Figure 19 : l'énergie au sein de la filière bois

Conclusion du chapitre 1

La notion hybride de bois-énergie se réfère à toutes les applications du bois en tant que combustible. Bois ou énergie ? Entre le matériau initial et son utilisation énergétique finale, s'est développée une grande diversité de formes : bûches, plaquettes, granulés, mais aussi gaz par torréfaction et bientôt carburant liquide par craquage à haute température. Ainsi le bois, première source d'énergie historiquement utilisée par l'homme, se retrouve-t-il aujourd'hui dans la catégorie des « énergies nouvelles », placées sous les projecteurs politiques, médiatiques et scientifiques (Avocat et al. 2011). Si le secteur domestique reste le principal consommateur de bois-énergie (essentiellement sous forme de bois-bûche), la demande dans le secteur collectif tertiaire croît de manière très importante depuis une vingtaine d'années sous l'impulsion de nombreux dispositifs de soutien à la filière. La Franche-Comté, région propice au développement du bois-énergie en raison de son important gisement ligneux, a vu le nombre de ses chaufferies collectives augmenter de façon exponentielle, ce qui pose un certain nombre d'interrogations relatives à l'approvisionnement de ces unités de consommation.

Chapitre 2

Une filière en pleine mutation, une augmentation de la demande sans précédent

Si la France est « le premier pays consommateur de bois-énergie en Europe, essentiellement grâce au chauffage domestique qui représente une consommation annuelle de 7,3 millions de tep » (ADEME, 2007), nous assistons également depuis deux décennies à un très fort développement de la consommation dendroénergétique dans les secteurs collectif/tertiaire et industriel, sous l'impulsion des différentes politiques mises en place. Fort d'un certain nombre de constats (expansion et sous-valorisation de la forêt française, enjeux environnementaux, géopolitiques et économiques...), le Gouvernement *via* ses ministères et ses services déconcentrés a pris un certain nombre de mesures et dispositifs politiques en faveur du développement du bois-énergie.

1. Les moyens mis en place en faveur du développement de la filière bois-énergie

1.1. L'énergie dans la politique forestière

L'exploitation de la matière ligneuse à des fins énergétiques est une des finalités de l'exploitation forestière, et est considérée comme un aspect stratégique de la politique forestière française (Bianco, 1998).

1.1.1. Les grandes lignes de la politique forestière nationale

Dans le livre préliminaire du code forestier portant sur les principes fondamentaux de la politique forestière, il est stipulé que « la mise en valeur et la protection des forêts sont reconnues d'intérêt général, [et que] la politique forestière prend en compte les fonctions économique, environnementale et sociale des forêts et participe à l'aménagement du territoire, en vue d'un développement durable. Elle a pour objet d'assurer la gestion durable des forêts et de leurs ressources naturelles, de développer la qualification des emplois en vue de leur pérennisation, de renforcer la compétitivité de la filière de production forestière, de récolte et de valorisation du bois et des autres produits forestiers et de satisfaire les demandes sociales relatives à la forêt » (article L1).

Aujourd'hui, les orientations générales de la politique forestière dictées par le code forestier trouvent leurs fondements dans deux documents majeurs : le rapport Bianco de 1998 et la loi d'orientation forestière de 2001. Le rapport Bianco « *la forêt, une chance pour la France* » (Bianco, 1998) marque selon Barthod et al. (2001) une étape importante dans la construction de la stratégie forestière nationale, en s'interrogeant sur les avenir possibles pour la forêt française, et en essayant de proposer « un document opérationnel, et non une simple charte ou une déclaration d'intention ». Ce document propose une stratégie forestière reposant sur quatre axes majeurs (augmentation de la productivité, mise en place d'une certification de gestion durable, incitation à l'usage du bois dans la construction et enfin développement du bois-énergie), le tout dans un cadre territorial (contrats de territoire dont le principe de base est « un territoire, un projet, un contrat »). Trois ans plus tard, une partie des principes énoncés dans le rapport Bianco ont été retrouvés dans la loi d'orientation de 2001, qui est la dernière loi en date dans le processus de définition d'une stratégie forestière nationale. Selon le ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche¹³, les perspectives de la politique forestière française reposent donc à l'heure actuelle sur quatre axes prioritaires.

¹³ <http://agriculture.gouv.fr/sections/presse/dossiers-presse/la-politique-forestiere-du-gouvernement>. Dossier sur la politique forestière du gouvernement, créé le 17/05/2005 et consulté le 24/08/2009.

- Valoriser la forêt notamment par le biais de contrats d'approvisionnements avec les industries.
- Conforter la gestion durable des forêts.
- **Développer la valorisation de la biomasse forestière, c'est-à-dire encourager l'utilisation du bois-énergie.** Ainsi l'article L1 du code forestier (livre préliminaire sur les principes fondamentaux de la politique forestière) : précise que « la gestion forestière et la valorisation des produits forestiers contribuent à la réduction des émissions nationales de gaz à effet de serre et au développement des énergies renouvelables. À ce titre, elles ont vocation à participer aux mécanismes de marché destinés à honorer les engagements internationaux en la matière ».
- Se mobiliser dans les démarches internationales et communautaires concernant la forêt.

Les lignes directrices de la politique forestière française dans les années à venir seront inspirées du Programme Forestier National initié par le Ministère de l'agriculture et de la pêche, portant sur la période 2006-2015 (Ministère de l'agriculture et de la pêche, 2006). Pour atteindre ces objectifs, un certain nombre de moyens et d'actions sont mis en place par l'administration forestière, des incitations financières sous forme de subventions monétaires ou techniques, aux mesures plus coercitives.

1.1.2. La prise en compte de la problématique énergétique

Bien que la valorisation énergétique de la biomasse ligneuse apparaisse comme l'un des axes majeurs de la politique forestière française, il n'y a pour l'heure pas de lois ou de décrets imposant des objectifs quantitatifs de biomasse forestière à vocation énergétique. Si l'utilisation du bois-énergie est prônée dans l'ensemble des textes constitutifs du Code Forestier (et que l'État joue un rôle prépondérant dans son élaboration) il n'y a rien de vraiment imposé, les lois restant des lois d'orientation définissant des objectifs généraux à atteindre. Les directives et mesures d'action concrètes en faveur de l'augmentation de la récolte forestière à des fins énergétiques sont généralement mises en œuvre au niveau local. Poupeau et al. (2009) mettent néanmoins en avant un phénomène intéressant par rapport aux problématiques de la structuration de l'offre et des politiques d'intensification de la production qui constituent selon lui de nouveaux enjeux pour les pouvoirs publics. De nouvelles actions « en amont de la filière, sur la disponibilité de la ressource », voient ainsi le jour dans le cadre des contrats de plans État-Régions, en collaboration avec les DRAF et le CRPF dans le but d'intensifier la production en allant chercher la matière première plus en profondeur, dans des parcelles jusque là mal desservies voire délaissées. Des subventions ciblées sont également mises en place par les collectivités territoriales, pour inciter au regroupement des propriétaires forestiers (le morcellement parcellaire étant un frein majeur à l'intensification de la production).

L'élaboration d'une politique forestière est donc le fruit de discussions et de compromis entre ces différents acteurs. Si les compétences étatiques jouent un rôle prépondérant dans la définition des politiques forestières, les échelons régional et infra-régional jouent également un rôle important, notamment par la mise en place de directives régionales aux conséquences directes en matière d'aménagement forestier et de valorisation énergétique.

1.1.3. Les politiques et moyens mis en œuvre à l'échelon régional et infra-régional

Monin (2003) affirme que « si la prise en compte du long terme et les fondements d'intérêt public de la politique forestière restent toujours très présents, le Code Forestier et le Régime Forestier, historiquement basés sur un fort encadrement par l'État des propriétés forestières privées et des forêts des collectivités, se sont adaptés à l'évolution du contexte économique et social, et au mouvement de déconcentration/décentralisation caractéristique des dernières décennies ». Ainsi l'article 2 du Code Forestier stipule que « la politique forestière relève de la compétence de l'Etat qui en assure la cohérence nationale », et précise également que « les collectivités territoriales et leurs groupements peuvent passer des contrats avec l'État, notamment dans le cadre des Chartes Forestières de Territoire, en vue de concourir à la mise en œuvre de cette politique ». Une série de documents de planification et d'aménagement forestier sont dès lors établis, confirmant l'intérêt du bois-énergie (ADEME 1999) : Orientations Régionales Forestières, Schémas Régionaux de Gestion Sylvicole, et Chartes Forestières de Territoire principalement.

a) Les orientations régionales forestières fixent sur une durée de quinze années la stratégie à mener pour la gestion des forêts publiques (et parfois privées), et sont la déclinaison régionale de la politique forestière nationale (ONF). Leur champ d'application est très vaste (économie, société, aménagement du territoire), et comporte des orientations spécifiques relatives à la valorisation du potentiel forestier local (bois d'œuvre, bois diffus), et du potentiel énergétique. Ces documents ne demeurent néanmoins que des préconisations, tout comme les directives régionales d'aménagement et le schémas régionaux d'aménagement, en charge d'établir les stratégies de gestion durable des forêts domaniales et des collectivités.

b) Les Schémas Régionaux de Gestion Sylvicole (SRGS) sont des documents de planification concernant la forêt privée, préconisant des méthodes de gestion au vu des objectifs définis dans les politiques forestières. Le SRGS de la région Franche-Comté consacre un chapitre au bois-énergie, en encourageant la production de plaquettes forestières, qui est « le véritable potentiel de développement de la filière bois-énergie » : « la filière plaquette représente une opportunité majeure pour le monde forestier, car elle offre un débouché commercial aux bois non-marchands (premières éclaircies, sous-produits d'exploitation... » (Forêt Privée Française, 2006).

c) Les Chartes Forestières de Territoire (CFT), sont des initiatives locales témoignant d'une volonté d'organisation territoriale de la filière forêt-bois et dendroénergétique. Instaurées par l'article L12 de la loi d'orientation sur la forêt, les CFT sont des documents de planification destinés à mettre en œuvre une stratégie multifonctionnelle de la filière forêt-bois (programme d'action pluriannuel) pour des territoires jugés pertinents en regard de leurs potentialités ligneuses (parcs naturels régionaux, établissements publics de coopération intercommunale, pays etc.). La CFT, de par ses objectifs économiques de renforcement, de diversification et de structuration de la production des produits forestiers locaux encourage fortement la valorisation énergétique de la biomasse ligneuse.

Si, pour l'heure, l'échelon régional reste encore un peu fragile en matière de planification forestière, notamment en raison d'un manque de moyens (Sergent, 2008), on peut néanmoins « constater qu'autour de quelques thématiques [dont] le bois-énergie, certaines régions parviennent à encadrer des groupes de travail et des partenariats originaux ». Les politiques agissant sur la mobilisation du bois (potentiel) dans une optique de valorisation énergétique sont cependant moins efficaces que les autres dispositifs agissant sur le volet de la demande (chaufferies). « L'implication croissante des pouvoirs publics, notamment l'ADEME, donne en effet un coup de pouce décisif à la structuration de la filière, les initiatives se focalisant dans un premier temps du moins, sur la demande, en s'efforçant de soutenir l'émergence de nouveaux besoins du côté des industriels et de la maîtrise d'ouvrage publique » (Poupeau et al., 2009).

1.2. Les dispositifs de soutien à la production de bois-énergie

En 2008, la part des énergies renouvelables (ENR) dans la consommation totale d'énergie primaire française est de 7,4%, ce qui reste relativement modeste (Eurostat, 2010). À cela plusieurs raisons : des marchés d'équipements réduits qui ne peuvent engendrer d'économies d'échelle, une structuration insuffisante des réseaux professionnels, une implication insuffisante des institutions financières et des tarifs encore relativement bas des énergies fossiles (ce qui n'encourage guère à la substitution) (ADEME, 2006). Pour les différentes instances en charge des politiques énergétiques, l'objectif est de faire « décoller » les ENR tout en assurant un développement durable (ADEME, 2006). Pour cela, un certain nombre d'actions et de programmes de soutien à la production d'ENR (et *a fortiori* de bois-énergie) ont été mis en place. Selon Sandrin (2006), cité in Mérenne-Schoumaker (2010), il s'agit essentiellement :

- d'incitations fiscales et financières (allègements fiscaux pour favoriser l'exploitation de la forêt privée et mieux mobiliser la ressource, crédits d'impôt sur les équipements

domestiques fonctionnant au bois, aides financières à l'installation de chaufferies urbaines collectives et industrielles) ;

- de tarifs d'achat garantis imposant aux distributeurs d'acheter toute l'énergie renouvelable produite dans leur zone au tarif décidé par les pouvoirs publics ;
- de procédures d'adjudication ou appels d'offres, visant à la production d'une certaine quantité d'énergie renouvelable durant un laps de temps au prix du marché.

Les leviers mis en place en faveur du développement du bois-énergie en France répondent ainsi à des objectifs et orientations impulsés par les instances supranationales et les autorités publiques. "En outre, il faut évoquer les actions plus ou moins importantes mises en place pour sensibiliser les collectivités, les industriels et les particuliers" (Mérenne-Schoumaker, 2010). À ce jour, les décisions concernant le développement de la filière se font au niveau national et régional, contribuant à la mise en place d'une logique à deux vitesses, avec, d'une part, la promotion de gros projets « structurants » et, d'autre part, avec l'incitation à la création de chaufferies de taille petite à moyenne.

1.2.1. Les actions mises en place au niveau national

1.2.1.1. Les plans bois-énergie et développement local (PBEDL)

Initiés en 1994 par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), les Plans Bois-Énergie et Développement Local (PEBDL) sont des programmes de soutien au bois-énergie, notamment dans les secteurs collectif/tertiaire et industriel. Treize régions-test (dont la Franche-Comté) ont été retenues dans un premier temps pour la conduite de ce programme, selon trois types d'actions :

- l'aide à la structuration de l'offre en bois,
- l'aide à la décision d'installation de chaudières collectives,
- les subventions pour l'acquisition de chaudières bois.

À l'issue de cette première phase en 1999, un parc de 320 chaufferies collectives avait vu le jour en cinq ans, pour une puissance installée de 263 MW. Parallèlement, 210 emplois locaux ont été créés pour la mise en place, la maintenance et l'approvisionnement de ces installations. Fort de ce bilan satisfaisant, le programme a été reconduit dans le cadre des contrats de plan État-Régions (accords-cadres) pour la période 2000-2006, en visant cette fois-ci l'ensemble du territoire national et tous les secteurs types : collectif, industriel et individuel. L'objectif était de maintenir à hauteur de 8 Mtep/an la consommation domestique de bois tout en améliorant le rendement énergétique, et d'installer 1000 nouvelles chaudières collectives ou industrielles grâce à des actions sur les marchés d'approvisionnement en

partenariat avec les collectivités locales et les professionnels de la filière bois. Au final, les objectifs sont largement atteints (tant au niveau du nombre de chaufferies créées que de tonnes équivalent pétrole substituées).

Troisième phase de ce programme : produire 290 000 tep supplémentaires de bois pour la période 2007-2010. L'objectif fixé est ambitieux et revient à doubler le résultat moyen obtenu lors du précédent programme (DGEMP-DIDEME¹⁴). Durant ce programme l'accent est mis sur les projets à forte consommation : réseaux de chaleur urbains, hôpitaux, logement collectif, piscines, maison de retraites, etc. tout en favorisant le regroupement des petits projets. Du point de vue de l'approvisionnement, la priorité est donnée aux projets fonctionnant à partir de plaquettes forestières.

Le programme « 1000 chaufferies bois pour le milieu rural »

Parallèlement aux actions en faveur du développement des projets de chaufferies bois de taille importante (> 1 MW), l'ADEME a également entrepris de soutenir les projets de taille plus modeste. Ainsi, lors des VIII^{èmes} assises de l'énergie en Janvier 2007, l'ADEME et la Fédération Nationale des Communes Forestières (FNCOFOR) ont signé un accord pour la mise en œuvre du programme "1000 chaufferies bois pour le milieu rural", dont l'objectif est de faciliter la réalisation de chaufferies bois groupées, par les acteurs des territoires à l'échelle d'une charte forestière de territoire, d'un pays, d'un parc naturel régional ou d'une intercommunalité. Les Conseils régionaux et généraux ainsi que l'ADEME sortent alors de la position qu'ils occupaient jusque là (soutenir la demande par le biais de subventions, remplir une fonction d'assistance à maîtrise d'ouvrage) pour jouer un rôle nouveau : contribuer à structurer une offre durable sur le segment des petites et moyennes chaudières en se tournant vers des combustibles issus d'espaces ligneux forestiers et agricoles. Son coût plus élevé nécessite une action plus volontariste, sous forme de subventions aux investisseurs mais aussi en direction des offreurs, lesquels pourraient avoir peine à émerger (Poupeau et al., 2009). L'objectif poursuivi est de réaliser au minimum trois chaufferies pour une « grappe¹⁵ » d'opérations (avec une puissance cumulée supérieure ou égale à 1 MW pour le groupement), et des chaufferies bois ayant une puissance unitaire supérieure ou égale à 150 kW.

Ces projets s'inscrivent dans le cadre des plans bois-énergie engagés au niveau régional avec l'ensemble des acteurs (régions, départements ou autres collectivités locales intéressées). Avec cet accord, l'ADEME et la FNCOFOR s'engagent à coordonner leurs efforts pour assister les collectivités territoriales dans leurs projets bois-énergie et sécuriser l'approvisionnement par une meilleure connaissance des ressources forestières présentes dans les territoires et par une meilleure mobilisation de celles-ci tout en préconisant une utilisation

¹⁴ Source : DGEMP, modifié le 29/10/2007. Consulté le 02 septembre 2009.

¹⁵ Terminologie des FNCOFOR pour désigner un groupement de chaufferies à créer sur un territoire.

préférentielle de plaquettes forestières (avec pour objectif d'arriver à hauteur de 70% des approvisionnements). Les fondements et principes sous-jacents à ce programme (structuration territoriale des approvisionnements, développement local, utilisation de plaquettes forestières locales) constituent un cadre conceptuel extrêmement intéressant pour ces recherches dans la mesure où ces aspects ont à notre sens une importance capitale pour une structuration durable et locale des approvisionnements.

1.2.1.2. Les appels d'offres de la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE)

Autorité administrative indépendante chargée de veiller au bon fonctionnement des marchés de l'électricité et du gaz en France, la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) publie régulièrement des appels d'offres en faveur du développement des installations de production d'électricité ou de cogénération à partir de biomasse.

Lancé en 2003, le premier appel d'offres visait à la création d'unités de production d'électricité à partir de biomasse ou de biogaz ayant un débit supérieur à 1000 t/jour, pour une puissance supérieure à 12 MWe¹⁶ par installation. L'objectif porte sur une puissance supplémentaire installée de 200 MWe à partir de biomasse et de 50 MWe à partir de biogaz (Direction générale de l'énergie et des matières premières, 2003). Il n'y a néanmoins pas eu de suites à cet appel d'offres.

Suite à cet échec, un deuxième appel d'offres a été publié en 2006, portant sur une puissance supplémentaire maximale de 300 MWe à partir de biomasse à réaliser au plus tard le 1^{er} Janvier 2010. La puissance totale est répartie en deux tranches : une tranche de 220 MW pour des installations de puissance strictement supérieure à 9 MW, et une tranche de 80 MW pour des installations de puissance comprise entre 5 et 9 MW. (Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières, 2006 ; Dalkia France, 2007). Concernant les approvisionnements de ces structures et les ressources admissibles, les installations doivent être alimentées à partir de biomasse, à l'exclusion de la fraction renouvelable des déchets ménagers. Au titre des déchets industriels, sont pris en compte les sous-produits de l'industrie papetière (liqueur noire et boues) ainsi que les déchets de l'industrie agro-alimentaire. Les déchets et résidus provenant de l'agriculture prennent en compte la paille et les cultures énergétiques. S'agissant des produits, déchets et résidus provenant de la sylviculture, les combustibles éligibles sont les connexes de l'industrie du bois faisant ou ne faisant pas l'objet d'une valorisation matière (dosses, délignures, plaquettes non forestières, écorces, chutes etc.), les broyats issus de centres de tri de DIB, la biomasse issue des espaces boisés (forestiers et non forestiers) obtenue notamment sous forme de plaquettes forestières. Il est également précisé que « tout approvisionnement, partiel ou intégral, en biomasse d'origine sylvicole décrite ci-dessus doit

¹⁶ Les installations visées par l'appel d'offres de la Commission de Régulation de l'Énergie sont des installations de production d'électricité ou de cogénération. Leur puissance est mesurée en watt électrique, correspondant à la production de puissance électrique.

comporter pour la part correspondante de l'approvisionnement, une proportion issue des quatrième et cinquième catégories (c'est-à-dire la biomasse forestière) supérieure ou égale à 50% » (Direction générale de l'énergie et des matières premières, 2006). Suite à cet appel d'offres, le Ministre de l'écologie Jean-Louis Borloo a sélectionné en juin 2008, 22 projets de centrales de production d'électricité et de chaleur alimentées à partir de biomasse. Ces centrales pourront bénéficier d'un tarif préférentiel d'achat de l'électricité. La puissance électrique cumulée de ces centrales, qui devront être mises en service avant 2010, est de 300 mégawatts (MW), soit l'équivalent du tiers de la puissance d'un réacteur nucléaire. La chaleur produite est estimée à 450 000 tonnes équivalent pétrole. L'ensemble des projets retenus (localisation, tranche et combustible majoritaire) est visible sur la figure 20.

Sans attendre que les installations résultant du deuxième appel d'offres soient en service, la CRE a lancé un troisième appel d'offres (dit CRE3) fin 2008 avec pour objectif une puissance supplémentaire maximale installée de 250 MWe à partir de biomasse d'ici à 2012. Les combustibles éligibles sont les mêmes que pour le précédent appel d'offres, avec au minimum 50 % de biomasse forestière issue du gisement naturel. La CRE a déclaré avoir reçu 106 dossiers au 3 Août 2009 représentant 936 MW. Les projets présentés, qui sont en majorité d'une puissance comprise entre 3 et 6 MW, envisagent, dans plus de 90% des cas, une alimentation majoritairement à partir "de produits, sous-produits et déchets de la sylviculture ou de l'industrie de transformation du bois". Les autres projets sont basés sur une production d'électricité à partir de produits et déchets de l'agriculture ou de l'industrie agroalimentaire¹⁷.

Avec ces appels d'offres de la CRE, nous changeons d'échelle en matière de puissance installée, et *a fortiori* de quantité de ressources ligneuses à prélever pour l'approvisionnement, sur une durée minimum de 20 ans, le gouvernement garantissant un rachat de l'électricité sur cette période. Les projets éligibles sont en effet de puissance importante, voire très importante, puisque aucun ne se situe en deçà de 3 MW. Besson (2003) insiste sur la nécessité de mettre en place une logique à double vitesse : « à côté des petites et moyennes entreprises qui sont très nombreuses dans ce secteur (celui des ENR) [...] il semble que l'implication des grands groupes énergétiques soit particulièrement souhaitable ». L'émergence de ces très gros projets devrait ainsi changer énormément la donne en matière dendroénergétique.

¹⁷ Source : communiqué de presse de la CRE, été 2008.

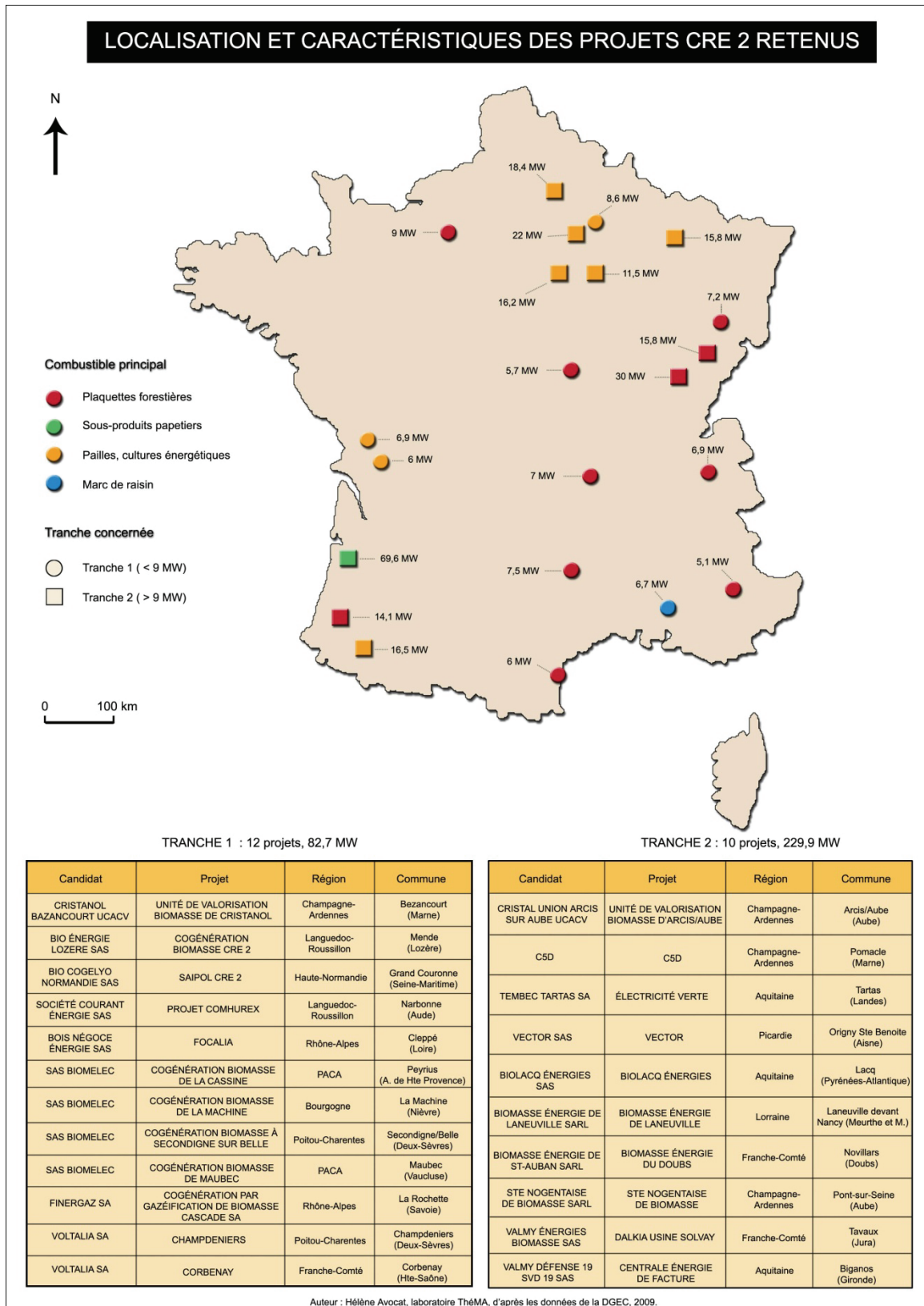


Figure 20 : répartition nationale des projets retenus par la Commission de Régulation de l'Énergie suite à son deuxième appel d'offres

En Franche-Comté, trois projets ont été retenus par la Commission de Régulation de l'Énergie, à Corbenay (Compagnie Française du Panneau), Novillars (Papeterie/OTOR), et

Tavaux (SOLVAY), dont l'exploitation est confiée à des grosses sociétés : VOLTALIA, POWEO, et DALKIA. Ces trois installations devraient consommer 505 200 tonnes de biomasse forestière par an. Parallèlement, le reste des chaufferies collectives de Franche-Comté consomme aujourd'hui moins de 80 000 tonnes de plaquettes forestières (Boittin et al. 2010). Les rayons d'approvisionnement de ces différents projets sont spatialement très étendus (plus de 100 km) et témoignent de fortes concurrences spatiales (cf. figure 21).

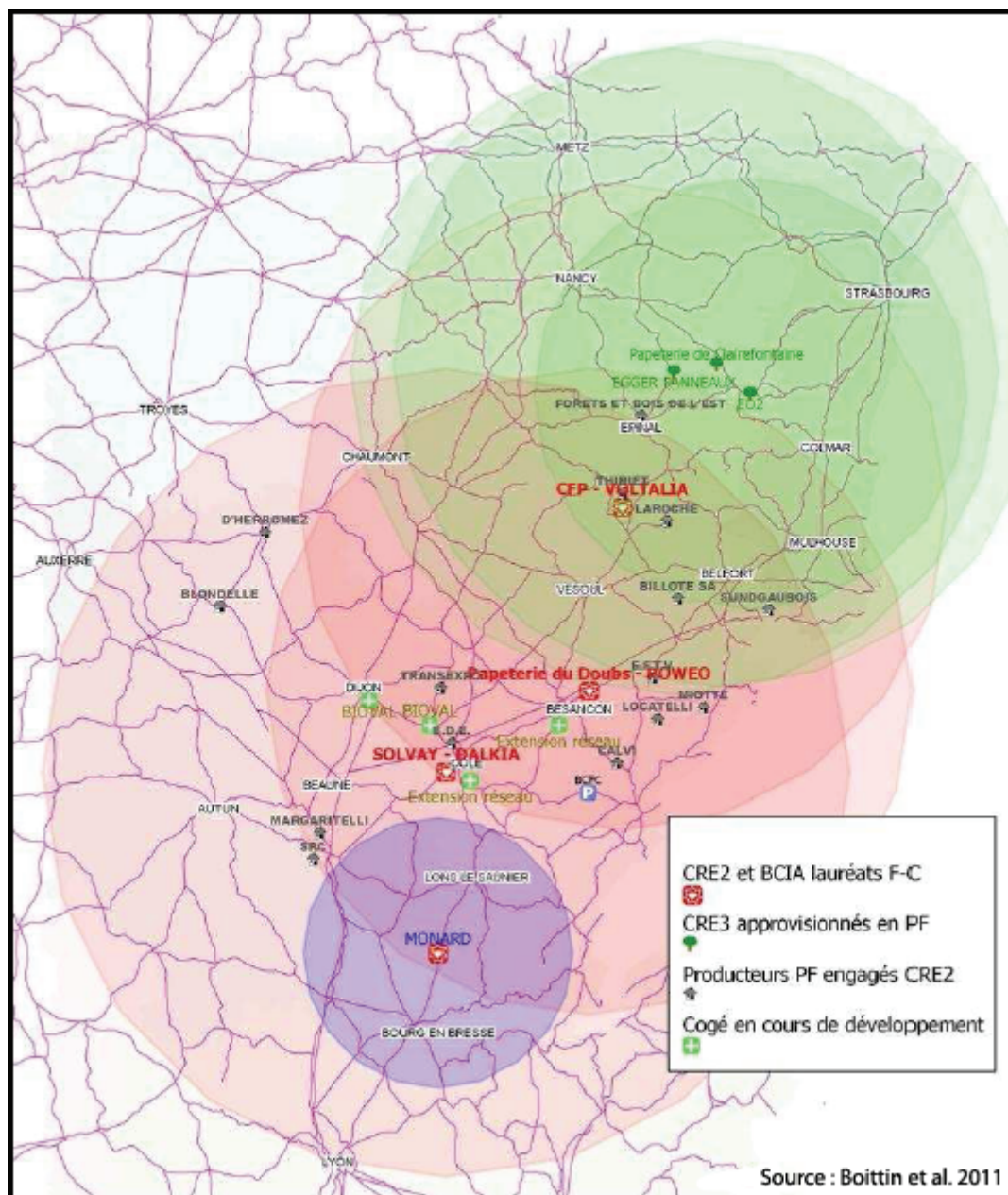


Figure 21 : rayons d'approvisionnement des différents projets en cours de réalisation en Franche-Comté, Bourgogne et Lorraine

La visibilité sur le degré de réalisation des gros projets étant faible voire nulle pour des raisons de manque de transparence et de bases concrètes au plans d'approvisionnement - les

stratégies des opérateurs n'étant pas dévoilées au niveau de l'achat de la matière première, et les engagements des fournisseurs restant virtuels - (Boittin et al. 2010), nous avons décidé de ne pas les considérer dans le cadre de ces travaux. D'autant plus qu'il est peu probable que tous ces projets aboutissent dans le format actuel.

1.2.1.3. Les autres dispositifs

Pour contribuer aux objectifs ambitieux de la France en matière de développement des énergies renouvelables, le gouvernement a lancé plusieurs programmes de valorisation énergétique (calorifique et électrique) de la biomasse¹⁸ (y compris ligneuse). La production électrique est soutenue financièrement par l'ADEME *via* la mise en place de dispositifs incitatifs de rachat de l'électricité (prévus par la loi POPE). La poursuite des appels d'offre pour la production d'électricité ou de cogénération à partir de biomasse sera quant à elle encore sous la tutelle de la Commission de Régulation de l'Énergie. Les autres dispositifs sont essentiellement issus du « fonds chaleur renouvelable ».

Le fonds chaleur renouvelable

« De manière générale, la chaleur qu'elle soit ou non produite à partir de sources renouvelables n'est pas bien reconnue par les textes. C'est pourquoi les professionnels demandent un texte spécifique, de préférence à l'échelon européen, qui définirait l'activité et qui comporterait des mesures d'aides [...] ainsi que la création d'un fonds chaleur alimenté par les contribuables ou les consommateurs » (Besson, 2003). L'ADEME a donc mis en place un dispositif visant à développer la chaleur d'origine renouvelable : le « Fonds Chaleur Renouvelable ». En vigueur sur la période 2009-2011, ce plan vise à développer très fortement la production d'énergie calorifique produite à partir de sources comme le bois, la géothermie, le solaire etc. dans les secteurs tertiaire, industriel, agricole, et collectif.

Ses deux modes d'intervention sont : d'une part des appels à projets nationaux pour de grosses chaufferies industrielles, où les porteurs de projets demanderont une bonification par mégawatt-heure de chaleur renouvelable produit ; et d'autre part des aides à l'investissement, notamment pour les collectivités. Le gouvernement précise en outre que la gestion de ce fonds et ses procédures seront fortement déconcentrées vers les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), les délégations régionales de l'ADEME et les Régions.

¹⁸ *Nota bene* : Il est intéressant de noter que les appels à projets portent maintenant d'avantage sur la biomasse (y compris forestière) qu'exclusivement sur le bois-énergie comme c'était le cas auparavant.

Les appels à projets Biomasse Chaleur Industrie et Agriculture (BCIA)

Pour atteindre les objectifs fixés dans le cadre du Grenelle de l'environnement et du fonds « chaleur renouvelable », l'ADEME a lancé un premier appel à projets afin de susciter le développement de projets de production de chaleur à partir de biomasse dans l'industrie et l'agriculture (ADEME, 2009). L'objectif indicatif est de 100 000 tep pour 2009 et porte sur les installations industrielles assurant une production énergétique annuelle supérieure à 1000 tep à partir de biomasse. Un document de l'ADEME datant de novembre 2009 nous informe que ce premier appel à projets a permis de retenir 31 projets sur 37 déposés, pour une production énergétique totale de 145 400 tep à partir de biomasse.

Les appels à projets biomasse Chaleur Industrie, Agriculture et Tertiaire (BCIAT)

Encouragée par le succès de l'appel à projets précédent, l'ADEME lance pour la période 2009-2011 un appel à projets concernant les entreprises des secteurs de l'industrie, de l'agriculture et du tertiaire privé (bureaux, commerces, grandes surfaces de distribution, plateformes logistiques, aéroport...) et vise la réalisation d'installations assurant une production de chaleur supérieure à 1000 tep/an à partir de biomasse. L'objectif indicatif fin 2009 est une production annuelle de 175 000 tep, sachant que les installations retenues devront être mises en service au plus tard le 1^{er} septembre 2012.

Organisme	Dispositif	Objectifs/résultats
ADEME	Plan bois-énergie et développement local	
	- première phase	320 chaufferies / 263 MW (env. 100 000 tep)
	- deuxième phase	1000 chaufferies /1000 MW (env. 300 000 tep)
	- troisième phase	290 000 tep
ADEME	1000 chaufferies bois pour le milieu rural	80 000 tep
CRE	CRE 2	300 MW (22 projets, env. 150 000 tep)
CRE	CRE 3	250 MW (d'ici 2012, env. 100 000 tep)
ADEME	Fond chaleur renouvelable	5,5 Mtep (d'ici 2020)
ADEME	Biomasse Chaleur Industrie et Agriculture	Production annuelle de 145 000 tep
ADEME	Biomasse Chaleur Industrie, Agriculture et tertiaire	Production annuelle de 175 000 tep

Tableau 2 : synthèse des dispositifs en faveur du bois-énergie

Pour encourager l'utilisation du bois énergie, le Gouvernement propose d'abaisser à 5,5 % le taux de TVA pour la fourniture de bois à usage non domestique. De même, la France a demandé que la directive communautaire sur la TVA soit révisée, pour faire bénéficier les abonnements aux réseaux de chaleur de la TVA à taux réduit. Par ailleurs, les conditions de prise de participation de l'ONF dans des entreprises commerciales seront assouplies pour

faciliter l'utilisation du bois-énergie (Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche). Le tableau 2 synthétise l'ensemble de ces dispositifs et la production énergétique en résultant, au niveau national.

1.2.2. Les politiques, actions et dispositifs au niveau local et régional

Les systèmes énergétiques ¹⁹tendent de plus en plus à se décentraliser (Ibrahim, 2007 et Flety, 2007) et les collectivités sont de fait amenées à jouer un rôle de plus en plus prépondérant vis-à-vis de la thématique énergétique. Ce constat est corroboré par Besson (2003) : « les collectivités territoriales ont une vocation particulière à s'intéresser à des projets qui permettent de valoriser des ressources locales ». Néanmoins, si les collectivités locales manifestent beaucoup d'intérêt à la thématique dendroénergétique, et sont à la base de l'émergence des projets de chaufferies bois, elles ne disposent pas (exception faite des Conseils Régionaux) de moyens incitatifs. Si les communes ou structures intercommunales peuvent expressément faire mention de la volonté de développer une filière bois-énergie sur leur territoire dans leurs documents de planification et d'aménagement (Agenda 21 par exemple), il ne s'agit néanmoins pas de dispositifs ayant une valeur législative et un caractère obligatoire. Les dispositifs les plus efficaces émanent des Conseils Régionaux et généraux qui définissent un certain nombre d'objectifs en matière dendroénergétique (en accord avec les objectifs nationaux) et allouent un budget pour aider à la réalisation de ces objectifs.

Il est également précisé que les installations industrielles de plus petite taille non éligibles à l'appel à projet (BCIA) seront susceptibles de bénéficier d'aides à la production énergétique à partir de biomasse au travers d'instructions régionalisées. Cela témoigne-t-il de la mise en place d'une logique à double vitesse avec des gros projets financés par les instances nationales et des petits projets financés par des instances régionales voire infra-régionales ?

Toutes ces actions politiques en faveur de l'émergence de la filière bois-énergie, qu'elles agissent en faveur de l'intensification de la récolte de matière ligneuse ou qu'elles favorisent la création de chaufferies, ont entraîné l'émergence de nouveaux acteurs et de nouveaux enjeux, ce que nous voyons à travers le tableau 3, issu de Poupeau et al. (2009) :

¹⁹ Et spécialement ceux basés sur les ENR.

Phases	Principaux acteurs économiques de la filière bois énergie	Principaux enjeux pour la filière
Lancement de la filière bois → <i>Milieu des années 1990</i>	Scieurs, exploitant de chaufferie,	<ul style="list-style-type: none"> • Faire émerger la demande • Sécuriser les approvisionnements • Mutualiser les coûts
Consolidation de la filière → <i>Fin des années 1990 - milieu des années 2000</i>	Acteurs historiques Nouveaux entrants : <ul style="list-style-type: none"> • opérateurs de déchets : collecteurs (dont Veolia Propreté), • agriculteurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Soutenir la croissance du bois énergie en favorisant de nouveaux débouchés (notamment auprès des collectivités locales) • Rendre la filière crédible
Entrée dans une phase plus industrielle → <i>À partir du milieu des années 2000</i>	Acteurs historiques Entrants phase 2 Nouveaux entrants : <ul style="list-style-type: none"> • propriétaires de forêts (ONF, COFA) • ONF Energie 	<ul style="list-style-type: none"> • Atteindre les objectifs (ambitieux) de production à base d'énergies renouvelables fixés par l'Union européenne • Sortir plus de bois • Gérer la concurrence entre les usages du bois

Tableau 3 : Principales phases de développement de la filière bois-énergie

Source : Poupeau et al., 2009

Concernant les mutations de la filière dendroénergétique, le ministre J.-L. Borloo affirme ainsi en 2008 que ce plan a pour ambition un changement complet d'échelle visant à « passer d'un modèle essentiellement fondé sur le carbone et sur des ressources inégalement réparties sur la planète, à un modèle totalement décarboné, où chaque maison, chaque entreprise et chaque collectivité devient son propre producteur d'énergie ». Ce dernier aspect nous interpelle. Cela donne à penser que les collectivités doivent valoriser les ressources présentes sur leur propre territoire, valorisant de fait un gisement local.

L'ensemble de ces politiques et dispositifs a eu pour conséquence une profonde transformation du paysage dendroénergétique franc-comtois, devenue deuxième région française par sa puissance installée.

2. Le bois-énergie en Franche-Comté : une augmentation exponentielle de la demande pour les secteurs industriels et collectif/tertiaire

Très souvent citée comme une région phare, en raison de son positionnement précoce sur la scène dendroénergétique, la Franche-Comté est caractérisée par un développement important de la filière qui la place à l'heure actuelle en deuxième position derrière la région Rhône-Alpes en matière de puissance installée. L'objectif de ce chapitre est de faire le point sur la structure et les dynamiques de consommation dendroénergétique franc-comtoise, dans les secteurs types industriel et collectif / tertiaire (hors projets CRE 2). Pour ce faire, nous avons remis à jour la base de données fournie par l'ADEME²⁰(confidentielles), et la coopérative forestière Pro-Forêt sur les installations collectives et industrielles (base de données remise à jour par le biais d'entretiens téléphoniques individuels ; 40 % des données présentes initialement dans le fichier présentant des erreurs ou n'étaient pas renseignées). Nous avons également effectué des recoupements avec des données transmises par la ville de Besançon, la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon, et le Conseil Général du Doubs. L'analyse de ces fichiers de données remis à jour nous permet de mettre en évidence :

- la structure globale de la demande en bois-énergie en Franche-Comté selon la puissance (tous secteurs confondus dans un premier temps),
- la structure des installations ventilée par secteur type (collectif/tertiaire et industriel)
- leur répartition spatiale et temporelle.

L'ensemble de ces analyses a pour finalité première une meilleure connaissance de la structure de consommation dendroénergétique franc-comtoise, ce qu'il était difficile d'avoir avant, puisqu'il n'y a pas vraiment d'organisme centralisateur de ces données²¹. Au 1^{er} Janvier 2009, les installations de consommation dendroénergétique franc-comtoises se structuraient de la manière suivante (tableau 4) :

²⁰ Pour cette raison, nous considérerons les données de façon agrégée et en aucun cas ne ferons mention de la maîtrise d'ouvrage des installations.

²¹ Même si l'ADEME en détient la majeure partie dans la mesure où elle finance beaucoup de projets, l'évolution de la demande est tellement rapide que certaines installations ne sont pas forcément référencées.

Nombre	431
Puissance cumulée (MW)	226
Puissance moyenne (MW)	0,53
Puissance minimum (MW)	0,01
Puissance maximum (MW)	11
Consommation cumulée (tep)	78385
Consommation moyenne (tep)	186,2

Tableau 4 : structure globale de la consommation de bois-énergie en Franche-Comté

Données ADEME, DRIRE, PRO-FORÊT au 6 avril 2009

2.1. Une augmentation exponentielle de la demande depuis 1996

La mise en place du premier plan bois-énergie et développement local sous l'égide de l'ADEME en 1994 marque le début d'une augmentation exponentielle du nombre de chaufferies bois, particulièrement dans le secteur collectif/tertiaire. Les collectivités connaissent notamment un véritable « décollage » à partir de 1996, date avant laquelle seulement cinq installations avaient été mises en place par les collectivités (figure 22).

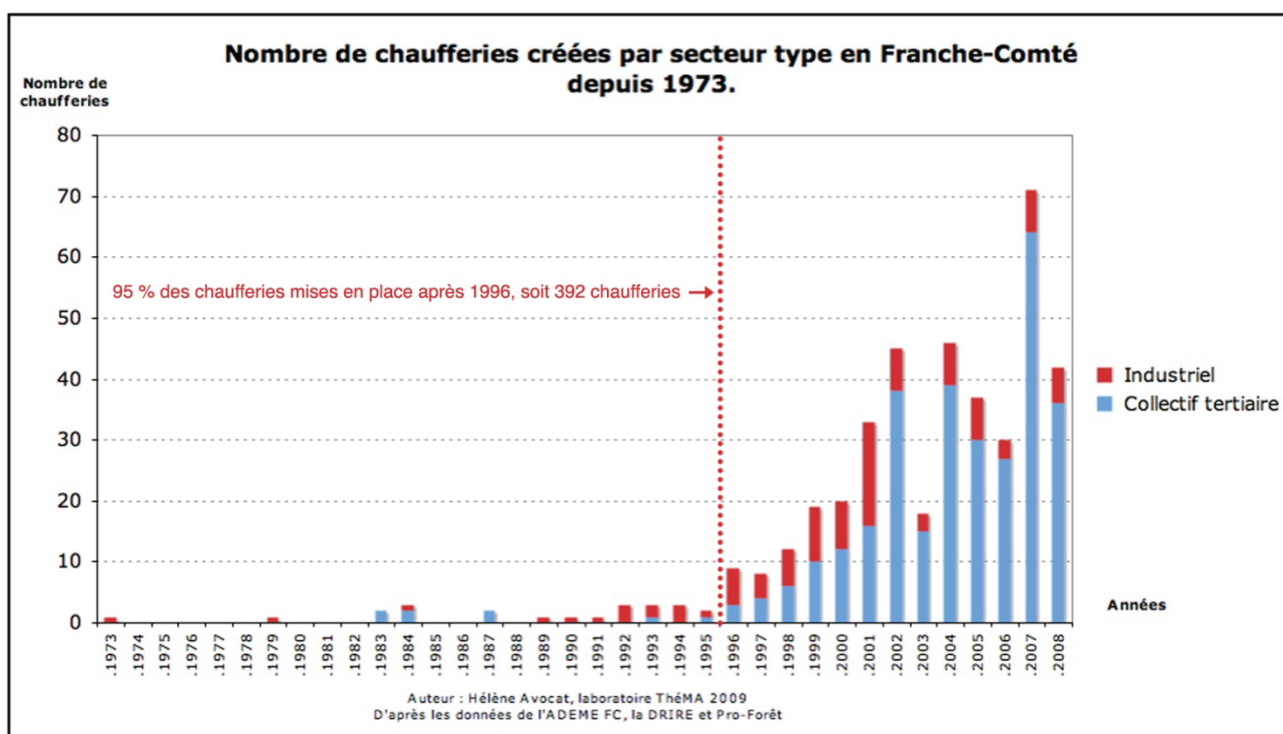


Figure 22 : évolution du nombre de chaufferies en Franche-Comté

Les chaufferies du secteur industriel ont quant à elles été mises en place de façon plus précoce, avant les importantes actions de subventions. Les entretiens ont même révélé une chaufferie mise en place en 1944 dans une menuiserie²². Il s'agit en grande majorité de chaufferies mises en place par les industries du bois, et la création de chaufferies industrielles en dehors de l'industrie du bois est un phénomène extrêmement récent. Une analyse plus fine révèle qu'à l'instar du secteur collectif, le secteur industriel effectue un véritable « décollage » dès le début des années 90. La figure 23 décrit l'évolution du nombre de chaufferies dans l'industrie du bois.

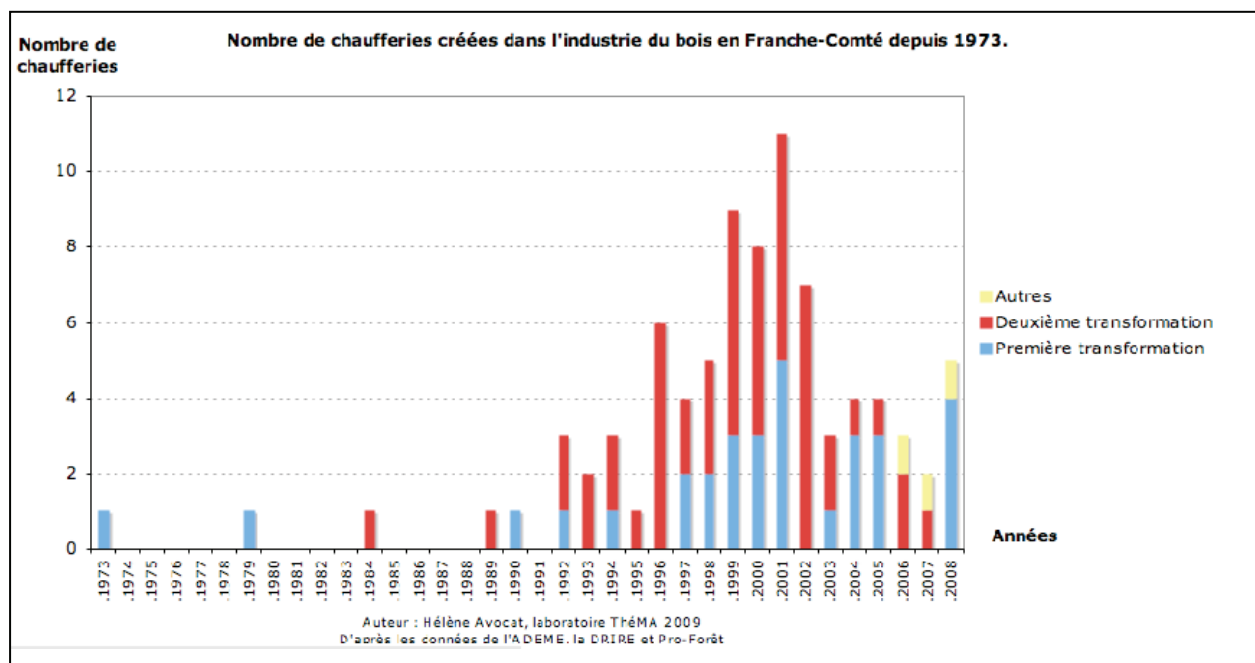


Figure 23 : évolution du nombre de chaufferies dans l'industrie du bois

La figure 24 nous montre l'évolution du nombre de chaufferies tous secteurs confondus à quatre dates différentes : 1996, 2000, 2004 et 2008. On voit que le nombre de chaufferies s'accroît de façon importante depuis 2000. Le département du Jura a été le premier à amorcer un développement rapide de la filière, puisque entre 1996 et 2000 il concentre une majorité de création de chaufferies.

²² Mais le maître d'ouvrage n'ayant que très peu d'informations sur cette installation, nous ne l'avons pas prise en compte dans le cadre de cette analyse.

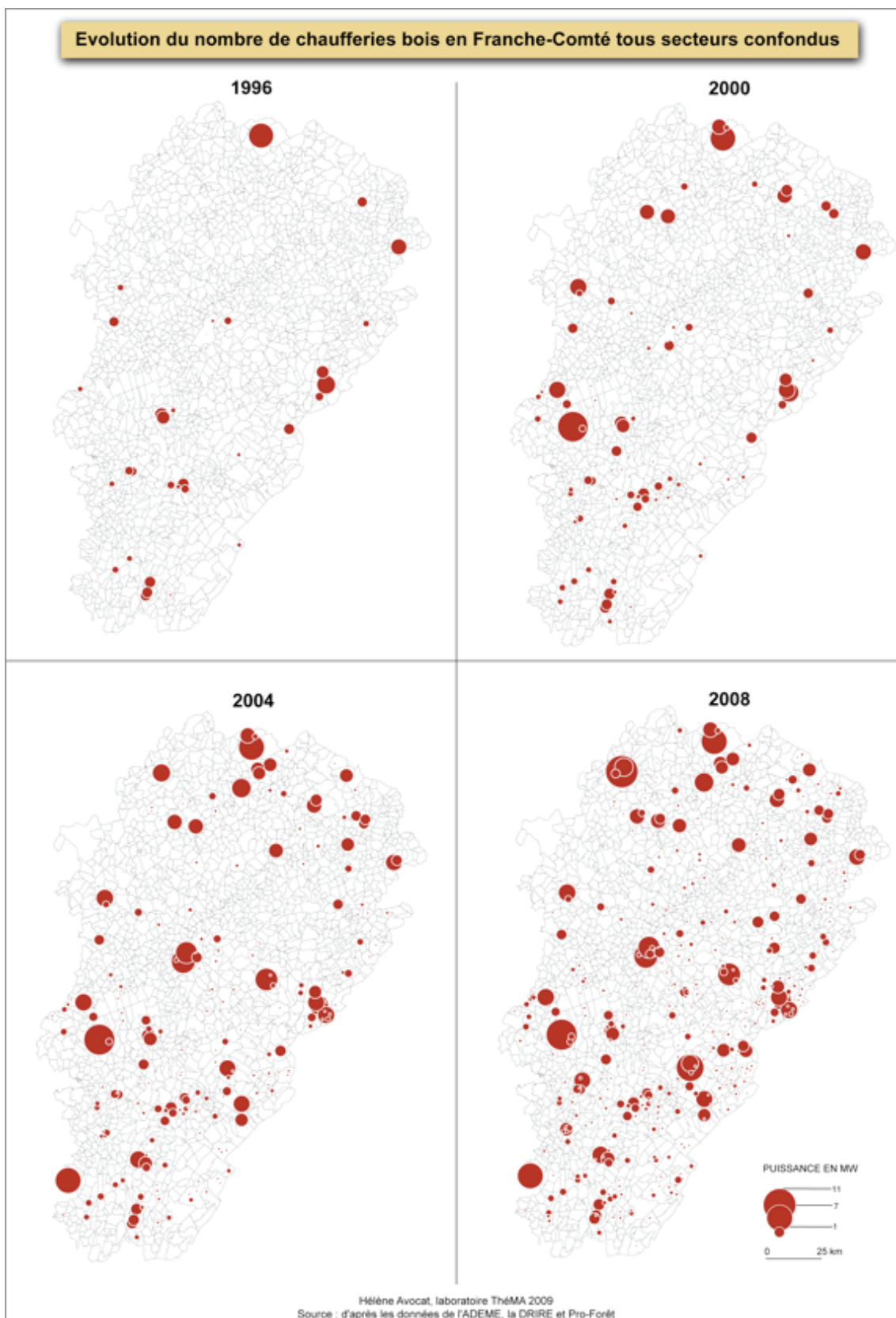


Figure 24 : évolution de la consommation dendroénergétique en Franche-Comté

2.2. Une majorité de petites installations

Plus de 85% des chaufferies ont une puissance inférieure à 1 MW, et 97% une puissance inférieure à 4 MW. Des analyses à un niveau de détail plus fin mettent en évidence la prépondérance des petites chaufferies inférieures à 100 kW (49,4%); avec une classe modale entre 50 et 60 kW. L'adéquation entre le nombre de chaufferies et leur puissance cumulée est un indicateur intéressant de la structure de consommation, et la figure 25 nous indique que les chaufferies de puissance inférieure à 1 MW) ne contribuent qu'à hauteur de 26,3 % de la puissance totale.

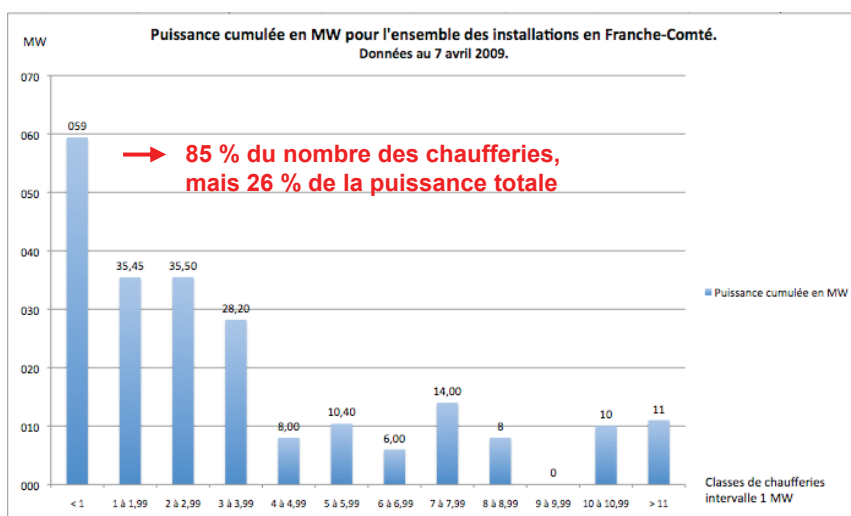


Figure 25 : puissance cumulée par classes de 1 MW

2.3 Des chaufferies collectives plus nombreuses mais des chaufferies industrielles plus puissantes

Les chaufferies collectives représentent 75% du nombre de chaufferies franc-comtoises mais seulement 40 % de la puissance cumulée (tableau 1, annexe 1). Cela dénote d'une faible puissance : en moyenne 290 kW contre 1,26 MW pour les chaufferies du secteur industriel.

Le tableau 2 de l'annexe 1, ainsi que les figures 26 à 28, révèlent une prédominance de chaufferies inférieures à 1 MW dans le secteur collectif/tertiaire, qui représentent 42 % de la puissance installée totale, soit 197 chaufferies. Ainsi, la classe de puissance comptant le plus grand nombre d'installations (une cinquantaine) est comprise entre 50 et 60 kW. Au delà de 70 kW, le nombre de chaufferies est très nettement décroissant (figure 28).

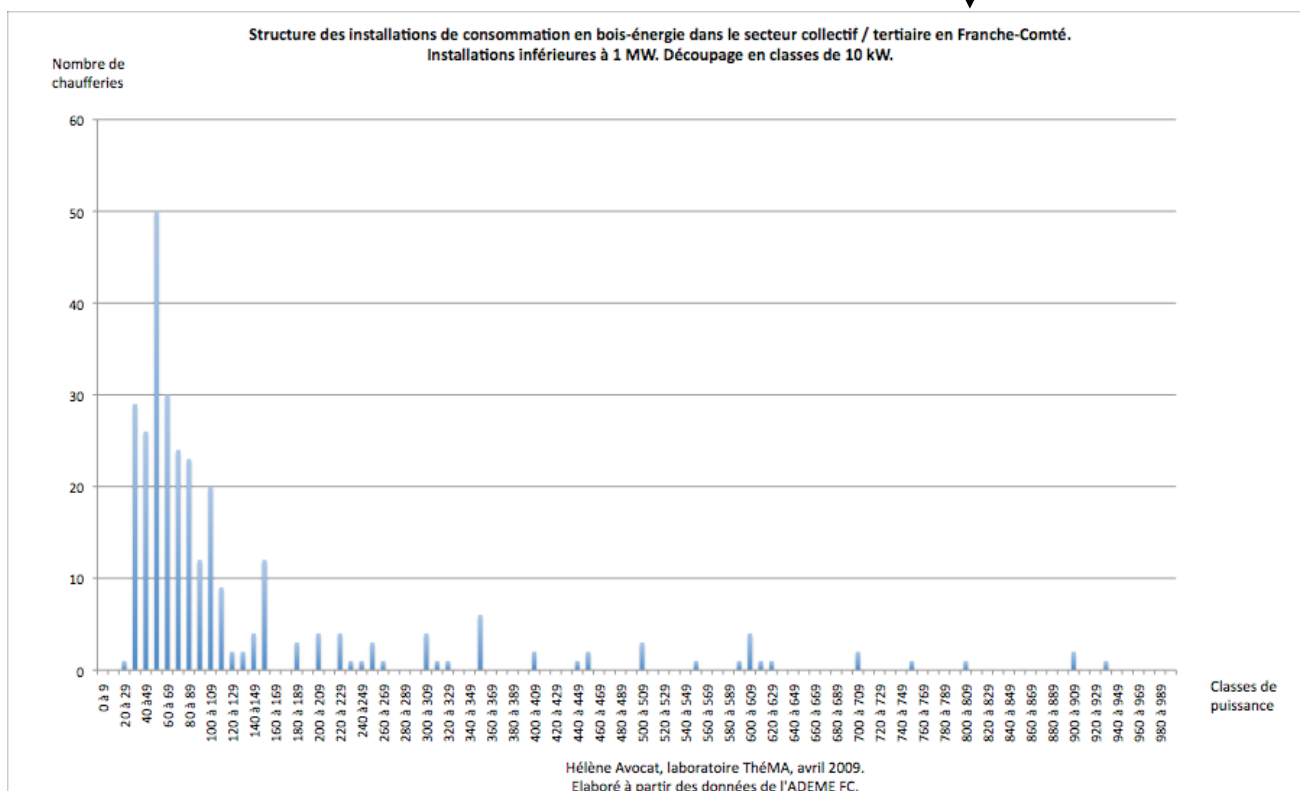
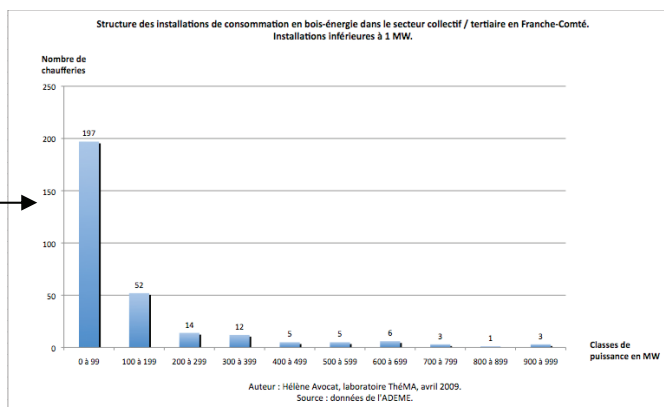
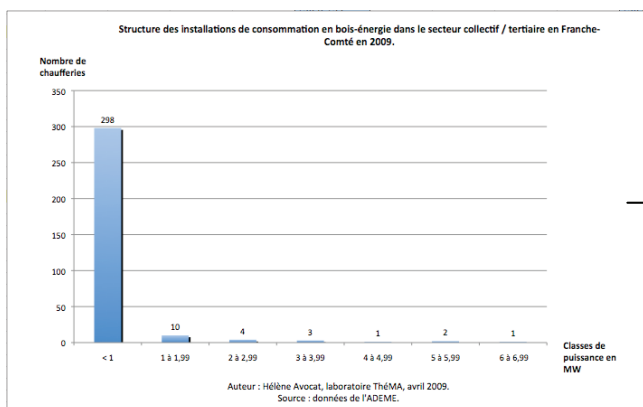


Figure 26 : structure globale des installations de consommation dans le secteur collectif / tertiaire. Découpage 1 MW

Figure 27 : structure des installations de consommation dans le secteur collectif / tertiaire, inférieures à 1 MW. Découpage 100 kW

Figure 28 : structure des installations de consommation dans le secteur collectif / tertiaire, inférieures à 1 MW. Découpage 10 kW

En revanche, les installations sont de taille plus conséquente dans le secteur industriel. Les chaufferies de puissance inférieure à 1 MW représentent 62 % du nombre total des chaufferies industrielles et ne totalisent que 15,8% de la puissance cumulée (cf. figure 29 et annexe 1).

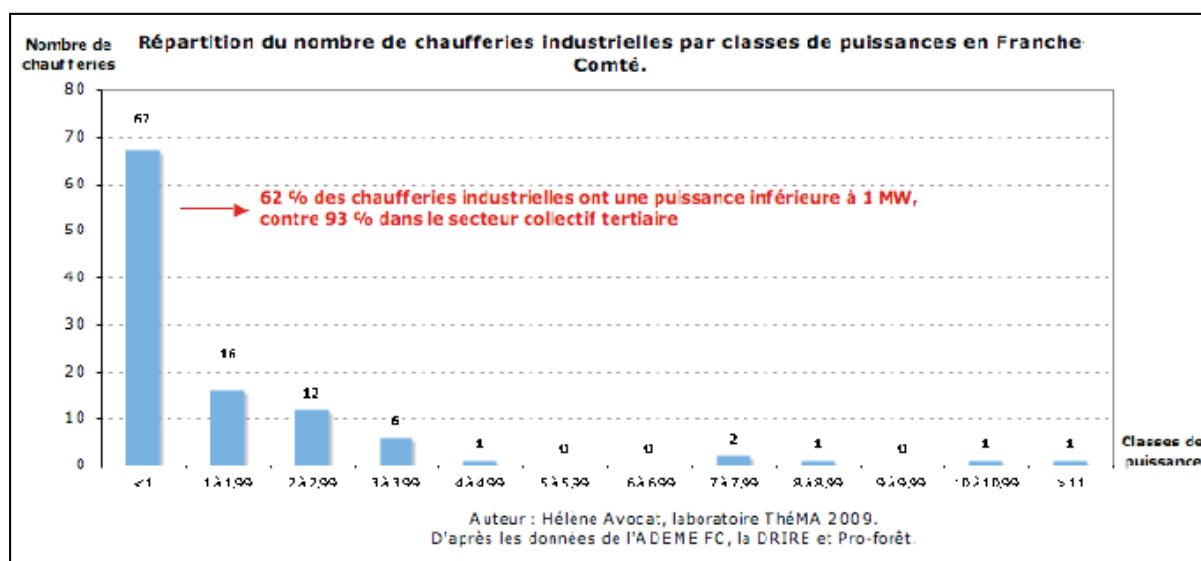


Figure 29 : structure de la consommation dans le secteur industriel

La figure 30 nous montre la répartition spatiale des deux grandes catégories de chaufferies (industrielles et collectives).

Localisation et caractéristiques des chaufferies bois en Franche-Comté en 2009

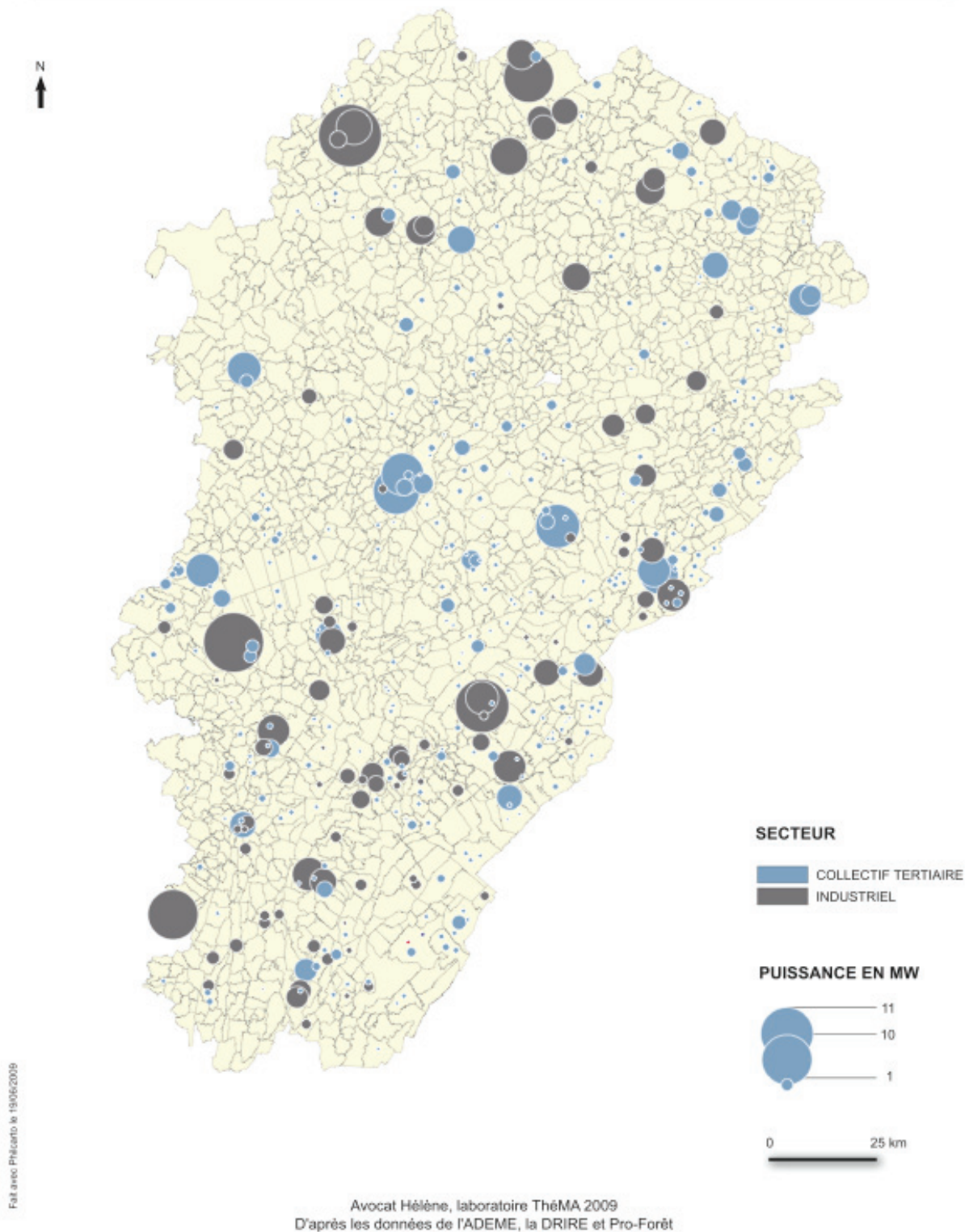


Figure 30 : cartographie des chaufferies franc-comtoises selon le type de maîtrise d'ouvrage

2.4. Les collectivités et le secteur petit collectif locatif, des acteurs prépondérants du secteur collectif/tertiaire

L'étude du secteur collectif/tertiaire sous l'angle de la maîtrise d'ouvrage présente des spécificités intéressantes (cf. figure 31).

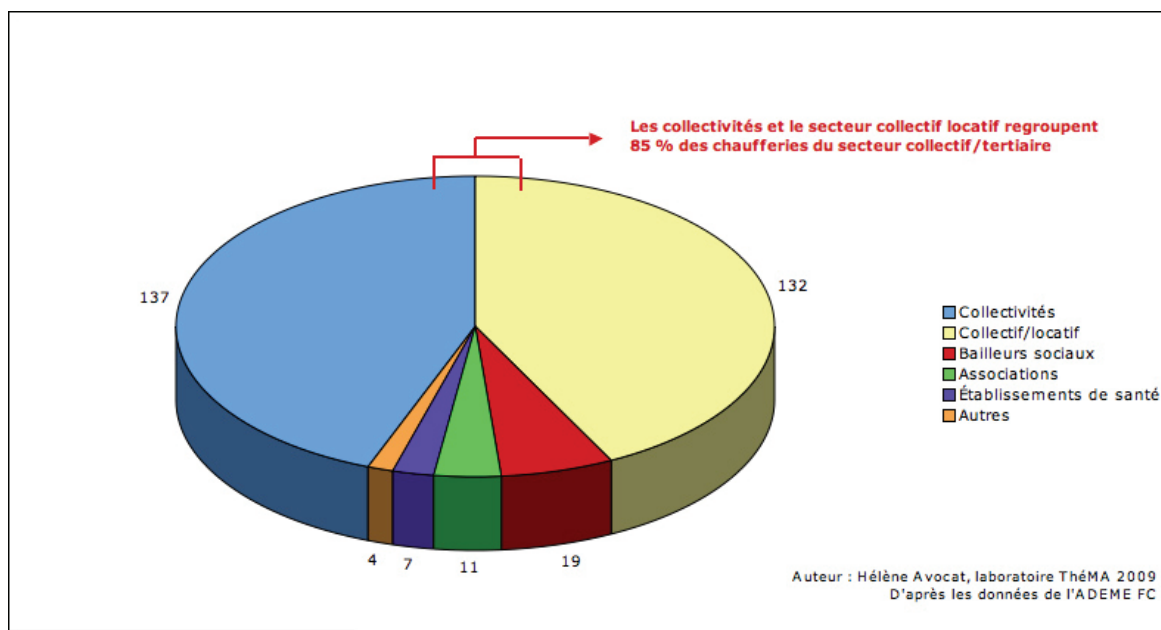


Figure 31 : répartition du nombre de chaufferies du secteur collectif/tertiaire selon la maîtrise d'ouvrage en Franche-Comté

Une première analyse révèle une grande disparité dans la distribution du nombre de chaufferies, en faveur des collectivités et du collectif locatif. Les installations mises en place par les collectivités totalisent 58 MW de puissance cumulée, et ont une puissance moyenne de 420 kW (avec les gammes de puissance s'échelonnant de 30 kW à 6 MW). Une majorité de chaufferies, (presque 60 %) sont mises en place par les structures communales (figure 32). Viennent ensuite les communautés de communes (une seule communauté d'agglomération est maître d'ouvrage à l'échelle de la Franche-Comté). Les syndicats de différents types ont quant à eux en charge 17 chaufferies à l'échelle de la région.

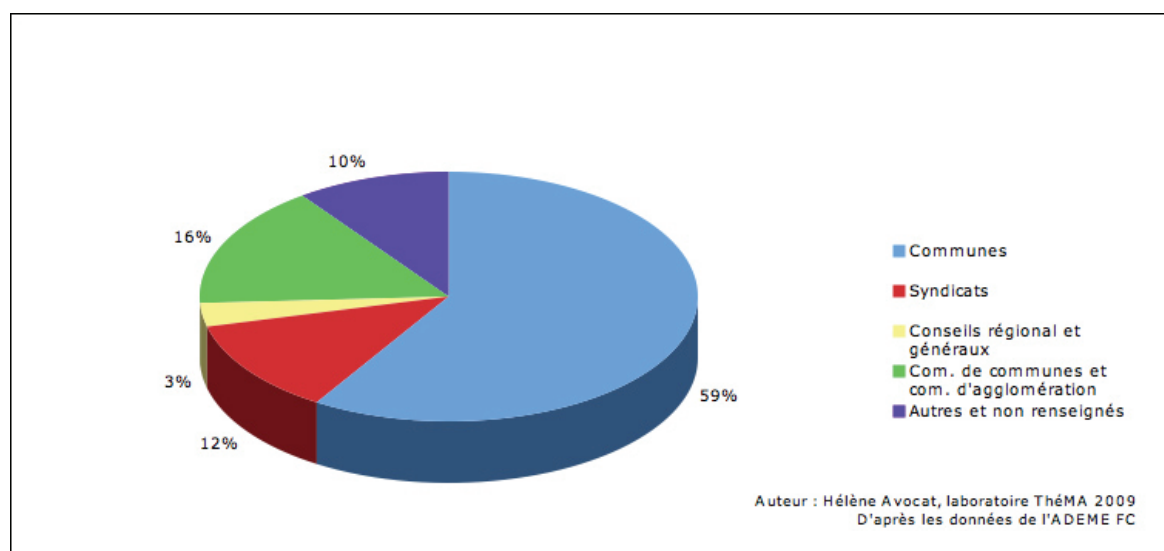


Figure 32 : répartition des chaufferies par type de collectivités

Caractérisé par un développement très récent, le secteur collectif locatif occupe malgré tout la deuxième place en nombre de chaufferies du secteur collectif/tertiaire. La puissance est faible et culmine à 350 kW (90% des chaufferies ont une puissance inférieure à 100 kW) ; alors que la puissance cumulée de l'ensemble de ces installations ne s'élève qu'à seulement 8,5 MW.

Le tableau 5 nous donne des informations synthétiques sur ces chaufferies :

Type de maîtrise d'ouvrage	Nombre de chaufferies	Puissance cumulée	Puissance moyenne	Évolution
Bailleurs sociaux	19	12,5 MW	650 kW avec des puissances comprises entre 30 kW et 2,9 MW	Récente, avec trois quarts des chaufferies mises en place après 2009
Associations	11	1,86 MW	0,17 MW avec des puissances comprises entre 40 et 610 kW	82 % de chaufferies mises en place après 2004
Établissements de santé	7	3,5 MW	0,5 MW, avec une puissance minimum de 90 kW et une puissance maximum de 2,2 MW (une seule chaufferie > 1 MW)	5 installations sur 7 mises en service après 2002
Autres	4	5,5 MW	1,4 MW avec 3 chaufferies < 40kW et 1 chaufferie > 5 MW	3 chaufferies sur 4 mises en place après 2004

Tableau 5 : chaufferies mises en place par les bailleurs sociaux, associations, et établissements de santé

2.5. Un secteur industriel très largement dominé par les industries du bois

Bien que les données aient été remises à jour *via* des entretiens téléphoniques avec des maîtres d'ouvrage (courant mars 2009) et un croisement avec des données de la DREAL, nous devons préciser qu'il est possible que les données ne soient pas exhaustives pour les chaufferies industrielles non subventionnées par l'ADEME (bien que nous ayons complètement remis à jour le fichier de données transmis par Pro-forêt). Cette non exhaustivité s'explique par le fait que la DREAL ne comptabilise les installations de combustion qu'au delà de 4 MW²³ et ne fait pas de distinction entre les types de combustibles utilisés. Cela nous a néanmoins permis de répertorier les installations les plus importantes. Pour une exhaustivité totale, il aurait fallu enquêter l'ensemble des industries du bois de la région (2200 au total selon l'ADIB²⁴). Or, ces structures fonctionnant majoritairement en auto-provisionnement (et n'étant pas par conséquent au cœur des processus que nous souhaitons étudier), cela aurait généré une charge de travail trop importante pour des résultats éloignés de nos objectifs).

- **Les chaufferies industrielles hors industrie du bois**

Présentant une très forte hétérogénéité au niveau des maîtrises d'ouvrage (des entreprises agricoles aux fruitières, en passant par des entreprises diverses), ces industries sont beaucoup moins nombreuses et beaucoup moins importantes que les industries du bois. En effet, 14 chaufferies comptabilisent une puissance cumulée de 1,95 MW dans des gammes de puissances relativement faibles, de 0,06 à 0,4 MW (puissance moyenne : 150 kW). Leur développement est aussi plus récent, la plus ancienne chaufferie ayant été mise en place en 1998.

- **Les chaufferies de l'industrie du bois**

Environ la moitié des chaufferies de l'industrie du bois ont une puissance inférieure à 1 MW, ce qui diffère considérablement du secteur collectif / tertiaire, qui, rappelons-le regroupe 93 % de ces chaufferies. Pratiquement 40 % des chaufferies ont une puissance comprises entre 1 à 4 MW), cumulant 65 MW, soit la moitié de la puissance installée de ce secteur. Nous comptabilisons ensuite 5 chaufferies de puissance très importante (de 7 à 11 MW), totalisant un tiers de la puissance cumulée du secteur. Des différences notables peuvent être observées entre les industries de la première et de la deuxième transformation. La première transformation est caractérisée par un nombre moins important d'installations, mais de

²³ Installations classées SEVESO et faisant l'objet d'une déclaration aux services de la DRIRE.

²⁴ ADIB : Association régionale pour le Développement de la forêt et des Industries du Bois.

puissance plus importante (en moyenne 2,2 MW contre 0,84 pour les industries de la deuxième transformation). La distribution statistique du nombre de chaufferies de la deuxième transformation témoigne d'une très grande majorité de petites chaufferies (inférieures à 1 MW) et une décroissance rapide avec l'augmentation des puissances installées.

Les analyses effectuées ici révèlent une forte hétérogénéité dans la structure de consommation dendroénergétique franc-comtoise, ainsi qu'une forte augmentation de la demande, caractéristiques que l'on retrouve également dans nos deux terrains d'étude. Ce fort développement de la filière bois-énergie, fruit d'une structuration "par le haut et par la demande" soulève un certain nombre de questions et de problèmes, notamment au niveau de l'approvisionnement de ces chaufferies, qui reste la question majeure pour la grande majorité des acteurs de la filière.

Chapitre 3

Les approvisionnements en plaquettes forestières : un enjeu majeur, une problématique géographique

La forte augmentation du nombre de chaufferies, et l'émergence prochaine de centrales de cogénération de puissance importante, soulèvent un grand nombre de questions et d'enjeux relatifs à l'approvisionnement : de la satisfaction de la demande à la renouvelabilité de la ressource, en passant par la sécurisation des approvisionnements sur le long terme, les prix et la qualité des dendrocombustibles, la qualité environnementale de la filière, etc.

Le développement rapide de la filière et l'augmentation de la consommation ont eu pour conséquence une déstructuration de la demande dont les répercussions se sont fait ressentir à tous les niveaux avec une mobilisation accrue des acteurs locaux vis-à-vis de cette problématique (et spécialement au niveau de la production ligneuse, la demande en plaquette forestière ayant fortement augmenté).

Particulièrement sensibles aux problèmes de renouvellement de la ressource ligneuse, de développement et valorisation des ressources locales, de création d'emplois locaux, etc., les approvisionnements en plaquettes forestières cristallisent l'attention de l'ensemble des acteurs de la filière bois-énergie. L'objectif de ce chapitre est de rendre compte de ces enjeux et de comprendre le fonctionnement des processus impliqués. En tant que géographe, nous nous intéressons plus spécifiquement à la composante spatiale des processus d'approvisionnement, de la définition des potentiels énérgisables (caractérisation de l'offre) à la définition d'aires de chalandise autour des chaufferies (mise en adéquation de l'offre et de la demande).

1. Les enjeux inhérents à l'utilisation des plaquettes forestières

Issues des accrus, taillis et rémanents de l'exploitation forestière, les plaquettes forestières présentent un débouché intéressant pour la filière forêt-bois. Notamment pour les taillis ou perches tordues, qui, par définition n'ont pas de débouchés commerciaux dans le bois d'œuvre (les diamètres des tiges et la qualité de la matière ligneuse ne permettant pas une valorisation économiquement intéressante). Quant aux rémanents, qui constituent les menus débris de bois restant dans les coupes après exploitation, ils sont aujourd'hui bien souvent abandonnés en forêt en raison de leur faible valeur commerciale et des coûts inhérents à leur mobilisation. Les souches peuvent également être utilisées comme source de bois-énergie, mais leur utilisation reste expérimentale à ce jour (ADEME²⁵), et leur récolte (qui implique des coupes rases) n'est pas envisagée. Par conséquent, ce dernier gisement n'est pas considéré dans le cadre de ce travail.

Alors que jusqu'au début du XX^{ème} siècle tout était récupéré en forêt (la plupart du temps par les particuliers comme petit bois de chauffe), à l'heure actuelle, les négociants en bois de chauffage ne veulent pas des rémanents, car ils n'entrent pas dans les normes de consommation. Cette situation problématique est néanmoins peut-être en passe de se modifier avec l'augmentation du nombre de chaufferies et centrales de cogénération qui entraîne une augmentation de la demande en dendrocombustibles (en particulier en plaquettes forestières). Bien qu'une part de la consommation porte sur des connexes et déchets de l'industrie du bois, les incertitudes sur ces marchés incitent les maîtres d'ouvrages et sociétés d'approvisionnements à diversifier le bouquet dendroénergétique des chaufferies bois. Et la plaquette forestière, constituée entre autres par le broyat des rémanents de l'exploitation forestière semble constituer une bonne réponse à ces enjeux (Forêt Privée Française, 2006).

1.1. La plaquette forestière, un combustible amené à se développer

1.1.1. Une forte augmentation de la demande dans les décennies à venir

Bien que la filière bois-énergie se soit initialement développée à partir d'un gisement industriel (connexes et déchets) qui ne trouvait pas de débouchés (Poupeau et al., 2009), les récentes mutations induites par une forte augmentation de la demande changent considérablement la donne. En effet, si les chaufferies de l'industrie du bois ont constitué le noyau initial du développement de la filière, la tendance tend aujourd'hui à s'inverser sous

²⁵ Évaluation du gisement de bois pour l'énergie, rubrique disponibilités brutes. www.dispo-boisenergie.fr .

l'influence des politiques incitatives pour laisser la place à l'émergence de chaufferies collectives et industrielles (hors industries du bois). Cela a pour conséquence une augmentation de la consommation à laquelle il faut adapter la structure de l'offre. Bien que bon nombre de chaufferies continuent de consommer des connexes et déchets de l'industrie du bois à l'heure actuelle (notamment en raison de leur prix concurrentiel), quantité de sources s'accordent à dire que ce gisement est fini et que les tensions dues aux conflits d'usage interfilière pour ces connexes ne vont aller qu'en s'accroissant. Ainsi, « les produits connexes de scieries qui couvrent aujourd'hui 70 % du bois utilisé dans les chaufferies collectives urbaines ne suffiront plus à couvrir ce besoin. La voie est donc ouverte aux plaquettes forestières qui, actuellement, ne représentent que 10 % du bois de chauffage en zone urbaine » (Forêt Privée Française, 2003). Bien que les sources divergent quant aux tensions pesant sur les produits connexes de l'industrie du bois, et à la proportion de plaquettes forestières consommées, AFOCEL (2006) affirme que « la faible croissance de l'industrie du sciage ne permet pas d'envisager que le gisement de produits connexes de scieries puisse croître de manière sensible dans les années à venir ». Par conséquent « la forêt constitue ainsi le gisement qui, à court terme, dispose des volumes qui permettraient de répondre à une demande industrielle croissante » (cf. figure 33).

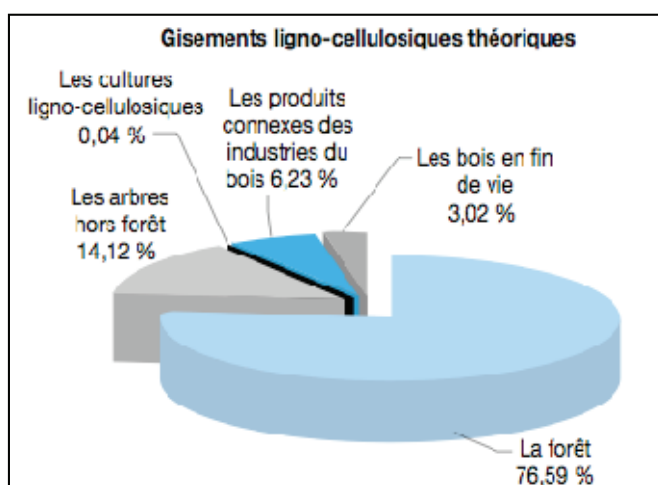


Figure 33 : Gisements ligno-cellulosiques théoriques

Source : AFOCEL, 2006

Helderle (2006) corrobore ce constat en affirmant que « le récent développement du chauffage collectif et industriel au bois a créé une nouvelle demande au sein de la filière forêt-bois, en vue de répondre à des besoins énergétiques. Au niveau national, l'approvisionnement de ces chaufferies s'est jusqu'à présent majoritairement appuyé sur le gisement des produits connexes de scieries et déchets bois, concurrençant plus ou moins directement l'approvisionnement des industries des panneaux et de la pâte à papier. Devant la multiplication du nombre de chaufferies bois de grosse capacité en service et en projet, la valorisation énergétique d'autres gisements en vue de produire des plaquettes forestières, et notamment celle des bois de qualité secondaire ne trouvant pas de débouchés industriels, devient désormais incontournable sous peine de perturber gravement les équilibres économiques en place au sein de la filière forêt-bois ».

Si en 2004 en France, « la plaquette forestière mobilisée pour l'énergie [ne] représente [que] 25 % des combustibles utilisés en chaufferies collectives et tertiaires [...] », elle est malgré tout appelée à se développer en raison de la forte valorisation des autres gisements de bois (sous-produits de l'industrie, déchets bois en fin de vie) pour le papier, le panneau, le paillage et l'énergie et de la forte demande future (J.-C Pouët in (IFN, 2005)). Concernant ce dernier aspect, Puech (2009), dans son rapport sur *la mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois*, précise qu'en tenant compte des résultats sur les années 2007 et 2008 des programmes Bois-énergie et développement local, « les besoins supplémentaires en biomasse totale s'élèveront à partir de 2010 à 482 000 tep/an, dont 300 000 tonnes de plaquettes forestières ». Le Fonds Chaleur nécessitera quant à lui pour 2012 « de 1,3 à 2,2 millions de tonnes de plaquettes forestières (selon la proportion de plaquettes consommées : 30% ou 50%). Les appels d'offre de cogénération-biomasse du ministère en charge de l'énergie (CRE 2 et 3 en cours), devront quant à eux incorporer au moins 50% de biomasse forestière et appelleront par conséquent pour 2012 « la mobilisation d'environ 2 millions de tonnes de plaquettes forestières ». L'ADEME (2006) précise en outre que l'utilisation de la plaquette forestière a par ailleurs fortement augmenté ces dernières années (multiplication par 12 entre 2000 et 2004. Ainsi dans le secteur collectif, les plaquettes forestières, représentaient 7 % du bouquet énergétique bois en 2000 et 24 % en 2004. Un des enjeux de ce travail de thèse sera donc de modéliser les approvisionnements de ce combustible en plein essor.

À cela s'ajoute une situation préoccupante pour les sciures, qui servent entre autres à la fabrication de granulés consommés dans les chaufferies de petite puissance. Selon l'ONF (cité dans Chastan, 2009), la production de granulés de bois est passée de 2,5 à 6 millions de tonnes en Europe, et de 45 000 à plus de 200 000 tonnes en France. Néanmoins, en dépit de cette augmentation de la production, la demande a de plus en plus en mal à être satisfaite. Cela s'explique entre autres par la main mise des groupes énergétiques européens qui « s'arrachent ce produit pour le brûler au même titre que le charbon dans leurs centrales thermiques » (Gold, 2009). Mainmise qui crée de grosses tensions sur les marchés du granulé, dont les importations ne cessent d'augmenter (l'essentiel des importations provenant des Etats-Unis, qui voient fleurir des « usines à granulés »). Cependant, Steve Walker (directeur du développement de Phoenix Renewable Energy) prévient que si une directive fédérale en matière d'énergies renouvelables venait à être adoptée, les entreprises fabricant des granulés « n'exporteraient plus leur production [...] et] la réserveraient au marché local ». À cela s'ajoute la crise de la construction en Europe qui a provoqué un effondrement de l'activité des scieries qui étaient les principales pourvoyeuses de matière première pour la fabrication de granulés. Face à ces incertitudes et à l'augmentation des prix des granulés résultant des tensions sur les marchés²⁶, les maîtres d'ouvrage et les fournisseurs de dendrocombustibles cherchent à sécuriser leurs approvisionnements en diversifiant leurs panels de combustibles.

²⁶ Selon [CHA, 2009], en Allemagne les granulés bois sont même devenus brièvement plus chers que le fioul.

L'ensemble de ces constats (augmentation du nombre de chaufferies et de la demande en plaquettes forestières, incertitudes face à la disponibilité du gisement industriel) concourt à la nécessité de diversifier l'offre en recourant à un combustible moins sujet aux conflits d'usage. La plaquette forestière apparaît ainsi comme un combustible préférentiel, puisque issu des rémanents de l'exploitation forestière et du broyage de bois impropre à d'autres usages (bois d'œuvre, bois d'industrie).

1.1.2. Un débouché pour la forêt et les espaces boisés...

« Quand le bois ne "paie plus" la gestion forestière, le bois-énergie peut aider à réduire l'écart ou à mieux valoriser les coupes (éclaircies, régénération, récolte rémanents, gestion dédiée au bois-énergie, ... » (ADEME).

Issues soit des accrus feuillus ou taillis, soit des rémanents de coupes rases ou encore des éclaircies, les plaquettes forestières constituent une valorisation intéressante pour des produits forestiers qui n'auraient pas forcément de débouchés ailleurs (Forêt Privée Française, 2006). « Elles permettent notamment de valoriser un gisement important de bois de taillis et de rémanents d'exploitation, actuellement sous-exploité notamment du fait de la concurrence des autres sources de bois déchiqueté (connexes de scierie et déchets industriels banals (DIB)), du manque d'organisation de la filière et de l'accessibilité de la ressource ». (Document objectif pour développer la filière bois-énergie en Rhône-Alpes). « Elles offrent également des débouchés commerciaux permettant de réaliser certaines opérations d'entretien à moindre frais », améliorant ainsi la gestion forestière²⁷. Ainsi « la production des plaquettes forestières apparaît envisageable sur des chantiers de première éclaircie résineuse ou sur des chantiers de nettoyage des parcelles de chablis non exploités. En revanche, le nettoyage d'un parterre de coupe rase par une production de plaquettes forestières présente peu d'intérêt » (Poupeau et al., 2009).

Dans un contexte de forêt sous-exploitée et de filière bois en difficulté (Puech, 2009), la valorisation des rémanents de l'exploitation forestière sous forme de plaquettes apparaît donc porteuse d'importants enjeux en matière d'aménagement territorial et forestier, et constitue une « nouvelle donne pour les acteurs historiques de la filière » (Poupeau et al., 2009). « Ainsi, jusqu'à présent, mis à part quelques opérations ponctuelles, la plaquette forestière n'intéressait guère les protagonistes de la filière bois-énergie, [et] seuls quelques acteurs en

²⁷ Action 70, décembre 2006. Journées d'information et de réflexion collective du réseau d'agents de développement de la Haute-Saône : Énergies renouvelables & intercommunalités : cadres d'actions et conduites de projets.

marge du marché dominant s'efforçaient de la valoriser». « Les plaquettes forestières constituent ainsi pour notre pays un combustible biomasse dont le potentiel est très important » (ADEME, 2006), et les rémanents de l'exploitation forestière, jusqu'alors délaissés, deviennent un gisement intéressant à valoriser. Jadis abandonnés en forêt ou brûlés sur place, les rémanents, qui peuvent représenter de 25 à 50 % de la partie aérienne de l'arbre peuvent néanmoins être valorisés pour partie sous forme de bois déchiqueté. Leur utilisation devrait permettre, au moins de manière ponctuelle, de résorber certains conflits d'usage (Boittin et al., 2010). "Quant à l'impact sur la forêt elle-même, tout montre que la production de combustible bois permet la valorisation des ressources ligneuses d'un territoire et contribue de la sorte à l'entretien des espaces boisés (peuplement forestier, bocage, par cet alignement urbain...). Cette production a de multiples effets : préservation des espaces et de la biodiversité, sécurisation des zones boisées, lutte préventive contre les incendies, les inondations et le développement des parasites, maintien d'activité locale et de lien social... La valorisation des rebuts permet de son côté désencombrement des décharges (6000 m³ pour 1000 tonnes de bois) et la contribution à la lutte contre les brûlages à l'air libre". (Mérenne-Schoumaker, 2010, et Biomasse Normandie²⁸).

1.3.1. ... mais des coûts importants

Néanmoins, en dépit d'arguments en faveur de l'utilisation des plaquettes forestières, un document de l'ADEME (octobre 2008) nous montre que ces dernières souffrent encore d'un certain handicap par rapport aux produits connexes de scierie (PCS) et bois de rebut (figure 34) :

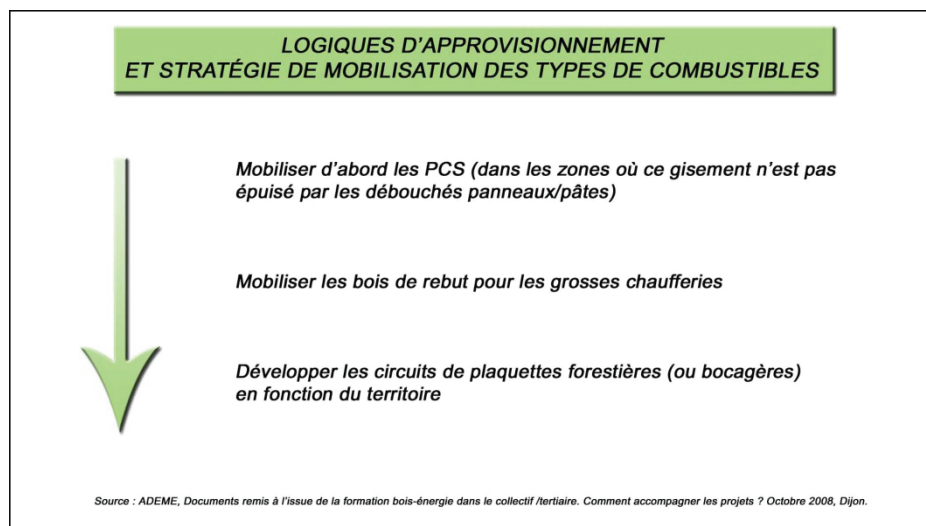


Figure 34 : approvisionnement et mobilisation des dendrocombustibles

Ainsi, en dépit d'apparents avantages, le développement de la plaquette forestière est pour l'heure limité par certains facteurs : craintes des autres acteurs de la filière qui voient dans le

²⁸ <http://www.biomasse-normandie.org>. Consulté le 13 décembre 2010.

développement de la plaquette forestière une concurrence pour la filière « classique », prix, contraintes de mobilisation, etc. Au caractère récent et à l'importance des mutations de la filière bois-énergie, viennent s'ajouter des incertitudes quant aux ressources ligneuses potentiellement énergisables. Ainsi de nombreuses craintes s'élèvent parmi les acteurs de la filière bois, même si, pour l'heure, « le problème n'est pas tant dans la disponibilité globale de la ressource en bois (qui semble suffisante) que l'exploitation des portions de forêts les plus accessibles et l'accaparement du bois le moins onéreux par des opérateurs aux reins solides ». L'accès à la ressource dans ce contexte tend à devenir un enjeu pour l'ensemble des protagonistes. À cela s'ajoutent également de nombreuses craintes parmi les acteurs de la filière bois, qui craignent « qu'en se développant de plus en plus autour de la plaquette forestière, la filière bois-énergie ne fasse advenir une concurrence accrue entre les usages du bois » (Poupeau et al., 2009). La situation est d'autant plus complexe qu'en terme d'usages concurrents sur la matière forestière, on constate que les compartiments bois d'industrie et bois-énergie se recouvrent très fortement et s'entrecroisent en fonction de la logique économique du marché de trituration, avec une très forte variabilité de l'usage en fonction de la structure des prix liée aux conditions de marché du secteur panneau-papier" (Boittin et al., 2010).

Un deuxième frein au développement de l'utilisation des plaquettes forestières est son coût relativement important (ITEBE, 2001) par rapport aux dendrocombustibles issus des industries de transformation du bois. Issus de la filière déchets, ces derniers ont forcément un coût moindre (et ce malgré les tensions sur les marchés précédemment évoquées) que la plaquette forestière, qui nécessite la mise en place de toute une logistique spécifique. Ainsi selon Helderle (2006) « le coût de production de plaquettes forestières reste cependant relativement élevé par rapport à d'autres combustibles bois, du fait notamment de la logistique à mettre en place pour sortir les sous-produits de la parcelle, variant de 40 à 55 euros par tonne avec des process de fabrication de type "industriel" à plus de 80 euros par tonne dans le cas de fabrication de type "artisanal" ». Ce constat est corroboré par l'ITEBE²⁹, qui publie une fourchette de prix allant de 31 à 85 euros par tonne, la variabilité s'expliquant par l'origine des sources d'approvisionnement, les essences, la qualité du combustible (hygrométrie et granulométrie), la logistique d'approvisionnement etc. L'ITEBE (2001) précise que le prix relativement élevé du bois déchiqueté d'origine forestière est généralement lié aux choix des techniques d'extraction du combustible, les logistiques utilisées étant le plus souvent directement empruntées aux exploitations classiques en rondins et que les logistiques spécifiques au déchiquetage éprouvées dans les pays scandinaves ne sont pas facilement transposables en France, spécialement dans les zones à fort dénivelé.

La figure 35 nous renseigne sur les prix des différents combustibles bois. Bien que deux à trois fois plus chères que les plaquettes industrielles et déchets industriels banals, les

²⁹ www.itebe.org. Consulté le 28 septembre 2009.

plaquettes forestières sont néanmoins plus compétitives que les granulés ou les sources d'énergies fossiles.

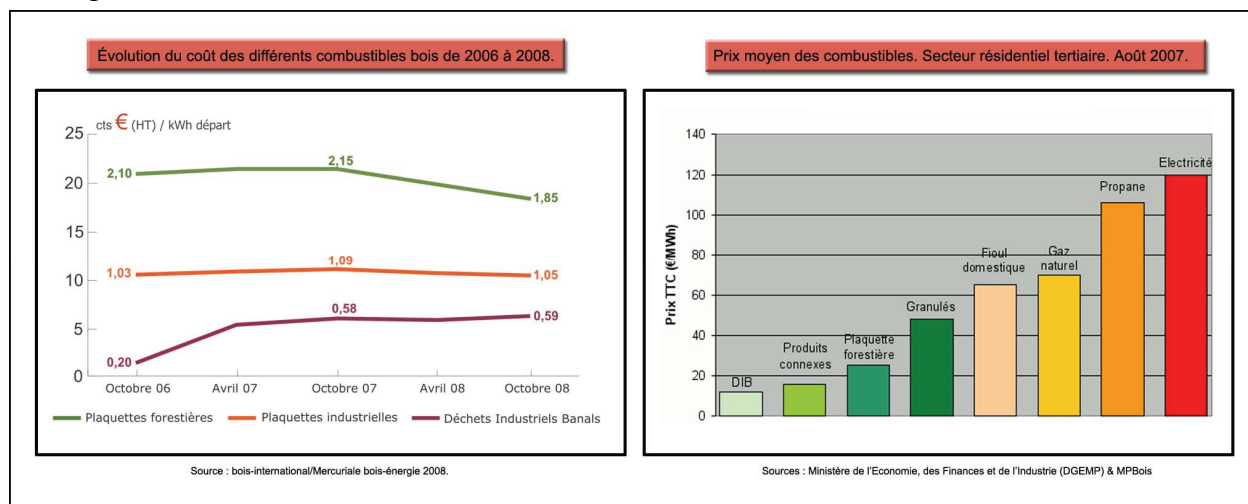


Figure 35 : coûts des différents combustibles

Le prix de la plaquette forestière dépendant des conditions locales de mobilisation, de transport, des marchés du bois, les postes de dépense sont de fait très hétérogènes et difficiles à évaluer (tableau 6). Par ailleurs, selon Boittin et al. (2007), le marché de la plaquette forestière est très dépendant des variations du marché du bois d'industrie, et la fourchette des coûts de production est extrêmement large compte tenu de la diversité des conditions de chantier (les variations constatées peuvent ainsi aller jusqu'à 50%).

Postes de dépense	Part du poste dans le prix de la plaquette forestière
Matière première	1 à 19 %
Bûcheronnage	7 à 29 %
Débardage	1 à 24 %
Déchiquetage	12 à 41 %
Reprise	0 à 3 %
Stockage	0 à 4 %
Transport	19 à 48 %
Séchage	0 à 8 %
Frais de gestion	0 à 20 %
Amortissement des équipements	0 à 10 %

Tableau 6 : décomposition du coût de la plaquette forestière

Source : Cemagref, 2007

Dans une optique de meilleure structuration des approvisionnements en plaquettes forestières, il serait nécessaire de prendre en compte la dimension économique du coût de la plaquette forestière, ce paramètre étant un des seuls leviers efficaces pour la promotion de ce type de

combustible (les maîtres d'ouvrage et les sociétés d'approvisionnement recherchant avant tout à maximiser leurs profits et amortir les frais consécutifs à la mise en place de la chaufferie). Cependant, la variabilité des prix est telle qu'il nous apparaît pour l'heure extrêmement difficile de modéliser le coût global des plaquettes forestières. Certains paramètres peuvent néanmoins être optimisés : ainsi par exemple les postes de dépense liés au transport peuvent être minimisés, à condition de se positionner dans une optique de développement local, et de valoriser au maximum les ressources à proximité des chaufferies.

1.2. Un enjeu de développement local

Maîtres d'ouvrage et sociétés d'approvisionnement s'accordent très souvent à dire que la filière bois-énergie génère du développement local, puisqu'elle se base en théorie sur l'exploitation de ressources locales. Mais en deçà de quel seuil peut-on dire que l'on valorise des ressources locales ?

1.2.1. Le local : un terme difficile à définir

Pour définir les bassins locaux d'approvisionnement, certains se basent sur des limites administratives. Ainsi lors d'un entretien, D. Barthelet (Pro-Forêt) estime que des ressources sont nécessairement considérées comme locales à partir du moment où elles proviennent de l'espace régional franc-comtois. Les collectivités locales ont également parfois tendance à raisonner selon cette logique. Nous pouvons d'ores et déjà émettre des réserves quant à ce premier argument. D'autres estiment qu'une distance d'approvisionnement d'une centaine de kilomètres autour du lieu de consommation peut être considérée comme locale, mais sans raisonnement scientifique solide en arrière de leur argumentaire. Par ailleurs, on peut penser que l'augmentation des distances d'approvisionnement renforce les effets de concurrence.

Le concept de "local" est indissociable de celui de proximité. Cette dernière s'évalue principalement au moyen de la distance, qui est l'un des concepts phares de la géographie (Pumain et al., 2001), et l'un des paramètres fondamentaux des processus d'approvisionnement.

Ainsi, selon Guedon (2005) " la définition ontologique [de la proximité] met tout d'abord en lumière la relation entre distance et proximité. Dans l'espace, la distance représente une vision quantitative du rapport entre des objets, exprimée en unité de mesure [...]". Or, il existe un grand flou autour de ce concept de proximité et pour l'heure aucune publication scientifique ne met clairement en exergue la distance au-delà de laquelle on peut considérer qu'on ne se situe plus dans le cadre d'une optique de valorisation de ressources dites locales. Or, nous pensons que la minimisation des distances de transport est nécessaire, spécialement dans un

contexte où « l'utilisation des catégories de la proximité [se prête de plus en plus] à l'analyse des questions environnementales » (Torre et Zuindeau, 2006).

1.2.2. Développement local et proximité des approvisionnements

« La plaquette forestière d'origine locale, utilisée comme combustible principal dans des projets cohérents à l'échelle des territoires, permet :

- de développer le tissu social en milieu rural grâce à la relocalisation de l'approvisionnement qui maintient ou crée des emplois,
- d'agir en faveur de l'environnement en limitant les émissions de gaz à effet de serre,
- de lutter contre le réchauffement climatique,
- d'améliorer la qualité et le bilan économique de la gestion forestière,
- d'assurer la stabilité économique et la sécurité des approvisionnements en combustible dans un contexte de marché des énergies fossiles fluctuant,
- d'induire des économies financières pour les collectivités ».

Source : Programme *1000 chaufferies bois pour le milieu rural*

Si la valorisation des connexes de scierie et autres déchets de l'industrie du bois est économiquement intéressante pour les industries qui les produisent et pour les maîtres d'ouvrage des chaufferies (combustible compétitif), la plaquette forestière présente également d'indéniables enjeux de développement local, d'aménagement territorial et forestier. À la différence du gisement industriel, la plaquette forestière génère en effet des actions de gestion forestière et sylvicoles à des fins spécifiquement énergétiques. En ce sens elle est donc au cœur des problématiques énergétiques et forestières, et sa production génère de l'emploi local pour la mobilisation de la ressource ligneuse, le stockage des plaquettes et les approvisionnements des chaufferies. Néanmoins, si cette affirmation apparaît logique, rares sont les chiffres venant appuyer ce constat et de grosses incertitudes pèsent sur les chiffres prospectifs en matière de création d'emplois locaux. D'autre part, considérant le cycle de vie des combustibles bois, nous pourrions ajouter un argument supplémentaire en faveur de la plaquette forestière qui, à la différence d'autres combustibles type granulés, présente des procédés de fabrication moins complexes, ce qui en fait au final un combustible moins énergivore.

La plaquette forestière apparaît ainsi, plus que tout autre combustible bois au cœur des enjeux de développement durable local... **à condition de provenir de ressources locales**, l'exploitation de ressources locales permettant, nous l'avons vu, de créer de l'emploi et du développement local, et d'offrir de nouveaux débouchés pour les espaces boisés environnants.

La diminution des émissions de carbone et des coûts de transport³⁰ en cas d'approvisionnements locaux sont des arguments supplémentaires pour la promotion de circuits courts. Or, dans une optique de développement et de valorisation des ressources locales, il nous semble indispensable de connaître l'origine géographique des dendrocombustibles. En effet, comment affirmer que le bois-énergie génère du développement local et permet la valorisation de forêts et de ressources locales si l'on ne connaît pas la provenance de la matière ligneuse ? Selon le FCBA (2008) et Boittin et al. (2010), « la provenance (c'est-à-dire la zone géographique de production du produit), n'est pas un critère de classement [pour la plaquette forestière, au même titre que la granulométrie, le taux d'humidité, etc.]. Le comité européen de normalisation (CEN)³¹ recommande [seulement] de préciser le pays d'origine sur la fiche de déclaration du combustible. » Il convient néanmoins de souligner que « cette information peut-être précisée contractuellement (région, département, zonage spécifique type ICHN³², etc.), tout comme la certification « gestion durable ». Cependant, afin de garantir l'origine des plaquettes forestières, les opérateurs peuvent décider de mettre en place un système de traçabilité des produits, dans le but d'assurer un suivi des combustibles depuis le site de production (forêt, ...) jusqu'à la chaufferie qui doit être approvisionnée. Précisons néanmoins que le maître d'ouvrage n'a pas le droit, dans le cadre d'une procédure d'appel d'offres, d'exiger que le combustible soit issu d'un endroit prédéfini (entrave à la libre concurrence). Ce dernier peut toutefois introduire des clauses stipulant que les ressources ligneuses servant à la fabrication de la plaquette forestière doivent être mobilisées dans un rayon inférieur à un kilométrage convenu dans le but de limiter les distances de transports responsables d'émissions de CO₂. Une collectivité propriétaire d'une forêt peut néanmoins produire et consommer ses propres plaquettes forestières, si elle décide d'assurer elle-même son approvisionnement et de passer outre les procédures d'appel d'offres. C'est le cas de la commune de Champvans (Jura), qui a un employé communal dédié à la production de plaquettes issues de la forêt communale, à la gestion du hangar de stockage et à l'approvisionnement des deux chaufferies (salle des fêtes et école).

1.2.3. Enjeux économiques et environnementaux liés à la minimisation des distances de transport

Selon Möller et Nielsen (2004), la demande en bois-énergie dépend de la taille de l'installation et génère des besoins en matière de transport de la matière ligneuse. Le transport routier est aujourd'hui le principal mode de transport du bois (Bourcet et al.) et par extension des plaquettes forestières. Or ce dernier a besoin d'être optimisé (Möller et Nielsen, 2004 et 2007), et cela passe entre autres par la minimisation des distances de transport.

³⁰ Constituant entre le cinquième et la moitié du coût du combustible entrée chaufferie (cf. tableau 6)

³¹ Guide pour un système d'assurance qualité des biocombustibles solides. CEN/TR 15569.

³² Indemnités compensatoires handicaps naturels.

Utiliser l'argument économique pour la minimisation des distances de transport peut-être doublement problématique.

- D'une part il n'existe pas de données précises sur la décomposition du prix des plaquettes forestières, par poste de coût (matière première, exploitation, transport, etc). Selon le Cemagref (2007), et Möller et Nielsen (2004 et 2007), l'un des postes de coûts majeurs de la plaquette forestière est le transport, dont la valeur est intrinsèquement liée au positionnement géographique des forêts et plantations énergétiques. Or la composition du prix du combustible varie fortement selon les contextes (ainsi dans les zones pentues nécessitant un débardage par câble, la mobilisation aura un coût supérieur que dans une zone plane).
- D'autre part, l'acheminement des plaquettes forestières est en général sous-traité à des sociétés spécialisées dans les transports, et après discussion avec ces dernières, il apparaît que l'évaluation économique de ces coûts est très délicate. En effet, contrairement à ce que nous pensions initialement, l'adéquation tarif-distance parcourue ne se vérifie pas, en dépit de la consommation de carburant, qui elle, est proportionnelle aux distances parcourues. Dans la pratique, les systèmes forfaitaires mis en place par les entreprises de transport faussent l'adéquation tarifaire liée à la seule consommation de carburant. Néanmoins, si le coût du carburant ne cesse d'augmenter, cet argument deviendra un jour valable.

Une autre solution est donc de justifier la minimisation des distances de transports *via* le coût environnemental de ces derniers. Cela se justifie notamment par rapport aux émissions de GES liées au transport routier. Ainsi Möller et Nielsen (2007) affirment que si l'importation de combustibles en provenance des pays voisins est une option pour faire face à une demande croissante, en raison de la compétitivité des prix pratiqués ; des externalités négatives sont néanmoins à prendre en considération. Ainsi, la balance positive des émissions de CO₂ et autres externalités négatives dues à de longues distances de transport, la congestion du trafic routier sont autant de facteurs attestant de la pertinence de la limitation des distances de transport en donnant la priorité aux combustibles locaux. Cet argument est corroboré par Loubouze et le Guern (2005) : "les impacts environnementaux liés à la production industrielle des plaquettes sont essentiellement dus au fonctionnement des moteurs thermiques. La maîtrise des distances de transports, l'adaptation des volumes de stockage au volume de transport des plaquettes [...] sont les clés d'une réduction de ces impacts". La minimisation des distances de transport s'inscrit donc dans une double logique de développement durable et de développement local. Dans un contexte actuel de faible coût de transport, le facteur distance, pourtant facilement maîtrisable n'est pas vraiment minimisé. En revanche, si les coûts de l'énergie venaient à augmenter, les acteurs de l'approvisionnement considéreraient les choses autrement. L'évaluation du coût environnemental des transports permettrait ainsi de

réfléchir au concept de proximité et au moyen de l'évaluer, ce qui serait très utile dans une démarche d'aide à la décision et d'accompagnement de la filière dans la mesure où les maîtres d'ouvrage des chaufferies s'engagent de façon plus ou moins formelle à valoriser des ressources locales.

La forte augmentation de la demande en plaquettes forestières résultant du développement de la filière bois-énergie, et de la multiplication de chaufferies sur le territoire national, cristallise l'attention de l'ensemble des acteurs de la filière. La Forêt Privée Française (2006) révèle que pour la région Franche-Comté la consommation actuelle de plaquettes forestières est de 20.000 tonnes/an³³ pour un potentiel facilement mobilisable estimé entre 300 et 500.000 tonnes/an. Depuis quelques années, la filière de production de plaquettes forestières se développe : les coopératives forestières tendent à augmenter la production de plaquettes et les réseaux d'entrepreneurs de travaux forestiers se spécialisent dans le broyage des sous-produits de l'exploitation forestière.

Par ailleurs, les différentes sources s'accordant à dire que le gisement industriel est fini et que les tensions sur les marchés de bois tendent à s'exacerber en raison de la hausse de la demande et des concurrences d'usages, la plaquette forestière devient donc un combustible incontournable³⁴. Ainsi, « le développement de la filière plaquettes forestière permettra de réduire les tensions sur le marché de la matière, en particulier vis-à-vis de la filière pâte et panneaux » (ADEME³⁵). Par ailleurs, dans une hypothèse tout à fait plausible de continuation de la tendance à l'augmentation du nombre de chaufferies bois parallèlement à l'émergence de très gros projets de cogénération, il est tout à fait pertinent de réfléchir dès à présent sur les moyens d'optimiser la structuration des approvisionnements en plaquettes forestières. De plus, les enjeux liés à l'utilisation de ce combustible (renouvelabilité, aménagement du territoire, logistique à forte composante spatiale, développement local etc.) justifient que nous nous y intéressions de façon préférentielle dans le cadre de ces travaux de recherche. De plus, au vu des objectifs généraux de ces travaux, nous nous intégrons parfaitement bien dans l'esprit de la politique régionale qui témoigne d'un fort « souci de développement local (à chaque volume de bois-énergie consommé en chaufferie devant correspondre la mobilisation locale d'un volume équivalent de sous-produits forestiers³⁶) ».

³³ Boittin et al. (2010) estiment la consommation annuelle de plaquettes forestières en Franche-Comté à 80000 t.

³⁴ Et ce d'autant plus que l'ADEME impose théoriquement une proportion minimale de 70% de plaquettes forestières à l'heure actuelle dans les plans d'approvisionnement des chaufferies qu'elle finance (source : Ademe FC, Sophie Goutaland).

³⁵ D'après les documents remis à l'issue de la formation *bois-énergie dans le collectif/tertiaire, comment accompagner les projets ?* Septembre 2008.

³⁶ Source : Schéma Régional de Gestion Sylvicole en Franche-Comté

La figure 36 dresse un bilan des enjeux inhérents à la valorisation de la plaquette forestière :

Diagnostic du développement de la « filière plaquettes forestières »	
<p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Energie renouvelable ✓ Création d'emploi ✓ Valorisation du patrimoine forestier ✓ Prix compétitif de la plaquette forestière par rapport aux énergies fossiles 	<p>Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Prix de revient supérieur aux PCS et DIB ✓ Concurrence au niveau de la qualité, du taux d'humidité, de la plaquette de scierie (produit calibré et homogène)
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Gisement le plus important ✓ Volonté politique locale de recourir à la plaquette forestière ✓ Présence d'acteurs déjà impliqués dans la production de plaquettes forestières ✓ Développement des chaufferies collectives 	<p>Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Filière récente concurrencée ✓ Risque de développement anarchique de filières d'approvisionnement au niveau local au détriment d'une filière professionnalisée ✓ Pas de réelle coordination entre le développement de la demande en plaquettes et l'offre fournie : filière non structurée

Figure 36 : les enjeux de la filière plaquettes forestières

Source : CSTB, 2008

La satisfaction d'un nombre croissant de chaufferies est sans nul doute l'un des enjeux majeurs de la filière, et ce d'autant plus que la plaquette forestière tend à devenir un combustible préférentiel. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de comprendre comment les acteurs s'organisent à l'heure actuelle et dans ce contexte particulier pour satisfaire cette demande et organiser les approvisionnements (si possible localement).

2. La structuration actuelle des approvisionnements : fonctionnement et limites

2.1. Les étapes de l'approvisionnement

Les approvisionnements en plaquettes forestières sont des processus complexes qui se définissent par plusieurs étapes ou sous-processus au cours desquels interviennent un grand nombre d'acteurs, depuis la production de plaquettes jusqu'à leur acheminement dans les chaufferies (figure 37). Après avoir exposé le fonctionnement global de la chaîne d'approvisionnement, nous verrons que chaque élément constitutif de cette chaîne s'inscrit dans un cadre spatialisé, soulevant des interrogations en lien avec la discipline géographique.

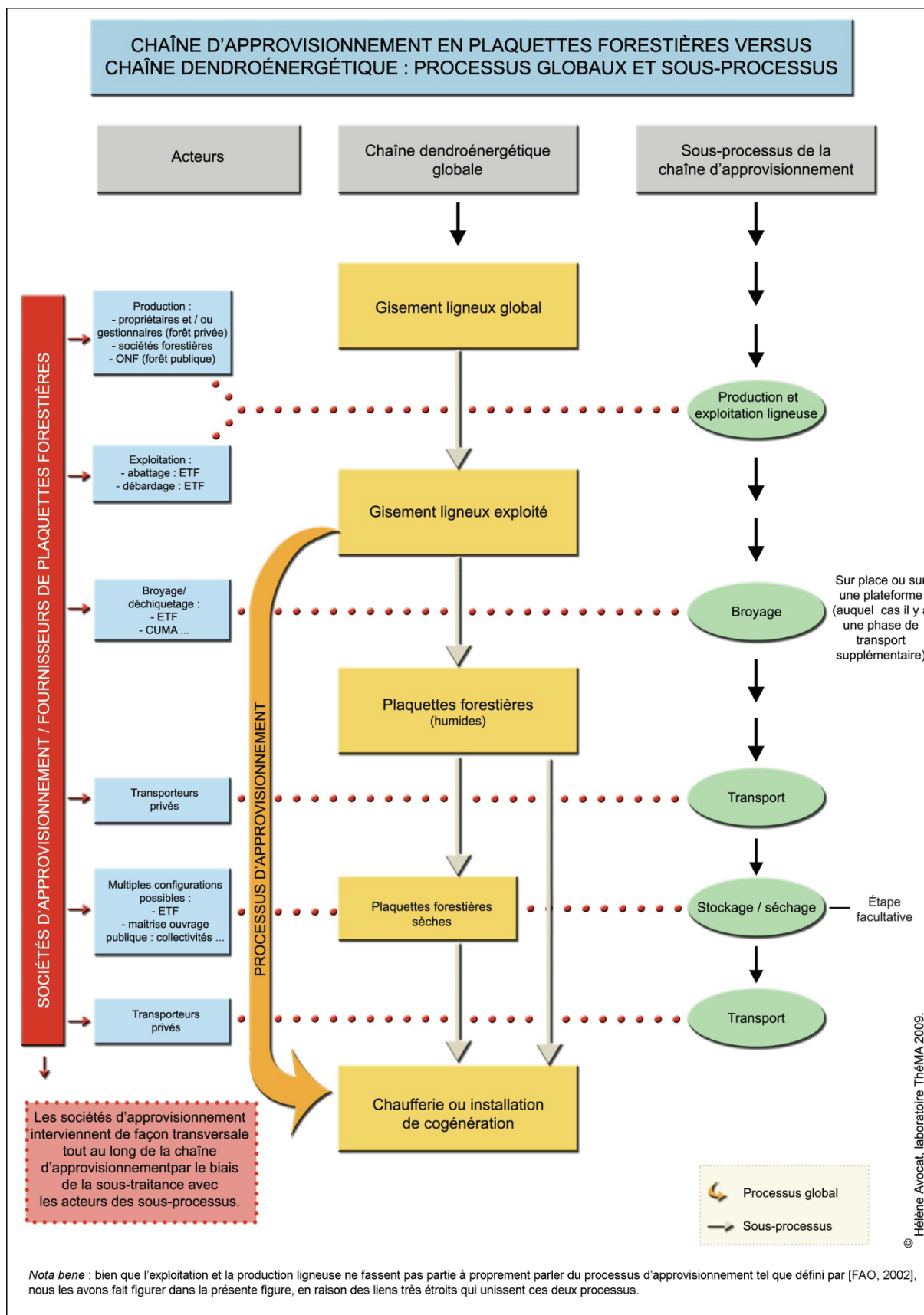


Figure 37 : Acteurs et sous-processus des approvisionnements en plaquettes forestières

1.2.1. En amont : exploitation et production

Premier maillon de la chaîne, les acteurs de la production et de l'exploitation forestière interviennent à la fois dans l'exploitation et dans le broyage/déchetage qui est la première étape de transformation de la matière ligneuse en plaquettes forestières. De ce processus de mobilisation découlent plusieurs enjeux extrêmement importants tels que la définition de la disponibilité de la ressource, la nature des ressources prélevées, l'assurance de renouvelabilité, etc. Pour la **production** proprement dite, il s'agit d'un processus relevant de la compétence des propriétaires et/ou gestionnaires pour la forêt privée (les coopératives/experts privés et autres organismes de gestion) ayant un rôle de premier plan dans la production ligneuse et a fortiori de plaquettes forestières. Ainsi, « les coopératives et groupements de gestion assurent le regroupement technique, économique et logistique de la production forestière privée, avec un objectif de fiabilisation quantitative et qualitative [et] permet l'optimisation de services tels que la coordination des approvisionnements réalisés par plusieurs coopératives sur les mêmes sites industriels, la certification de la gestion durable de leurs adhérents, la production de plaquettes forestières pour le bois-énergie, etc. » (Forêt Privée Française). La société forestière et ses déclinaisons régionales, de par leur rôle en matière de services d'investissement, de gestion et d'expertise pour le compte de la Caisse des Dépôts intervient également dans le domaine du bois-énergie, qu'elle considère comme « un poste important du commerce mondial [dont] la consommation est appelée à se poursuivre ». Pour la forêt publique, la production ligneuse est essentiellement assurée par l'ONF (gestionnaire de 4,7 millions d'hectares de forêts publiques) qui est « convaincu que l'essor de la filière bois-énergie doit être maîtrisé par les producteurs pour garantir une gestion durable des forêts ».

Pour les phases d'**exploitation** (abattage et débardage), bien que toutes sortes de schémas soient possibles, le travail est essentiellement assuré par les ETF. Les propriétaires et gestionnaires peuvent sous-traiter ou co-traiter ces phases d'exploitation, soit en employant leurs propres bûcherons, soit en louant ou vendant le droit d'exploitation à une compagnie forestière. Selon le régime forestier et les opérations d'exploitation réalisées, un plus ou moins grand volume de chutes (rémanents) vont être laissés sur place. Si la demande en plaquettes forestières est importante, 80 % de ces rémanents peuvent être broyés/déchiquetés pour être transformés en plaquettes. L'ADEME (2006) recommande en effet de laisser au moins 30 % de rémanents sur place pour des raisons de protection pédologique et de maintien de la biodiversité. Pour cette phase de broyage, nous observons également une volonté des CUMA (coopératives d'Utilisation du matériel Agricole) de s'impliquer, les agriculteurs (propriétaires de forêts ou non) souhaitant s'engager dans la production de plaquettes forestières.

Ces phases de production/exploitation nous intéressent particulièrement dans le cadre de ces travaux dans la mesure où la localisation des chantiers forestiers représente le point d'origine dans une matrice d'interactions spatiales entre des lieux de production de plaquettes forestières et des lieux de destination représentés par les chaufferies. Or, la matrice d'interactions spatiales est l'outil qui nous permettra justement d'analyser le déterminant « distance » des pratiques d'approvisionnement actuelles.

1.2.2. En aval : le stockage, distribution, le transport

Une fois la matière ligneuse abattue et débardée, elle peut être déchiquetée sur place ou acheminée telle qu'elle vers une place de stockage ou elle sera ensuite déchiquetée. Il convient également de préciser que la plateforme de stockage peut aussi servir pour les phases de séchage du combustible, et que leur usage est utile pour sécuriser les approvisionnements ou accroître la qualité du combustible. Cependant, quelque soit la configuration choisie (approvisionnement avec ou sans rupture de charge) il faut transporter le combustible :

- depuis le lieu de production où il a été entreposé vers la chaufferie,
- ou depuis le lieu de production vers la plateforme de stockage/séchage puis ensuite vers la chaufferie.

La gestion des plateformes de stockage/séchage est complexe en raison de la multiplicité des montages juridiques possibles : bail commercial, contrat de dépôt, exploitation par un syndicat de gestion ou une société d'économie mixte locale etc. (URACOFOR, 2009). La phase de transport/distribution est quant à elle assurée par des transporteurs privés, spécialisés ou non dans le convoi de plaquettes forestières.

L'analyse des processus d'approvisionnement révèle un certain nombre de sous-processus et une infinité de configurations possibles leur conférant une grande complexité. Les problématiques inhérentes à la structuration des approvisionnements sont exacerbées par l'augmentation exponentielle de la demande décrite dans le chapitre précédent. Ainsi, « la structuration d'une filière de conditionnement du bois et d'approvisionnement en combustible est la première étape à engager pour envisager dans les meilleures conditions la mise en place de chaufferies bois » (Pouët, 2007). Dans une optique d'aménagement et d'aide à la décision, il est indispensable de connaître le fonctionnement de la filière et de la prise en compte des processus d'approvisionnements dans les documents constitutifs d'un projet. Cela nous permet notamment de mettre en avant les incohérences de la filière et de défendre une approche plus géographique des processus d'approvisionnement.

2.2. L’approvisionnement dans les documents constitutifs d’un projet de chaufferie bois

2.2.1. Les étapes d’un projet de chaufferie bois

Avant qu’un maître d’ouvrage ne prenne une décision en faveur de la réalisation d’une chaufferie bois, il y a un certain nombre d’étapes à respecter depuis l’évaluation de la pertinence d’un projet jusqu’à la gestion des installations (figure 38).

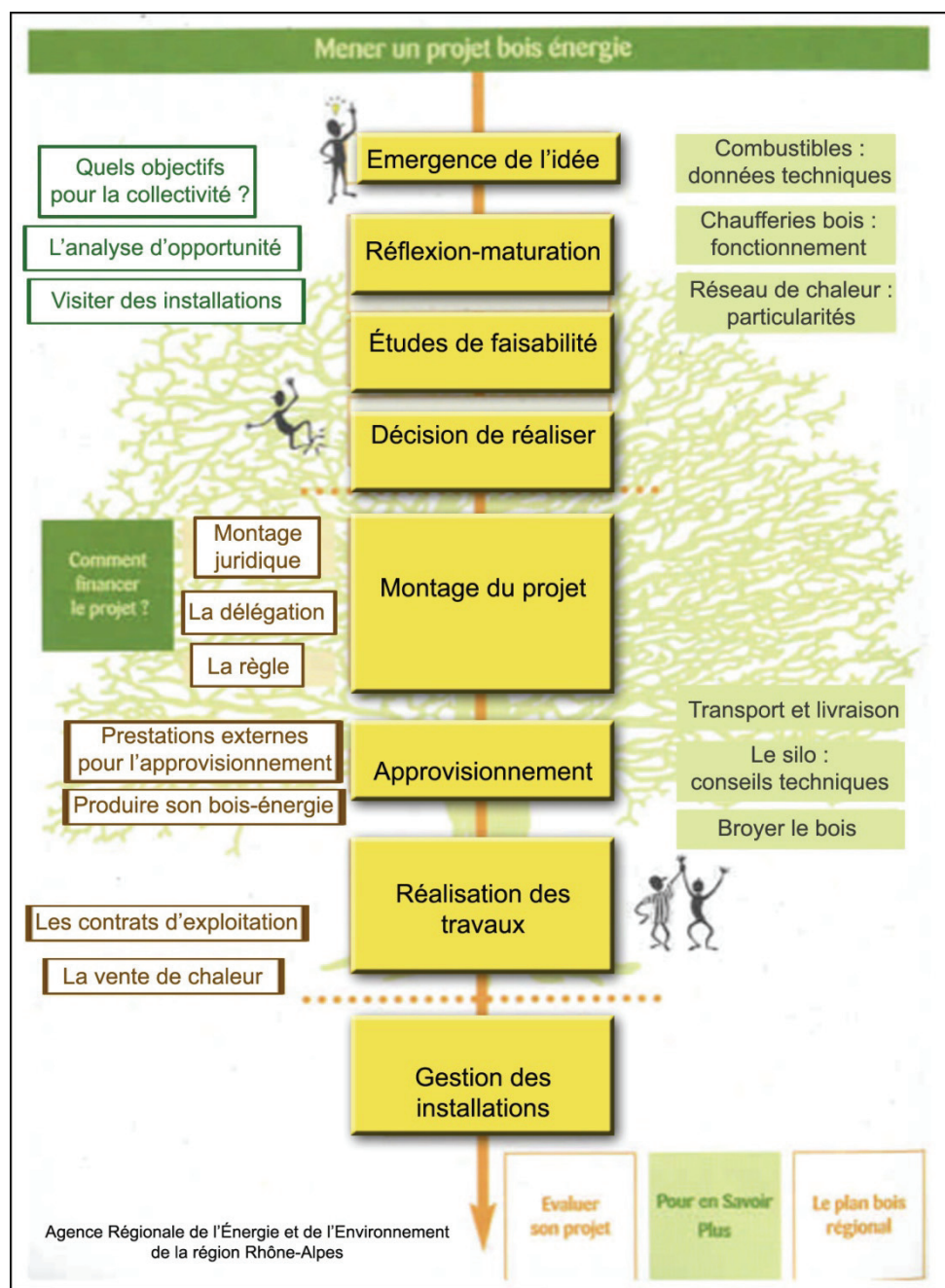


Figure 38 : Les étapes du montage d'un projet

Ainsi la phase d'émergence de l'idée puis, par la suite, de la réflexion et de la maturation du projet sont des phases clés au cours desquelles le maître d'ouvrage définit les objectifs et orientations de son projet, qui peuvent naître selon Pouet (2007) :

- de la volonté de valoriser des ressources locales,
- de la nécessité de rénovation ou de création de bâtiments qui induit un changement de mode de chauffage,
- de la nécessité pour un industriel du bois de trouver un débouché pour ses sous-produits et déchets,
- d'une volonté politique d'adhérer aux démarches de maîtrise de l'énergie, de développement des ENR et de lutte contre l'effet de serre, etc.

Avant le montage financier, technique, juridique et la réalisation des travaux, il convient de réaliser un certain nombre d'études de faisabilité afin d'évaluer la pertinence d'un projet. Parmi les points abordés dans ces documents : la structuration de l'approvisionnement en combustibles bois.

2.2.2. Les approvisionnements dans l'analyse d'opportunité et l'étude de faisabilité

La procédure de montage d'un projet de chaufferie bois donne lieu à la production d'un certain nombre de documents, lorsque ce projet est avalisé par l'ADEME (ce qui est le cas de la très grande majorité des chaufferies). L'objectif est ici de voir quelle est leur finalité et comment sont considérés les approvisionnements dans cette démarche de création de projets. Afin d'étayer notre argumentaire, un exemple type de chacun de ces documents est mis en annexe.

L'analyse d'opportunité est le premier document émis par le maître d'ouvrage désireux de mettre en place une chaufferie bois. Il s'agit d'un document synthétique présentant les enjeux et l'intérêt général du projet (Rhône Alpes Énergie Environnement, 2005 fiche n°1). Lors de cette étape, l'accompagnateur (en l'occurrence, bien souvent, le chargé de mission bois-énergie) doit « attirer l'attention du maître d'ouvrage sur l'importance du lien combustible-chaufferie » (c'est-à-dire l'approvisionnement). Selon Rhône Alpes Énergie Environnement (2005 fiche n°3), lors de l'analyse d'opportunité il s'agit d'évoquer les pistes possibles en matière d'approvisionnement en « établissant le lien entre le combustible (sec ou humide) et la chaufferie en fonction du contexte local, des volontés des maîtres d'ouvrage et la taille pressentie du projet ». Mais cela reste très succinct et basé sur les informations que l'accompagnateur aura en sa possession au moment de l'élaboration du document (filière existante, qualité, prix, ...). Ce dernier ne fera pas de recherche particulière et se basera sur le travail d'observation des filières d'approvisionnement qu'il mène sur son département.

Étape ultérieure et plus approfondie, l'étude de faisabilité doit, quant à elle, selon l'Association d'Initiatives Locales pour l'Énergie et l'Environnement, permettre de :

- vérifier la faisabilité technique et économique du projet,
- proposer des solutions techniques adaptées au contexte et aux possibilités qu'offre le site,
- comparer la solution bois aux autres possibilités en termes d'investissement et d'exploitation,
- proposer des solutions pour le financement de l'opération, le montage juridique et administratif,
- **rechercher des solutions visant à assurer la pérennité d'un approvisionnement de qualité, réservant une place à la plaquette forestière ou bocagère.**

Concernant ce dernier point, l'étude de faisabilité doit notamment donner des pistes de réflexion pour « l'optimisation spatiale du site (pour le stockage du combustible) avec une prise en compte de l'environnement local et des contraintes de surfaces et de volumes » et caractériser les ressources bois susceptibles d'être mobilisées pour l'approvisionnement de l'installation. À ce stade, des propositions concrètes doivent être faites pour développer des solutions fiables quant à la fourniture du combustible. Des informations plausibles et chiffrées doivent être données sur :

- les caractéristiques des produits disponibles,
- les sources d'approvisionnement possibles,
- la nécessité d'une éventuelle organisation locale de la filière d'approvisionnement, d'un recours à plusieurs fournisseurs,
- l'intégration dans une politique locale d'aménagement du territoire, d'entretien de l'espace naturel, de la gestion des déchets,
- le respect des conditions transmises par les délégations régionales de l'ADEME en matière de pourcentage minimum de plaquettes forestières ou bocagères dans le bouquet des dendrocombustibles.

Selon le schéma guide pour établir un cahier des charges d'étude de faisabilité d'une chaufferie bois, des informations supplémentaires doivent être apportées quant aux « caractéristiques physico-chimiques et la nature de chaque type de gisement, lieux de production, contraintes techniques de mobilisation (éloignement du site de chauffe, gisement diffus/concentré, transport), et à l'évolution prévisible ». Selon l'ADEME, les schémas d'organisation d'une filière d'approvisionnement doivent être également mis en évidence en tenant compte « de la proximité, du coût, de la qualité, des possibilités de contractualisation

et de la pérennité (gisement disponible et durable) ». Néanmoins l'exemple de l'annexe 2, transmis par l'ADEME lors de la formation « bois-énergie dans le collectif/tertiaire, comment accompagner les projets ? » montre que le chapitre consacré à l'approvisionnement reste tout de même relativement succinct.

2.2.3. Le contrat d'approvisionnement : le document, ses objectifs, ses garanties

« Généralement, les données sur l'approvisionnement incluses dans l'étude de faisabilité sont à actualiser ou à revoir complètement » (ADEME). Or, dans une optique de sécurisation des approvisionnements, il est nécessaire d'élaborer un document énonçant un certain nombre de garanties. Ainsi les objectifs d'un contrat d'approvisionnement sont d'assurer :

- la fiabilité de l'approvisionnement,
- l'engagement du fournisseur,
- la sécurisation de la qualité et des prix des combustibles.

Ce document est par ailleurs demandé par l'ADEME pour une période de cinq ans en cas de demande de versement de subvention, et est élaboré au terme d'une consultation locale visant à établir :

- des données générales telles que l'objectif du contrat, les quantités annuelles ou volumes estimés, la période, la durée, etc.
- des informations sur la qualité du combustible : taux humidité maximum, granulométrie, cendres, ...
- des informations sur les contraintes techniques liées au site et à la chaufferie : localisation, accessibilité, modes de transfert,
- des indications sur les prix : modalités d'achat (tonne, MWh,...), indexation, etc.

C'est également dans ce document que sont mentionnées les informations concernant **la traçabilité des combustibles** et les **contraintes imposées par la maîtrise d'ouvrage**. Après réception des offres et choix d'un fournisseur, un contrat doit être établi par le maître d'ouvrage ou le gestionnaire délégué dans le but de sécuriser l'approvisionnement de la chaufferie. Dans le but d'assurer la sécurité des approvisionnements et de fournir aux maîtres d'ouvrage un combustible de qualité, un très grand nombre d'acteurs interviennent durant le montage de projet et tout au long de la chaîne d'approvisionnement, depuis la mobilisation des ressources jusqu'à la livraison, une fois le projet de chaufferie concrétisé.

2.3. L'organisation actuelle des approvisionnements

2.3.1. Des logiques d'approvisionnement économiques et peu géographiques pour les chaufferies de forte puissance

Nous ne disposons que de peu d'informations sur les logiques d'approvisionnement en combustibles bois. Seuls les travaux menés par Boittin et al. (2010) donnent quelques éclairages quant aux logiques d'approvisionnement des chaufferies collectives de forte puissance. Le premier constat est que les logiques d'approvisionnement sont « essentiellement économiques et peu géographiques, et qu'en pratique, le seul bassin d'approvisionnement identifiable est celui de la chaufferie de Planoise (alimentée par les forêts publiques dans un rayon de 50 km autour de la chaufferie). Les autres chaufferies sont approvisionnées par des circuits ou des itinéraires technico-économiques dépendant de la nature du fournisseur et de sa capacité à mutualiser les volumes nécessaires quelles que soient leurs origines et donc de paramètres logistiques ». Ainsi, « l'intérêt d'un raisonnement sur le transport comme variable d'ajustement des rayons d'approvisionnement trouve également son fondement et son explication dans le fonctionnement et la structuration de certains acteurs « négociants », qui se positionnent clairement non pas seulement en tant que fournisseur de plaquette forestière, mais comme fournisseur de solutions logistiques complètes. De ce fait, la mobilisation de la ressource se fait parfois sans cohérence véritable par rapport au bassin géographique d'approvisionnement, mais plutôt selon les logiques technico-économiques propres aux opérateurs de chaque projet » (sociétés d'approvisionnement et fournisseurs de plaquettes forestières). La figure 39 atteste de ce phénomène : les principaux flux représentés sur cette carte montrent qu'aujourd'hui les approvisionnements des grosses installations répondent plus aux capacités logistiques des fournisseurs de plaquettes forestières qu'à une véritable volonté de valoriser les ressources de proximité et de minimiser les distances de transport (cf. chaufferie de Valdahon).

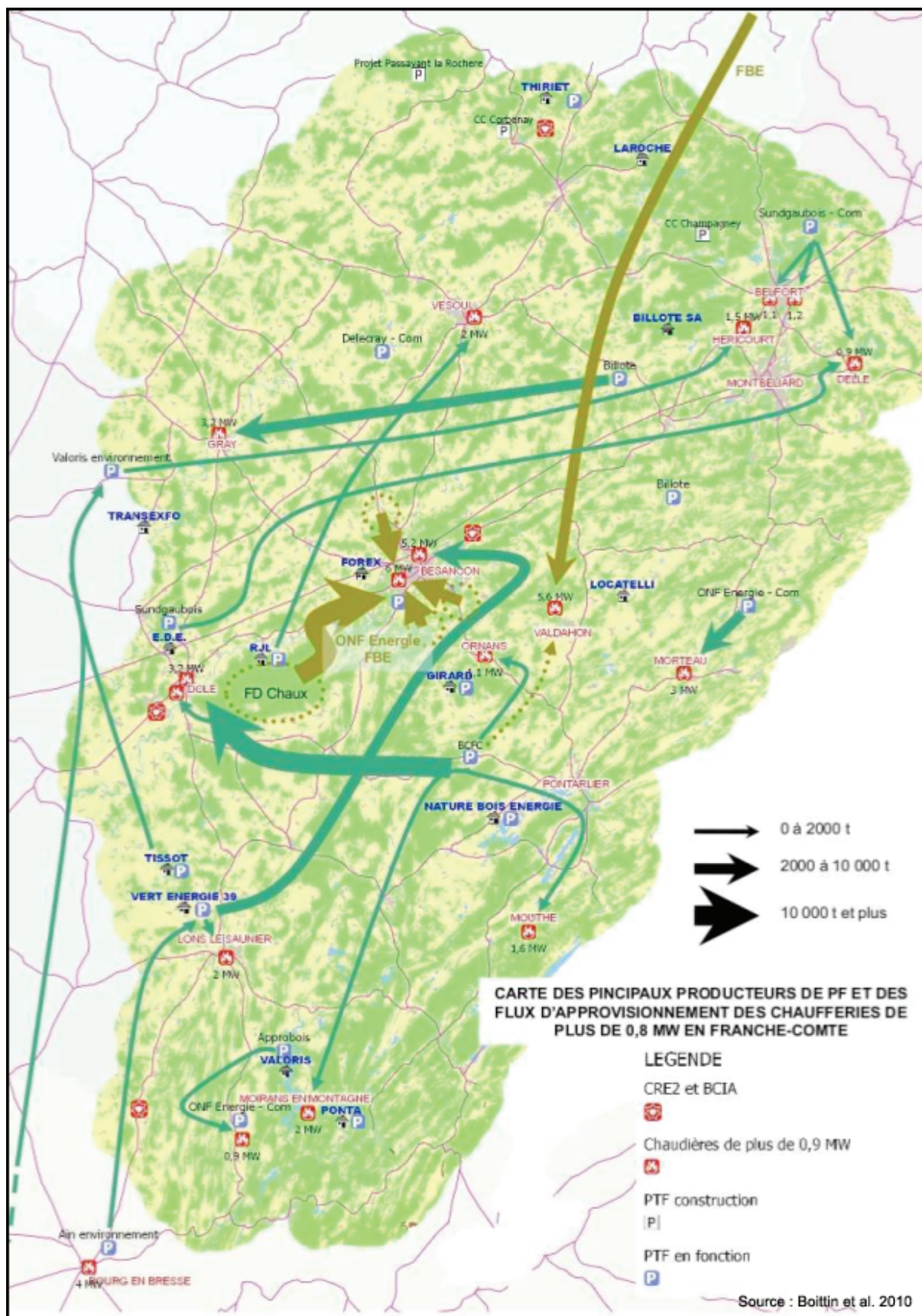


Figure 39 : principaux flux de plaquettes forestières en Franche-Comté

2.3.2. Les sociétés d'approvisionnement et fournisseurs de plaquettes forestières

Selon la configuration et le choix de délégation de l'exploitation de la chaufferie (P1, P2, et P3), le maître d'ouvrage peut choisir d'assurer lui-même son approvisionnement sans passer par une procédure d'appel d'offres (mais cette configuration est extrêmement rare). La deuxième option est de déléguer l'approvisionnement en combustibles (P1) à des sociétés spécialisées, intervenant à tous les niveaux de la chaîne d'approvisionnement.

Le développement de la filière et l'augmentation de la demande en dendrocombustibles ont eu pour corollaire l'émergence de nouveaux acteurs spécifiquement positionnés sur la problématique de l'approvisionnement. Selon Philippe Nunes, ingénieur thermicien, ces sociétés nouvellement positionnées sur les marchés de la dendroénergie, se comptaient sur les doigts de la main il y a dix ans. Aujourd'hui, les dispositifs de soutien à la filière bois-énergie ont permis l'émergence de plus de 60 sociétés importantes sur le territoire national, qui assurent des livraisons conséquentes, allant de 300 à 50 000 tonnes de combustibles. Nous ne connaissons cependant que peu de choses sur ces sociétés d'approvisionnement également mentionnées sous le vocable de « structures d'approvisionnement » ou de « fournisseurs en plaquettes forestières », si ce n'est qu'elles regroupent « de nombreux acteurs de la filière bois, détenteurs et producteurs de la ressource (exploitants forestiers, scieurs, entreprises de deuxième transformation) » (P. Nunes). Si l'on se réfère à la figure 37, nous voyons en effet qu'elles interviennent à tous les niveaux de la chaîne énergétique en sous-traitant avec l'ensemble des acteurs des sous-processus. Néanmoins, là encore, les configurations sont nombreuses et les sociétés peuvent avoir différents statuts. Selon Boittin et al. (2010), on recense en Franche-Comté, une dizaine de structures fournisseurs de combustibles bois d'envergure régionale ou supra-régionale (qui sont les approvisionneurs des chaufferies collectives de forte puissance), et une douzaine de petits fournisseurs d'envergure départementale ou locale. Ces fournisseurs peuvent être des entrepreneurs de travaux forestiers, des exploitants-scieurs, des producteurs/gestionnaires de la forêt (ONF Energie, coopérative Coforêt etc.), ou encore des récupérateurs et négociants en bois. Cela engendre une grande diversité en termes d'organisation des approvisionnements, pouvant être assuré par un fournisseur unique, par plusieurs fournisseurs ou encore par un regroupement (Cemagref, présentation du projet BENEFITS). La figure 40 montre les principales configurations rencontrées en Franche-Comté.

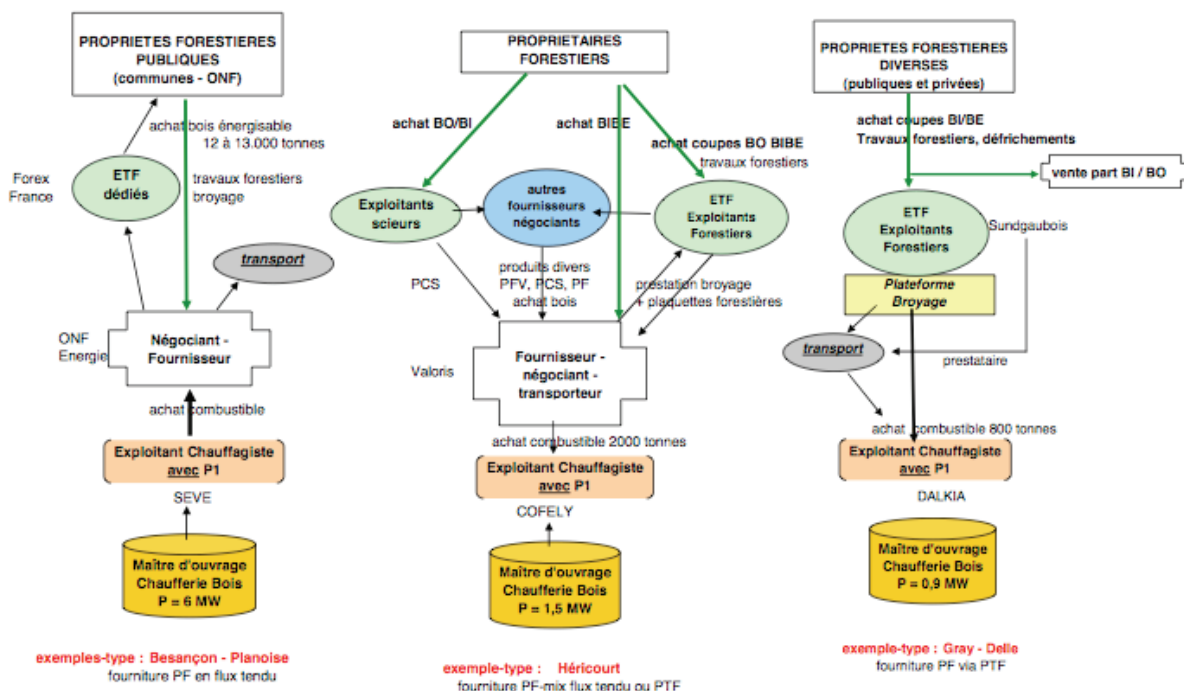


Figure 40 : schémas type d'approvisionnement en plaquettes forestières

Source : Boittin et al. (2010)

Ces trois schémas type d'approvisionnement correspondent aux modes de mobilisation des combustibles bois en Franche-Comté, dépendant de la nature des projets, la puissance, l'exigence de l'exploitant de la chaufferie etc. Les flux peuvent être directs de la forêt à la chaufferie ou indirects, c'est-à-dire en faisant transiter le combustible par une plateforme.

La récente et brutale émergence de ces sociétés d'approvisionnement qui voient dans le bois-énergie une véritable manne économique ne manque cependant pas de susciter l'inquiétude chez les acteurs de la filière forêt-bois. Poupeau et al. (2009) ont ainsi analysé les réactions des acteurs « traditionnels » de la filière par rapport au positionnement de ces sociétés (notamment ONF Énergie) sur les marchés. Les appels d'offre de la Commission de Régulation de l'Énergie, dont nous avons parlé précédemment ont en effet levé les doutes sur la crédibilité de l'utilisation des ressources forestières et incité « de nouveaux acteurs à sortir de leur attentisme et à se lancer sur le marché : les grands exploitants forestiers. [...] Leur stratégie est claire et ambitieuse car il s'agit pour elles de se positionner comme des ensembliers intervenant à la fois en amont (extraire ou faire extraire le bois forestier) et en aval de la filière (commercialiser des plaquettes auprès des clients). L'exemple de l'ONF est de ce point de vue tout à fait significatif de ce changement de cap ». Ainsi, suite au succès des appels d'offres, l'Office a en effet créé en 2005 sa propre filiale, ONF Énergie ayant pour mission de « mobiliser les ressources en bois disponibles, alimenter les filières de proximité, optimiser la production et la distribution des produits, ... » (ONF). En se positionnant de manière de plus en plus agressive sur le marché et générant des tensions avec certains

opérateurs existants (par exemple Dalkia souhaitant garder le monopole du contact avec les clients ou certaines petites entreprises de travaux agricoles). Néanmoins, il convient de préciser que les tensions émanent aussi des industriels, qui craignent que l'ingérence des sociétés d'approvisionnements en plaquettes forestières ne génère une concurrence accrue entre les usages du bois. Cette concurrence concerne surtout l'industrie de la trituration qui avait coutume d'utiliser des rémanents (qui servent également aujourd'hui à la fabrication de plaquettes forestières).

P. Nunes met également l'accent sur un problème intéressant lié à la nécessité de structurer localement les approvisionnements : « si leur montée en puissance et l'augmentation de leur rayon d'action entraînent même désormais une concurrence inter-régionale, leur nombre est encore trop faible et certaines communes doivent dès lors faire appel à des sociétés d'approvisionnement situées à plusieurs centaines de kilomètres ». Ce phénomène est lié à une autre crainte mise en exergue par Poupeau et al. (2009): les risques de « fuite du bois » et ses conséquences pour les acteurs locaux. Cela est surtout lié aux projets de cogénération « de taille importante, et sans commune mesure avec la plupart des chaufferies existantes », qui nécessitent « une ponction importante de la ressource en bois sur tout le territoire Est de la France ». Il résume par ailleurs la situation des approvisionnements aujourd'hui de la manière suivante : « le problème aujourd'hui n'est pas tant dans la disponibilité globale de la ressource en bois (qui semble suffisante) que l'exploitation des portions de forêts les plus accessibles et l'accaparement du bois le moins onéreux par des opérateurs aux reins solides ». Ce constat est corroboré par Boittin et al. (2010), pour qui l'accessibilité à la ressource est le véritable enjeu des projets de forte puissance : « aussi, pour ne pas surexploiter certaines zones forestières (les plus facilement accessibles), il est nécessaire de travailler sur le maximum de surfaces forestières possibles, y compris celles situées dans des zones où les coûts d'exploitation sont élevés. Ce genre de tensions résulte essentiellement du mode de structuration actuelle des approvisionnements, basé avant tout sur une logique de projet et une gestion des ressources par la demande pouvant dans certains cas apparaître problématique (et nécessiter *a fortiori* d'être mieux structurés, optimisés).

2.3.3. Deux logiques d'approvisionnements qui s'entrecroisent...

La structure de consommation est extrêmement hétérogène, tant au niveau de la puissance que de la nature et de la quantité des combustibles consommés. Et la distinction entre les grosses (voire très grosses) chaufferies et celles de taille plus modeste, se répercute directement sur les logiques d'approvisionnement. Ainsi selon l'ADEME, nous avons :

- D'une part une « logique territoire » garantie par une organisation locale de la collectivité, qui s'investit sur le développement forestier de son territoire. Selon

l'ADEME cette seconde configuration est plus à même de répondre aux besoins des petites chaufferies sur des circuits courts.

- D'autre part une « logique filière » garantie par des professionnels, caractérisée par des entreprises équipées pour répondre à la demande de plaquettes bois-énergie, et marquée par une tendance au regroupement de grosses entreprises pour constituer des volumes importants capables de répondre à la demande de chaufferies de forte puissance (plusieurs MW). Pour Boittin et al. (2010), l'approvisionnement des grosses installations franc-comtoises obéit à trois logiques différentes. L'approvisionnement des centrales de cogénération résultant de l'appel d'offres de la Commission de Régulation de l'Energie se base sur des « logiques de filières industrielles, difficilement captables par des entreprises locales (sans négociant intermédiaire). Les projets résultant de l'appel à projet Biomasse Chaleur Industrie et Agriculture (> 1000 tep) présentent une logique d'approvisionnement « qui reste territoriale, et qui est par conséquent plus facilement accessible aux entreprises locales ». Enfin, les chaufferies collectives de forte puissance, alimentées en plaquettes forestières « fonctionnent sur des schémas d'approvisionnement plus ou moins locaux qui représentent le débouché actuel des entrepreneurs de travaux forestiers et des détenteurs de la ressource forestière ».

Pour Boittin et al. (2010), "on retrouve classiquement deux catégories d'approvisionnement : les approvisionnements territoriaux avec des fournisseurs locaux (peu présents sur les chaufferies de forte puissance) et des approvisionnements "commerciaux" qui concernent la majorité des chaufferies de puissance supérieure à 800 kW". La situation est donc loin d'être simple. En réalité, se profilent une infinité de configurations possibles à l'échelle d'un territoire ; « chaque contrat d'approvisionnement étant unique et dépendant du contexte » (Rhône Alpes Énergie Environnement, 2005 fiche 3). Ainsi des chaufferies de taille importante peuvent émettre le choix de donner la primauté à la valorisation des ressources locales et par conséquent fonctionner en circuit court, et à l'inverse des collectivités peuvent assurer leur approvisionnement *via* des structures industrielles, et donner la priorité au coût le moins cher, peu importe la qualité du combustible et la distance parcourue pour l'acheminer. Ainsi ces deux types d'organisation peuvent être complémentaires, les infrastructures mises en place pour l'approvisionnement des grosses chaufferies (exemple hangar de stockage) pouvant servir aux petites installations et ainsi fonctionner en synergie. Cela pose donc la question de la configuration optimale de la filière, du rôle structurant des grosses installations en matière d'organisation des approvisionnements, et des limites d'un fonctionnement basé sur une structuration "par le haut et par la demande" (Tabourdeau, 2010).

2.3.4. Une structuration de la filière par la demande

Selon Philippe Nunes « on constate que c'est la demande qui bien souvent contribue à structurer l'offre ». La figure 38 (étapes de montage d'un projet) corrobore les propos que nous tenions précédemment, à savoir que la structuration des approvisionnements intervient après le montage du projet alors qu'elle devrait l'être conjointement, et de façon approfondie. Ce type de raisonnement découle en grande partie des dispositifs d'aides étudiés précédemment, agissant sur le volet demande plutôt que sur la partie offre. La figure 41 représente de façon conjointe les principes de l'organisation actuelle des approvisionnements (à savoir une structuration de la filière par la demande) qui présente quelques aspects problématiques, et la méthode de structuration que nous préconisons et qui constitue le socle conceptuel dans lequel nous insérerons notre démarche de modélisation.

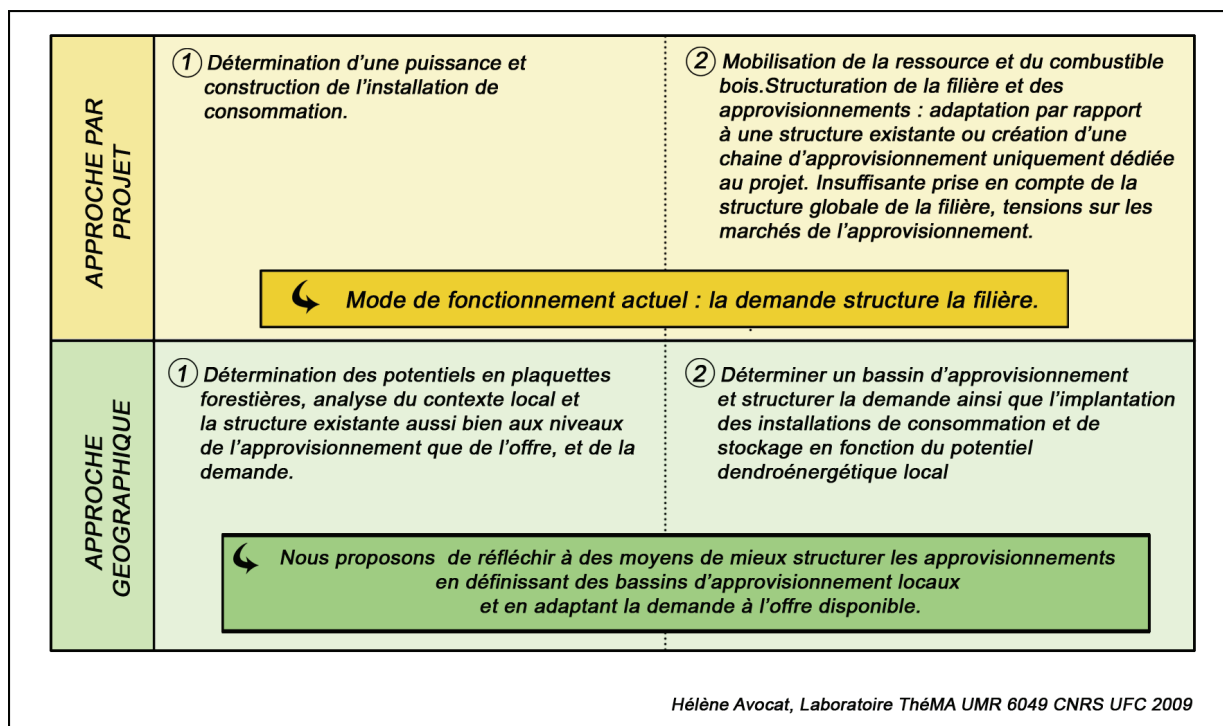


Figure 41 : deux visions différentes de la structuration de la filière dendroénergétique

Bien entendu, une telle approche ne peut se considérer de manière segmentée, puisqu'elle implique de prendre en compte l'ensemble du système bois-énergie (conjointement offre et demande) ainsi que son inscription territoriale. Ce qui justifie la pertinence **d'une approche géographique des approvisionnements en plaquettes forestières.**

3. Une problématique géographique

Les enjeux inhérents à la valorisation dendroénergétique sous forme de plaquettes forestières (aménagement forestier, développement local), entretiennent, nous l'avons vu, de forts liens avec la géographie et l'aménagement du territoire. Les processus d'approvisionnement, de par leur situation à l'interface des lieux de production et de consommation, revêtent quant à eux une dimension spatiale supplémentaire qui en fait un objet d'étude préférentiel.

3.1. La structuration des approvisionnements... un enjeu éminemment spatial

Selon Olivier Guichardaz³⁷, « le développement du bois-énergie passe par une meilleure structuration des approvisionnements ». Ce gENRe de constat est extrêmement fréquent, avec un large accord sur le fait que l'approvisionnement doit être mieux structuré, optimisé. Cependant peu donnent des pistes de réflexions (méthodologiques ou non) pour arriver au résultat attendu, à savoir la garantie d'un approvisionnement, tant quantitatif que qualitatif, non concurrentiel pour les autres utilisateurs de biomasse ligneuse et s'inscrivant dans une optique de durabilité. L'ADEME³⁸ émet d'ores et déjà des pistes de réflexion en vue de répondre à la question « pourquoi structurer les approvisionnements ? » :

- constituer une offre adaptée à tous les types de projets,
- sécuriser les maîtres d'ouvrage et les projets en regroupant les partenaires des filières,
- réduire les circuits d'approvisionnement (circuits courts),
- valoriser les ressources locales (différentes sources/natures de bois).

Le tout en prenant en compte quatre paramètres fondamentaux :

- le potentiel local (forêt, scierie, industrie du bois)
- le territoire (la territorialité des ressources et des acteurs)
- les enjeux et caractéristiques des projets de chaufferies (forts/faibles consommateurs, intégrés localement ou non, à but économique, substitution énergétique, développement territorial)
- les fournisseurs de combustible (local, régional, national).

³⁷ Pro-environnement

³⁸ Documents remis à l'issue de la formation *bois-énergie dans le collectif/tertiaire : comment accompagner les projets ?* 2008.

Si les approvisionnements sont des processus extrêmement complexes dépendant de nombreux paramètres (économiques, environnementaux, politiques...) et de nombreux acteurs aux intérêts parfois différents, nous avons choisi de les approcher sous un angle spatial. Dans le cadre de ces recherches il s'agit de voir comment s'organisent les approvisionnements à l'heure actuelle, et de proposer des pistes de réflexion et des méthodes pour satisfaire l'approvisionnement des chaufferies en maximisant la valorisation des ressources locales. La figure 42 atteste de l'inscription spatiale et territoriale de la filière dendroénergétique.

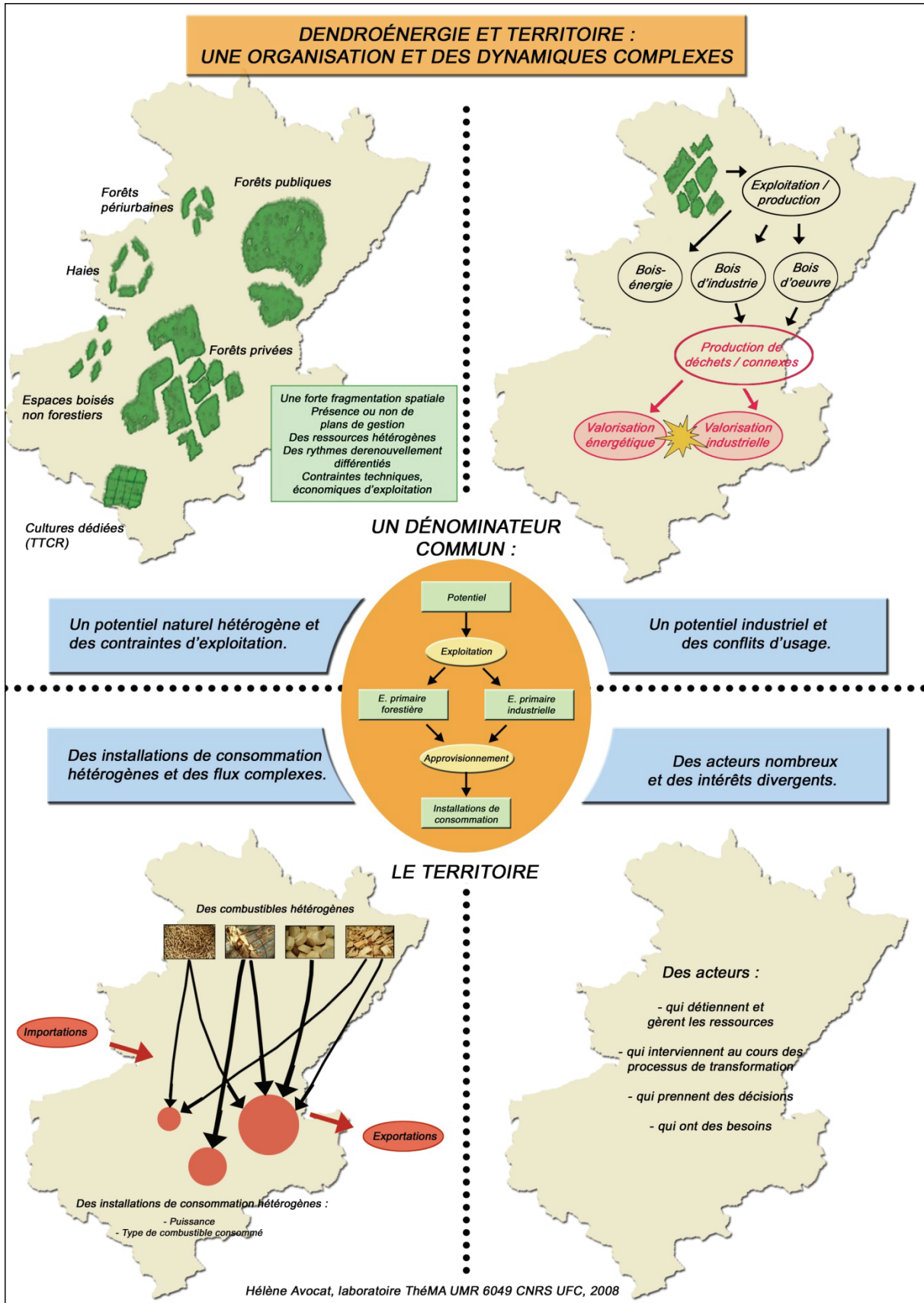


Figure 42 : dendroénergie et territoire

En ce qui concerne la spatialisation des processus d'approvisionnement, il faut mettre l'accent sur des problèmes spatialisés qui nous intéressent particulièrement en tant que géographe.

- La localisation des ressources ligneuses induisant des problèmes d'accessibilité, et à leurs conséquences en termes de coûts de mobilisation de la ressource et d'acheminement vers les unités de consommation.
- La définition de la fraction énergisable du couvert boisé à l'échelle d'un territoire, ou d'un bassin d'approvisionnement. Cet aspect est indispensable dans la mesure où les approvisionnements se définissent aussi par rapport à la disponibilité des ressources.

Ce qui permet d'aborder les points suivants.

- La question de la minimisation des distances entre les lieux de production et de consommation, le bois-énergie devant théoriquement être acheminé par les voies les plus courtes en vue de répondre aux exigences de développement local. Ainsi, concernant le prix des plaquettes forestières et leur indexation, de nombreuses formules de révision circulent accordant une place importante aux coûts de transports routiers, s'élevant de fait de 20 à 50 % du prix du combustible « entrée chaufferies » (ADEME). L'ADEME précise en outre que « la formule de révision doit traduire la réalité économique de la production de plaquette pour le fournisseur, mais également **les exigences de circuit court pour le combustible** ».
- L'analyse et la définition « d'aires de chalandise » (bassins d'approvisionnement) des installations de consommation, avec :
 - d'une part une analyse des données de traçabilité, ces dernières étant envisagées comme des interactions spatiales entre lieux de production et de consommation, et traitées avec des méthodes idoines (modèles d'interactions spatiales, avec toutes les réserves induites par l'utilisation de ce type de modèle).
 - d'autre part la modélisation exploratoire de bassins d'approvisionnement autour des chaufferies, visant à satisfaire la demande en exploitant de manière durable les ressources ligneuse à proximité des chaufferies. Ceci permettra de faire le parallèle avec les travaux menés par l'ONF (2007), concernant le concept de rayon d'approvisionnement.

3.2. Des processus complexes et fortement spatialisés

L'approvisionnement regroupe, nous l'avons vu, « l'ensemble des processus et des activités par lesquels le bois-énergie sous ses différentes formes circule depuis ses lieux d'origine jusqu'à ses utilisateurs finaux » (FAO, 2002). En filigrane de cette définition transparait une vaste complexité, liée au caractère polyforme de la dendroénergie et des dendrocombustibles d'une part, et de la multiplicité des flux possibles de ces dendrocombustibles depuis les lieux de production jusqu'aux lieux de consommation d'autre part. En effet, les lieux d'origine (lieux de production de la plaquette forestière) sont nombreux et correspondent aux chantiers forestiers, et les lieux de destination finale au réseau de chaufferies présentes sur l'espace géographique considéré. Les processus d'approvisionnement peuvent également être complexifiés avec l'existence de plateformes de stockage induisant une rupture de charge et de trajectoire entre l'origine et la destination. Selon les caractéristiques des chaufferies, on peut ainsi considérer les approvisionnements comme des flux directs entre les espaces producteurs et consommateurs ou alors prendre en compte le triptyque espaces producteurs-plateforme de stockage-chaufferie. Ce deuxième type de configuration permet d'assurer la sécurité des approvisionnements et d'améliorer la qualité du combustible. L'ensemble de ces éléments s'inscrit dans l'espace, ce qui nous intéresse particulièrement en tant que géographe.

3.2.1. Une logique de flux

La situation des processus d'approvisionnement à l'interface de lieux de production et de consommation sous-entend une idée de mouvement, de transfert et plus largement de mobilité. Dans son acception la plus générale, la mobilité désigne un changement de lieu et "traduit le déroulement des interactions dans l'espace", et l'observation de ces mobilités "à l'échelle d'unités géographiques assez vastes et sur des durées assez longues se traduit par des flux [...]" (Pumain et al., 2001). Or, les approvisionnements font transparaitre la notion de flux définie par Pumain et al. (2001) comme "une mesure d'interaction spatiale obtenue par l'addition de déplacements individuels ou de quantités matérielles ou immatérielles échangées entre deux zones géographiques pour une durée donnée". Le glossaire de Géoconfluences complète cette définition en y ajoutant une précision quant aux modalités de ces échanges : les flux sont ainsi caractérisés par "l'écoulement, le transfert d'une certaine quantité de [...] marchandises, transportées par un moyen de communication, par le biais d'un réseau". Les flux considérés ici correspondent ainsi aux quantités de plaquettes forestières acheminées depuis des lieux de production jusqu'à des lieux de destination (chaufferies) sur le long terme, une nouvelle installation pouvant succéder à une chaufferie en fin de vie. L'ensemble de ces flux correspond à une matrice d'interactions spatiales.

3.2.2. Des interactions spatiales entre lieux de production et sites de consommation

La différenciation spatiale engendre nécessairement des flux entre des espaces complémentaires : "les interactions spatiales reflètent ainsi des relations de complémentarité/concurrence entre les lieux et jouent un rôle moteur dans les transformations de l'espace et dans la dynamique des systèmes spatiaux" (Sanders, 2001). D'un point de vue méthodologique, on se situe donc dans un système spatialisé où l'ensemble des flux de plaquettes forestières est régi par un différentiel entre zones productrices (émettrices) et réceptrices. Ces deux types de zones ou objets géographiques sont respectivement caractérisés par des indices d'émissivité et d'attractivité. Si l'on se réfère à Pumain et al. (2001), "le principe général est de considérer que le volume des échanges entre deux zones est déterminé (ou a une certaine probabilité de l'être) soit par l'importance de la zone émettrice, soit par celle de la zone réceptrice, soit plus souvent du produit de ces deux effectifs". Bien que nous disposions de peu de données, nous souhaitons éprouver cette hypothèse *via* le test d'un modèle d'interaction simple. Ceci nous permettra d'apporter des éléments de compréhension à l'organisation spatiale actuelle des processus d'approvisionnement. Bien que ces processus s'expliquent en grande partie par des facteurs comportementaux et relationnels entre les acteurs, nous ne pouvons les intégrer dans notre démarche faute d'informations. L'objectif est ici d'étudier dans un premier temps, si la structure spatiale du couvert boisé (offre) a une incidence sur les pratiques d'approvisionnement, et si la puissance de la chaufferie détermine aujourd'hui la taille des bassins d'approvisionnement.

Conclusion de la partie 1

La forte augmentation du nombre de chaufferies a eu pour conséquence une déstructuration de la demande assortie d'une mobilisation accrue des acteurs locaux (spécialement au niveau de la production ligneuse, la demande en plaquette forestière ayant fortement augmenté³⁹). Avec le développement de la filière et l'émergence des très gros projets, les approvisionnements ont été bouleversés et le principe de structuration de la filière (et des approvisionnements) uniquement par une gestion de la demande, qui prévaut encore, commence à montrer ses limites. De plus en plus, les acteurs institutionnels et professionnels s'interrogent sur la viabilité d'un tel modèle à long terme, et réfléchissent à des modes de structuration des approvisionnements considérant davantage l'ensemble de la filière et l'inscription territoriale de cette dernière. Il faut donc trouver un moyen d'adapter au mieux l'offre à la demande en tenant compte des principes invoqués par les acteurs de la filière : valorisation des ressources locales, diminution des pressions environnementales, développement local, etc. Au vu de ces différents éléments, on pose l'hypothèse que le système dendroénergétique ne peut-être viable que si l'on diminue au maximum les distances de transport entre les lieux de production et les lieux de consommation, et que l'on valorise des ressources locales. Ce qui, par ailleurs, est en accord avec les argumentaires véhiculés par les promoteurs de la filière bois-énergie.

Ces méthodes sont développées dans la partie 2. D'un point de vue conceptuel, les approvisionnements correspondent à des flux de combustibles dendroénergétiques, depuis les espaces producteurs / installations de production jusqu'aux installations de consommation. Dans cette optique, nous proposons de développer une méthodologie visant à identifier les potentiels locaux et modéliser les processus d'approvisionnements en plaquettes forestières, en satisfaisant les exigences de durabilité et de développement local. Bien que les incertitudes liées au caractère récent du développement de la filière et au manque de recul par rapport à l'émergence des très gros projets de cogénération (résultats publiés en juin 2008 par la CRE) apparaissent très clairement comme des facteurs limitatifs en regard de nos objectifs, il nous apparaît important d'essayer de comprendre ces différentes logiques et de tenter de les modéliser en posant des hypothèses *a priori*. Cela est d'autant plus délicat que la question des approvisionnements est difficile à traiter, non seulement en raison des nombreux enjeux qu'elle soulève, mais également en raison de la complexité qui caractérise ces processus (grand nombre d'acteurs, problèmes d'adéquation entre des combustibles hétérogènes et des installations de consommation employant des combustibles différents selon leur nature et leur puissance, etc.). Cela est particulièrement vrai pour le secteur collectif/tertiaire, dont les

³⁹ Le gisement industriel étant fini et faisant l'objet de fortes tensions en raison de conflits d'usage entre bois-énergie et usages industriels, la plaquette forestière (bois déchiqueté) est par conséquent amenée à se développer.

installations de consommation sont caractérisées par une très forte hétérogénéité, tant au niveau de la puissance que des usages et de la nature des combustibles consommés.

Il serait peut-être intéressant de tenter de définir un modèle global tenant compte à la fois des besoins des différents acteurs de la filière (partage des ressources), des conditions imposées par les lois des marchés des produits ligneux, et des contraintes inhérentes à la nature des ressources en termes de renouvelabilité. Néanmoins, la complexité des phénomènes observés est telle que cela aurait impliqué la mobilisation de compétences qui ne sont pas de notre ressort, notamment en matière d'ingénierie forestière ou de sciences économiques. De plus, la nature des données que nous avons à disposition rend impossible la réalisation d'un tel projet. Il nous a donc fallu opérer un certain nombre de choix quant aux orientations de nos recherches, ce qui impliquait d'éluder certains de ces aspects. Nous avons choisi de nous intéresser à la modélisation (spatiale notamment) des processus d'approvisionnement des chaufferies des secteurs collectif/tertiaire et industriels hors industries du bois, en raison du grand nombre de questionnements en liens directs avec la discipline géographique.

- Quelle est la fraction énergisable des espaces boisés ?
- La configuration spatiale et structurelle des espaces boisés a-t-elle une influence sur les processus d'approvisionnement ?
- La distance est-elle un paramètre que l'on cherche aujourd'hui à minimiser ? La taille des bassins d'approvisionnement est-elle fonction de la puissance des chaufferies ?

Autant de questions auxquelles nous tenterons de répondre dans les parties consacrées à la formalisation théorique et méthodologique des questionnements sur les processus d'approvisionnements, et à la présentation des résultats à l'échelle de deux territoires aux structures dendroénergétiques différentes.

Partie 2

Éléments de méthode pour la modélisation des approvisionnements et la quantification des potentiels ligneux énergisables

Introduction de la partie 2

De l'utilité de la modélisation en géographie

Les approvisionnements en plaquettes forestières sont des processus complexes, qui se traduisent par une infinité de flux possibles entre les lieux de production et les lieux de consommation. Or, la complexité intrinsèque de ces processus justifie que l'on recoure à des simplifications, "pour dégager l'essentiel de l'accessoire, le permanent et le déterminant du contingent, et poser les problèmes relatifs à l'explication de ce que l'on observe" (F. Durand-Dastès in Sanders (2001)). L'usage des modèles, que P. Haggett (1965) définit comme une représentation schématique de la réalité en vue d'une démonstration, apparaît dès lors comme une voie féconde.

Modéliser les approvisionnements : objectifs et méthodologie globale

Les approvisionnements se situant à l'interface de l'offre et de la demande en bois-énergie, il est utile de bien connaître ces deux composantes, pour ensuite les mettre en adéquation (cf. figure 43).

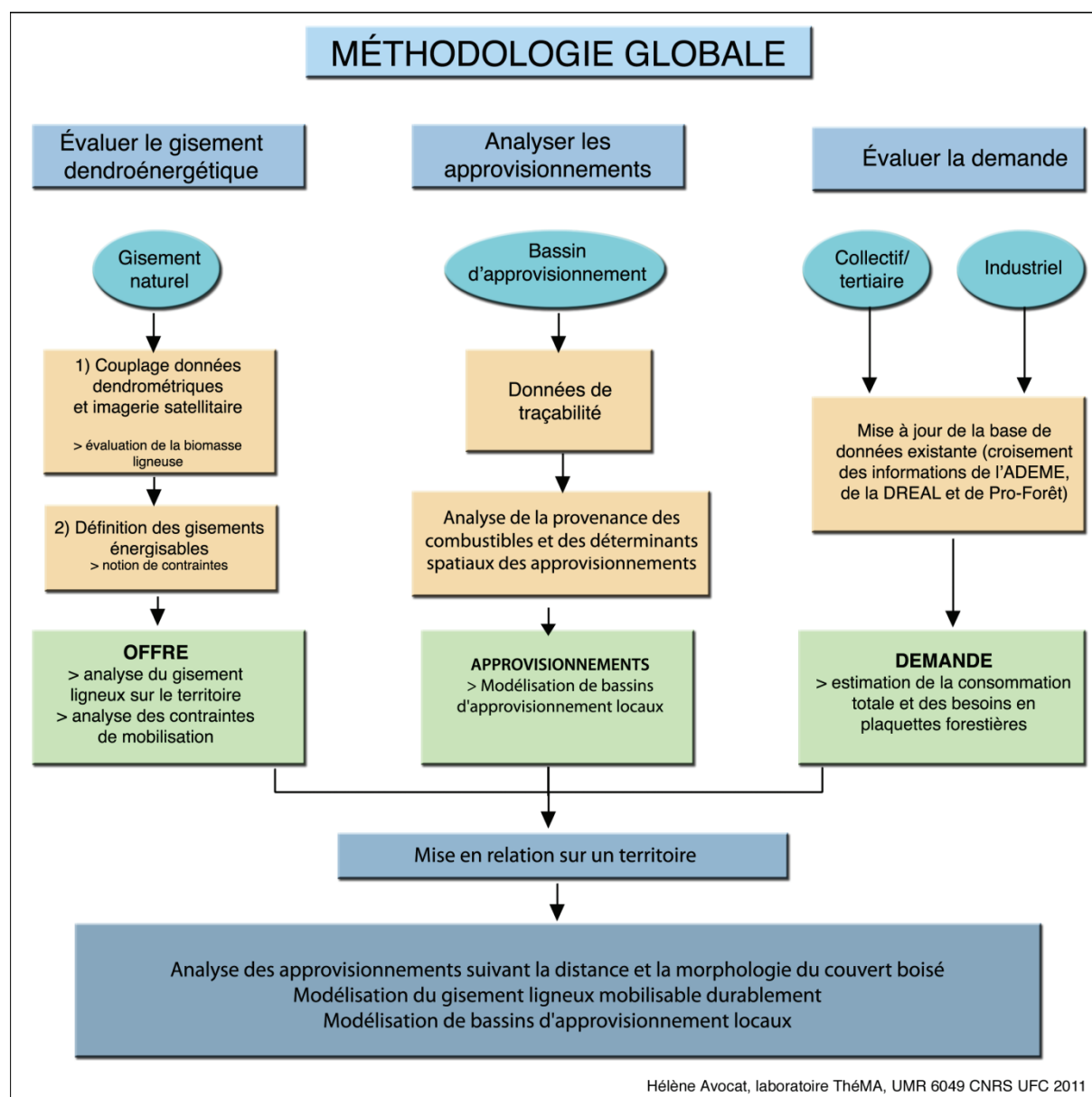


Figure 43 : méthodologie globale

Un couplage de deux approches

1) *Analyse des déterminants spatiaux des processus d'approvisionnement*

Bien que les processus d'approvisionnement aient une forte composante spatiale, ils s'expliquent aussi par l'existence de processus aspatiaux (ou dont la composante spatiale est floue ou ambiguë à préciser) : jeux d'acteurs (facteur comportemental), considérations économiques, opportunités liées à la tenue de chantiers forestiers etc. (Boittin et al., 2011). Compte tenu des réticences des acteurs de la chaîne d'approvisionnement à fournir des informations sur leurs pratiques, notre seule alternative était d'exploiter des données de

traçabilité, ce qui nous permettait d'étudier la provenance des combustibles, et de nous interroger sur le rôle de la configuration des espaces forestiers et de la distance, autrement dit sur les caractéristiques spatiales des approvisionnements. Une telle approche implique de considérer les approvisionnements comme des interactions spatiales entre les espaces boisés et les chaufferies. Les déterminants de l'interaction spatiale intervenant dans la modélisation des processus d'approvisionnement sont :

- les variables d'émissivité des origines mesurant la capacité d'un lieu à engendrer des flux (potentiel dendroénergétique des espaces boisés)
- les variables d'attractivité des destinations mesurant la capacité d'un lieu à attirer un flux (caractéristiques des chaufferies)
- la séparation entre les lieux (distance)

La modélisation de ces trois déterminants donne lieu à :

- 1) La définition du potentiel des espaces boisés
- 2) La définition de l'attractivité des lieux de consommation
- 3) L'analyse des interactions entre ces différents objets géographiques

L'étude des bassins d'approvisionnement *via* des données de traçabilité, n'a pour l'heure été utilisée à notre connaissance que par Laurent Gazull (2009), mais dans un contexte totalement différent, puisqu'il s'agissait de modéliser le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Bamako (origines multiples, destination unique). Nous disposons ici de deux jeux de données de traçabilité, pour des chaufferies de puissance très hétérogène, dont l'analyse nous permet de mettre en évidence le rôle des masses (puissance) et de la distance, qui sont les principaux descripteurs de ces interactions spatiales. Il s'agit de données agrégées, compatibles avec l'utilisation d'un modèle d'interactions spatiales de type gravitaire, couramment utilisé en géographie (avec toutes les réserves qu'ils comportent : notamment au niveau de leur pauvreté théorique). Les bassins ou aires d'approvisionnement sont la traduction surfacique de ces interactions spatiales. Une telle approche permet de mettre en évidence l'hétérogénéité de la structure de la demande, les phénomènes de hiérarchie, de concurrence au sein de l'ensemble des chaufferies, et de réfléchir à l'influence de la ressource forestière sur les approvisionnements. Faisant cela, nous mettons en parallèle les processus d'approvisionnement avec de grands concepts et méthodes de la géographie quantitative et de l'économie spatiale⁴⁰, en vue de proposer des pistes visant à la valorisation des ressources ligneuses locales et à la structuration des approvisionnements en circuit court.

⁴⁰ Nous aborderons ainsi les notions d'attractivité, d'accessibilité, de localisation optimale etc.

2) Modélisation des ressources ligneuses durablement énergisables

La quantification du potentiel ligneux énergisable mobilise de nombreuses données et savoir-faire : biologie, foresterie, télédétection. L'entreprise est complexe, en témoigne l'émergence récente de deux projets de recherche dédiés spécifiquement à cette problématique : les projets EMERGE et FORESEE. Le premier projet, coordonné par l'ONF, fait partie de l'ANR Bioénergies 2008-2012 et vise à l'élaboration de modèles pour une estimation robuste et générique du bois-énergie, au niveau arbre et pour différents compartiments. Le second projet, porté par le FCBA, vise à mobiliser les données issues de la télédétection et de la photogrammétrie pour caractériser finement la ressource forestière à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement. Ces projets étant récents, nous ne disposons pas encore de la méthodologie précise et des résultats.

Nous avons donc élaboré notre propre protocole méthodologique d'évaluation de la biomasse ligneuse énergisable *via* le croisement entre des données dendrométriques, des données d'inventaire forestier, des informations issues de l'imagerie satellitaire (indices de végétation et classification des grandes formes de peuplement), et des tables de production. Le résultat se présentera sous forme d'une grille de cellules (raster) caractérisant l'ensemble du couvert boisé (y compris les arbres isolés, les bosquets et autres formations linéaires). Les tables de production seront ensuite utilisées afin d'établir des modèles de production/prélèvements pour différents types de peuplement dans un espace donné. Cela permettra d'intégrer une dimension temporelle *via* le prisme de la durabilité des prélèvements (figure 44).

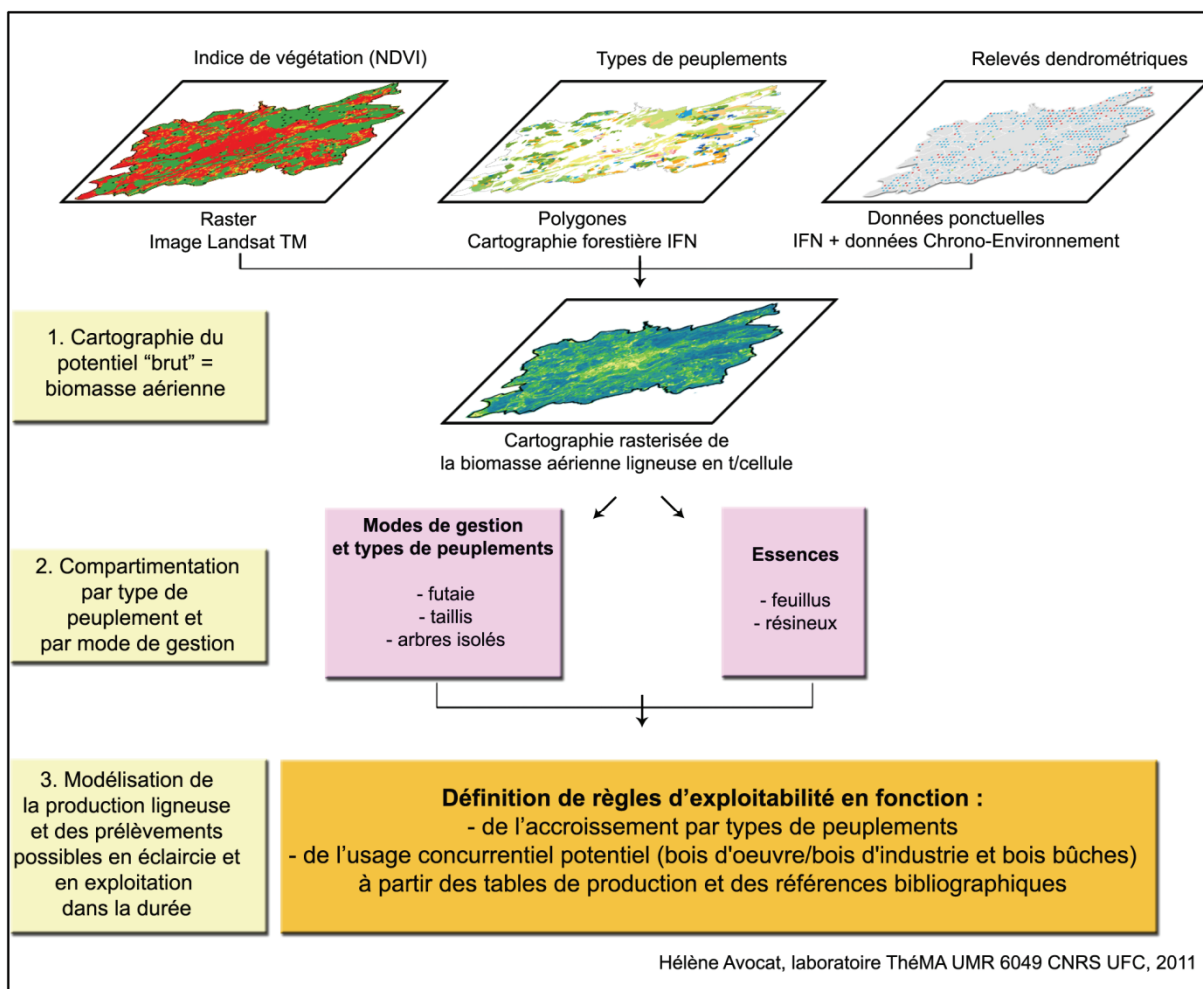


Figure 44 : Méthodologie de détermination des potentiels de plaquettes forestières

3) Modélisation d'aires d'approvisionnement maximisant la valorisation des ressources locales

Sur la base des acquis précédemment développés (cartographie de la biomasse aérienne et modèle de production/prélèvement), nous modélisons de manière itérative des aires d'approvisionnement autour des chaufferies, dont nous avons estimé la consommation. L'objectif est triple :

- satisfaire la demande tout en tenant compte autres usages du bois ;
- minimiser la distance d'approvisionnement ;
- exploiter durablement les ressources ligneuses, considérant les rythmes d'accroissement de chaque peuplement et les prélèvements possibles sans faire diminuer le capital ligneux initial.

Cette partie s'organise en trois chapitres, reprenant cette trame méthodologique :

Le chapitre 4 traite de méthodes applicables à l'analyse des caractéristiques spatiales des processus d'approvisionnement (masses et distances), à partir de données de traçabilité de plaquettes forestières. Dans cette approche, les approvisionnements sont considérés comme des flux/interactions spatiales entre des zones de production (espaces boisés) et des lieux de consommation (chaufferies).

Le chapitre 5 est consacré aux travaux sur la définition des potentiels ligneux énergisables : les méthodes issues de la foresterie, leurs paramètres et leurs variables, et les apports de l'information géographique pour la modélisation de la biomasse. Suivent une revue des données d'inventaire et un développement sur l'utilisation des indices de végétation pour évaluer la biomasse. La question de la fraction énergisable est enfin développée.

Le chapitre 6 pose le problème de la définition exploratoire par itération spatiale et temporelle de bassins d'approvisionnement locaux, tenant compte des contraintes environnementales liées à la renouvelabilité des ressources ligneuses et considérant les usages concurrentiels de la plaquette forestière.

Les chapitres 5 et 6 posent des cadres problématiques et traitent des principes méthodologiques adaptés à leur résolution. L'exposé plus détaillé des méthodes effectivement employées dans cette recherche est placé dans les différents chapitres de la troisième partie, afin de ne pas alourdir le va-et-vient entre l'exposé méthodologique et la présentation des résultats.

Chapitre 4

Des données de traçabilité aux bassins d'approvisionnement : l'apport des modèles d'interactions spatiales

Les chaufferies absorbent ou drainent en effet une certaine quantité de matière ligneuse (flux), de façon proportionnelle à leur puissance, et la bassin d'approvisionnement de chaque chaufferie se définit en fonction de ces flux. Les approvisionnements sont l'expression d'interactions spatiales entre des zones de production de plaquettes forestière et des lieux de consommation (les chaufferies). Ces interactions sont appréhendées *via* des données de traçabilité fournies par deux sociétés d'approvisionnement : chaque ligne du tableau étant caractérisée par une origine, une destination, et une quantité de plaquettes forestières acheminée. Ce genre de problématique, impliquant à la fois les phénomènes de concurrence et d'interaction spatiale, est une entrée du questionnement géographique (Ullman, 1980). Cependant il s'agit d'une démarche originale et novatrice en ce qui concerne la thématique dendroénergétique dans la mesure où les réflexions sur les approvisionnements n'ont jamais, à notre connaissance, été abordées sous cet angle, du moins de façon approfondie, scientifiquement argumentée et éprouvée à l'aide de données sur la traçabilité géographique des combustibles bois⁴¹. De plus, les documents élaborés lors du montage d'un projet de chaufferie bois (cf. chapitre 3 sur les analyses d'opportunité, et les études de faisabilité⁴²) sont relativement pauvres en ce qui concerne l'analyse de l'environnement de la chaufferie, que ce soit au niveau des ressources ou au niveau des installations existantes. Or, une vue d'ensemble de la structure spatiale des chaufferies permettrait aux maîtres d'ouvrages ou aux sociétés d'approvisionnement d'appréhender les phénomènes de concurrence spatiale et donc

⁴¹ À l'exception des travaux de L. Gazull, mais dans un contexte très différent : au Mali (Bamako), avec une destination unique et des origines multiples.

⁴² Documents évoqués en première partie, chapitre 3.

d'optimiser les approvisionnements (en mettant en place des systèmes de mutualisation des transports ou des équipements).

Afin de modéliser les bassins d'approvisionnement et *a fortiori* les flux de plaquettes forestières, nous nous basons dans un premier temps sur l'analyse de la structure de consommation. Cela nous permet de mettre en exergue des phénomènes de hiérarchie et de concurrence entre les lieux de consommation, partant de l'hypothèse principale que la puissance a un rôle déterminant dans la définition du bassin d'approvisionnement.

1. Interactions spatiales et approvisionnements

1.1. La problématique de l'interaction spatiale

1.1.1. Une problématique centrale en géographie

La problématique de l'interaction spatiale naît à la fin des années 1950 d'une quantification et d'une modélisation des relations (réelles ou potentielles) entre unités géographiques, et se nourrit des observations effectuées dans d'autres disciplines : sociologie (étude des migrations), psychologie (analyse comportementale), économie, physique (modélisation gravitaire et entropie) (Pini et Milhaud, 1995). Le champ d'investigation de l'interaction spatiale est donc diversifié, et s'intéresse aux flux de biens, de personnes, de capitaux, de matière etc. matérialisant les interrelations fonctionnelles entre les différentes parties des territoires (Rodrigue, 2009). Elle est depuis longtemps au cœur des réflexions des géographes, et apparaît encore aujourd'hui comme un concept central et récurrent en matière d'analyse et de modélisation spatiale (Sanders, 2001). Cela s'explique notamment par le fait que « dans un espace en construction, l'intensité des interactions entre les entités le constituant est un élément central de la détermination et de l'évolution de sa structure » (Virol, 2006). Selon Sanders (2001), il y a différentes façons d'appréhender le phénomène d'interaction spatiale.

- Elle peut être l'objet même de la recherche, auquel cas on cherche à expliquer pourquoi et dans quelle mesure l'importance des flux varie entre plusieurs couples de lieux. Dans le cadre de ces travaux, nous nous plaçons dans ce premier cas de figure.
- Elle peut représenter une contrainte, et le déplacement d'un lieu à un autre est considéré comme un frein dans la réalisation d'une action, ou alors constituer le facteur explicatif d'une dynamique, de l'émergence d'un phénomène à un endroit sous l'impulsion donnée par des échanges avec d'autres lieux. Cependant pour l'heure, le phénomène de développement de la filière bois-énergie est encore trop récent et la filière insuffisamment structurée pour que cela puisse donner lieu à des résultats satisfaisants sur le rôle explicatif des flux dans la structuration de la filière.

Même si les interactions ne sont forcément liées à la configuration géographique, leur réalisation a des répercussions spatiales sur le territoire. La question à se poser est notamment : quel est le poids de l'espace dans l'émergence et la persistance de l'interaction ? Et au-delà dans l'émergence des structures organisées ? (cela nous ramène à des questionnements sur la contrainte distance, annihilée dans certains cas par le très faible coût de la matière première, ou le très faible coût des transports). L'interaction a donc une forte composante spatiale, de par la localisation des unités en relation et des distances les séparant, révélant ainsi des phénomènes de hiérarchies, complémentarités et disparités de l'espace (Pini et Milhaud, 1995). Et les flux, en tant qu'indicateurs de ces relations mettent ainsi en exergue l'hétérogénéité des territoires à l'origine de phénomènes de complémentarité et de concurrence générant ces transferts.

1.1.2. A la base : un différentiel né de l'hétérogénéité de l'espace géographique

La différenciation spatiale engendre inévitablement des flux entre des espaces complémentaires : "les interactions spatiales reflètent ainsi des relations de complémentarité/concurrence entre les lieux et jouent un rôle moteur dans les transformations de l'espace et dans la dynamique des systèmes spatiaux" (Sanders, 2001). Edward Ullman met en évidence les conditions de réalisation d'une interaction, et ces dernières sont étroitement liées à l'organisation spatiale des objets et de l'espace géographique (cf. figure 45) :

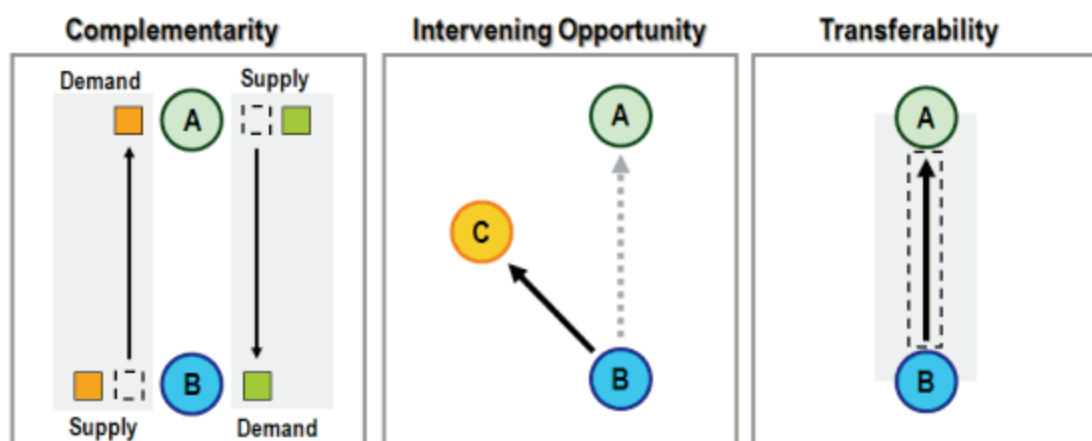


Figure 45 : les conditions de réalisation d'une interaction spatiale

Source : Rodrigue (2009), d'après Ullman (1980)

Les conditions d'un transfert dans l'espace sont ainsi le fruit de la conjonction de trois phénomènes : la complémentarité, les opportunités alternatives et la transférabilité. Ces phénomènes interviennent de façon plus ou moins importante selon la nature des transferts. En ce qui nous concerne, les opportunités d'intervention sont pour l'heure plus difficiles à

évaluer et font référence à notre sens aux caractéristiques des espaces boisés et à leurs influences potentielles sur les interactions. Nous pouvons ainsi supposer que si la forêt « C » possède les mêmes caractéristiques que la forêt « A », mais qu'elle est plus proche de la chaufferie « B », nous pouvons supposer que l'interaction aura davantage de chance d'avoir lieu entre « B » et « C » qu'entre « B » et « A ». Cependant tout dépend de l'état de la forêt, de ses caractéristiques foncières etc. La transférabilité fait référence aux coûts de franchissement des distances, qui peut être modifiée par le fait que "certaines catégories de biens, personnes, informations sont plus facilement ou mieux transportables que d'autres" (Pini et Milhaud, 1995). La complémentarité est ici le paramètre le plus important. Elle est étroitement liée aux concepts d'émissivité et d'attractivité, générateurs d'interactions spatiales (même si cette vision reste très restrictive par rapport à la réalité).

1.1.3. Émissivité (des espaces boisés) et attractivité (des chaufferies)

Les échanges et transferts découlant de l'hétérogénéité de l'espace et de la complémentarité entre les lieux sont intimement liés aux concepts d'émissivité et d'attractivité de chaque zone. Les interactions I (nombre de flux) entre deux zones sont ainsi fonction d'une part de l'émissivité mesurant la propension d'un lieu i à engendrer des interactions (Em_i) et d'autre part de l'attractivité d'un autre lieu j mesurant l'attrait de la destination j pour i (Att_j) (Pini et Milhaud, 1995 ; Pumain et al., 2001) tel que :

$$I_{ij} = (Em_i, Att_j)$$

Ici, les lieux ne jouent pas un rôle symétrique : il s'agit de mesurer des flux et de modéliser des interactions spatiales « à sens unique » depuis des lieux de production (forêts, espaces boisés, émettrices de matière ligneuse) vers des lieux de consommation. Ces interactions sont dites dissymétriques (Sanders, 2001) avec Em_i qui caractérise les potentialités des espaces boisés en termes d'exportation de plaquettes forestières, et Att_j qui symbolise la consommation des chaufferies, fonction de leur puissance. L'importance de l'émissivité d'une zone i peut s'estimer par exemple en sommant des lignes de flux issus de cette zone ($\sum_j n_{ij}$) et inversement l'attractivité d'une zone j correspond à l'addition des flux à destination de cette zone ($\sum_i n_{ij}$). L'ensemble de ces flux est répertorié dans une matrice de flux, support de toute démarche de modélisation des interactions spatiales.

1.2. La modélisation des interactions spatiales

Les mouvements ayant lieu au sein de l'espace géographique, entre des unités ou des objets, peuvent être représentés sous forme d'interactions spatiales à condition de tenir compte de leurs attributs de localisation (Haynes et Fotheringham, 1984) : un mouvement se déroule entre un lieu d'origine (i) et un lieu de destination (j). Si ces derniers font référence à des

zones spatialement étendues pouvant être assimilables à des polygones, alors le centroïde de la zone en question constitue en pratique et de façon réductrice la référence ponctuelle des attributs du mouvement. Dans une optique de modélisation (spécialement à une échelle méso ou macro-géographique), l'ensemble des mouvements est considéré de façon agrégée sous forme de flux, exprimés au moyen d'un vecteur valué T_{ij} , représentant une interaction entre les zones/lieux i et j (figure 46).

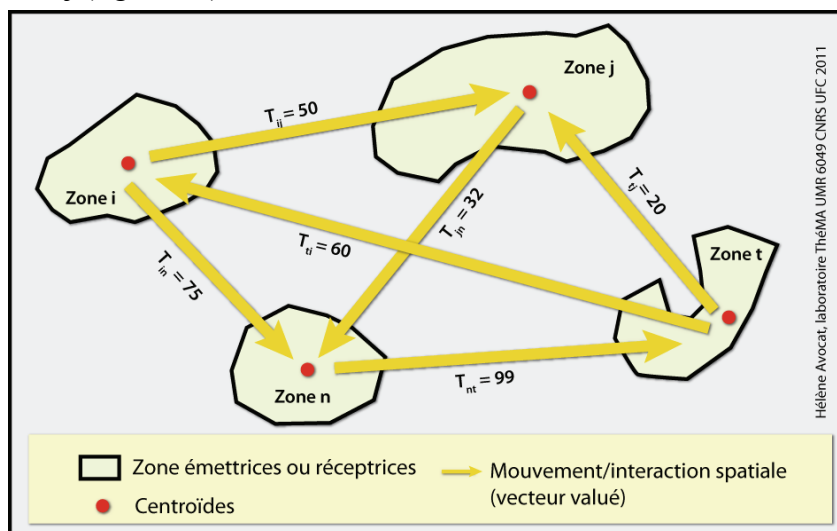


Figure 46 : le mouvement comme interaction spatiale

Selon les finalités de la recherche, l'analyse de la matrice d'interactions spatiales peut donner lieu à différents types de formalisation et de modélisation. Les modèles d'interaction spatiale les plus classiques sont destinés à exprimer l'intensité des flux ou des échanges entre un lieu d'origine et un lieu de destination en fonction des caractéristiques de ces lieux (en termes de potentiels de partants et d'attractivité du lieu d'arrivée) et d'un effet dissuasif de la distance séparant les deux lieux (Sanders, 2001). N'ayant que peu de données et peu d'informations sur les déterminants aspatiaux des processus d'approvisionnement, nous utiliserons donc ce type d'approche.

Les différentes déclinaisons des modèles gravitaires, qui font apparaître le volume des interactions entre deux lieux comme dépendant de la masse des lieux émetteurs et récepteurs et de la distance qui les sépare, peuvent ainsi être considérés comme les précurseurs de formalisations théoriques plus générales des flux rassemblés actuellement sous le terme de modèles d'interaction spatiale (Grasland, 2004). Dans le cadre de ces travaux, il s'agit d'évaluer le rôle de la distance et des masses forestières par rapport aux flux forêts-chaufferies au vu des données (non exhaustives) dont nous disposons, et donc d'éprouver la validité de l'analogie gravitaire par rapport à la problématique des approvisionnements en plaquettes forestières.

Le rôle de la distance et des masses dans la modélisation des flux

Si l'intensité des interactions s'explique en partie par l'attractivité et l'émissivité des objets spatiaux, la position relative de ces derniers nécessite l'existence de possibilités de transport, et la distance apparaît bien souvent comme un frein maintes fois constaté. Or, la distance est un paramètre clé que l'on va chercher à minimiser puisque intimement liée à la notion de valorisation des ressources locales, qui est un argument de poids pour les acteurs de la filière. Concept phare de la géographie, notamment dans le cadre de la géographie des transports ou l'étude des mobilités, la distance matérialise une séparation, une difficulté d'accès mesurée en énergie, en coût, en temps... et résume la dilution des possibilités d'intervention d'un acteur au fur et à mesure qu'il considère une zone de plus en plus vaste autour de lui. Elle est mesurée par rapport à un repère ou caractérise des couples de lieux (en l'occurrence l'espacement entre les zones de production et les lieux de consommation). C'est aussi un paramètre déterminant dans la formalisation des différents modèles se référant aux interactions spatiales, qu'ils aient une visée explicative ou prédictive. Et la plupart des théories de l'analyse spatiale qui tentent d'expliquer la localisation et la distribution des activités humaines se réfèrent ainsi au rôle majeur que joue la distance (D. Pumain, *Hypergéogéographie*, 2004). Malgré l'hétérogénéité des contextes spatiaux (distribution et localisation des objets géographiques, présence et caractéristiques des infrastructures de communication), le frein de la distance qui a pour corollaire une atténuation de l'intensité et de la fréquence des interactions avec la distance, est une régularité maintes fois constatée empiriquement, notamment par Pini et Milhaud (1995), Sanders (2004), Ullman (1980) et Gillon (1997). Ces différentes mesures de la distance peuvent ainsi être utilisées pour définir l'accessibilité d'un lieu (c'est-à-dire la capacité d'un endroit à être atteint par d'autres endroits selon Rodrigue (2009)), et les difficultés de son franchissement vont dès lors déterminer des gradients spatiaux, qui matérialisent l'éloignement à un lieu (Pumain et al., 2001).

Autre paramètre extrêmement important pour l'explication et la modélisation des flux, la masse des objets géographiques correspond à leur propension à capter des flux et donc à générer des interactions. Néanmoins, comme il s'agit ici de relations à sens unique, nous raisonnons à partir de la masse des chaufferies, que nous définissons par rapport à leur puissance. Cela nous est utile lors de la modélisation, car si les masses et les distances ne sont pas les éléments créateurs de l'interaction, ils sont en revanche un excellent descripteur de ces interactions (Pini et Milhaud, 1995). Nous nous interrogeons dès lors sur la pertinence de l'utilisation de l'analogie gravitaire pour la détermination des bassins d'approvisionnements des chaufferies et la modélisation des flux de plaquettes forestières. Ces modèles sont par ailleurs largement utilisés en géographie et en économie spatiale pour l'explication et la prévision des flux, ainsi que pour la définition d'aires de chalandise. Aucun modèle n'ayant encore été proposé pour la détermination des bassins d'approvisionnement des chaufferies, il

nous a semblé pertinent d'éprouver dans un premier temps l'adéquation de notre problématique avec ce type de modèle.

2. Des données de traçabilité à la modélisation des bassins d'approvisionnement

La problématique des interactions spatiales s'intéresse à l'intensité et à la genèse des relations entre les objets géographiques, ainsi qu'à leur prévision et aux modalités de leur réalisation (Pini et Milhaud, 1995). Pour ce faire, l'utilisation d'une matrice de flux permet de mettre en évidence les caractéristiques de l'interaction spatiale, indispensables dans une démarche de modélisation. Les matrices de flux, également appelées matrices d'interactions spatiales ou matrices origine/destination, sont une représentation matricielle des flux échangés entre les unités géographiques, et servent de base pour l'analyse et la modélisation des interactions spatiales. Ici, elles sont construites à partir des données de traçabilité fournies par les sociétés d'approvisionnement. A chaque ligne correspond une origine, une destination, une quantité de plaquettes forestières, et implicitement une distance parcourue, caractérisant l'émissivité des espaces boisés, l'attractivité des chaufferies et l'intensité des flux.

2.1. Description d'une matrice de flux et résultats dérivés de son analyse

Selon C. Grasland (2004), une matrice d'interactions spatiales comporte les informations suivantes :

- les lieux d'origine et de destination ;
- la période au cours de laquelle le flux est mesuré ;
- la nature du flux ;
- la quantification des flux ;
- le mode de transport/transfert.

Chacune de ces interactions, représentant un transfert (bilatéral ou unilatéral) entre un couple de lieux est présentée dans un tableau de la forme suivante (figure 47) :

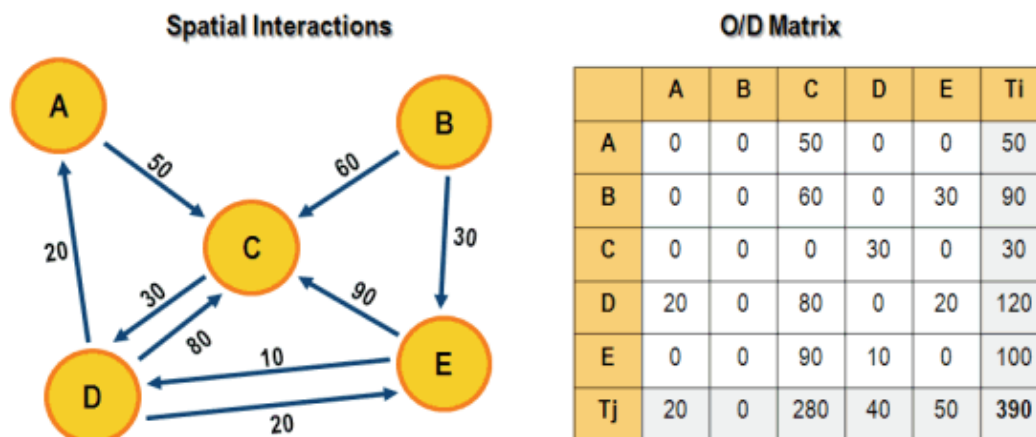


Figure 47 : exemple de matrice d'interactions spatiales

Source : Rodrigue, 2009

Les flux considérés ici étant exclusivement unilatéraux (depuis les zones forestières jusque vers les lieux de consommation), leur représentation s'effectue sous forme d'un tableau (avec les origines en colonne et les destinations en ligne) et non d'une matrice aux entrées lignes et colonnes identiques.

D'un point de vue opérationnel, la matrice (ou tableau) origine/destination permet d'effectuer un certain nombre d'opérations et de calculs sur les flux effectifs. Ici, les résultats dérivés directement de la matrice de flux mettent en évidence le degré de polarisation des installations de consommation ainsi que les zones préférentiellement exploitées à des fins énergétiques. L'analyse des interactions (quantité/distance) entre les couples de lieux référencés dans la matrice permet d'affiner les résultats, et de mettre en évidence des phénomènes de gradient spatial, d'effet frontière etc. Les données n'étant fournies que pour une saison de chauffe (hiver 2009-2010), il nous est impossible d'analyser la dimension temporelle (les données d'ONF Énergie sont néanmoins ventilées par mois, ce qui devrait nous permettre d'affiner nos analyses).

2.2. Les données constitutives de la matrice de flux de plaquettes forestières

Dans le cadre de ces recherches, seules deux sociétés d'approvisionnement ont accepté de nous fournir des données de traçabilité concernant des approvisionnements en plaquettes forestières : l'entreprise de travaux forestiers GIRARD, basée à Fertans (Doubs) et ONF Énergie. L'exploitation des données d'ONF Énergie est soumise à convention avec d'importantes clauses de confidentialité. Il s'agit en effet d'un domaine en plein développement et fortement concurrentiel, ce qui explique la réticence de bon nombre

d'acteurs de la filière à nous transmettre des informations, en dépit de la transparence dont nous nous devons de faire preuve en tant que chercheur. De ce fait il faut bien prendre conscience que les données sont loin d'être exhaustives, ce qui est un obstacle pour l'identification des déterminants de l'interaction forêt-chaufferie et la définition des bassins d'approvisionnement de ces dernières.

Les configurations sont sensiblement différentes en ce qui concerne les deux types de données brutes qui nous ont été fournies (et qui vont constituer la trame de notre matrice). En ce qui concerne l'entreprise GIRARD, les lieux de destination ne sont pas des chaufferies mais une plateforme de stockage située à l'interface de trois chaufferies de tailles sensiblement similaires. La configuration est différente pour les chaufferies alimentées par ONF Énergie au sein de l'agglomération bisontine. Bien que la situation soit censée être identique à celle de l'entreprise GIRARD (plusieurs chaufferies pour une même société), la polarisation de la consommation par la chaufferie de Planoise est telle que cette dernière apparaît comme unique destination. À cela s'ajoute le fait que la plateforme de stockage⁴³ est pour l'heure confondue avec la chaufferie, dans la mesure où elle se situe sur le site (bien qu'ONF Énergie alimente des chaufferies de taille plus modeste dans la CAGB).

Concernant la description du tableau de flux dérivé des données brutes, on peut noter les points suivants :

- Les lieux d'origine se rapportant initialement à des communes sont assimilés au centroïde du ban communal. Quant aux lieux faisant explicitement référence à des forêts, nous leur attribuerons un point de référence défini arbitrairement dans la forêt concernée dans la mesure où nous ne disposons pas des n° de parcelles forestières.
- Les lieux de destination sont connus et géoréférencés de façon précise.
- Les données couvrent dans les deux cas la saison de chauffe 2009-2010. Les volumes des flux étant plus importants (et en flux tendus) pour la chaufferie de Planoise, les données qui lui sont afférentes sont de ce fait ventilées mensuellement.
- La nature des flux et le critère de quantification sont exprimés en tonnes de plaquettes forestières.
- Le mode de transport est totalement assuré par des camions.

Les données brutes sont présentées dans l'annexe 3. Selon Rodrigue (2009), il se peut que les matrices origines/destination ne soient pas disponibles ou incomplètes, ce qui est notre cas

⁴³ Il ne s'agit pas d'une véritable plateforme de stockage, mais plus d'un stock tampon permettant d'assurer seulement quelques jours d'autonomie à la structure principale.

puisque les données de sont pas exhaustives. Dès lors, « il devient nécessaire d'estimer aussi précisément que possible les interactions spatiales, et particulièrement lorsque des données empiriques sont inexistantes ou incomplètes. Le recours à un modèle d'interactions spatiales (notamment gravitaire) se présente alors comme une option possible ».

3. L'analogie gravitaire : une méthode pertinente pour la modélisation des flux de plaquettes forestières et la délimitation de bassins d'approvisionnement ?

L'avancée des recherches dans le domaine des approvisionnements en plaquettes forestières est assez faible en raison du développement récent de la filière, et du manque d'informations (données non exhaustives)⁴⁴. Gazull (2009) passe en revue quatre grands types d'approches employés pour modéliser les prélèvements en bois-énergie en milieu sahélien (paradigme de Von Thünen, paradigme gravitaire de l'interaction spatiale, paradigme du choix discret, paradigme multi-agent). Bien que les contextes ne soient pas comparables, il livre d'intéressantes réflexions quant à la pertinence d'une approche par rapport à une autre en fonction des données et des objectifs de modélisation. Selon les paradigmes et les biens étudiés, l'analyse porte donc essentiellement sur :

- la forme (taille, géométrie) des aires de marché ;
- les relations entre les lieux de production et les lieux de vente ;
- les relations entre les lieux de consommation et les lieux de vente ;
- les positions relatives des lieux de production, de vente, de consommation ;
- les processus d'agglomération ou de dispersion (Gazull, 2009).

Le choix d'un modèle d'interaction spatiale est influencé par un niveau d'agrégation pertinent de l'information et des comportements, du niveau micro des individus au niveau macro du marché dans son ensemble. Une approche individu-centrée est ici trop complexe à mettre en œuvre en raison du manque de transparence au sein de la filière d'approvisionnement et de problème de collecte d'une masse importante d'informations individuelles, posant des problèmes de validation. En revanche, en présence de données agrégées (même avec des matrices d'interactions incomplètes), le recours à un modèle de type gravitaire n'est pas aberrant dans la mesure où l'une des finalités de ce type de modèle est justement la délimitation des aires d'attraction (Pumain et al., 2001). L'intérêt de l'analogie gravitaire a été mis en évidence dès les années 1900 par l'économiste William Reilly (1931) pour l'estimation d'aires d'attraction d'établissements de commerces et de services. Cependant les applications

⁴⁴ Beaucoup d'acteurs ont préféré de ne pas divulguer leurs sources d'approvisionnement en dépit de la transparence et du respect de la confidentialité auxquels nous nous étions engagés.

de ce modèle sont aujourd'hui nombreuses et diversifiées, et permettent de mettre en évidence des phénomènes d'attraction/polarisation de diverse nature, depuis des thématiques classiques comme les échanges commerciaux (Josselin et Nicot, 2003) à des aspects beaucoup moins conventionnels comme le degré de médiation paysagère de certains sites touristiques *via* les cartes postales (Litot, 2010). Or, d'un point de vue conceptuel, les bassins d'approvisionnement des chaufferies correspondent à des aires de marché (ou aires d'influence), ce qui justifie le recours à une telle méthodologie pour tenter d'expliquer, voire de prévoir, la portée des interactions « forêt-chaufferie » dans une démarche de structuration globale de la filière.

3.1. Forces et limites de l'analogie gravitaire

3.1.1. Un modèle pour l'explication et la prévision des flux largement utilisé en géographie et en aménagement

Dès le milieu du XIX^{ème} siècle, les chercheurs remarquent des régularités dans les flux, s'exprimant selon une géométrie très particulière, l'intensité et la fréquence des interactions décroissant plus vite que linéairement avec la distance qui sépare les lieux. Une analogie avec la loi de la gravitation est alors énoncée, transposant la notion de force d'attraction susceptible d'orienter les trajectoires célestes à celle d'intensité d'interaction suscitant un flux entre zones géographiques (Pumain et al., 2001) et « la paternité du modèle gravitaire est communément attribuée à William J. Reilly, qui, dans un ouvrage intitulé *the law of retail gravitation*, publié à New-York en 1931, transpose explicitement la loi de Newton en géographie. En réalité, Reilly reprenait les intuitions de Renst Georg Ravenstein, lequel, dans ses *law of migration*, ouvrage publié en 1885, dressait une carte des courants migratoires fondée sur la loi de la gravitation » (Parrochia, 2006). Bien que les modèles gravitaires se soient dans un premier temps intéressés à la mobilité des personnes⁴⁵, des arrangements ont par la suite été effectués pour d'autres types de flux (marchandises, informations, etc.), et leur utilisation s'est largement répandue dans les domaines de la géographie, de l'aménagement et de l'économie spatiale. Néanmoins, leur utilisation ne va pas sans soulever un certain nombre d'interrogations, liées notamment à la validité des paramètres estimés. L'objectif de ce chapitre est donc de réfléchir à la pertinence de l'utilisation de ce type de modèle dans le cadre de notre problématique, et aux moyens de le mettre en œuvre. Cela nous permet également d'appréhender la relation « distance-intensité des flux en plaquettes forestières », qui est un bon moyen de réfléchir au concept de localité.

Après avoir étudié les flux effectifs au moyen de méthodes d'analyse des interactions spatiales et décrit les caractéristiques fondamentales de la forme et de l'intensité des flux de plaquettes forestières, la deuxième étape de notre protocole consiste à émettre des

⁴⁵ Et continuent de s'y intéresser majoritairement.

généralisations à partir de ces caractéristiques qui puissent expliquer des flux similaires. Pour cela, le recours à un modèle nous permettant de déterminer des aires d'influence théoriques des chaufferies est indispensable, et l'utilisation du modèle gravitaire nous semblait à première vue pertinent dans la mesure où il est très largement utilisé et que les déterminants masse et distance expliquent bon nombre d'interactions spatiales.

Depuis les années 40, les tentatives de modélisation des interactions spatiales sont largement dominées par les modèles de type gravitaire. Ils font partie des premiers modèles à avoir trouvé une application en sciences sociales, et continuent aujourd'hui à être utilisés, développés et améliorés (Haynes et Fotheringham, 1984). Ils trouvent ainsi de multiples applications dans les domaines de la planification urbaine, les analyses de transport, la construction de centres commerciaux (géomarketing), l'aménagement etc. Selon D'Aubigny et al. (2000), cela est entre autres dû à l'évidence de leurs hypothèses de base (les échanges entre origines et destinations dépendent des capacités d'exportation et d'importation des lieux ainsi que de leur degré de séparation) et à la simplicité de leur formalisme mathématique. C'est un moyen de déterminer les éléments T_{ij} (cf. figure 47) de la matrice d'interactions spatiales que l'on souhaite reconstituer. Toutefois, même s'il résume très souvent de manière satisfaisante la configuration des flux dans l'espace géographique, et intervient dans l'explication de presque toutes les structures spatiales ou processus spatiaux, la construction théorique sous-jacente à ce modèle (qui le déduirait par exemple d'hypothèses faites au niveau de propriétés associées aux lieux) est encore hésitante (Pumain et al., 2001).

3.1.2. Théorie de la relativité géographique et limites du modèle gravitaire

Bien que très souvent utilisée dans les sciences géographiques, au point qu'elle est citée comme un modèle incontournable auquel on recourt de façon quasi-systématique pour expliquer les déterminants des interactions spatiales (du moins dans un premier temps) (Pumain et al., 2001 ; Mikkonen et Luoma, 1999), l'analogie formalisée de la formule d'attraction universelle de Newton peut néanmoins poser question (Pini et Milhaud, 1995). Le débat sur les limites du modèle gravitaire s'inscrit dans un débat plus vaste qui repose sur la pertinence de l'utilisation de modèles en géographie (ou d'autres sciences sociales) (Dobruskes et Marrisal, 2002). L'objectif de ce paragraphe n'est pas dresser une liste exhaustive des incohérences posées par la transposition de l'analogie gravitaire à l'espace géographique évidemment différent (de par sa dimension anthropique) de l'espace cosmologique, mais de porter un regard critique sur les limites liées à l'utilisation de ce modèle dans le cadre de ce travail.

Pour Yamashita (1995), toute analogie d'une discipline scientifique à une autre pose problème, que ce soit au niveau de l'implémentation du modèle ou au niveau de son

interprétation. Dans ces conditions, il semble logique que la transposition de la théorie de la gravitation de la sphère physique au domaine géographique puisse être problématique. Parrochia (2006) insiste sur le fait que l'application des principes de la gravitation tient sous la condition qu'un certain nombre d'hypothèses soient satisfaites (espace continu, globalement isotrope, etc.). Les discontinuités géographiques complexifient notablement la structure de l'espace. K. Krivoruchko et A. Gribov, dans un exposé au colloque Geo-ENV à Barcelone⁴⁶, montrent en effet qu'en présence de bord ou de fractures, les corrélations fondées sur des distances euclidiennes ne sont plus valables, et proposent des méthodes afin de rétablir la continuité de l'espace, même en présence d'asymétries, de dénivellations, de bords ou de ruptures.

Pour Mikkonen et Luoma (1999), le problème réside davantage dans le calibrage du modèle, dans la mesure où les paramètres de l'équation ne sont pas constants et varient dans le temps, ce qui peut évidemment être un inconvénient dans une optique d'aménagement et de planification s'intégrant dans une plage temporelle assez vaste. D'autres auteurs (Pumain et al., 2001 et , Dobrukes et Marissal, 2002), mettent en avant la pauvreté théorique de ce modèle et la simplicité de la formule de base qui en font un modèle très réducteur quant aux facteurs à prendre en compte pour reconstituer voire expliquer un phénomène d'interaction spatiale. Ainsi l'analogie avec le modèle newtonien ne constitue pas une explication pour la géographie, et on a encore établi que des interprétations partielles du modèle gravitaire, une véritable explication devant s'appuyer sur la connaissance des comportements dans l'espace géographique (D. Pumain, hypergéométrie 2004). Bien que d'une grande utilité pratique, c'est un modèle statique qui ne prend pas en compte l'évolution de la configuration, en particulier celle engendrée par les flux (D. Pumain, hypergéométrie 2004). La structuration des approvisionnements en plaquettes forestières provenant d'opérations ponctuelles (chantier de défrichage de nettoyage, travaux liés à la construction d'infrastructures de transport) pourrait induire des biais dans la régularité des flux qui pourrait apparaître dès lors comme une limite à l'utilisation de l'analogie gravitaire. D'autre part, le modèle est statique, c'est-à-dire qu'il traite des relations à un moment donné, mais qu'il n'intègre pas la notion de temps. Il va donc chercher à rendre compte de la situation observée et n'est pas capable d'expliquer le processus qui aboutit à cette situation (Gillon, 2007). Cette condition est imposée par la disponibilité des données, puisqu'il faut absolument des séries temporelles pour pouvoir intégrer la dynamique.

Si l'utilisation du modèle gravitaire se révèle insatisfaisante, en revanche l'analyse des écarts au modèle peut être extrêmement enrichissante et féconde ; et permet de cerner les phénomènes qui se présentent autrement qu'attendu, en raison d'aspects économiques, politiques, sociaux peu ou pas pris en compte initialement (Dobrukes et Marissal, 2002). On en revient alors aux réserves mises en avant par C. Grasland : "de nombreux auteurs

⁴⁶ Cité dans Parrochia, (2006).

n'acceptent pas la transposition au comportement humain des lois de la physique, et tentent d'expliquer autrement la décroissance des interactions avec la distance". Ces explications peuvent être de nature économique : l'effet de la distance doit s'interpréter comme l'ajustement de l'offre et de la demande en fonction du coût de déplacement. La distance n'agit que si elle participe au coût de mise en relation, les acteurs obéissant à un principe de rationalité économique. Elles peuvent être également de nature sociologique et comportementale ou encore psychologique : plus la distance augmente, plus le nombre d'occasions interposées est élevé.

Ainsi, lorsqu'on a appliqué un modèle (même insatisfaisant), on peut trouver autant, voir plus de sens, à l'analyse entre réalité et modèle, qu'aux résultats du modèle eux-mêmes, et l'utilisation d'un modèle permet ainsi, en première analyse, de voir si un phénomène étudié s'y conforme, quitte à ajuster ensuite l'explication ou à la compléter. Ce qui pose la question des rôles des déterminants "puissance" et "distance" dans les interactions spatiales représentées par les flux de plaquettes forestières.

3.2. Principes et formulation mathématique de base

Les hypothèses de base du modèle gravitaire sont que le nombre T_{ij} des interactions entre deux zones de centres i et j est proportionnel au produit des masses M_i et M_j de chaque zone et inversement proportionnel à la distance. Dans sa forme la plus simple, le modèle gravitaire s'écrit :

$$T_{ij} = kM_iM_j / d_{ij}^2$$

Équation 1: formulation la plus simple du modèle gravitaire

Mais d'emblée un arrangement peut être apporté quant à l'exposant de la distance :

$$T_{ij} = kM_iM_j d_{ij}^{-a}$$

Équation 2 : Équation du modèle gravitaire (modification de l'exposant de la distance)

- Avec M qui représente la masse des objets géographiques en interaction. Les masses représentent une estimation de ce qui « explique » trivialement (le plus généralement), la capacité de l'émission ou de l'attraction d'un lieu pour les flux (Pumain et al., 2001) ;
- k qui est une constante de proportionnalité servant à établir la relation entre le volume de flux et celui des masses ;

- a qui est un paramètre représentant la difficulté de franchissement de la distance (plus sa valeur est importante et moins il y a d'échanges à une distance donnée)

Les grandeurs qui vont représenter dans le modèle les masses et la distance sont très variables selon les applications du modèle gravitaire (Pumain et al., 2001): dans notre cas, les masses font référence à des quantités de plaquettes absorbées ou produites. Ainsi la masse de la zone réceptrice est assimilée à la puissance des chaufferies exprimée en MW et traduisible en mètres cubes apparents plaquettes, tonnes équivalent pétrole, ou tonnes de plaquettes forestières selon les unités de mesure utilisées par les professionnels de la filière d'approvisionnement ; et la mesure de la masse de la zone émettrice est théoriquement donnée par la quantité de plaquettes forestières potentiellement produite par (ces) zone(s)⁴⁷. De façon très basique et en partant du postulat que les flux de plaquettes forestières tendent à s'amenuiser à mesure que la distance augmente, nous pouvons d'ores et déjà supposer que les flux (nombre d'interactions) entre les zones de production i et les chaufferies j (F_{ij}) dépendent à la fois des caractéristiques (des masses) des zones émettrices et réceptrices. Ils peuvent être modélisés de la façon suivante :

$$F_{ij} = k C_i P_{0j} d_{ij}^{-a} \text{ où :}$$

- k est le paramètre qui sert à établir la relation entre le volume des flux et celui des masses (Pumain et al., 2001). Il s'agit d'une constante déterminée lors de l'ajustement du modèle
- a est le paramètre qui représente la difficulté de franchissement de la distance (plus sa valeur est grande et moins il y a d'échanges à une distance donnée)
- C_i est la variable qui caractérise la chaufferie et qui représente sa consommation en tonnes ou en MAP
- P_{0j} est la variable qui caractérise les lieux de production, et qui représente le potentiel P_0 également exprimés en tonnes ou en MAP
- d_{ij} est la distance entre les chaufferies et les lieux de production, exprimée en km.

La distance est un paramètre qui pose problème, car nous pensions initialement le traduire en distance-coût en arguant que le prix du transport était proportionnel à la distance parcourue et devait par conséquent être un paramètre à minimiser. Cependant, même si le principe de base reste vrai (plus la distance parcourue est longue, plus la quantité de carburant consommée est importante et par conséquent plus le poste de dépense lié à la distance parcourue est important), les systèmes de forfaits proposés par les transporteurs et le coût de revient parfois très bas de la matière première compensent le faible coût des transports et invalident (partiellement du moins) notre hypothèse. Il serait intéressant d'évaluer les transports sous la forme d'un coût écologique lié aux émissions de polluants, et dont un certain seuil ne devra pas être dépassé sous peine de griser une énergie censée être verte. Au-delà du coût

⁴⁷ Potentiel dont la méthodologie d'estimation est détaillée dans le premier chapitre.

écologique, il est intéressant d'évaluer le coût de l'énergie (et donc des transports) pour en mesurer l'impact sur les flux. La distance est évaluée dans un premier temps de façon euclidienne même si ce n'est guère satisfaisant puisque l'hétérogénéité de l'espace géographique et des réseaux n'est pas prise en compte. Une mesure des distances-réseaux en faisant l'hypothèse du chemin le plus court est préférable.

3.3. Modèle gravitaire, aires d'influence et bassins d'approvisionnement

D'un point de vue méthodologique, les découpages spatiaux des aires d'influence sont la conversion en surface de l'intensité d'une relation entre les unités géographiques, et correspondent à des zones à l'intérieur desquelles certaines unités sont considérées comme influentes, voire dominantes (Pini et Milhaud, 1995), ce qui revient à une allocation de l'aire d'influence à son unité dominante. La notion d'influence se mesure à partir des fréquences ou des probabilités de transfert vers le centre. L'attractivité étant centripète et cumulative, elle peut donc obéir à des logiques gravitaires. De manière très simple, dans un premier temps, l'attractivité d'un centre i sur un objet géographique j est proportionnelle à son importance (P_i) et inversement proportionnelle au carré de la distance (d_{ij}) qui les sépare. Cette loi, dite loi de Reilly s'écrit $A_{ij} = P_i / d_{ij}^2$ et permet de décrire la forme générale de l'aire d'attraction (ici du bassin d'approvisionnement) de la chaufferie, et de calculer comment des objets géographiques donnés (ici des quantités de plaquettes forestières) peuvent se répartir entre plusieurs centres d'inégales importances. Notons que ce modèle ne fait intervenir que la "masse" du pôle attracteur (ici la consommation de plaquettes) : il présente donc l'inconvénient de ne prendre en compte que la consommation, et ne s'intéresse à la production que par la distance entre lieux de consommation et de production. « Avec ce modèle, et en utilisant la distance euclidienne, la représentation géométrique des points pour lesquels un point d'offre a la même utilité est un cercle centré sur lui-même (isodyne), et si l'on trace les isodynes correspondant à des points d'offre concurrents, l'intersection de deux isodynes de même valeur définit deux points où l'utilité des deux points d'offre est égale » (Grimeau et Wayens, 2003). Cf. figure 48.

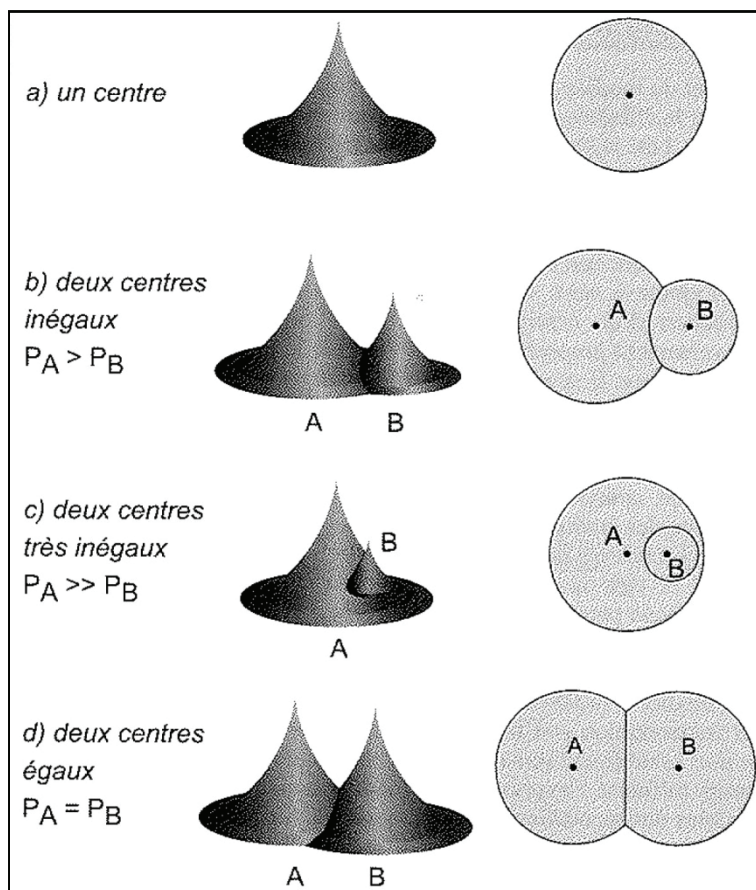


Figure 48 : Forme générale des aires de marché (un et deux centres)

Source : Pumain et al. (2001)

Le point d'équilibre x est la solution du problème du partage du marché, et la formule de la distance entre le x et j s'écrit de la manière suivante :

$$d_{xj} = d_{ij} / (1 + \sqrt{(P_i/P_j)})$$

A ce modèle déterministe, Huff (1964) préfère une approche probabiliste où le territoire est découpé selon un zonage ayant la même probabilité de fréquentation. Il va établir un potentiel pour tout point de l'espace, entendu comme la somme des attractivités vers chaque pôle de l'espace étudié. L'attraction vers l'un des pôles donnés est une simple probabilité correspondant au rapport entre l'attractivité de ce pôle sur le point d'observation et le potentiel du point d'observation (Faivre-Mallefroy, 2010). Néanmoins, « si les ordres de grandeur des aires de marché correspondent généralement à celle des centres, les limites observées ne sont pas des frontières linéaires et rigides : il s'agit plutôt d'une zone floue où les échanges se font tantôt en faveur d'un centre et tantôt en faveur de son ou ses voisins" (Pumain et al., 2001). L'intérêt de cette méthode est de prendre en compte à la fois l'attractivité des unités géographiques, la notion de distance et la "concurrence" présente.

Conclusion du chapitre 4

Les processus d'approvisionnement en plaquettes forestières sont matérialisés par des interactions spatiales qui sont l'expression de flux entre des lieux de production (forêts et espaces boisés) et des installations de consommation (chaufferies). Le problème qui se pose ici est donc d'étudier ces flux au moyen d'une matrice origine-destination et de réfléchir au concept de bassins d'approvisionnement, qui est la traduction surfacique de l'intensité de ces relations. L'objectif poursuivi est d'étudier la répartition spatiale des flux et de mettre en évidence l'emprise spatiale des bassins d'approvisionnement. Les hypothèses de base sont que la puissance est et la taille du bassin d'approvisionnement sont deux paramètres corrélés, et que l'intensité des flux décroît à mesure que la distance au point de consommation augmente. Cette deuxième hypothèse doit se penser dans un contexte de "rationalité environnementale" dont se réclament la quasi-totalité des acteurs de la filière et qui implique une nécessaire minimisation des distances de transport. Au vu de ces deux éléments, nous supposons donc que les masses (puissance des chaufferies) et la distance ont un rôle déterminant dans la configuration des approvisionnements en plaquettes forestières, et que dès lors l'analogie gravitaire (largement utilisée en géographie) pourrait constituer un socle de réflexion intéressant. Le recours à ce genre de modèle a pour objectif d'estimer empiriquement l'effet de la distance et de l'attraction des chaufferies sur les pratiques d'approvisionnement. D'autre part, "par la fonction d'interaction qu'elles intègrent, les modélisations de type gravitaire font entrer la notion de portée limite dans la délimitation des zones d'attraction" (T. St-Julien, *Hypergéométrie*). Or cette notion de seuil, qui "désigne la portée limite de l'interaction spatiale, correspondant le plus souvent à la variable distance" (*idem*) est très intéressante à étudier dans le cadre de notre problématique puisqu'elle permet de mettre en évidence la structure des zones d'attraction des chaufferies et les limites de ces dernières. Cependant, si cette démarche est intéressante pour l'analyse des descripteurs de l'interaction spatiale et la compréhension des processus d'approvisionnement, une démarche exploratoire fondée sur la satisfaction de la demande peut également contribuer à la définition d'aires d'approvisionnement optimisées et satisfaisant la contrainte de minimisation des distances de transport. Néanmoins une telle démarche ne peut s'envisager sans avoir préalablement défini les quantités de biomasse ligneuses énergisables.

Chapitre 5

Quantifier la fraction énergisable des ressources ligneuses

De la ressource théorique au potentiel effectif...

L'intérêt d'estimer la biomasse des arbres et des forêts est considérable, que ce soit à des fins d'aménagement forestier ou dans une optique de recherche scientifique (Parresol, 1999). Et l'augmentation des besoins de plaquettes forestières, ainsi que la valorisation de tous les compartiments de l'arbre ont eu pour corollaire le développement de méthodes de mesure et d'évaluation de la ressource ligneuse (Husch et al., 1982 ; Philip, 1994). Les potentiels en plaquettes forestières forment une part de la fraction directement énergisable des espaces boisés, forestiers ou non, ce qui implique de bien connaître la ressource ligneuse et ses modalités de gestion/exploitation. Ainsi l'adéquation [présence de forêt = présence de bois-énergie] n'est pas vérifiée en raison de contraintes de mobilisation des bois inhérentes à la configuration de la ressource d'une part, et aux pratiques gestionnaires d'autre part. Plusieurs méthodes ont été élaborées à différents niveaux d'échelle et *a fortiori* à différents niveaux de précision, notamment à partir des données de l'Inventaire Forestier National. Le Cemagref (2007) détaille les études existantes au niveau national en matière d'analyse des quantités de biomasse forestière disponible « pour de nouveaux débouchés énergétiques et industriels ». La plupart de ces méthodes d'estimation de la ressource ligneuse ont été développées par des organismes participant à la gestion des espaces forestiers (ONF, CRPF, COFOR, IFN) et ne sont par conséquent pas exploitables telles quelles dans le cadre de ces travaux. La démarche générale de ces modèles visant à déterminer des volumes ligneux exploitables à des fins énergétiques est décrite dans la figure 49. Après avoir caractérisé la ressource ligneuse (essences, types de peuplement, volumes etc.), les auteurs définissent la part énergisable en tenant compte de contraintes technico-économiques et environnementales.

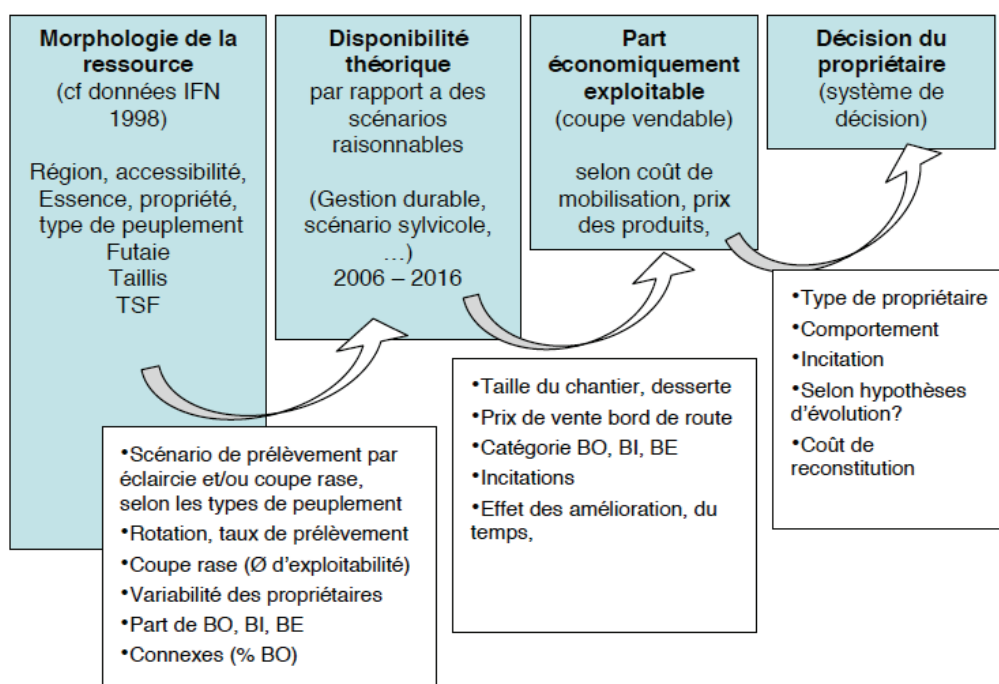


Figure 49 : méthodologie générale d'estimation des volumes ligneux exploitables à des fins énergétiques

Source : Cemagref (2007)

Bien que cette méthode tienne compte d'un grand nombre de contraintes, il convient néanmoins de dire que certains paramètres sont très difficiles à estimer en raison des incertitudes pesant sur le comportement décisionnel des propriétaires, l'estimation des contraintes économiques dans un contexte de volatilité des prix, de l'absence de scénarii sylvicoles pour une fraction des espaces forestiers, etc.

L'objectif est de s'appuyer sur les méthodes existantes et de développer, en fonction des données que nous avons à disposition et de la finalité de notre modèle, une démarche nous permettant d'estimer des quantités de plaquettes forestières mobilisables en fonction des contraintes inhérentes aux espaces producteurs et à la mobilisation de la biomasse ligneuse.

Une telle démarche implique :

- De caractériser et quantifier la biomasse ligneuse.
- De déterminer la fraction énergisable de cette biomasse ligneuse.

Les méthodes et modèles issus de la foresterie s'appuient tous sur des données d'inventaire forestier de l'IFN pour caractériser la ressource forestière (les arbres hors forêt ne sont jamais considérés), alors que l'information géographique constitue un apport intéressant pour la cartographie de l'emprise du couvert boisé et de la biomasse.

1. Les différentes méthodes d'estimation de biomasse forestière

Le Cemagref (2007) a recensé et synthétisé les études existantes au niveau international, en matière de « *biomasse disponible pour de nouveaux débouchés énergétiques et industriels* ». Ces dernières, élaborées le plus souvent par des forestiers ou institutions en rapport avec la gestion forestière (IFN, ONF, AFOCEL etc.) « traitent de points très divers de la filière bois-énergie, depuis la ressource disponible en forêt, jusqu'à la construction de la chaudière, en passant par les différents moyens de récolte », et sont plus ou moins élaborées selon les objectifs fixés préalablement et la finesse des données exploitées. L'objectif ici n'est pas d'étudier en détail les 288 documents recensés par le Cemagref (2007)⁴⁸, mais de nous concentrer sur les études réalisées à un échelon régional, départemental ou local et d'analyser les méthodes de calcul sous-jacentes, les données utilisées et les résultats présentés (notamment leur degré de spatialisation).

1.1. Les modèles issus de la foresterie

1.1.1. Typologie des études existantes au niveau national

L'estimation de la ressource disponible à des fins énergétiques est une entreprise complexe en raison de l'hétérogénéité de la ressource, des modes de gestion/exploitation qui leur sont inhérents, et des différents usages afférents à la matière ligneuse (bois d'œuvre, bois-énergie, bois d'industrie). De plus, chaque type d'acteur développera une méthodologie différente en fonction de son domaine de compétence et de la finalité à laquelle il souhaite arriver. Ainsi le forestier n'aura pas le même regard que l'approvisionneur ou que le géographe en raison de sa connaissance du terrain et de sa maîtrise des règles sylvicoles. Hesse (1991) in (Cemagref, 2007) a répertorié cinq grands types de méthodes utilisables pour estimer la **disponibilité** en bois⁴⁹. Le but de ces analyses est de définir des volumes de bois récoltables à des fins autres que le bois d'œuvre. Ces dernières ne sont néanmoins que très sommairement détaillées, et les résultats diffèrent parfois beaucoup selon les méthodes de calcul utilisées.

- Les **méthodes empiriques** permettent, à partir de la production courante (mesurée par l'IFN) d'évaluer la disponibilité réelle en appliquant un coefficient réducteur qui dépend des conditions économiques du moment.

⁴⁸ Dont la majeure partie (53%) concerne des études réalisées au niveau national, voire européen ou mondial.

⁴⁹ Cemagref, (2007) étant le document de référence en matière de recensement d'études sur la disponibilité ligneuse, le présent chapitre en est par conséquent largement inspiré.

- Les **méthodes de projection des données IFN** dans le temps fournissent quant à elles une prévision de prélèvements annuels possibles, par projection des informations dans le temps, et ne sont valables que si la structure en surface et en volume, ainsi que la production courante, restent constantes pendant la période de calcul. La méthode des disponibilités brutes⁵⁰ utilisée en fait partie.

Ces deux méthodes nous intéressent particulièrement dans le cadre de ces travaux car elles sont relativement simples à mettre en œuvre (en comparaison aux modèles basés sur des scénarii sylvicoles poussés et des données dendrométriques extrêmement précises). D'autre part, elles intègrent une dimension temporelle extrêmement importante.

- Les **méthodes de transposition des données IFN dans le temps** permettent de calculer la disponibilité par classe d'âge ou de diamètre, mais nécessitent une parfaite maîtrise des règles sylvicoles, et supposent une production courante constante, ce qui justifie que nous ne recourions pas à cette méthodologie.
- Les **méthodes de simulation des croissances** permettent de modéliser l'évolution future des peuplements par simulation de l'évolution des récoltes ou du matériel sur pied selon un ou plusieurs scénarios de gestion.
- Les **modèles du secteur forestier** intègrent, en plus du calcul de la disponibilité, des facteurs économiques relatifs au développement de la filière forêt-bois.

Les données utilisées sont celles de l'IFN (surface, volume moyen par hectare, et production courante moyenne par ha et par an).

Les études précises à niveau infra-départemental sont très rares, et les résultats de ces études ne sont que très rarement présentés sous forme cartographique, et la dimension spatiale étant quasiment absente (sauf dans le cadre des PAT). De plus il n'y a aucune prise en compte des espaces boisés non forestiers, excepté pour la dernière version de la méthode développée conjointement par l'IFN et SOLAGRO. Mais là encore le niveau de détail le plus fin est la région administrative.

⁵⁰ www.dispo-boisenergie.fr

1.1.2. Quelques exemples

1.2.1.1. De l'estimation des récoltes à celle des gisements en bois-énergie : les méthodes utilisées par l'ONF et le CRPF

Parmi les méthodes qui nous intéressent particulièrement, nous pouvons citer **les méthodologies utilisées par l'ONF et le CRPF en 2006** en Champagne-Ardenne et en Rhône-Alpes. La première méthode donne une estimation future pour chaque catégorie de produits⁵¹, et se base sur un bilan de la récolte à l'échelle régionale à partir duquel est effectuée une estimation prospective de la récolte sur les mêmes produits sur les 10 années à venir. La seconde permet, quant à elle, d'estimer par essence principale et en fonction de classes d'exploitabilité et de diamètres, le gisement disponible. Selon le Cemagref (2007), « l'intérêt de cette méthode est qu'elle prend en compte les caractéristiques des peuplements et un certain nombre d'éléments sylvicoles », et la formule utilisée est la suivante :

$$K = [D + ((V_{ha} - V_{th})/S) - U] * (1 + T_1) * T_2$$

Avec :

K : Gisement bois-énergie net annuel

D : accroissement – mortalité

V_{ha} : volume à l'hectare

V_{th} : volume théorique idéal, qui dépend du type de peuplement et de la région naturelle IFN

S : durée d'atteinte de l'objectif, fixée ici à 50 ans

U : prélèvement par l'exploitation actuelle (bois-bûches, bois d'industrie et autres). Le prélèvement est issu d'un taux moyen donné par l'IFN sur les 12 années qui ont précédé l'inventaire, et est appliqué systématiquement aux zones d'exploitation facile, sachant qu'on ne connaît pas exactement la répartition de ce prélèvement entre les différentes classes d'exploitabilité.

T_1 : taux de branches

T_2 : taux de production de petits bois par la sylviculture.

L'ensemble des résultats produits dans ces deux études résulte de traitements mathématiques et statistiques, et leur présentation se fait essentiellement sous forme de tableaux récapitulants des volumes exploitables par classes d'exploitabilité pour l'échelon régional. Aucune présentation cartographique n'a été présentée dans les rapports finaux. Il n'y a *a priori* pas d'intégration de la dimension spatiale en tant que telle dans les traitements effectués.

⁵¹ Houppiers feuillus, bois d'éclaircies précoces en peuplements feuillus, houppiers et rémanents résineux, taillis, grumes et surbilles de mauvaise qualité, billon d'industrie, grumes de qualité.

1.2.2.1. De la définition des disponibilités forestières brutes à la simulation par classe d'âge : la méthodologie IFN-AFOCEL

La méthode utilisée par l'IFN et AFOCEL consiste à répartir les formations boisées de production en différents ensembles de peuplements (le "domaines d'étude"), susceptibles d'être soumis à un même scénario de gestion puis à appliquer un ou plusieurs scénarios moyens à chaque domaine d'étude ainsi défini (scénario actuel, ou optimal) durant une période de quinze ans. Les scénarios actuels sont estimés après comparaison des deux derniers inventaires départementaux disponibles. Deux simulations ont été mises en place, selon le type de structure forestière, présentées ci-après.

- La *méthode des disponibilités forestières brutes*, concerne les peuplements inéquiens (futaie irrégulière ou mélange taillis/futaie) pour lesquels aucun âge ne peut-être renseigné. Le calcul des disponibilités forestières brutes repose sur une approche statique consistant à séparer les peuplements en deux groupes (régénération et amélioration) en fonction d'un diamètre pour la futaie, ou d'un âge d'exploitabilité pour le taillis. Les données IFN renseignent chacun de ces groupes par la surface, le volume sur pied et la production nette, et le simulateur fournit une moyenne annuelle des disponibilités de bois sur l'ensemble de la période considérée. Ces disponibilités en coupe d'amélioration ou de régénération sont ensuite ventilées par catégorie de propriété, classe d'exploitabilité, structure forestière, essence, classe de dimension et type de produits. Cette méthode ne permet néanmoins pas de restituer l'état des peuplements après prélèvements et d'apprécier l'évolution future de la ressource sur pied.

- La *méthode des simulations par classe d'âge* (figure 50), que l'on retrouve également dans la dernière version de l'évaluation du gisement bois-énergie proposé et mis en ligne par l'ADEME⁵², permet d'estimer les disponibilités en bois dans les peuplements équiennes de type futaie régulière et taillis simples, et a été mis en œuvre par le logiciel PCSIMUL développé par l'IFN. Il s'agit de simuler la croissance des peuplements à partir de leur état initial, caractérisé par une surface, un volume unitaire moyen à l'hectare (en m³/ha), et une production courante (en m³/ha/an). La simulation est réalisée par itérations successives au niveau de chaque domaine d'étude selon des scénarios de récoltes.

⁵² www.dispo-boisenergie.fr

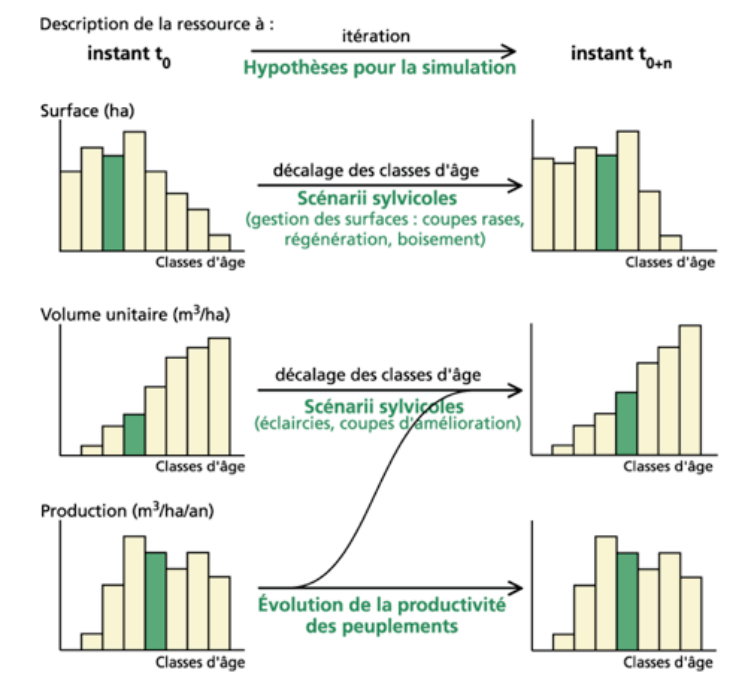


Figure 50 : méthode des simulations par classe d'âge.

Source : Cemagref (2007) p. 15 et évaluation du gisement bois-énergie de l'ADEME.

Là encore la dimension spatiale ne transparait pas nettement, si ce n'est *via* quelques représentations cartographiques par "bassin d'approvisionnement" d'éléments qui auraient pu faire l'objet d'une présentation sous forme de tableaux. Sur le site Internet utilisant cette méthodologie⁵³, l'utilisateur a la possibilité d'obtenir des informations personnalisées par département ou bassin d'approvisionnement. Néanmoins la présentation des résultats se fait de manière agrégée à l'échelon retenu sous forme de tableaux. A travers ces deux premiers exemples, nous voyons que la question de l'estimation des ressources ligneuse à l'échelon infra-départemental (et plus généralement à l'échelon infra-régional) est délicate et qu'il n'y a pas de représentation spatialisée des résultats (sauf dans les Plans d'Approvisionnement Territoriaux), ne serait-ce que pour visualiser l'emprise spatiale de la ressource et son accessibilité (alors que l'IFN dispose d'une cartographie forestière).

1.2.3.1. Une des méthodologies les plus abouties : la méthode IFN-SOLAGRO

Enfin, l'une des méthodes particulièrement abouties est la méthode d'évaluation du gisement de bois pour l'énergie dite « **IFN-SOLAGRO** » (figure 51). Initialement créée en 2004⁵⁴, la méthodologie a récemment été améliorée en vue de prendre en compte le gisement constitué par les peupleraies et les arbres hors forêts. Cette méthode vise à quantifier la disponibilité en biomasse ligneuse disponible dans les gisements forestiers et non forestiers en fonction des

⁵³ www.dispoboisauvergne.ifn.fr, consulté le 12 mai 2010.

⁵⁴ <http://www.boisenergie.ifn.fr/> (ancienne version) et www.dispoboisenergie.fr (méthode actualisée).

types d'usages potentiels des bois (définis selon des critères physiques et qualitatifs), et donne lieu à la définition de deux types de gisements : disponibilités brutes d'une part et gisement effectif d'autre part. Le passage de l'un à l'autre implique la prise en compte de contraintes :

- techniques (accessibilité des ressources, types d'usage des bois) ;
- environnementales (gestion durable des ressources, maintien de la fertilité des sols) ;
- économiques (conditions économiques d'exploitation, marché des bois).

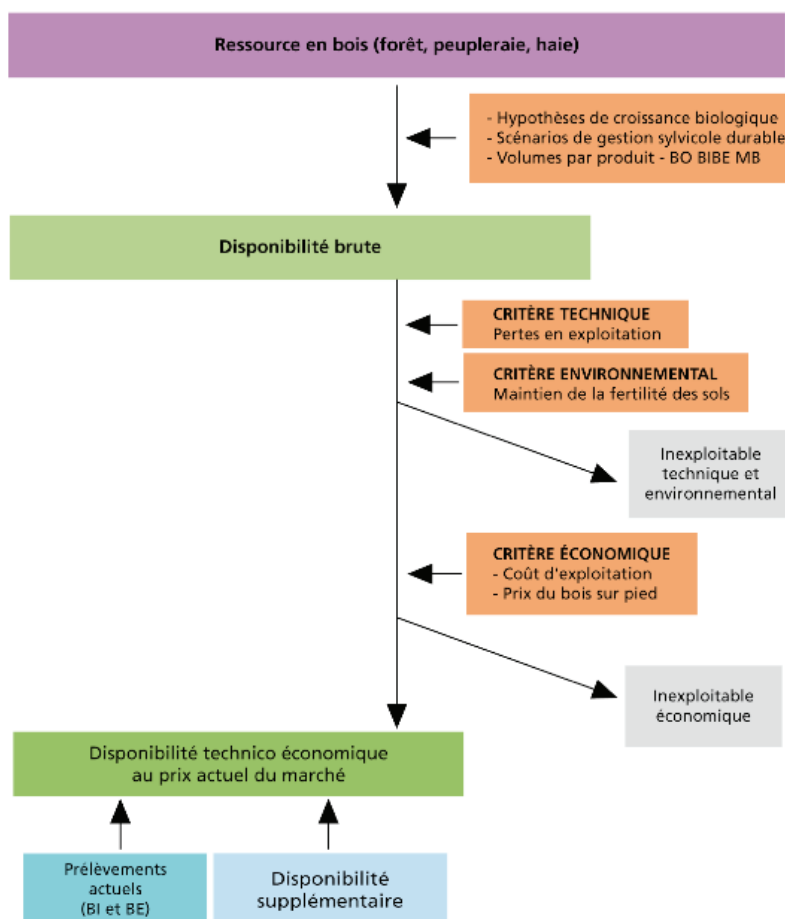


Figure 51 : méthode d'évaluation du gisement en bois-énergie (ADEME-IFN-SOLAGRO)

Le calcul des disponibilités en bois dans les forêts s'opère ainsi en plusieurs étapes successives⁵⁵. Les deux premières étapes visent à caractériser la ressource en vue d'en déduire une « disponibilité brute par parcelle virtuelle ».

Etape 1 : évaluation de la disponibilité brute à partir de la ressource estimée par les services statistiques nationaux et ventilation de ce volume en produits potentiels (BO, BIBE, MB). Cette étape vise à « décrire et évaluer la ressource en place » en créant une typologie de

⁵⁵ www.dispo-boisenergie.fr

peuplements basée sur des critères liés aux modes de gestion et à la croissance biologique, et en établissant des domaines d'études homogènes (au sein desquels s'opère une quantification de la ressource actuelle, et une ventilation de la ressource par classe d'âge ou de diamètre). Ensuite des scénarios de gestion sylvicoles sont établis pour chaque domaine d'étude, à partir de normes de préconisations de gestion durable issues de la littérature et de l'expertise régionale et nationale. Ces scénarios comprennent un taux de prélèvement, une durée entre deux interventions et une durée de régénération des peuplements mûrs. Les ressources dites « principales » (forêts, peupleraies et haies) font l'objet d'une évaluation détaillée, alors qu'à *contrario* les ressources ligneuses annexes (vignes, vergers, arbres urbains et souches forestières) font l'objet d'une évaluation de type exploratoire de leur disponibilité brute. Dans le contexte franc-comtois, et au vu de la précision des données de l'IFN disponibles en ligne (pas de données géoréférencées inférieures à 2,25 ha), nous pourrions émettre une remarque quant à la classification des haies comme « ressource principale ». Le contexte régional (relativement peu de haies⁵⁶) et le manque de données par rapport à ce gisement (notamment à grande échelle), nous obligera à l'évaluer de façon exploratoire.

Étape 2. Constitution de « parcelles virtuelles » possédant des caractéristiques d'exploitation similaires.

Les trois étapes suivantes visent à évaluer les disponibilités technico-économiques (figure 52).

Étape 3 : évaluation de la disponibilité nette technique. Il s'agit d'estimer les volumes perdus lors de l'exploitation (contrainte technique) et des disponibilités en menus bois sur les sols les plus sensibles aux exportations minérales (contrainte environnementale). On admet ainsi généralement que les pertes d'exploitation représentent 10% du volume exploité, mais peuvent aller jusqu'à 20% si les menus et petits bois ne sont pas récoltés. Néanmoins, l'intégralité des rémanents ne peut être collectée en raison des conséquences potentiels sur la fertilité pédologique.

Étape 4 : calcul au niveau de chaque "parcelle" virtuelle du coût de mobilisation du bois et du prix des produits extraits dans le contexte économique actuel. Il s'agit de déterminer la part de la disponibilité dont le coût de mobilisation est inférieur au prix actuel du marché, sachant que les coûts d'exploitation sont décomposés en deux postes : coûts techniques et charges de l'exploitant. Les coûts techniques sont constitués des frais engendrés par la récolte elle-même (abattage, façonnage, débardage, broyage en plaquettes) et varient selon les conditions d'exploitation (type de coupe, essence, volume à l'hectare, pente et distance de débardage). La grande hétérogénéité des situations rend néanmoins extrêmement difficile cette entreprise d'évaluation des coûts d'exploitation et de potentiel économiquement rentable.

⁵⁶ En comparaison avec d'autres régions françaises.

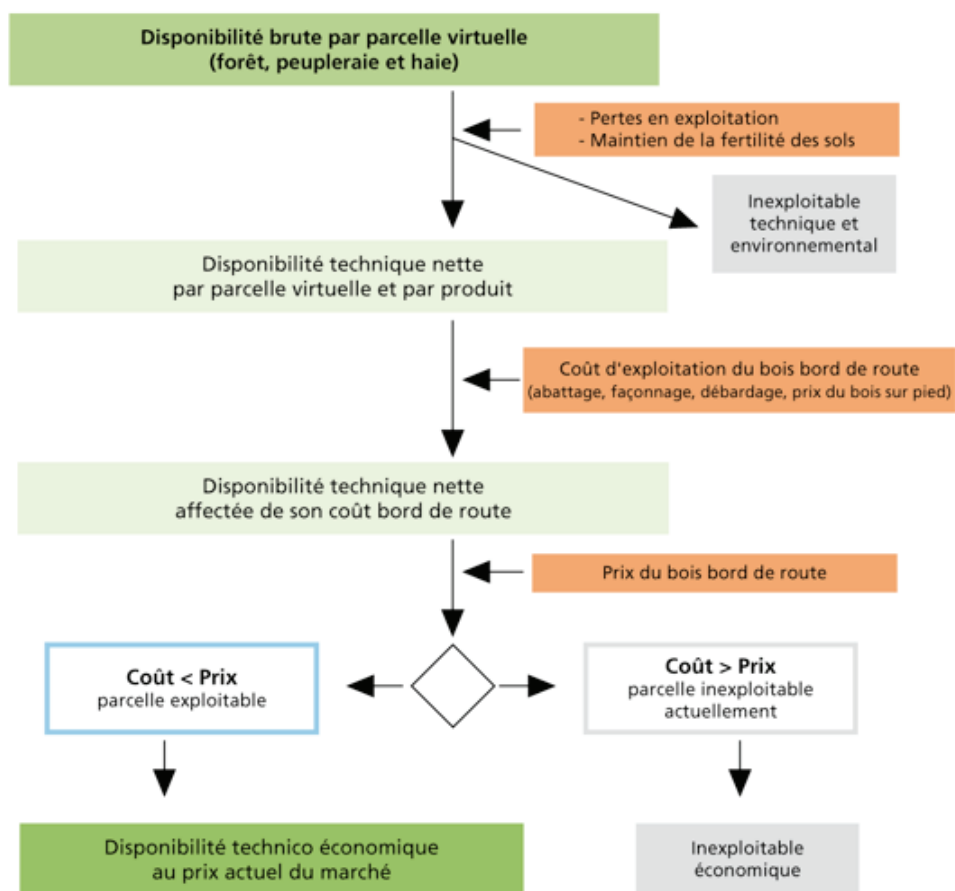


Figure 52 : méthode d'évaluation de la disponibilité technico-économique (ADEME-IFN-SOLAGRO)

Étape 5 : comparaison du coût de mobilisation du bois au prix des produits bord de route. Si le coût est inférieur au prix bord de route, la "parcelle" est considérée exploitable (contrainte économique) et la disponibilité correspondante est incluse dans la disponibilité technico-économique ; cette étape est néanmoins à considérer avec précaution en raison de la volatilité des prix du marché du bois et des hypothèses posées en amont « faute d'éléments disponibles ».

Étape 6. En déduisant la récolte actuelle de la disponibilité technico-économique, on obtient la disponibilité supplémentaire dans les conditions économiques actuelles. L'estimation des prélèvements (récolte) est calculée à partir des enquêtes annuelles de branche (EAB) « exploitation forestière et scierie », ventilée par région et groupes d'essences (feuillus et résineux). Ces enquêtes sont à manipuler avec précaution en raison de leur imprécision : d'une part car le maillage le plus fin est l'espace régional, et que d'autre part l'origine des prélèvements (forêt, ou hors forêt) n'est pas précisée dans les EAB, et doivent donc être « estimées à l'aide d'hypothèses ad hoc ». À cela s'ajoute les estimations de la consommation

actuelle de bois-énergie, qui elles aussi sont très imprécises en raison de la présence de circuits informels. Ainsi la détermination de l'origine du bois de feu consommé par le secteur domestique se fonde sur des « hypothèses qui s'appuient sur les rares données disponibles au niveau national et régional ».

Dans cette approche, la ressource ligneuse a été compartimentée en appliquant différents coefficients, permettant de définir un certain volume de bois énergisable. Une application en ligne a été développée, et l'utilisateur peut ainsi paramétrer ses requêtes selon le type de coupes, les essences, les classes d'exploitabilité, le type de propriété etc. A l'image des méthodes précédentes le niveau d'analyse le plus fin est la région, et les résultats présentés sous forme chiffrée exportables vers un tableur. Néanmoins, même si la spatialisation des résultats ne transparait pas, et que les méthodes ne sont pas transposables telles quelles pour les besoins de nos recherches, elles n'en restent pas moins extrêmement intéressantes et utiles pour la considération de la notion de contrainte, inhérente à la définition de potentiel énergisable.

Le tableau 7 présente une synthèse de ces différentes méthodes, leurs objectifs, les variables-clés et leurs difficultés de mise en œuvre à l'échelle locale.

Méthode	Objectif	Variables-clés	Difficultés de mise en œuvre / remarques
Méthodologie Générale (Cemagref)	Caractériser la ressource	Accessibilité Essence Propriété Type de peuplement	Pas de difficultés particulières Données IFN
	Disponibilité théorique Par rapport à des scénarios de gestion raisonnable	Prélèvements Part de BI, BO, BE Part de rémanents	Pas de difficultés particulières pour la part de BO, BI, BE (→ compartimentation de l'arbre), ni pour la part de rémanents (pourcentage du volume exploité) Nécessité de connaître l'âge des peuplements et leur croissance pour déterminer les prélèvements possibles
	Part économiquement exploitable	Taille du chantier Prix de vente	Difficile à mettre en œuvre car aucune visibilité à court, moyen et long terme de la localisation et de la taille des chantiers forestiers Prix de vente très variables Spatialisation des résultats ?
ONF/ CRPF	Estimation du gisement disponible en fonction des classes d'exploitation et des diamètres	Accroissement Mortalité Volume Volume théorique idéal Durée de l'objectif Taux de branches Production de petits bois	Disponibilité des données à l'échelle locale? Spatialisation des résultats ? Prise en compte de la dimension temporelle

Méthode	Objectif	Variabiles-clés	Difficultés de mise en œuvre / remarques
IFN AFOCEL Disponibilité forestière brute	Évaluation des disponibilités en coupe de régénération ou d'amélioration	Surface Volume sur pied Production Diamètre	Disponibilité des données à l'échelle locale? Spatialisation des résultats ?
IFN AFOCEL Simulation par classe d'âge	Estimation de la disponibilité dans les peuplements équiennes et taillis	Surface Volume Production courante	Disponibilité des données à l'échelle locale? Spatialisation des résultats ?
ADEME IFN SOLAGRO	Caractérisation de la ressource	Type de peuplement	Données IFN. Pas de difficultés particulières de traitement des données
	Disponibilité brute	Croissance Volume	Hypothèses de croissance et scénarios sylvicoles → quelles données ?
	Disponibilité technico-économique	Pertes en exploitation Part de rémanents Coûts d'exploitation Prix du bois sur pied	Coûts difficiles à estimer compte tenu de la variabilité des marchés du bois

Tableau 7 : synthèse des méthodes issues de la foresterie

1.1.3. Une indispensable dimension spatiale et des résultats à l'échelle locale avec les Plans d'Approvisionnements Territoriaux (PAT)

Mis en place par les Communes Forestières dans le cadre du programme *1000 chaufferies bois pour le milieu rural*, le PAT est un outil [...] construit par l'ensemble des acteurs de la filière [et] permet aux élus d'organiser localement l'approvisionnement des chaufferies." (Communes Forestières, fiche n°100). D'un point de vue opérationnel, les PAT permettent :

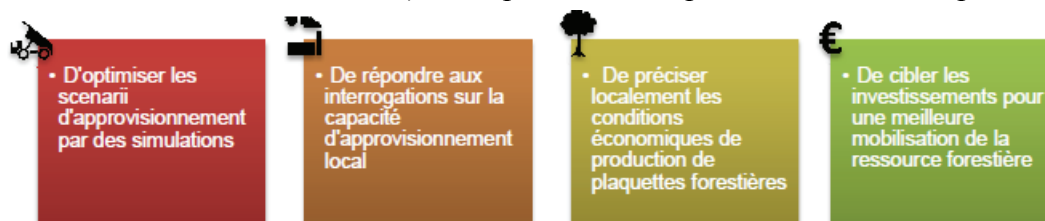


Figure 53 : les potentialités des PAT

Source : Communes Forestières, fiche n°100 consacrée à la présentation du PAT

En comparaison avec les méthodes précédemment évoquées, le PAT vise non seulement à évaluer la biomasse forestière disponible *via* les données d'inventaire de l'IFN, mais

également à l'intégrer dans une démarche plus globale de structuration des approvisionnements à l'échelle d'un territoire. Les finalités de cet outil les suivantes.

"Mettre en parallèle la consommation énergétique du territoire et la ressource forestière disponible. Localiser le potentiel de bois énergisable ainsi que son coût « rendu chaufferie ». Localiser et dimensionner au mieux les équipements communs à mettre en place (logistique optimisée).

Afficher les zones où la desserte forestière est insuffisante ainsi que les lieux où des méthodes d'exploitation spécifiques "zones naturelles sensibles" doivent être mises en place.

Évaluer la quantité de CO² évitée et les emplois induits en fonction des scénarii choisis.

Améliorer le modèle de calcul SylloGIS™ créé pour la réalisation des PAT et permettre sa transférabilité sur d'autres territoires.

Faire travailler ensemble les acteurs techniques de la forêt (publique et privée) à la construction d'un nouvel outil d'aide à la décision, et présenter les résultats aux élus sous la forme d'une table ronde (sensibilisation, débat)⁵⁷.

Source : Fédération Nationale des Communes Forestières (FN COFOR)

D'un point de vue conceptuel, et dans les objectifs affichés, nos travaux de recherche rejoignent le PAT en plusieurs points. Dans cette méthode le raisonnement spatial transparait clairement, et les données utilisées pour caractériser la ressource forestière sont des données de l'IGN (BD Topo, BD Ortho, Scan25), des données de l'IFN (domaines d'études cartographiés, typologie départementale), des données sur la forêt publique (desserte forestière, types de peuplements, données dendrométriques), des données sur la forêt privée (cartographie des peuplements et données dendrométriques). Une fois ces données implémentées dans un programme de traitement de l'information spatialisée, trois modules font tourner le modèle.

- Le premier module vise à déterminer les volumes prélevables.
- Le deuxième module calcule les coûts d'exploitation.
- Le troisième module calcule le coût total du combustible entrée chaufferie.

Les résultats sont présentés sous forme graphique et cartographique (figure 54):

⁵⁷ Les objectifs du PAT sont disponibles sur Internet à l'url suivante : <http://www.cipra.org/competition-cc.alps/WTissot/> (consulté le 4 mai 2010).

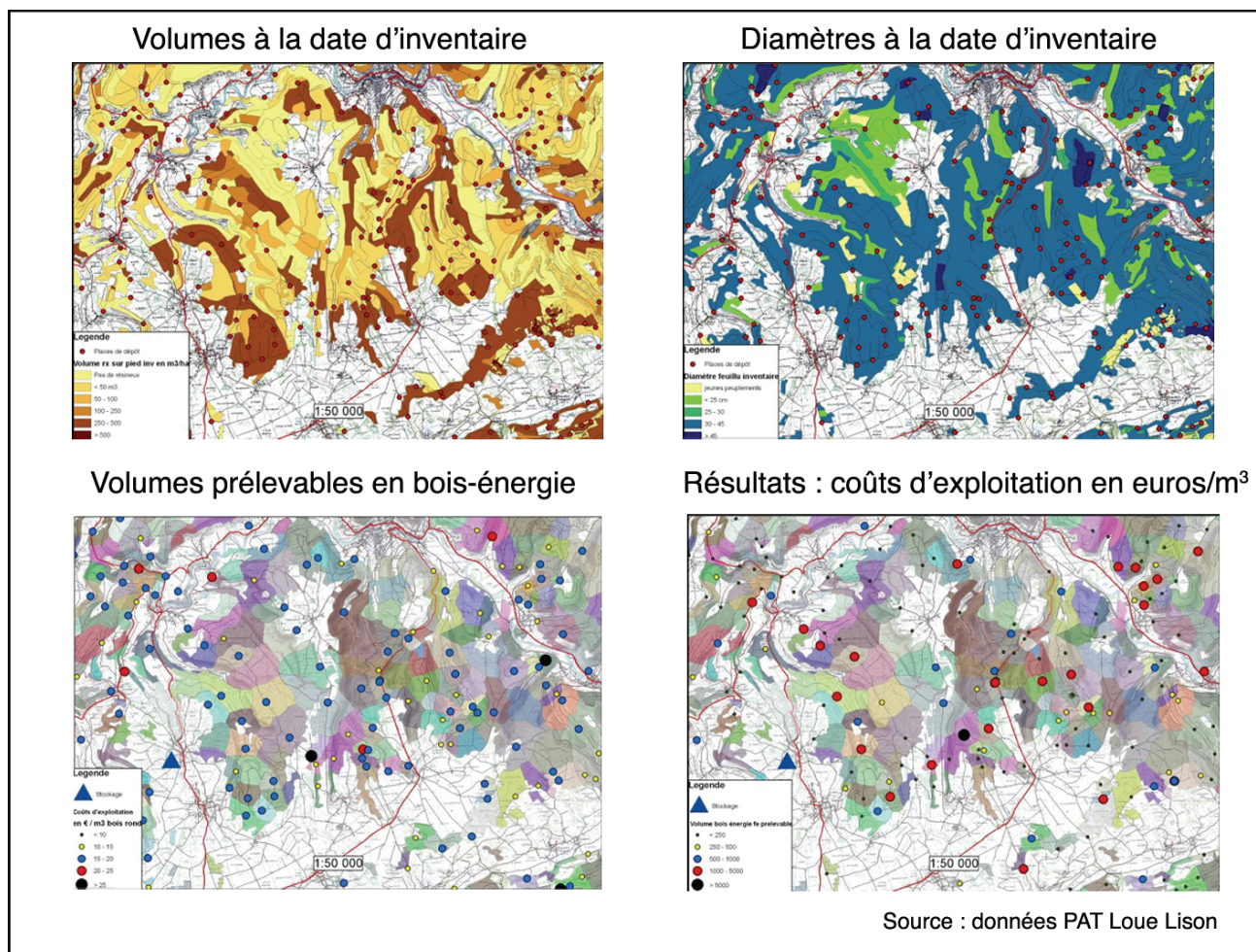


Figure 54 : exemples de traitements et de cartographie issus du PAT

L'intégration d'une dimension spatiale et d'une réflexion à l'échelle infra-régionale font des PAT un outil extrêmement intéressant et innovant. Néanmoins, ces derniers ne sont mis en œuvre qu'à l'échelle de territoires ruraux ayant des installations de consommation relativement modestes⁵⁸ (aux alentours d'1 MW au maximum), et ne considèrent pas les pratiques d'approvisionnement en tant que telles (analyses de flux). Au vu des objectifs affichés, certains aspects nous interpellent : l'outil est clairement orienté vers l'évaluation des coûts de la biomasse énergisable, mais n'intègre nullement la durabilité des prélèvements (aucune prise en compte de la dimension temporelle), alors qu'il s'agit tout de même d'un aspect central de la valorisation dendroénergétique. D'autre part, comment être sûr de l'estimation de ces coûts sachant que "la fourchette des coûts de production est extrêmement large compte tenu des conditions de chantier qui sont très diversifiées" (Boittin et al. 2010) ? Comment prévoir précisément la répartition des postes de dépense des quantités de plaquettes forestières (coûts de la matière première, de mobilisation, de transport...) compte tenu de la forte variabilité des marchés du bois ?

⁵⁸ Ce qui est relativement logique dans la mesure où ils ont été mis en place dans le cadre du programme "1000 chaufferies bois pour le milieu rural".

Dans le cadre de ces travaux de recherche, il ne s'agit pas de refaire ce qui a déjà été fait, mais de nous appuyer sur ces méthodes en vue de définir des volumes de bois exploitables à des fins énergétiques, en forêt et dans les secteurs boisés non forestiers. Si les PAT rejoignent en partie nos travaux sur un certain nombre d'objectifs (meilleure connaissance des ressources au niveau local, prise en compte des concurrences d'usage), les méthodologies envisagées et les corpus de données utilisées diffèrent radicalement (les PAT s'appuyant sur des données d'inventaire de l'IFN, alors que nous recourons à un couplage entre l'imagerie satellitaire et des données issues de tables de production). Dans les PAT la dimension économique est centrale : l'outil propose une évaluation des coûts de mobilisation de la ressource forestière, considérant les contraintes techniques liées à la pente et à la desserte, ainsi que des propositions pour optimiser la chaîne logistique d'approvisionnement et diminuer le coût global de la plaquette forestière livrée. Les PAT visent ainsi à répondre à un certain nombre d'interrogations, en lien avec la capacité des ressources identifiées sur le territoire à satisfaire l'ensemble des installations et des projets identifiés sur ce même territoire, avec les concurrences d'usage, mais également avec les méthodes d'exploitation, de déchetage, de stockage et de transport. Cette approche est donc différente de celle que nous proposons. Si nous visons à répondre à des questionnements similaires, le problème est envisagé sous un autre angle. La dimension économique est centrale dans les PAT, alors que nous nous intéressons davantage à la *durabilité* des prélèvements. Les PAT raisonnent uniquement à l'échelle d'un territoire alors que nous raisonnons aussi en termes de bassins d'approvisionnement de manière à appréhender leur organisation spatiale et éventuellement les phénomènes de concurrence spatiale.

La définition des potentiels ligneux énergisables passe tout d'abord par une caractérisation du couvert boisé et de la biomasse (ou des volumes ligneux). Les méthodes issues de la foresterie s'appuient toutes sur les données d'inventaire pour caractériser et quantifier la ressource forestière. Pour cartographier le couvert boisé forestier et non forestier et estimer la biomasse, recourons à l'imagerie satellitaire, qui peut offrir un complément intéressant aux données d'inventaire.

1.2. Apports de l'information géographique pour la modélisation de la biomasse

Dans la pratique forestière, le volume ligneux d'un peuplement est estimé au travers de trois méthodes :

- l'inventaire terrain traditionnel ;
- la photo-interprétation ;
- la télédétection satellitaire.

« La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information » (Centre Canadien de télédétection, 2008). Largement utilisée en foresterie pour la caractérisation de la ressource, elle offre un certain nombre d'avantages, notamment en matière d'actualisation de l'information, de gain de temps par rapport à des inventaires de terrain aux temporalités espacées etc.

1.2.1. Apports et limites de la télédétection en foresterie

Classiquement, le volume-tige d'un peuplement forestier est estimé à travers des inventaires qui emploient des méthodes d'échantillonnage statistique appliquées à des placettes où les paramètres dendrométriques sont mesurés in-situ. En couplant ces informations stationnelles à des données satellitaires, il est théoriquement possible de généraliser les volumes à l'ensemble du couvert boisé, en exploitant la relation radiométrie-volume. Goudet (2008), affirme ainsi que le recours à l'imagerie satellitaire est pertinent pour définir les volumes ligneux, spécialement dans un contexte de méconnaissance de la ressource et d'augmentation de la demande en plaquettes forestières. Ainsi « pour permettre de concrétiser le développement du bois-énergie, dresser l'état de la ressource est indispensable, et l'utilisation de la télédétection offre une bonne vue d'ensemble permettant de garder une cohérence territoriale en accord avec les objectifs ». En outre, l'usage de la télédétection permet une diminution des coûts par rapports à des méthodes d'inventaires classiques, onéreuses, et aux campagnes de levers de terrain temporellement espacées, ce qui est un gros avantage pour la reproductibilité du modèle. Ainsi, l'utilisation de l'imagerie aéroportée ou spatiale peut réduire la durée et le coût des inventaires dendrométriques, puisqu'elle permet de généraliser sur de grandes surfaces des informations relevées partiellement.

De telles informations peuvent notamment se révéler d'une grande utilité dans un contexte en rapide mutation où les acteurs de la filière peuvent avoir besoin de données à jour concernant les peuplements, ce qui n'est pas toujours le cas avec les données d'inventaire en raison de l'espacement des campagnes de relevés : "[...] la méthode d'acquisition des occupations du sol par télédétection permet alors de rapidement prendre connaissance des changements d'état des lieux. Ceci est particulièrement intéressant dans les zones mal connues qui ne sont pas contrôlées par un aménagement (en particulier dans les forêts privées sans plans simples de gestion)" (Goudet, 2008). L'usage de la télédétection nous permet en outre de quantifier avec plus ou moins de précision la biomasse aérienne dans les zones non cartographiées par l'IFN. La classification d'image par pixel permet discriminer différentes classes de végétation en fonction de leur "signature spectrale", sans pour autant éviter toutes les confusions. Un

couplage à des données d'inventaire ou de relevés de terrain obtenues par échantillonnage permet de fournir, pour chaque classe de forêt, le volume moyen contenu dans une placette échantillon comparable en dimension au pixel ; et la généralisation de ce volume à l'ensemble des pixels peut fournir le volume de la classe (cf. figure 63).

Néanmoins, bien que "la télédétection satellitaire soit reconnue comme une source sûre d'information forestière variée, pour le volume bois aucune méthode n'a été démontrée comme étant la plus appropriée" (Bencherif, 2009), et une évaluation précise ne pourra pas se passer d'un couplage avec des données de relevé de terrain. Ainsi comparé aux méthodes d'inventaire terrain et de photo-interprétation, l'imagerie satellitaire ne peut et ne pourra peut-être jamais fournir des mesures dendrométriques absolues (Renaud, 2000), mais elle offre certaines possibilités de mise en corrélation de la biomasse et du rayonnement électromagnétique. Aujourd'hui, les modes de télédétection actifs de type LIDAR offrent un niveau de détail encore plus fin et sont utilisés en foresterie notamment pour l'évaluation de données volumétriques.

1.2.2. Le LIDAR, une technologie prometteuse

Basées sur le principe de l'émission d'un signal lumineux discret ou continu vert, ultraviolet ou infrarouge et de la réception de sa portion réfléchi par tout objet intercepté, les images LIDAR (*Light Detection and Ranging*) ont des applications pratiques en foresterie notamment pour l'étude de la structure de la végétation : estimation de paramètres forestiers tels que le volume, la hauteur et le diamètre des troncs. Ce mode de télédétection présente en outre l'avantage d'une localisation en 3D avec un seul canal, avec une relative insensibilité aux ombres ou aux faibles contrastes (en comparaison à d'autres catégories d'images satellitaires), et la possibilité de "voir" le sol à travers le couvert forestier ou ce dernier en tant que tel et ce, simultanément (Renaud, 2000).

Leur précision est en général de 0,15 m en altimétrie et de 0,40 m en planimétrie. Couplée à un modèle numérique d'élévation, l'imagerie LIDAR permet d'estimer la hauteur différentielle de certains objets géographiques, et par extension d'estimer des volumes de matière ligneuse (cf. travaux de G. Gachet à l'EPFL). Ainsi, "même si l'estimation des volumes n'est pas localement toujours de bonne qualité, elle permet de rendre compte géographiquement des sources plus ou moins productives à l'échelle départementale. Cette [...] approche permet ainsi de visualiser où se situent préférentiellement les zones de fort approvisionnement potentiel" (Goudet, 2008). L'acquisition de telles données étant extrêmement onéreuse et demeurant peu répandue, nous ne disposons de fait pas de données LIDAR pour l'ensemble de nos terrains d'études.

2. Caractériser les espaces producteurs : les arbres et la forêt

Les espaces boisés sont à la base de la chaîne dendroénergétique. De leurs caractéristiques et des modes de gestion qui y sont associés vont dépendre des quantités plus ou moins importantes de bois énergisable et de plaquettes forestières. La première étape de notre modélisation est donc de caractériser ces espaces producteurs à l'échelle de nos terrains d'étude. Ces espaces peuvent être définis par un certain nombre de paramètres : surface, densité, taux de recouvrement, essences majoritaires, etc. Par définition, les espaces boisés sont hétérogènes, et la première distinction fondamentale est relative à leur morphologie *via* l'attribution du qualificatif "forestier". En effet, tous les espaces boisés ne sont pas forestiers, et cela va conditionner l'utilisation d'une partie des informations disponibles, dans la mesure où, par exemple, l'Inventaire Forestier National ne dispose que de données sur les espaces forestiers. Dans le cadre de notre protocole, nous abordons dans un premier temps la caractérisation des espaces forestiers à partir des données de l'Inventaire Forestier National telles qu'elles nous ont été fournies, puis nous étudions les volumes ligneux dans les espaces boisés hors forêt et zones de prébois (espaces intermédiaires relativement méconnus). Pour ce faire nous nous appuyons sur le socle de définitions proposé par l'IFN, que nous comparons avec une base de données sur l'occupation des sols (nomenclature Corine Land Cover) dans le but de montrer l'hétérogénéité inhérente à ces espaces et les contradictions existant entre les bases de données. Cette démonstration nous est utile dans la mesure où il est indispensable de connaître et de localiser le potentiel ligneux global pour ensuite modéliser les approvisionnements.

Cette rubrique est ainsi consacrée à l'analyse des données dont nous disposons pour caractériser ces espaces boisés ainsi que leurs limites d'utilisation, et les biais que cela induit dans le cadre de notre démarche.

2.1. Des données d'inventaire pour caractériser la ressource forestière...

En première approche, il pourrait sembler que le meilleur moyen d'estimer la quantité totale de bois, biomasse et autres produits ligneux d'une forêt est de mesurer précisément chaque arbre de façon individuelle... Néanmoins, pour des raisons techniques et économiques, une telle entreprise s'avère irréalisable, sauf sur des portions boisées très restreintes (West, 2003). Pour pallier ce problème, des méthodes d'inventaires ont été mises au point. Elles se basent sur des mesures individuelles d'arbres, sur des places d'inventaires représentatives d'une même strate arborée. L'Inventaire Forestier National est ainsi la principale source de données

pour la localisation et la caractérisation des espaces forestiers. Le module de cartographie en ligne de l'IFN, met notamment à disposition des informations sur :

- l'emprise spatiale du couvert forestier (limites et superficie des massifs boisés) ;
- les types forestiers départementaux, qui nous permettront de qualifier plus précisément la ressource, selon le type de structure forestière (futaie, taillis ou forêt mixte) et les essences majoritaires ;
- le type de propriété forestière (domaniale, communale ou privée par défaut d'informations)

D'autres données, achetées à l'IFN nous renseignent de façon plus précise sur les points d'inventaires levés :

- la quantité de matière ligneuse, qui peut être donnée en volume de bois sur pied ou en nombre de tiges, par placette d'inventaire en forêt levée ;
- la production (accroissement biologique).

2.1.1. Les méthodes d'inventaire (échantillonnage ponctuel et levés de terrains)

La méthodologie d'inventaire conditionne fortement la précision des données. C'est la raison pour laquelle il est indispensable d'en comprendre la procédure. Depuis 1958, l'IFN procède à des inventaires départementaux avec une périodicité d'environ 12 ans. Au fil du temps ces méthodes d'inventaire basées sur des échantillons stratifiés de points ont évolué pour aboutir, dans les années 80 à la méthode dite "cartographique", qui est celle que nous utilisons actuellement (bien que les méthodes d'inventaires aient récemment évolué suite à la tempête de 1999 et la canicule de 2003). La figure 55 détaille la méthodologie générale de la procédure d'inventaire.

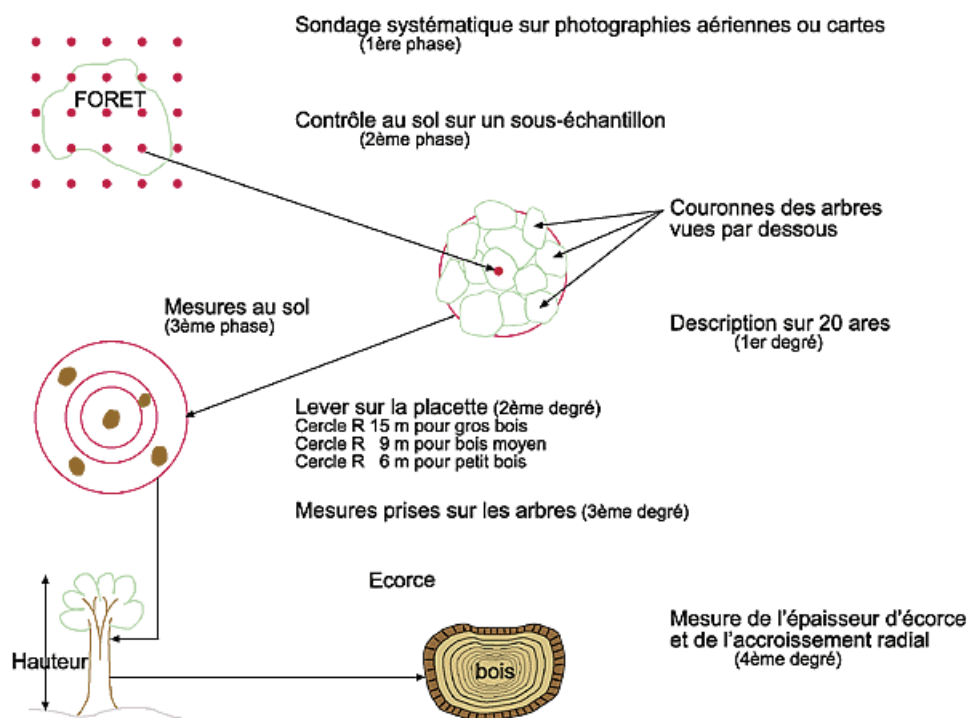


Figure 55 : Méthodologie générale de l'inventaire forestier

Source : IFN

Avec cette méthode, la carte forestière permettait d'identifier des domaines d'étude statistique (environ 100 à 150 par département), caractérisés par différents attributs : région forestière, catégorie de propriété, et type de formation végétale. "Cette dernière couche était définie en tenant compte de différentes caractéristiques comme la couverture du sol [...], le régime sylvicole et la composition des essences [...]. Par la suite, un échantillonnage stratifié à deux phases était pratiqué dans ces domaines : d'abord une photo-interprétation d'un échantillon systématique de points sur photographies aériennes, puis des observations et des mesures sur des placettes circulaires centrées sur un sous-échantillon stratifié de points (reconnaissance des formations et lever)" (Belouard, 2005). En résumé, les phases de travail sont les suivantes.

- La **phase 1** comprenait un sondage systématique ou pseudo-systématique de points uniformément répartis dans le territoire inventorié, une photo-interprétation des formations à inventorier, un classement et une première évaluation de leur importance à la date des photographies aériennes.
- La **phase 2** consistait en un sondage aléatoire ou systématique stratifié dans l'échantillon de phase 1, un contrôle au sol des données et une actualisation des résultats de phase 1. Les strates étaient constituées à l'intérieur des domaines d'étude statistiques (DES) obtenus par regroupements de DEC (domaines d'études cartographiés). Les taux de sondage sont ajustés en fonction d'une consigne de précision sur le volume sur pied.

- La **phase 3** visait à sélectionner des points de phase 2 interceptant une formation à inventorier et à effectuer un sondage à quatre degrés (en cas de mesure d'arbres), avec :
 - une description de la formation et de la station : structure, composition en essences, exploitabilité, topographie, sol, humus, flore, etc. ;
 - un recensement des arbres forestiers ;
 - une description et mesures d'âge et des dimensions (sauf radiales) d'un sous-échantillon d'arbres recensés ;
 - des mesures radiales des arbres de ce sous-échantillon.

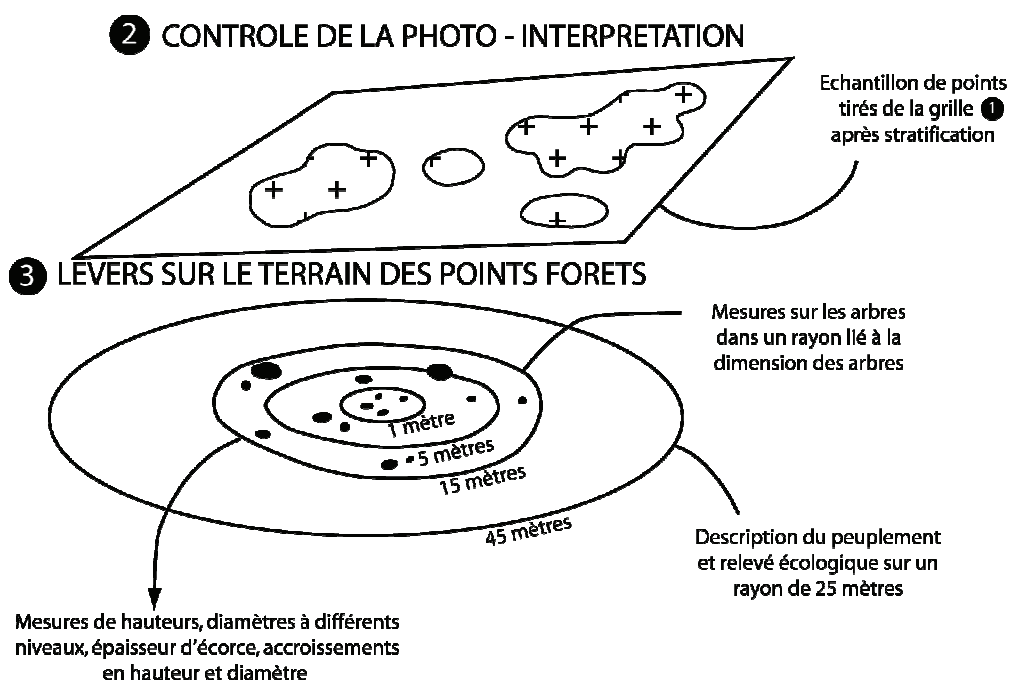


Figure 56 : Trois des quatre phases de l'inventaire forestier

Source : Inventaire Forestier National

Selon l'IFN, "cette méthode d'inventaire comprenait donc un sondage par points et non par arbres ou par parcelles (dont les populations sont méconnues), ou encore par unités cartographiées (absentes au début de l'IFN). Les points étaient échantillonnés dans un espace bidimensionnel continu (plan de la projection cartographique) et les variables extensives (surfaces, volumes, accroissements, etc.) étaient estimées par sommation pondérée des valeurs mesurées sur les points de sondage. Plus précisément, les densités surfaciques ou linéiques étaient mesurées dans un voisinage (surface ou longueur de régularisation) de chaque point appelé placette. Les coefficients de pondération, appelés surfaces ou longueurs d'extension, étaient calculés de manière à éliminer les biais d'estimation." Les données dont nous disposons dans le cadre de ces travaux sont issues de ces méthodes d'inventaire, et seuls

les points d'inventaires en forêt levée (deuxième phase de la procédure d'échantillonnage) sont renseignés de façon précise.

2.1.2. Les données fournies par l'IFN

Il s'agit de données brutes présentées sous forme de tableur directement issues du troisième inventaire départemental datant de 1994, et dont les modalités d'utilisation et d'exploitation sont définies dans une convention, nous interdisant entre autres de nous rendre sur les placettes d'inventaire. Selon S. Lucas (IFN), il leur était impossible de nous fournir des données statistiques par polygones directement exploitables dans un SIG, la condition *sine qua non* étant que les polygones devaient être de taille conséquente et comprendre au minimum 50 points d'inventaire, ce qui n'était pas notre cas. Pour les données cartographiques, il n'était possible d'avoir que des données de superficie. Or, ces dernières peuvent être estimées à partir des données disponibles en ligne. Des données brutes sont également téléchargeables en ligne, mais les données x, y sont floutées dans un intervalle de plus ou moins 500 mètres (source : C. Chauvin, Cemagref), ce qui est largement supérieur à l'imprécision intrinsèque des données de 1994 (l'intervalle flou étant d'environ 200 m, les données étant "imprécises par nature").

Les données fournies sont scindées en deux catégories, avec d'une part des informations centrées autour des points d'inventaire et d'autre part des informations dendrométriques. Ces deux types d'informations peuvent se recouper *via* les identifiants de points et leur géolocalisation avec des coordonnées X,Y en Lambert II étendu.

2.1.2.1. Les données à la placette d'inventaire

A l'échelle de nos deux terrains d'étude, nous disposons d'informations sur 1708 points d'inventaires, dont 1102 pour le Pays Loue-Lison, et 606 pour la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon. A chaque ligne du tableur correspond un point d'inventaire comportant les attributs suivants:

- un identifiant du point d'inventaire ;
- des coordonnées (abscisses et ordonnées) permettant l'importation des données dans un système d'information géographique, en vue de leur localisation ;
- des informations sur l'usage du sol, scindées en trois catégories (forêt de production levée, forêt de production non levée, et autre forêt) ; seuls les points d'inventaire en forêt de production levée sont renseignés, ce qui est assez problématique dans la mesure où ces points représentent respectivement 19,9 % et 17,5 % de l'ensemble des points d'inventaire dans le Pays Loue-Lison et dans la CAGB (cf. figure 104 sur les placettes d'inventaire).

- un code de propriété (domanial, communal, ou privé) ;
- un code type de peuplement (futaie, reboisement, boisement morcelé, formation boisée marginale etc.)
- un code de structure forestière (futaie régulière, irrégulière, taillis etc.)
- deux types de codes d'exploitabilité : l'un concernant l'accessibilité par rapport aux distances de débardage et à la présence d'infrastructures de desserte, l'autre faisant référence à la portance des sols et aux classes de pente.
- des informations sur les essences principales selon les formations forestières (futaie ou taillis).
- Une "surface d'extension du point", donnée en hectare. Il convient de préciser que les surfaces d'extension ne sont pas données de manière exhaustive, mais seulement pour les points d'inventaires situés en forêt de production levée, et que ces surfaces d'extension sont variables, allant de 14,61 à 235,28 ha.

Un extrait des données brutes dépourvues d'identifiant et de coordonnées par point d'inventaire est visible dans l'annexe 4.

2.1.2.2. Les données dendrométriques

Des informations sur les caractéristiques dendrométriques des arbres vifs sont disponibles uniquement pour les points d'inventaire ayant fait l'objet de relevés de terrain (approximativement 20% des points d'inventaire). À chaque ligne correspond un arbre, caractérisé par une essence, un type, un poids statistique, un volume en m³ ainsi que différents taux de qualité.

Selon J. Bir (chargé d'études à l'IFN), "il est possible d'obtenir l'effectif d'arbres levés pour chaque point d'inventaire, en sommant le nombre de lignes correspondant à un même point. Le « poids statistique » de l'arbre, correspond quant à lui à son extension en nombre à l'hectare. En sommant ces poids statistiques pour un même point (CPP), cela permet d'avoir une estimation du nombre global de tiges (recensables) à l'hectare sur ce point". Ces informations nous intéressent particulièrement. Tout comme les données par placette d'inventaire, les données dendrométriques se présentent sous forme de tableur (cf. annexes 4). Le lien entre les données par placettes et les données dendrométriques se fait *via* les coordonnées géographiques (centroïde de placette d'inventaire) ou l'identifiant du point. En sommant les lignes d'un même point nous obtenons un nombre d'arbre sur la surface donnée par les paramètres d'extension définis par l'IFN.

2.1.2.3. La cartographie forestière

La cartographie forestière de l'IFN, accessible via l'url <http://www.ifn.fr/spip/?rubrique67>, est une application, à partir de laquelle on peut accéder à la cartographie des formations végétales ayant une superficie supérieure à 2,25 ha si l'échelle des cartes est au 1/25000 et 4 ha si l'échelle de base est 1/50000 (source : IFN). Un type de formation végétale est « un ensemble forestier ou semi naturel continu ou discontinu, qui présente une certaine unité pour la couverture du sol, pour la densité du couvert, et pour la composition des essences » (IFN, 2009). Bien que cette cartographie soit en pleine évolution, nous ne disposons cependant pas actuellement⁵⁹ de la deuxième version de la cartographie forestière pour les départements de Franche-Comté. L'ensemble des analyses effectuées dans le cadre de ces travaux s'appuiera dès lors sur la première version de la cartographie forestière.

Celle-ci se caractérise par plusieurs attributs : couvert forestier, propriété forestière départementale, régions forestières départementales, et types forestiers départementaux (figure 57). Ce dernier attribut se présente sous la forme d'une trentaine de classes de formations végétales différentes et nous intéresse particulièrement, car il va nous servir de base pour l'analyse de la signature spectrale des types de peuplements, et la calibration de notre modèle en vue de la cartographie de la biomasse ligneuse.

LES TYPES FORESTIERS DEPARTEMENTAUX DE L'IFN, ISSUS DE LA PREMIERE VERSION DE LA CARTOGRAPHIE FORESTIERE



Figure 57 : les types forestiers départementaux de l'IFN, pour le Doubs

⁵⁹ Au 22 novembre 2010, la Franche-Comté est en effet encore caractérisée par la première version de la cartographie forestière.

2.1.3. Les limites d'utilisation

Concernant les limites de ces données, nous pouvons d'ores et déjà émettre des réserves, notamment par rapport à l'exhaustivité des espaces traités et aux imprécisions des données.

- Concernant l'exhaustivité des informations disponibles en ligne sous forme cartographique, nous ne disposons d'aucune information sur les espaces boisés inférieurs à 2,25 ha, les arbres hors forêt et les zones de prébois.
- L'autre point de réserve concerne l'exhaustivité et la précision des données statistiques résultant des méthodes de collecte (échantillonnage) et de l'hétérogénéité de la ressource qu'il est difficile d'appréhender de façon exhaustive. La ressource ligneuse est en effet complexe, à la fois dans ses configurations spatiales et dans sa structure, les massifs boisés étant composés d'arbres d'essences différentes, caractérisés par des vitesses de croissance hétérogènes. De plus les données d'inventaire les plus récentes datent de 1994, ce qui pose des problèmes quant à leur représentativité à l'heure actuelle, seize ans après les campagnes de levés de terrains, et ce d'autant plus qu'entre temps la tempête de 1999 et la canicule de 2003 ont modifié les structures forestières franc-comtoises.
- D'autre part, le diamètre de recensabilité des arbres étant fixé à 7,5 cm à 1,30 mètre du sol, cela peut induire des biais dans l'évaluation du potentiel en plaquettes forestières dans la mesure où les arbres de très petits diamètres peuvent constituer un potentiel intéressant car non concurrentiel avec les autres usages de la filière bois.
- Mais ce qui s'avère le plus problématique dans notre cas, c'est l'imprécision spatiale intrinsèque des points inventoriés dans un intervalle de 200 mètres pour les inventaires datant de 1994 (source : C. Chauvin, Cemagref), et de 500 mètres pour les données d'inventaire plus récentes disponibles sur Internet. Ce qui pose des problèmes pour la mise en relation avec l'imagerie satellitaire, l'objectif étant d'établir une correspondance entre des données dendrométriques et de valeurs d'indices de végétation (cf. figure 63)
- De plus, les données volumétriques fournies par l'IFN concernent le « bois fort-tige », c'est-à-dire le volume géométrique de la tige arrêté à la découpe bois fort d'un diamètre minimum de 7 cm (cf. figure 58). C'est la raison pour laquelle nous avons travaillé en collaboration avec le laboratoire Chrono-Environnement (UMR 6249) qui a fait des relevés dendrométriques selon une procédure différente (travail sur des parcelles carrées de 30 mètres de côté, relevé de la totalité de la biomasse).

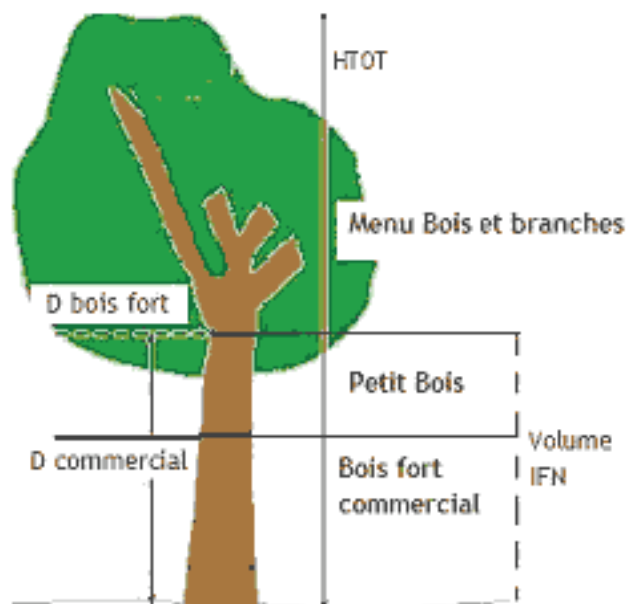


Figure 58 : compartimentation de l'arbre et volume IFN

Source : <http://www.boisenergie.ifn.fr/methode.php?page=1>⁶⁰

La majeure partie du houppier n'est donc pas comptabilisée dans le calcul des volumes IFN, ce qui est problématique dans la mesure où « les rémanents constituent l'essentiel du gisement en bois-énergie » (source : IFN). Bien que les sources diffèrent à ce propos, certains arguant qu'en pratique les rémanents ne sont pas toujours broyés ou broyables pour des raisons de qualité du combustible, nous partons du postulat que ces derniers doivent être comptabilisés pour l'estimation des potentiels en plaquettes forestières. Un entretien avec F. Adam⁶¹ (société Dalkia) a par ailleurs révélé que les structures internes des chaufferies tendraient de plus en plus à être modifiées de manière à être moins exigeantes au niveau de la qualité des combustibles, ce qui nous conforte dans notre position de considérer les branches et petits bois comme gisement potentiel de bois-énergie. Afin d'estimer au mieux ce compartiment, nous introduisons des facteurs d'expansion aux données *bois fort tige* fournies par l'IFN. Si cette méthode permet d'améliorer la précision des données dendrométriques pour les placettes levées en forêt, il persiste néanmoins de grosses incertitudes quant aux quantités mobilisables en dehors des espaces boisés forestiers.

⁶⁰ Consulté le 15 juillet 2010.

⁶¹ 15 juillet 2010.

2.2.... Mais très peu de données sur les espaces boisés non forestiers et les prébois

Les données de l'IFN n'étant pas exhaustives pour l'ensemble de la ressource ligneuse, nous ne disposons de fait d'aucune information sur les espaces boisés non forestiers.

- En ce qui concerne les vergers et les vignes, nous ne disposons pas d'informations précises si ce n'est leur localisation dans la BD CARTO. L'évaluation (volume et productivité) ne peut se faire qu'à partir de relevés de terrain et d'enquêtes auprès des acteurs de ces filières (Chambres d'agriculture, centres INRA, CUMA, etc.). Sur notre terrain d'étude, les vignes ne couvrent que très peu de superficie (au plus quelques hectares). Les vergers, par contre, sont bien représentés, notamment les anciens vergers des couronnes villageoises : nous tenterons donc de les identifier au mieux par télédétection.
- les arbres des parcs et jardins (arbres urbains) faisaient jusqu'en 2004 l'objet d'un inventaire *via* l'enquête Teruti, qui distinguait la nature de l'occupation du sol au travers d'une nomenclature physique (couverture) et fonctionnelle (utilisation). Mais l'enquête Teruti (réalisée par échantillonnage) ne permet pas de localiser les éléments répertoriés (au mieux, elle permet d'obtenir des taux de couverture à l'échelle du département, la précision de ces taux dépendant de leur importance : un thème rare n'est pas quantifié de façon précise. Des informations peuvent néanmoins être acquises *via* l'imagerie satellitale.
- Les haies et alignements d'arbres, évalués par l'IFN sont ventilés selon quatre classes (futaie, mixte, taillis, arbustive) et sont caractérisés une densité surfacique par maille de 100 km² (néanmoins comme le montre la figure 59, cette dernière paraît faible en Franche-Comté), en comparaison avec la France de l'Ouest, et à l'échelle de représentation régionale.

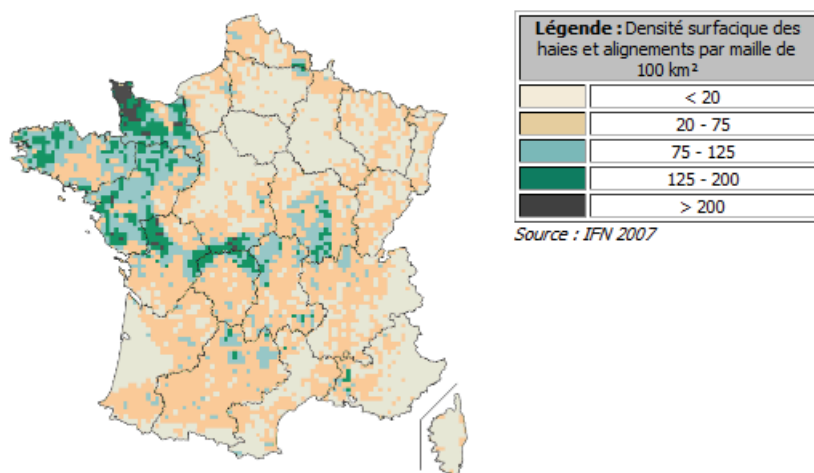


Figure 59: densité surfacique des haies et alignements par maille de 100 km²

Source : Inventaire National des Haies, IFN

Bien que nous ayons peu d'informations sur les arbres hors forêts, ces derniers peuvent représenter un potentiel dendroénergétique intéressant, qui justifie que l'on s'y intéresse (et ce d'autant plus que nous travaillons sur une optimisation des processus d'approvisionnements en circuit court, visant à valoriser au mieux les ressources locales). Ces gisements n'étant pas cartographiés par l'IFN, et aucune étude n'ayant été menée à l'échelle régionale ou infra-régionale sur ces types de gisements, nous les étudierons *via* l'imagerie satellitale et orthophotographique, en les identifiant par classification et en utilisant des indices de végétation (pour estimer leur biomasse ligneuse).

2.3. Les indices de végétation, un indicateur pertinent pour la caractérisation et la quantification de la biomasse... et des volumes ligneux ?

2.3.1. De la réflectance du couvert végétal...

L'utilisation de la télédétection en foresterie est basée sur l'étude de la réflectance des végétaux, notamment dans le visible et l'infra-rouge. La figure 60 montre les propriétés de réflectance des végétaux et des sols dans le rouge visible (R) et le proche infra-rouge (PIR) :

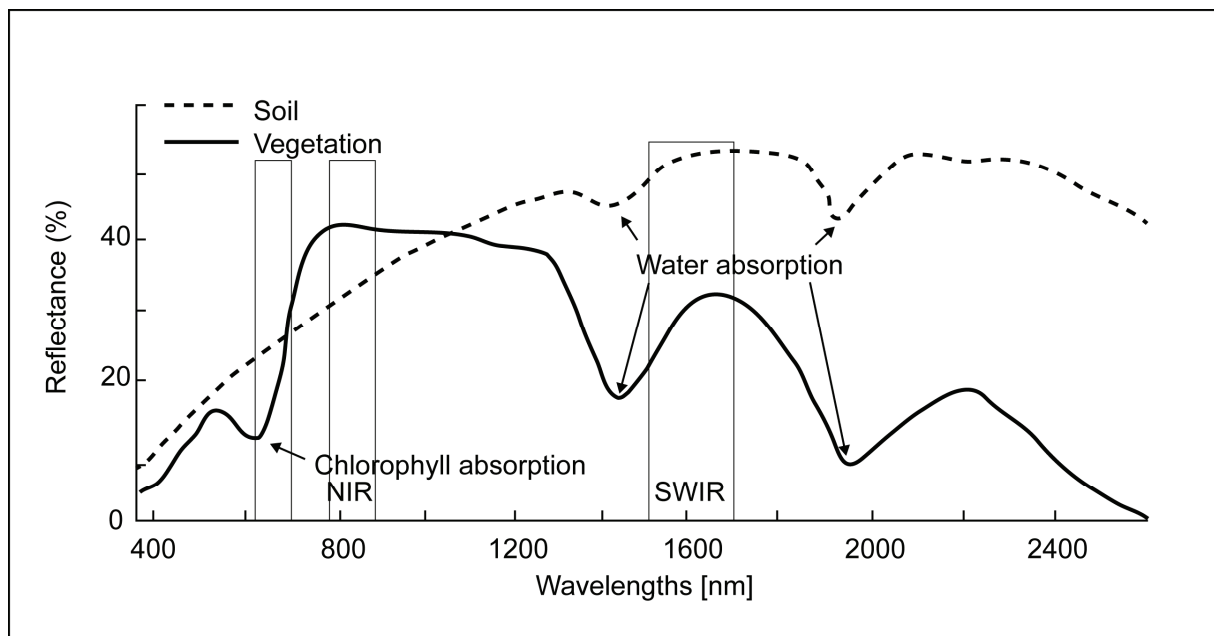


Figure 60 : Propriété de réflectance des végétaux et des sols

Source : adapté de Lillesand et Kiefer (1994)

En effet, les propriétés d'un végétal en activité sont très différentes de celles d'un sol nu: (CNES, CEOS⁶² etc.).

- Dans le domaine visible (0,4-0,7 μ m) le rayonnement est en majeure partie absorbé par les pigments foliaires pour la photosynthèse (utilisation de l'énergie radiative pour la synthèse de matière organique). Aussi la réflectance est d'autant plus faible que la photosynthèse est importante (cf. figure 61).
- Dans le domaine de l'infrarouge moyen, la réflectance des plantes est surtout affectée par leur teneur en eau.
- Dans le domaine du proche infrarouge (étendu de 0,7 à 1,5 μ m, fenêtré par Landsat TM sur 0,76-0,9), les pigments foliaires ainsi que la cellulose qui constituent les parois cellulaires sont transparents. Le rayonnement reçu est donc soit réfléchi, soit transmis. En augmentant les longueurs d'onde du visible au PIR, on passe donc très brutalement d'une réflectance très faible à un plateau de réflectance (près de 50% de réflectance). La position de l'inflexion (lieu où la réflectance augmente brutalement) est variable selon les types de végétation. D'autres facteurs peuvent également expliquer la variabilité des réponses spectrales, que ce soit à l'échelle de la feuille ou du peuplement : âge, état physiologique, ombre, densité du couvert, interférences sol-végétation etc. (Devineau, 1990). Ce "shift" important a conduit les géographes et télédéTECTEURS à la fabrication de nombreux **indices⁶³ de végétation** faisant ressortir la valeur de cet écart entre la réflectance dans le visible et le proche infra-rouge afin de mesurer l'activité photosynthétique de la plante.

2.3.2. ... à la production d'indices de végétation

Les indices de végétation qui servent ici à l'estimation de la masse de la couverture végétale sont issus de traitements des courbes de réflectance du rouge et du proche infrarouge⁶⁴ (PIR): la bande rouge coïncidant avec une forte absorption du rayonnement, et la bande infrarouge offrant au contraire une réflectance élevée, cela génère un écart important entre ces deux niveaux. Des combinaisons de ces deux bandes sont donc susceptibles de produire de bonnes capacités discriminantes et révéler des propriétés particulières des végétaux. Issus d'un rapport de variables, les indices s'expriment selon un intervalle numérique choisi arbitrairement, et "s'ils conservent une dimension de luminance, comme ceux résultant de combinaisons linéaires de bandes spectrales, leur signification est néanmoins celle d'une variable thématique" (Caloz, 2002). Dans le cadre de ces travaux nous travaillerons donc à partir

⁶² CNES : Centre National d'Études Spatiales, CEOS : *Committee on Earth Observation Satellites*.

⁶³ " *Variable synthétique, numérique qui caractérise l'intensité ou l'extension d'un phénomène trop complexe pour être décomposé en un nombre maîtrisable de paramètres*" (Caloz, 2002).

⁶⁴ Les végétaux présentant une faible réflectance dans le bleu, la bande correspondante est donc de peu d'intérêt ; et la bande verte, malgré une réflectance plus élevée traduisant des propriétés discriminantes pour les végétaux reste peu utilisée en raison de sa dépendance à l'égard des conditions atmosphériques.

d'images non spectrales, c'est-à-dire "des images dont l'information affectée à chaque pixel est une valeur dérivée des luminances spectrales pour exprimer une propriété des objets de la surface terrestre" (Caloz, 2002). Le couvert végétal, qui est un objet d'étude préférentiel en télédétection a, par conséquent, donné lieu à un nombre important d'indices de végétation plus ou moins élaborés à finalités diverses, depuis l'estimation de la masse végétale verte à l'inventaire de cultures par segmentation de l'indice, en passant par la description de l'état phénologique de la couverture végétale. Le NDVI est l'un des plus anciens, mais aussi l'un des plus utilisés des indices de végétation.

2.3.3. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Parmi les nombreux indices de végétation développés par les chercheurs, nous avons choisi d'utiliser l'indice de la différence normalisée, plus connu sous le sigle de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), en raison de sa très large utilisation et de son emploi relativement simple (cette transformation étant offerte par la plupart des logiciels de traitements d'image), ce qui offre des avantages quant à la reproductibilité du modèle. Proposé par (Rouse et al., 1974), cet indice s'exprime par l'équation suivante :

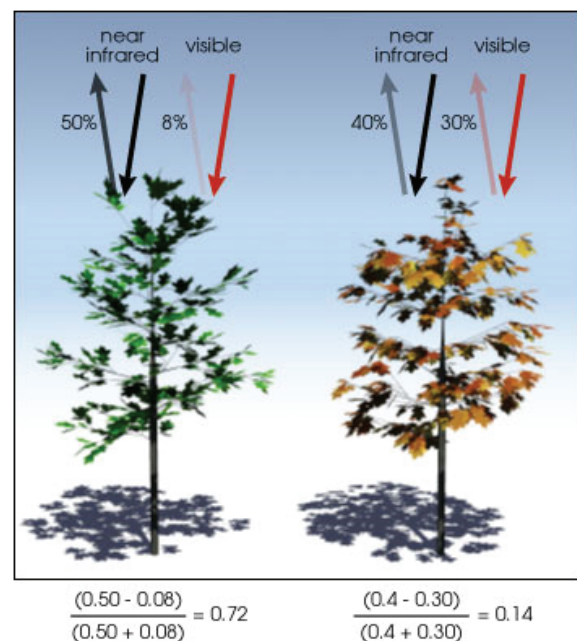
$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

Avec PIR et R représentant respectivement les mesures de réflectance spectrale dans le proche infra-rouge et le rouge

Équation 3 : calcul du NDVI

Source : Earth Observatory, Nasa

Figure 61 : NDVI et activité chlorophyllienne



NDVI is calculated from the visible and near-infrared light reflected by vegetation. Healthy vegetation (left) absorbs most of the visible light that hits it, and reflects a large portion of the near-infrared light. Unhealthy or sparse vegetation (right) reflects more visible light and less near-infrared light. The numbers on the figure above are representative of actual values, but real vegetation is much more varied. (Illustration by Robert Simmon).

Le NDVI présentant une relation avec la densité de végétation verte, cela a pour corollaire une saturation à mesure que cette dernière augmente, de sorte que sa sensibilité est intéressante surtout pour les milieux couverts peu denses (Holben, 1986). Concernant l'interprétation de l'indice, la figure 61 et le tableau 8 nous enseignent que plus la valeur du ratio est importante, plus l'activité photosynthétique est intense (Sellers, 1985, Weier et Herring, 2010).

Bien que les valeurs puissent différer sensiblement selon les types de satellites et de capteurs, Weier et Herring (2010) rapportent les adéquations suivantes :

Mesures du NDVI (valeurs moyennes)	Type de formation végétale
< 0,1	Espaces désertiques
De 0,2 à 0,3	Buissons et prairies
De 0,6 à 0,8	Forêts tempérées et tropicales

Tableau 8 : mesures du NDVI et types de végétation

2.3.4. L'indice de surface foliaire (leaf area index)

Autre indicateur fréquemment utilisé, l'indice de surface foliaire (*Leaf Area Index, LAI*) est une grandeur sans unité exprimant la surface de feuilles par unité de surface au sol, et présente des relations évidentes avec la productivité (Breda, 1999). Il est ainsi utilisé pour évaluer entre autres l'état de santé d'une forêt ou la biomasse aérienne. Il existe deux moyens de mesurer le LAI : mesure directe ou indirecte. La mesure directe consiste à « collecter les retombées de litière à l'automne sur des superficies échantillons connues et d'en évaluer ou mesurer la surface [...] ». Cette méthode est néanmoins destructive et lourde à mettre en œuvre ». Pour pallier ce problème, les scientifiques utilisent « des photographies prises du sol en visée verticale, ou évaluent l'atténuation de la lumière par les feuilles en comparant une zone dégagée et une zone de forêt » (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2002). Là encore, ces deux méthodes présentent des limitations importantes en termes de mise en œuvre, et impliquent l'utilisation de matériel spécifique (analyseurs de couvert). Enfin, « la télédétection (aéroportée ou satellitale) ouvre une autre voie possible de quantification de l'indice foliaire, à plus grande échelle (grande parcelle, massif forestier, région ou continent), en évaluant au dessus du couvert la réflectance du feuillage, dans des gammes de longueurs d'ondes spécifiques en la distinguant de la réflectance propre du sol » (Breda, 1999), ce qui rejoint d'un point de vue méthodologique le principe de construction de la grande majorité des indices de végétation. De nombreux modèles physiques ou semi-empiriques de transferts radiatifs ont été développés, ainsi que des tentatives d'estimer le LAI en utilisant des indices de végétation obtenus en télédétection. La formulation couramment trouvée dans la littérature scientifique (Baret et al., 1989 ; Perdigo et supit, 1999 ; Nziengui et al. 2002) est la suivante :

$$LAI = - \frac{1}{K} \ln \left| \frac{NDVI_8 - NDVI}{NDVI_8 - NDVI_{back}} \right|$$

Équation 4 : calcul du LAI à partir du NDVI

où NDVI est l'indice de végétation normalisé, $NDVI_8$ est la valeur maximale du NDVI observé, $NDVI_{back}$ est la valeur minimale correspondant à un sol dépourvu de végétation et K est un paramètre d'extinction caractérisant l'absorption des radiations lumineuses dans la canopée végétale. L'estimation du LAI par télédétection passe ainsi par l'utilisation d'indices de végétation moins complexes. Or, d'un point de vue opérationnel, Bariou et al, (1985) estiment qu'il est souvent plus avantageux de s'appuyer sur un indice simple dont on connaît les limites que sur un indice complexe mais sujet à des influences difficiles à estimer ; « les nuances que les auteurs ont parfois voulu apporter sont souvent « occultées » par le bruit statistique qui affecte l'image » (Caloz, 2002). C'est pourquoi nous avons choisi de travailler à partir du NDVI, simple à mettre en oeuvre. Malgré une sensibilité aux conditions atmosphériques, le NDVI connaît un taux d'application élevé, et est "en quelque sorte l'indice de référence" (Caloz, 2002), ce qui est un atout pour la reproductibilité de la méthode. D'autre part, de nombreux travaux éprouvent la relation NDVI/masse ligneuse, l'intensité de l'activité photosynthétique étant intuitivement corrélée à la masse de biomasse ligneuse, biomasse qu'il nous est nécessaire d'estimer (en volume ou en poids) pour déterminer par la suite un potentiel en plaquettes forestières.

2.3.5. Matériel

Concernant le choix de l'image satellitale, nous avons opté pour une image Landsat 7 Thematic Mapper (TM) datant de 1999, ce qui présente l'avantage de ne pas présenter de décalage temporel trop important par rapport aux relevés dendrométriques effectués en 1996. Les choix ont non seulement été guidés par les ressources disponibles au laboratoire Théma (Landsat, IRS), mais également par une interrogation fondamentale : vaut-il mieux privilégier la résolution spatiale ou spectrale ? Compte tenu de nos objectifs de travail et de la taille de la zone d'étude (relativement vaste), nous avons opté pour une image TM, qui présente en outre l'avantage de la comparabilité étant donné que la grande majorité des études portant sur l'estimation de la biomasse ou des volumes ligneux en faisant intervenir la télédétection se basent sur des images Landsat.

L'instrumentation embarquée est un radiomètre Thematic Mapper (capteur) effectuant des mesures dans sept canaux pour une résolution spatiale de 30 m (15 m en panchromatique) :

Bande	Bande spectrale	Résolution	Utilisation
1	0.45 - 0.515 μm	30m x 30m	Différenciation sol/végétaux, zones côtières
2	0.525 - 0.605 μm	30m x 30m	Végétation
3	0.63 - 0.69 μm	30m x 30m	Différenciation des espèces végétales
4	0.75 - 0.90 μm	30m x 30m	Biomasse
5	1.55 - 1.75 μm	30m x 30m	Différenciation neige/nuage
6	10.4 - 12.5 μm	30m x 30m	Thermique
7	2.09 - 2.35 μm	30m x 30m	Lithologie

Tableau 9 : caractéristiques des capteurs Landsat 7 TM

Source : EO Edu

Le recours à ces deux types de données (caractéristiques dendrométriques et signatures spectrales) nous permettra de caractériser la ressource ligneuse et les types de couvert, et d'effectuer une première cartographie de biomasse dérivée du NDVI.

3. Déterminer la fraction énergisable de la ressource ligneuse

Définir les potentiels de biomasse énergisable que les espaces boisés sont susceptibles de produire, implique idéalement de prendre en considération un certain nombre de contraintes influant sur la mobilisation des ressources ligneuses. Ces contraintes sont fortement liées aux caractéristiques mêmes des espaces forestiers, et sont essentiellement :

- environnementales (on ne peut pas prélever plus de matière ligneuse qu'il ne s'en produit),
- technico-économiques (certaines zones sont difficilement exploitables du fait de la topographie accidentée ou d'une mauvaise accessibilité). À titre d'exemple, la topographie conditionne très fortement les prix de mobilisation de la matière ligneuse, du fait des difficultés de débardage.

Étant donné l'hétérogénéité et la complexité de la ressource ligneuse ainsi que les incertitudes portant sur les modalités d'exploitation, nous sommes amenés à poser un certain nombre d'hypothèses et de postulats qui nous permettront par la suite de définir une quantité de bois valorisable en fonction de l'intégration de ces contraintes, à la fois dans les espaces forestiers et les secteurs boisés non forestiers.

3.1. Méthodes d'estimation de la biomasse ligneuse (en forêt et hors forêt)

3.1.1. Principe de la démarche

Définir une régularité et une pérennité de l'approvisionnement en bois-énergie passe par l'estimation du bois disponible (Goudet, 2008). La détermination de la biomasse ligneuse constitue ainsi la première étape de notre protocole. Dans le cadre de ces travaux, nous disposons de deux sources de données distinctes, nous donnant deux types d'informations différentes : images satellitales et données d'inventaires (cf. figure 63). Cependant, nous nous heurtons d'emblée à un problème majeur de fiabilité de l'information puisque "la mesure des volumes forestiers est actuellement une opération longue et sujette à l'erreur, ce qui constitue un obstacle pour les chercheurs, les gouvernements et les industriels, sur les plans scientifiques, politiques ou économiques" (Renaud, 2000). Et comme on ne peut matériellement pas mesurer chaque arbre sur le terrain, il faut s'employer à trouver une méthode permettant d'extrapoler des volumes ligneux, en conciliant la précision spatiale désirée (en termes de volumétrie et de localisation), l'extension géographique à couvrir, le temps imparti pour ces analyses, les données disponibles et nos objectifs. En théorie, la détermination plus ou moins exacte du volume passera par la mesure de diverses parties de l'arbre (Rondeux, 1993). Cependant, selon Renaud (2000), à toutes fins pratiques, une grande exactitude n'est en général ni atteignable (sauf après coupe), ni même nécessaire. En effet, l'objectif de ces travaux n'est pas de quantifier la biomasse de manière ultra-précise. On peut viser soit à connaître certains paramètres de chaque arbre, soit à connaître des valeurs moyennes, cette dernière approche étant la plus pratique dans le cas d'une évaluation extensive. Labrecque et al (2006), passent en revue quatre méthodes d'estimation de la biomasse :

- les k-NN (k-nearest neighbor algorithm)
- les indices de végétation,
- les classifications de l'occupation du sol,
- les régressions

Néanmoins, aucune d'entre elles n'a été démontrée comme étant la plus appropriée. Dans le cadre de nos travaux, nous travaillons à partir de données nous permettant d'estimer des volumes moyens par hectare autour du point d'inventaire, ce qui est suffisant en regard de nos objectifs. Nous travaillerons notamment à partir de variables d'essence et de densité spatiale (nombre de tiges à l'hectare), qui sont deux des principales variables influençant le volume⁶⁵, et pour lesquelles nous avons des informations. Ce type de méthodologie, basée sur la corrélation entre des caractéristiques dendrométriques et des indices de végétation a été maintes fois éprouvée pour l'estimation de la biomasse ligneuse aérienne : tronc + branches +

⁶⁵ Les autres variables étant la hauteur, le diamètre du tronc et la couronne (Berard et Cote, 1996)

feuilles (Luther et al, 2006 ; Warren et al, 1992 ; Bencherif, 2009 ; Hall et al, 2006 ; Roy et Ravan, 1996 ; Gonzales-Alfonso et al, 2008 ; Mäkela et Pekkarinen, 2004, Warren et al., 1992). Bien que présentant certaines limites (inhérentes notamment au biais de l'imagerie satellitaire et à la précision des caractéristiques dendrométriques), cette méthode n'a néanmoins jamais été utilisée à notre connaissance dans le cadre d'un protocole élargi de définition de potentiel dendroénergétique⁶⁶.

Au vu de ces différents éléments, nous avons opté pour une méthode permettant d'estimer des volumes ligneux sur l'ensemble du couvert boisé (forestier et non forestier) en établissant une relation entre des résultats d'inventaire (données discrètes, relevés dendrométriques aux points d'inventaire, cartographie des types de formations forestières), et des données de télédétection. L'utilisation de la télédétection prend tout son sens dans la mesure où elle "permet d'accéder à une estimation de la répartition des peuplements plus complète et plus précise" et ce, "même si les nouvelles surfaces identifiées ne répondent peut-être pas aux critères d'exploitabilité (volume minimal exploitable par exemple)" (Goudet, 2008).

3.1.2. L'utilisation des données satellitaires et leur couplage aux données d'inventaire

Les informations issues du couplage entre données d'inventaire, cartographie forestière et informations satellitaires peuvent théoriquement nous permettre d'obtenir des informations sur les espaces boisés forestiers et non forestiers, par le biais de méthodes d'analyse spatiale fondées sur des régressions statistiques entre les volumes ligneux (ou biomasse) et les valeurs des indices de végétation. Un état de l'art des publications traitant de cette problématique met en évidence une corrélation entre ces deux types de variables (Luther et al, 2006 ; Warren et al, 1992 ; Bencherif, 2009 ; Hall et al, 2006 ; Roy et Ravan, 1996 ; Gonzales-Alfonso et al, 2008 ; Mäkela et Pekkarinen, 2004). La valeur du coefficient de détermination varie néanmoins sensiblement selon les espèces ligneuses, la précision des données dendrométriques et la qualité de l'image satellite (couvert nuageux, interférences atmosphériques etc.).

Il faut donc avoir conscience des biais pouvant être induits par les images satellitaires (imprécisions liées à la signature spectrale des objets notamment dans un milieu aussi complexe que la forêt). De plus, ces données ne sont pas précises en ce qui concerne les types de peuplements⁶⁷ et leurs modes de gestion. Cette méthode nous permet notamment de

⁶⁶ En effet, la très grande majorité des publications utilisant cette méthodologie le font dans l'objectif ultime de cartographier de la biomasse et les méthodes d'estimation des potentiels en plaquettes forestières développés par le corps forestier n'exploitent pas ce type de données (conféré chapitre sur les différentes méthodes d'estimation de la biomasse forestière).

⁶⁷ Pour palier ce problème nous effectuerons des statistiques sur la signature radiométrique des différents types de peuplements, issus de la cartographie forestière de l'IFN.

localiser les arbres hors forêt, et d'en estimer un potentiel avec l'introduction de fourchettes hautes et basses compte tenu des incertitudes précédemment évoquées. Il faut également avoir conscience des approximations des données d'inventaire, que ce soit au niveau de la géolocalisation (imprécises dans un intervalle de plus ou moins 200 mètres) ou des biais inhérents aux méthodes d'échantillonnage.

- Nous avons donc d'une part des données de l'IFN avec :
 - Une cartographie forestière résultant de campagnes de terrain et de photo-interprétation, nous donnant des informations sur les structures forestières,
 - des relevés dendrométriques obtenus par échantillonnage stratifié, pouvant déjà nous permettre de fournir le volume moyen en m³/ha pour chaque type de structure forestière ou stratification⁶⁸ échantillonné. Cela suppose néanmoins de faire l'hypothèse que les strates de nos terrains d'étude possèdent les mêmes caractéristiques, et que par conséquent il est possible de généraliser le volume afférent à une placette d'inventaire. Les estimations de toutes les strates peuvent ensuite être combinées pour produire le volume global sur pied du peuplement.
- D'autre part des images satellitales desquelles nous pouvons être en mesure d'estimer la biomasse. Les méthodes d'analyses radiométriques ont largement été utilisées et reposent sur un modèle de régression entre des valeurs spectrales à des mesures ou des estimations dendrométriques (Franklin, 1986 ; Roy et Ravan, 1996 ; Jakubauskas et Price, 1997 ; Foody et al, 2003). Ainsi l'estimation de la biomasse peut se faire à partir de la relation entre le volume ou l'un de ses indicateurs, et un indice du milieu (Lelong, 2008, cité in Goudet, 2008).

Il convient de préciser que les chercheurs ayant trouvé des corrélations significatives entre les signatures spectrales et les volumes ligneux travaillent pour la plupart sur des zones spatialement très restreintes, ou dans des peuplements spécifiques et à partir de leurs propres données de terrain. Seul Gonzales-Alfonso et al (2006) trouvent de très bonnes corrélations entre les données d'inventaire forestier espagnol et le NDVI à l'échelle nationale. En France, nous n'avons pas connaissance de l'application d'un tel protocole, dont le but serait la construction d'une abaque de correspondance entre les volumes donnés par l'IFN et la signature spectrale /indices de végétation issus des traitements des images satellitales, en vue de définir des valeurs de biomasse pour les espaces boisés non forestiers pour lesquels nous ne possédons aucune information.

Le protocole réside en l'application d'une régression statistique (cf. figure 62) en vue de les rendre continues *via* un carroyage régulier (qui correspondrait à un carré de 30 m de côté). Le

⁶⁸ "La stratification dépend principalement de la densité et relativement de la hauteur" (Bencherif, 2009)

résultat sera donc une cartographie spatialement exhaustive de la biomasse aérienne (les arbres hors forêt étant eux aussi cartographiés).

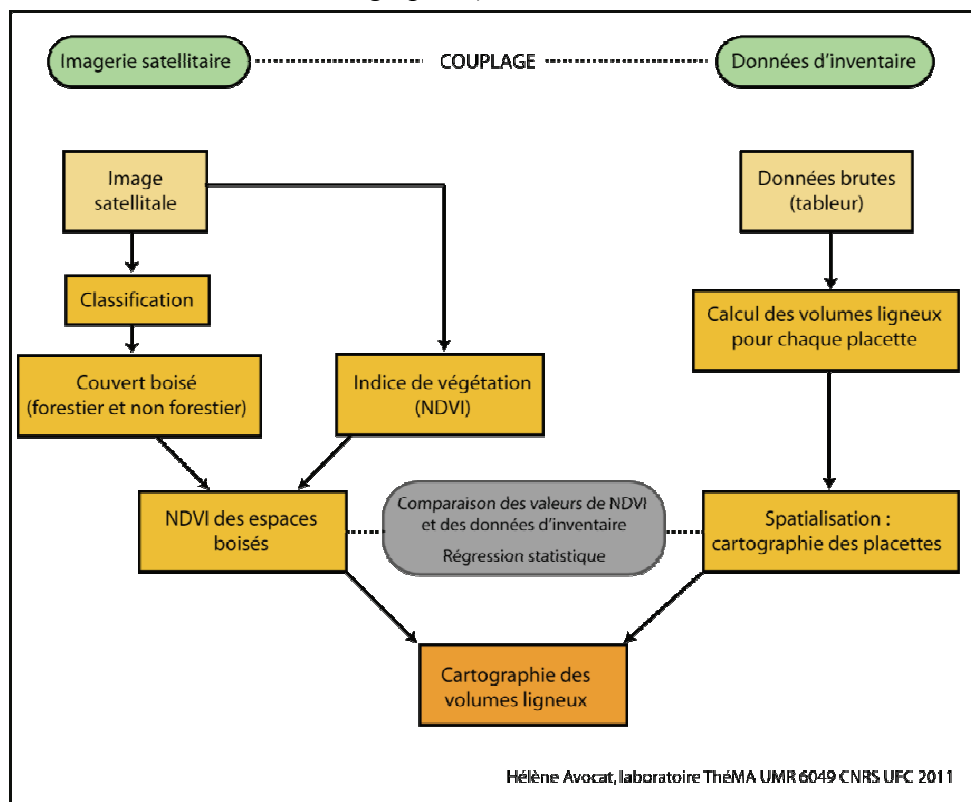


Figure 62 : méthodologie d'estimation et de cartographie des volumes ligneux

Cette méthodologie combinant données d'inventaire et télédétection répond tout à fait à des problématiques d'appréciation des volumes ligneux globaux à l'échelle de nos territoires d'étude (sous réserve bien entendu d'obtenir des corrélations suffisantes pour être exploitables). Et comme le dit à juste titre Goudet (2008), une fois les volumes ligneux évalués, "l'étape suivante qui consiste à délimiter dans la précision la ressource vers laquelle les investisseurs vont pouvoir se fournir demande une approche différente", en introduisant la notion de contrainte liée à l'exploitabilité des ressources ligneuses.

3.2. Déterminer la fraction énergisable des ressources ligneuses

L'exploitabilité des ressources ligneuses dépend de divers paramètres qui participent aussi à conditionner le potentiel énergisable. La connaissance de ces potentiels demande bien sûr une information sur la présence des couverts boisés, mais au-delà, il paraît nécessaire de :

- connaître la biomasse aérienne ligneuse ainsi que les caractéristiques des peuplements (âge, diamètre des tiges, essences, croissance etc.), afin d'évaluer la durabilité des prélèvements à des fins énergétiques,

- prendre en compte les contraintes technico-socio-économiques de mobilisation de la ressource ligneuse (pente, accessibilité, fragmentation spatiale, etc.) ;

Nous nous intéresserons ici en priorité aux contraintes d'ordre environnemental. A cela deux principales raisons : d'une part il y a un cruel manque d'informations sur la décomposition du prix de la plaquette forestière (fortement lié au marché du bois). D'autre part cet aspect a été en partie traité dans les PAT, alors que la dimension temporelle et le problème de la durabilité des prélèvements n'ont pas été abordés. Nous reviendrons en premier lieu sur les contraintes technico-économiques et les problèmes inhérents à leur intégration dans le modèle en l'absence de données et compte tenu des incertitudes liées aux marchés du bois. Puis nous aborderons les contraintes environnementales et la question du renouvellement de la ressource ligneuse.

3.2.1. Estimer les besoins concurrentiels

Selon Mewton (2007), "la nature de la ressource mobilisable varie d'un type de peuplement à l'autre", et "la cause principale de cette variation est l'existence de débouchés déjà présents". La situation est d'autant plus complexe qu'"en terme d'usages concurrents sur la matière forestière, on constate que les compartiments bois d'industrie et bois-énergie se recouvrent très fortement et s'entrecroisent en fonction de la logique économique du marché de trituration, avec une très forte variabilité de l'usage en fonction de la structure des prix liée aux conditions de marché du secteur panneau-papier" (Boittin et al., 2010).

Il s'agit en l'occurrence du bois de chauffage (utilisé par les ménages sous forme de bois bûches) et du bois d'œuvre/bois d'industrie. Ces débouchés ne devant pas être pénalisés, la matière ligneuse mobilisable doit se situer au niveau de peuplements ou de compartiments non commercialisés (menus bois et branches, rémanents). Autrement dit, il s'agit d'évaluer pour les peuplements de futaie de feuillus et résineux, la masse de bois fort (*via* les facteurs d'expansion de biomasse) afin de la soustraire de la biomasse aérienne globale, mobilisable à des fins énergétiques (et ce aussi bien pour les éclaircies que pour l'exploitation à proprement parler). La proportion de bois fort tige mobilisable pour l'industrie est estimée dans notre modèle au moyen des tables de production publiées par Decourt (1984).

En revanche, l'estimation de la proportion de biomasse ligneuse susceptible d'être mobilisée pour le chauffage du secteur domestique est très délicate, en raison de l'absence de statistiques régulières et exhaustives sur la production ou la vente de bois de chauffage (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement⁶⁹). Les enquêtes logement de l'INSEE ou l'enquête CEREN sur la régionalisation du bilan bois peuvent donner des informations sur la consommation du secteur domestique. Il s'agit

⁶⁹ http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/article.php3?id_article=1072

néanmoins de données agrégées à l'échelon régional, et exprimées en stères. Pour des raisons de commodité, et en raison de la complexité des circuits d'approvisionnement (souvent informels), « la production de bois-énergie est considérée comme étant égale à sa consommation, ce qui revient à considérer que les variations de stocks et le solde import-export sont négligeables ». À cela s'ajoute la problématique de l'affouage, encore pratiquée dans les communes forestières, et pour lesquelles nous n'avons aucune information. Néanmoins, nous supposons que la consommation de bois d'affouage est incluse dans les statistiques du CEREN (étant donné qu'il s'agit de circuits de proximité et que la production est supposée être égale à la consommation). N'ayant aucune information sur les prélèvements de bois-bûches et sur les pratiques d'affouage, il est par conséquent impossible de les intégrer dans notre modèle au même titre que les prélèvements sous forme d'éclaircie ou d'exploitation. La seule chose que nous puissions faire est d'en estimer la demande à l'échelle d'une zone (à partir du nombre d'unités de consommation estimées à partir du nombre de ménages) et de la comparer aux ressources mobilisables à l'échelle de cette zone afin de vérifier si la demande n'est pas supérieure aux quantités de biomasse prélevables définies dans le modèle.

À l'échelle de la Franche-Comté, la consommation de bois-énergie serait de l'ordre de 2 millions de stères (source : SOES, Atmo Franche-Comté), soit environ 300000 tep⁷⁰ ou 1 million de tonnes de bois⁷¹. 85 % de ce total sont réputés consommés par le chauffage résidentiel (bois bûche pour l'essentiel), ce qui laisse apparemment **15% pour les secteurs industriel et collectif**. Cette estimation est à prendre avec recul. En effet, on estime par ailleurs que la consommation moyenne d'un ménage se chauffant au bois-bûche est de 11,5 stères/an (Association des régions françaises du Grand Est). Ce qui voudrait dire que le bois bûche consommé en Franche-Comté par le secteur domestique (2 millions de tonnes *85%) représente environ 150 000 ménages se chauffant au bois, ce qui paraît très élevé au regard des 503000 ménages recensés dans la région. Nous sommes ici, une fois de plus, devant une incertitude très large. Les proportions de bois bûche et de plaquettes forestières diffèrent selon les caractéristiques locales (ruralité, nombre d'unités de consommation, nombre et puissance des chaufferies collectives etc.). Selon les Communes Forestières, la consommation de bois bûche du Pays Loue-Lison est de 32100 tonnes/an (soit 19600 tonnes de matière sèche selon le coefficient de conversion donné par ONF Energie), alors que la consommation du secteur collectif est de 1370 tonnes de matière sèche par an. Le ratio de plaquettes forestières est donc de 6,5% (93,5 % pour le bois bûche). Pour la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon, nous ne disposons en revanche

⁷⁰ Selon les conventions usuelles détaillées dans le guide de la DGEMP sur les équivalences énergétiques, 1 stère = 0,147 tep ou 1700 kWh (pour une humidité de 30 %). Ce facteur de conversion est à utiliser avec prudence car il est difficile *a priori* de trouver une équivalence fixe et unique entre masse, volume et contenu énergétique en raison de la forte variabilité des dendrocombustibles.

⁷¹ Cf Mémento de l'AJENA : 1 stère = 0,5 t. de bois vert dur ou 0,4 t. de bois vert tendre. En général, le secteur domestique préfère les bois feuillus durs (plus denses et contenant plus d'énergie que les résineux à volume égal). Par conséquent nous avons utilisé un facteur de conversion de 0,5.

d'aucune information sur la consommation de bois bûche. Par défaut nous lui affectons le même ratio que pour la Franche-Comté (15% de plaquettes forestières, 85 % de bois bûche).

3.2.2. Exploitabilité et contraintes technico-socio-économiques

Selon Mewton (2007), « les critères de réfaction technique sont les **contraintes physiques, techniques ou socio-économiques** qui rendent difficile, voire impossible, l'exploitation de la ressource en bois-énergie, et donc réduisent les surfaces de peuplements où la matière est mobilisable pour le bois-énergie ».

3.2.2.1. La question de la fragmentation spatiale de la propriété forestière

La fragmentation de la propriété forestière est de loin le principal obstacle à la mobilisation des bois en forêt privée (FAO). Nous pouvons donc supposer qu'en l'absence de remembrement ou d'action concertée des propriétaires, le potentiel en plaquettes forestières est par conséquent considérablement réduit, notamment dans les secteurs où le parcellaire est de petite taille et très morcelé. Un entretien avec le CRPF⁷² de Franche-Comté et l'ONF à ce propos a mis en évidence que la complexité du parcellaire et l'hétérogénéité des propriétaires (marqués par des intérêts divergents) rendait difficile l'estimation précise de la proportion de propriétaires souhaitant exploiter leurs parcelles, leur localisation et les modalités de gestion envisagées. Ainsi, à première vue nous pourrions penser qu'un ensemble de parcelles de très petite taille issues de la propriété privée auront un potentiel théorique important, mais un potentiel effectif extrêmement faible en raison de l'absence de possibilité de gestion (sauf si un remembrement était effectué, et que les propriétaires aient tous une même volonté d'exploitation de leurs ressources, ce qui est peu probable compte tenu de l'hétérogénéité de ces derniers). Bien que le choix du propriétaire soit "un paramètre décisif" (Cemagref, 2007), nous ne pouvons pas l'intégrer dans le cadre de ces travaux en raison de la grande variabilité comportementale de ces derniers et de notre incapacité à l'appréhender et à la traduire dans une optique de modélisation qui ne soit pas orientée sur le comportement des agents. En revanche, la méthodologie et les modèles que nous développons sont des outils d'aide à la décision et peuvent à ce titre guider les choix des propriétaires.

3.2.2.2. Accessibilité et exploitabilité

Le principal obstacle à la mobilisation de la matière ligneuse (espaces forestiers et non forestiers confondus) est lié à son accessibilité, qui favorise ou non la réalisation de chantiers d'exploitation forestière. Cette accessibilité est définie par la conjonction de deux paramètres : topographie et desserte (figure 63), qui ont une incidence très forte sur la production de bois,

⁷² Centre Régional de la Propriété Forestière.

notamment lors les phases de bûcheronnage et de débardage, dont les postes de dépense dépendent étroitement des conditions locales.

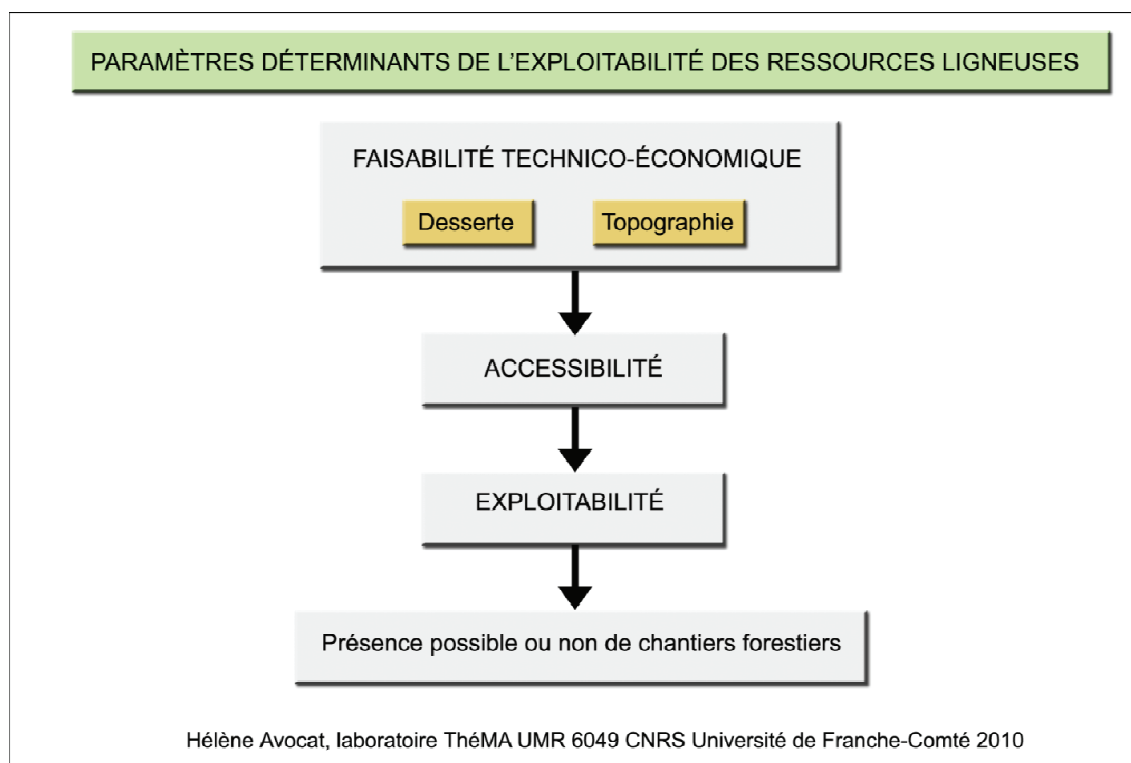


Figure 63 : accessibilité et exploitabilité

La configuration topographique et le réseau de desserte forestière ont une influence décisive sur la mobilisation de la matière ligneuse. L'IFN stipulant que l'exploitabilité de chaque lieu, potentiellement producteur, est déterminée par la conjonction de quatre facteurs.

- Les conditions d'accès, définies par la présence effective ou potentielle de pistes forestières. Foréo préconise qu'une parcelle forestière ne doit pas être à plus de 500 mètres d'une desserte forestière, d'une piste ou d'un chemin de débusquage.
- Les distances de débardage, qui ont une forte incidence sur l'exploitabilité de la ressource dans la mesure où elles doivent être strictement inférieures à 1000 m pour des zones dont la pente est comprise entre 15 et 30%, et si possible inférieures à 2000 m pour des pentes inférieures à 15%.
- La portance du terrain, qui représente la capacité des sols à supporter des charges. Selon Eric Lucot⁷³, aucune cartographie pédologique n'est à ce jour disponible sur nos terrains

⁷³ Maître de Conférences à l'UMR 6249 Chrono-Environnement, , spécialiste en pédologie (notamment des sols forestiers).

d'étude. Cet aspect méconnu mériterait néanmoins toute notre attention, car les possibilités d'exploitation dépendent fortement de la portance des sols. D'autre part la préservation des caractéristiques pédologiques est nécessaire à la durabilité de la gestion forestière (le tassement dû aux passages successifs d'engins de débardage à des finalités énergétiques a d'ores et déjà été mis en évidence dans la région, et les conséquences sur la viabilité des ressources ligneuses commencent à se faire ressentir : appauvrissement des sols et des espèces notamment⁷⁴). Ce critère n'étant pas renseigné, à notre connaissance, il sera pas pris en compte.

- La topographie, et plus particulièrement la pente, jouent un rôle réputé majeur dans la définition de l'exploitabilité. L'IFN et le Cémagref proposent une échelle de difficulté d'exploitation, présentée par le tableau suivant (figure 64), où la pente (discretisée en classes), est mise en relation avec les autres facteurs exposés ci-dessus.

Conditions d'accès	Distance de débardage	Sol non accidenté et portant				Sol accidenté ou mouilleux			
		Pente < 15%	Pente 15-30%	Pente 30-70%	Pente ≥ 70%	Pente < 15%	Pente 15-30%	Pente 30-70%	Pente ≥ 70%
Sans création d'infrastructure	< 200 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
	200-500 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
	500-1000 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
	1000-2000 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
	≥ 2000 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
Travaux spéciaux, piste possible	200-500 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
	500-1000 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
Piste impossible	200-500 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
	500-1000 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
Inexploitable	Inexploitable	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile

Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
--------	---------	-----------	----------------

Figure 64 : classes d'exploitabilité IFN

Source : IFN

Le Cémagref (2007), considère que « le volume théoriquement disponible par rapport au volume théorique », en tenant compte des classes d'exploitabilité de l'IFN est de : 100 % pour la classe 1 (facile), 80 % pour la classe 2 (moyen), 30 % pour la classe 3 (difficile), 0 % pour la classe 4 (très difficile). Bien que des informations sur les classes d'accessibilité nous aient été fournies par l'IFN pour chaque point d'inventaire levé, il est impossible de les exploiter telles quelles, étant donné qu'elles sont disponibles de façon ponctuelles, et par conséquent

⁷⁴ Entretien du 20 septembre 2010.

difficilement généralisables (même avec des méthodes d'interpolation spatiale), en raison de la dispersion des points et de leur éloignement les uns par rapport aux autres, dans une configuration où la topographie et l'accessibilité sont extrêmement variables. D'autre part, nous ne disposons d'aucun réseau de desserte forestière à jour (la DB TOPO ne fournissant pas l'intégralité des chemins forestiers). Il convient néanmoins de préciser que les engins d'exploitation forestière peuvent cheminer sans problème hors des dessertes, et que par conséquent le facteur "pente" est le plus discriminant en ce qui concerne l'exploitabilité.

Des classes de pente peuvent être calculées à partir des modèles numériques de terrain (BD Alti, SRTM) : cette variable peut donc être renseignée de façon complète et homogène. Dans notre modèle, nous pouvons simplifier les classes d'exploitabilité de l'IFN en ne prenant en compte que le facteur pente (inférieur à 15 %, de 15 à 30%, de 30 à 70% et supérieur à 70%), et en affectant les fractions de volume exploitable telles que définies ci-dessus par le Cemagref (2007).

3.2.2.3. Le problème de l'intégration des contraintes technico-économiques dans le modèle

La dimension économique est indissociable des contraintes de mobilisation technique (Mewton, 2007). Bien que cet aspect soit extrêmement important (notamment pour les maîtres d'ouvrage des chaufferies), le but de notre démonstration n'est pas de fournir des informations chiffrées sur le prix de revient en euros du MWh de plaquettes forestières pour chaque parcelle ou chaque cellule exploitée. En effet, la valeur marchande des plaquettes forestières dépend non seulement des conditions du marché (des dynamiques de l'offre et de la demande), mais également des distances de transport, du coût de la matière première, des contraintes de mobilisation, etc. (cf. tableau 6). Les deux postes de dépense principaux en matière de mobilisation du bois (bûcheronnage et débardage) varient ainsi de 8 à 53 % selon les contextes forestiers. La synthèse effectuée par le Cemagref (2007) démontre que le bûcheronnage mobilise de 7 à 29 % des postes de dépense globaux, et le débardage de 1 à 24 %. Cette forte variabilité s'explique par l'importance des conditions locales dans la tenue des chantiers forestiers et la récolte du bois : distance de débardage, types et quantité d'arbres etc. Ces importantes variations empêchent ainsi la généralisation des coûts, qui doivent être évalués au cas par cas selon la configuration des chantiers forestiers. Quant aux contraintes d'ordre socio-économiques (définies selon Mewton (2007) par le morcellement, les conflits d'usage avec le bois de feu, et la pénétrabilité commerciale⁷⁵), elles font référence à des comportements d'acteurs difficilement modélisables. En vue d'appréhender la concurrence interfilière, nous appliquons des taux de prélèvements tenant compte des autres besoins potentiels.

⁷⁵ Selon Mewton (2007), la pénétrabilité commerciale correspond à la facilité de démarcher les propriétaires et à leur activité sylvicole.

De la même façon qu'il est difficile d'avoir une visibilité à court ou moyen terme sur la localisation des chantiers forestiers, il est impossible de prévoir qu'elle sera la décomposition du coût des plaquettes forestières. Compte tenu de la volatilité des marchés, des fluctuations possibles des coûts de production (main d'œuvre, carburants, etc.) et des prix du bois, délivrer une tarification précise des coûts des plaquettes entrée chaufferie n'aurait guère de sens en regard de nos objectifs de travail. D'une part car la ressource est mal connue à la base, et d'autre part car si les conditions actuelles déterminent pour l'heure des zones inexploitable, cela serait susceptible de changer si par exemple la demande venait à augmenter brutalement, faisant ainsi monter les prix des combustibles. Or, les marchés actuels étant en plein développement, cela rend hasardeux les estimations des différents postes de dépense. Le but recherché est en effet de proposer un modèle intégrant au mieux les variables connues ou pratiquement évaluables, et qui contribuent à renforcer la faisabilité de la mise en œuvre de la méthodologie. Notons enfin que le premier problème est bien d'estimer une ressource maximale mobilisable loacelement, au-delà de laquelle il paraît peu raisonnable de spéculer pour le développement de l'énergie bois.

De même, la distance aux infrastructures de desserte forestière et la présence de places de dépôt ou de retournement conditionne l'accessibilité aux ressources et les facilités d'exploitation. Par conséquent nous pouvons supposer que les zones les plus accessibles ont des ressources mobilisables plus facilement et présentent par conséquent un potentiel dendroénergétique plus important. Cependant, il s'agit également de considérations technico-économiques susceptibles de changer en fonction des termes du marché. De plus, si la présence de desserte facilite l'accessibilité aux ressources ligneuses, les engins d'exploitation forestière peuvent tout à fait s'éloigner des chemins de desserte et s'affranchir de cette contrainte pour accéder à un chantier forestier si cela est nécessaire. Il est bien sûr possible à titre indicatif de donner des informations sur ces contraintes, et de cartographier les pentes (figure 65) et la desserte forestière au moyen des BD ALTI et BD TOPO (bien que cette dernière ne soit pas forcément à jour au niveau des infrastructures de desserte forestière).

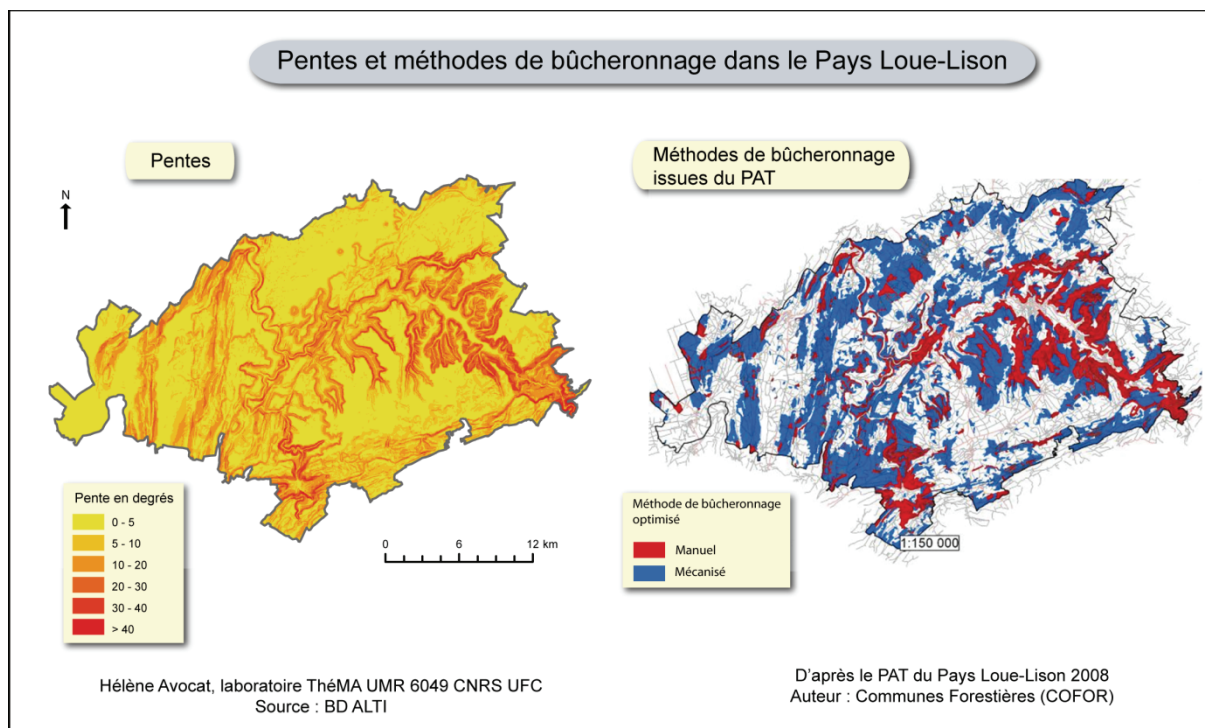


Figure 65 : incidence des pentes sur les méthodes de bûcheronnage

Ces éléments ayant par ailleurs été développés dans les PAT, il nous a semblé plus pertinent de nous concentrer sur la dimension durable de l'exploitation forestière (contraintes environnementales), avec la définition de possibilités de prélèvements en accord avec le rythme de croissance/régénération des différentes formations boisées pour chaque cellule boisée cartographiée.

3.2.3. Contraintes environnementales : assurer la durabilité des prélèvements en préservant la ressource en arbres et forêts

Espace multifonctionnel par excellence (fonctions productives, récréatives, cynégétiques), la forêt peut parfois être contrainte dans son exploitation par la préservation d'autres fonctions, notamment à caractère environnemental. La préservation de la qualité des sols, la protection des écosystèmes et la durabilité des prélèvements font partie de ces contraintes. Nous considérons ici les aspects "croissance/prélèvements" et "qualité et fertilité des sols".

3.2.3.1. Zonages de protection et fertilité des sols

Préservation de la qualité et la fertilité des sols

Les rémanents, constitués des branches et feuillages usuellement non valorisés, représentent une ressource énergétique intéressante. Néanmoins la récolte répétée de ces produits peut engendrer une exportation de minéraux et de matière organique non négligeable, et entraîner

une baisse de la fertilité à long terme (le feuillage ne représente que 3 à 12 % de la biomasse aérienne sèche, mais contient 10 à 50 % des éléments minéraux).

Dans le cadre d'une sylviculture durable sans apports de fertilisants externes, l'ADEME préconise dans la mesure du possible de :

- ramasser les rémanents une fois, voire deux, au maximum dans la vie d'un peuplement ;
- ne pas récolter toute la biomasse aérienne en laissant une part des rémanents au sol, et ce à chaque récolte (de fait il est techniquement difficile de récupérer plus de 70 % des rémanents).

Pour l'estimation des prélèvements des résidus d'exploitation, nous nous sommes appuyés sur le guide de *la récolte raisonnée des rémanents en forêt*, édité en 2006 par l'ADEME et nous prendrons comme base le minimum de 30 % de rémanents pour le sol.

Protection des écosystèmes

Certains espaces boisés (forêts de protection et espaces boisés classés) constituent des biotopes qu'il convient de préserver, et qu'une activité d'exploitation forestière risque de dégrader. Leur régime forestier spécial, parfois très strict, implique en effet une réglementation des aménagements et des activités, ce qui peut avoir des répercussions sur leur exploitabilité. Les forêts ainsi protégées sont inscrites dans les Plans Locaux d'Urbanisme, et dans les espaces boisés classés, "tout défrichement est interdit, la coupe et l'abattage d'arbres ne sont possibles librement que dans le cadre d'un plan simple de gestion agréé ou sur arrêté préfectoral (en cas d'existence d'un PLU). Néanmoins selon les données de la DIREN (2003), le seul espace classé forêt de protection en Franche-Comté est la forêt de la Goutte des Forges et de la Goutte d'Ulysse (Territoire de Belfort)⁷⁶. Concernant les autres zonages dédiés à l'inventaire ou à la conservation du patrimoine biologique de type ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt écologique Faunistique et Floristique), zones d'intérêt communautaire, arrêtés préfectoraux de biotope, Natura 2000, etc., ils n'ont pas toujours d'incidences sur les pratiques gestionnaires. Les zones Natura 2000 (présentes dans le périmètre du Pays Loue Lison), bien que soumises à des mesures de conservation et des modalités de gestion définies dans les documents d'objectifs ou DOCOB, ne sont pas systématiquement contraignantes pour les activités d'exploitation forestière (Emmanuel Cretin, Syndicat Mixte Loue Lison). Quant aux ZNIEFF, bien qu'initialement sans portée réglementaire, il est néanmoins conseillé d'en tenir compte dans un projet d'aménagement ou de gestion si des espèces protégées y sont présentes. Là encore l'exploitation forestière y est possible, et par conséquent nous n'en tiendrons pas compte dans le cadre de ces travaux.

⁷⁶ Classée en 1925 pour lutter contre le ravinement consécutif à sa sur-exploitation pour les reconstructions d'après la première guerre mondiale.

3.2.3.2. Pratiques sylvicoles et durabilité des prélèvements

La sylviculture, ou culture de la forêt, désigne l'ensemble des techniques visant à créer, renouveler, améliorer un peuplement forestier, dans une optique de production de biens (bois d'œuvre, bois d'industrie, bois-énergie) ou de services (qualité paysagère, protection pédologique etc.). Un certain nombre de règles et de pratiques sylvicoles (plantation, régénération, éclaircies, coupes finales, ...) sont mises en place, visant notamment à améliorer la qualité et la productivité des peuplements, assurer le renouvellement de la ressource, et veiller au maintien d'un bon état sanitaire des espaces forestiers.

Dans une optique de durabilité de la ressource, ces pratiques sylvicoles doivent tenir compte de la productivité des arbres ou des peuplements et de leur âge d'exploitabilité. Les modèles forestiers évoqués au début de ce chapitre se basent en grande partie sur des données de production et de scénarii de gestion. L'IFN (2006) affirme ainsi que « la ventilation est peu fine du fait de la diversité des données en jeu, [et que] spatialement aucune analyse n'est possible au niveau infra-départemental ». Seuls quelques documents de gestion (orientations régionales forestières, directives régionales d'aménagement, schémas régionaux d'aménagement, schémas régionaux de gestion sylvicole) donnent des informations sur la ressource et les prélèvements effectués à l'échelle régionale. Si les données d'inventaire nous renseignent sur les caractéristiques biologiques et morphologiques des forêts, elles ne nous donnent en revanche quasiment pas d'informations sur la forêt en tant qu'espace géré et exploité. Or, il est extrêmement difficile de trouver des données fiables et exhaustives sur les chantiers forestiers et les quantités de bois prélevées, ce qui est assez problématique quand on sait qu'à l'heure actuelle l'offre en plaquettes forestières dépend dans une large mesure des rémanents des chantiers d'exploitation pour le bois d'œuvre ou le bois d'industrie...

Des entretiens avec les institutions en charge de l'élaboration de ces documents (DRAAF, CES, CRPF,...) ont de surcroît révélé que les données de prélèvement/exploitation sont largement méconnues, et que la source la plus fiable (l'enquête annuelle de branche sur la récolte des bois et la production des sciages), ne donne pas de précisions sur la provenance exacte des ressources exploitées : la seule indication sur l'origine étant « provenance de Franche-Comté » ou « hors de Franche-Comté ». **Dans ces conditions et en travaillant à une échelle locale, est-il seulement possible d'intégrer des scénarii de gestion sylvicole satisfaisants ?** Et éplucher en détail chaque document de gestion (plan de gestion par exemple) est-il pertinent et compatible dans le cadre d'une démarche de modélisation impliquant une simplification dans une optique de reproductibilité du modèle ? D'autant qu'on y trouve davantage de grandes préconisations et orientations d'aménagement que de scénarii de gestion sylvicoles précis, et que bon nombre de parcelles ne sont couvertes d'aucun document de planification.

L'application de méthodes telles que les disponibilités brutes, ou les simulations par classe d'âge en vue de définir des seuils de prélèvement, sont certes intéressantes, mais impliquent à notre sens une connaissance parfaite de la ressource, ce qui n'est pas le cas à l'échelle d'espaces géographiques à l'échelle infra-régionale. En supposant que le niveau de détail devienne moins exigeant à mesure que la taille du territoire considéré augmente, il est alors possible de calculer des estimations prospectives de récolte, ainsi que l'ont fait les différents auteurs cités au début de ce chapitre. Ne disposant pas d'informations permettant de formuler hypothèses sylvicoles et scénarii d'exploitation à l'échelle locale, il est néanmoins possible de palier partiellement à ce problème en effectuant des calculs basées sur des hypothèses de prélèvements pour chaque "pixel" boisé en fonction de la biomasse, de la production (accroissement), et de l'âge d'exploitabilité. En nous appuyant sur des données de production (tables de N. Decourt, et données issues d'une revue bibliographique), il est ainsi possible de définir des conditions d'exploitation durable en fonction des essences majoritaires et de régimes forestiers. Ces tables présentent pour différents peuplements, des valeurs de production courante et moyenne, ainsi que les caractéristiques des peuplement avant et après éclaircie, ce qui permet de mesurer les prélèvements.

Conclusion du chapitre 5

Après avoir pris connaissance des différentes méthodes développées sur l'estimation de la biomasse aérienne ligneuse, et avoir ouvert les questions de sa fraction énergisable et de la part disponible pour le broyage de plaquettes, nous avons fait le choix d'écarter les pistes requérant trop d'information inconnue ou incertaine, ou appelant des paramètres trop éphémères. Notre orientation est maintenant de modéliser la biomasse aérienne de matière exhaustive (en forêt et hors forêt), ainsi que la fraction énergisable de cette biomasse, c'est-à-dire la matière ligneuse mobilisable durablement, pour part sous forme de plaquettes forestières. En nous appuyant sur la signature radiométrique des différents types de peuplement et en les couplant à des données de volumétrie ligneuse, il nous sera ainsi possible d'estimer la biomasse aérienne. Il s'agit d'un travail novateur dans la mesure où cela n'a jamais été entrepris dans le cadre d'un protocole élargi de modélisation des potentiels en plaquettes forestières. L'ensemble des modèles issus du monde forestier s'appuie sur des données d'inventaire, et tous présentent des résultats non spatialisés et très rarement en dessous de l'échelle infradépartementale. Seuls les Plans d'Approvisionnements Territoriaux, font exception à la règle, et présentent des résultats pour des territoires de taille plus modeste (pays), mais leur limite est peut-être d'associer trop de paramètres mal connus, ou de variables trop variables... Quant aux données de biomasse issues de la biologie végétale, elles sont à l'inverse extrêmement précises, et spatialement très restreintes (parcelle). Notre objectif est de développer une méthode permettant d'estimer la biomasse aérienne et sa fraction énergisable à un niveau infrarégional, en combinant plusieurs sources de données et en considérant des contraintes d'exploitation (renouvelabilité de la ressource, préservation de la fertilité des sols, concurrence d'usage).

Concrètement, les résultats de la cartographie de la biomasse aérienne se présentent sous la forme d'une couverture cellulaire (raster), où chaque cellule est caractérisée par une valeur de biomasse (exprimée en tonnes), et par un type de peuplement. Chaque cellule peut produire, en fonction de son peuplement et de son âge, une certaine quantité de biomasse ligneuse, en partie énergisable. Partant de ce référentiel, il s'agit maintenant de voir comment satisfaire les besoins des chaufferies, en valorisant durablement les ressources locales, ainsi que le présente la figure 66.

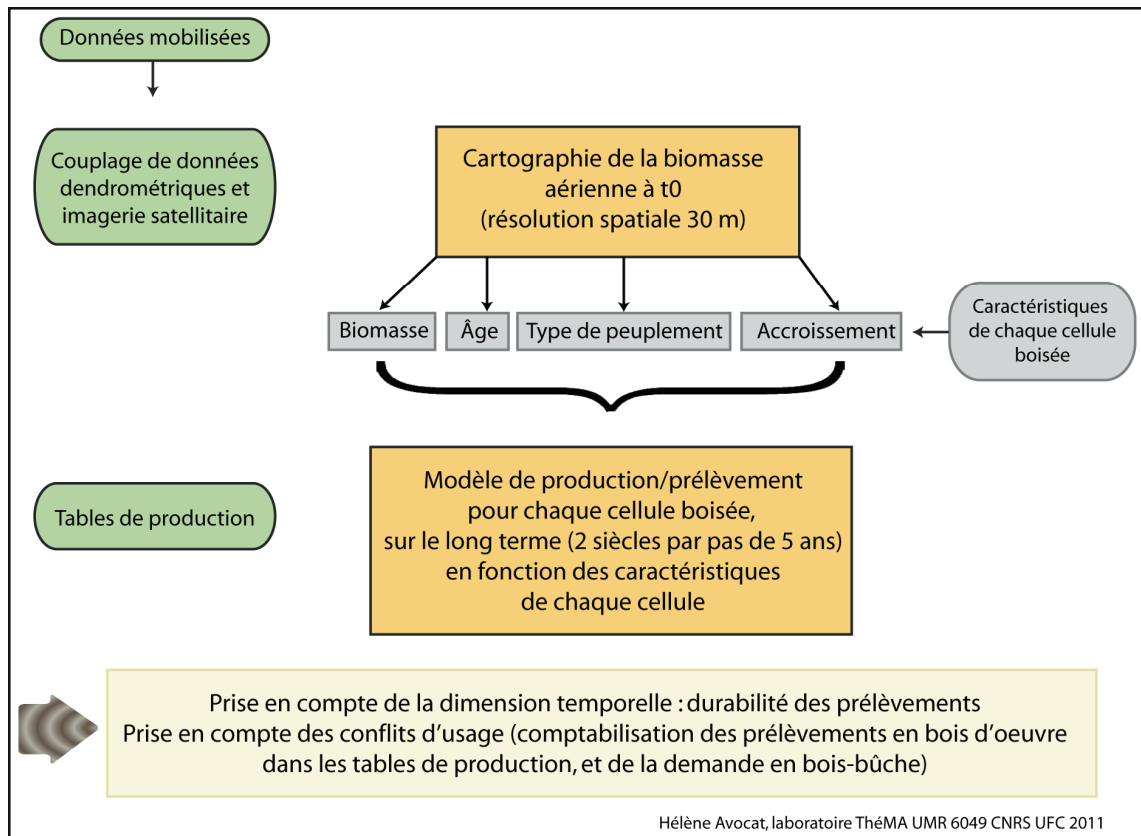


Figure 66 : méthodologie d'estimation de la fraction énergisable de la biomasse ligneuse

Chapitre 6

Modélisation de bassins d'approvisionnement locaux durables

Le bois-énergie est un enjeu de développement local à condition de consommer des ressources renouvelables de proximité. La dernière étape de ce travail consiste donc à définir des bassins d'approvisionnement locaux et durables.

1) En calculant la ressource mobilisable durablement sur des emprises prédéterminées, par exemple le territoire d'un pays ou d'une communauté d'agglomération.

2) En calculant des bassins d'approvisionnement centrés autour des chaufferies, en élargissant le rayon d'approvisionnement jusqu'à ce que la demande soit satisfaite. Sur le principe, cette démarche rejoint la méthode développée par ONF Energie concernant "les zones de prospection et rayons d'approvisionnement".

Nous ne ferons ici que donner les éléments généraux de la méthode employée. Ainsi qu'il a été dit en introduction, l'exposé plus détaillé de la méthodologie sera présenté dans les différents chapitres de la partie 3.

1. Calcul de la biomasse énergisable durable sur un espace défini

Pour estimer les ressources durablement mobilisables à l'échelle d'un territoire, il faut :

- en premier lieu qualifier et quantifier la biomasse, ce qui a été vu dans le chapitre 5 ;
- modéliser son accroissement et l'exploitation qui peut lui être soumise ;
- estimer la part de biomasse exploitée utilisable pour la production d'énergie.

Les sources bibliographiques insistent sur les points suivants dans la définition du potentiel dendroénergétique :

- contraintes technico-économiques de mobilisation de la ressource ligneuse (pente, accessibilité, méthodes de bucheronnage / débardage) ;
- caractéristiques des peuplements (âge, diamètre des tiges, essences, croissance etc.) ;
- aspects gestionnaires et fragmentation spatiale des espaces forestiers (qui constitue l'un des principaux obstacles à leur exploitation).

Cependant, dans une optique de modélisation où les composantes spatiales et temporelles tiennent une place prépondérante, il n'apparaît ni possible ni même pertinent (pour la reproductibilité de la méthode) de prendre en compte l'ensemble de ces paramètres (cf. 3.2 chapitre 5).

En effet, si les méthodes développées par les experts en foresterie sont intéressantes dans la mesure où elles considèrent des aspects gestionnaires et biologiques (production courante, scénarii de gestion, disponibilité, taux de prélèvements, taux de branches, volume théorique idéal etc.) ; les résultats ne sont que rarement disponibles à une échelle infra-régionale. Par ailleurs, et pour les raisons développées dans le chapitre 5, nous ne considérerons que la durabilité des prélèvements et la pérennité de la ressource ligneuse.

Nous connaissons des espaces arborés et forestiers par leur type de peuplement et de biomasse. Mais l'accroissement et les possibilités de prélèvements sont aussi fonction de l'âge des peuplements. Une première étape doit donc permettre de dériver l'âge à partir de la biomasse, selon les peuplements. Les tables forestières permettent de réaliser cela, au prix d'une simplification autour de valeurs moyennes, selon les espèces et les classes de productivité, et selon les modes de gestion. Par exemple, une futaie de hêtre en classe de production moyenne et après un suivi régulier en éclaircie, a un volume (bois fort) moyen de 376 m³/ha à 105 ans, et de 425 m³/ha à 125 ans (d'après les tables de N. Decourt). Connaissant la masse volumique du bois de hêtre, la conversion de masse en volume peut être faite, puis celle de volume en âge. Il est donc possible, en acceptant les simplifications autour des valeurs moyennes de calculer l'âge d'après la biomasse.

Une fois l'âge des peuplements déterminé, et compte tenu des types de ces peuplements, il est alors possible d'estimer leur accroissement courant, toujours en faisant référence aux tables forestières et à leurs valeurs moyennes. Il est donc possible de calculer quelle sera dans 5 ans, dans 10 ans, ou dans 100 ans, la biomasse moyenne de tel secteur forestier, du moins si ce secteur n'a pas l'objet d'une coupe totale. Simultanément, les tables forestières permettent d'estimer la quantité de bois fort qui peut être prélevée en éclaircie sur ce même secteur forestier, et pour des pas de temps donnés. Toujours pour une forêt de hêtre et en conditions

moyennes, le volume d'éclaircie est par exemple de 143 m³/ha entre 105 et 125 ans. Nous pouvons donc connaître pour chaque type de peuplement et selon le mode de gestion, les quantités prélevables en éclaircie au fil du temps (si l'éclaircie est de mise), et la masse accrue restante qu'il sera possible d'exploiter lorsque les conditions seront réunies. Nous proposons de retenir trois contraintes relatives à l'exploitation :

- un âge minimal d'exploitation (donné par les tables forestières) ;
- un âge maximal de sénescence au-delà duquel les arbres ne seront pas conservés (exemple 180 ans pour une futaie de hêtre, dont l'accroissement courant deviendrait trop faible) ;
- la nécessité de ne pas réduire la biomasse, seuls seront considérés comme exploitables les arbres des tranches d'âge les plus élevées, dont le prélèvement est compensé par l'accroissement sur d'autres secteurs.

Cette dernière condition impose de mener l'analyse sur un espace suffisamment vaste pour présenter des peuplements de tous âges. En effet, la contrainte de maintien de la biomasse ne pourrait pas être satisfaite sur un secteur étroit, à la population peu diversifiée.

Nous arrivons ainsi à calculer pour un espace donné, des masses prélevables durablement par éclaircie ou exploitation. Nous faisons également le postulat que les parcelles exploitées ne sont pas soustraites à l'occupation forestière, mais sont reconduites avec les mêmes types de peuplement et modes de gestion.

Reste à déterminer la part énergisable sur cette masse prélevée, en tenant compte des autres usages du bois (bois matériaux). Le problème se complique un peu dans la mesure où les biomasses manipulées jusqu'ici sont celles du bois fort, alors que dans les futaies, la fraction énergisable est plutôt située dans les houppiers. Un ensemble de paramètres doit donc être amené pour calculer la masse énergisable à partir de la masse de bois fort. Ces paramètres dépendent des types de peuplement et des modes de gestion. Enfin, une part du bois exploité doit être laissée sur le sol pour maintenir sa qualité.

Au final, cette méthode doit permettre d'obtenir pour un espace donné, et pour des pas de temps donnés, les quantités de biomasse énergisable exploitable durablement, par type de peuplement et mode de gestion (cf. figure 67). Il s'agit bien entendu d'une estimation théorique dérivée des valeurs moyennes proposées par les tables forestières, mais mise en œuvre pour des couverts arborés et forestiers particuliers, dont la diversité initiale est connue.

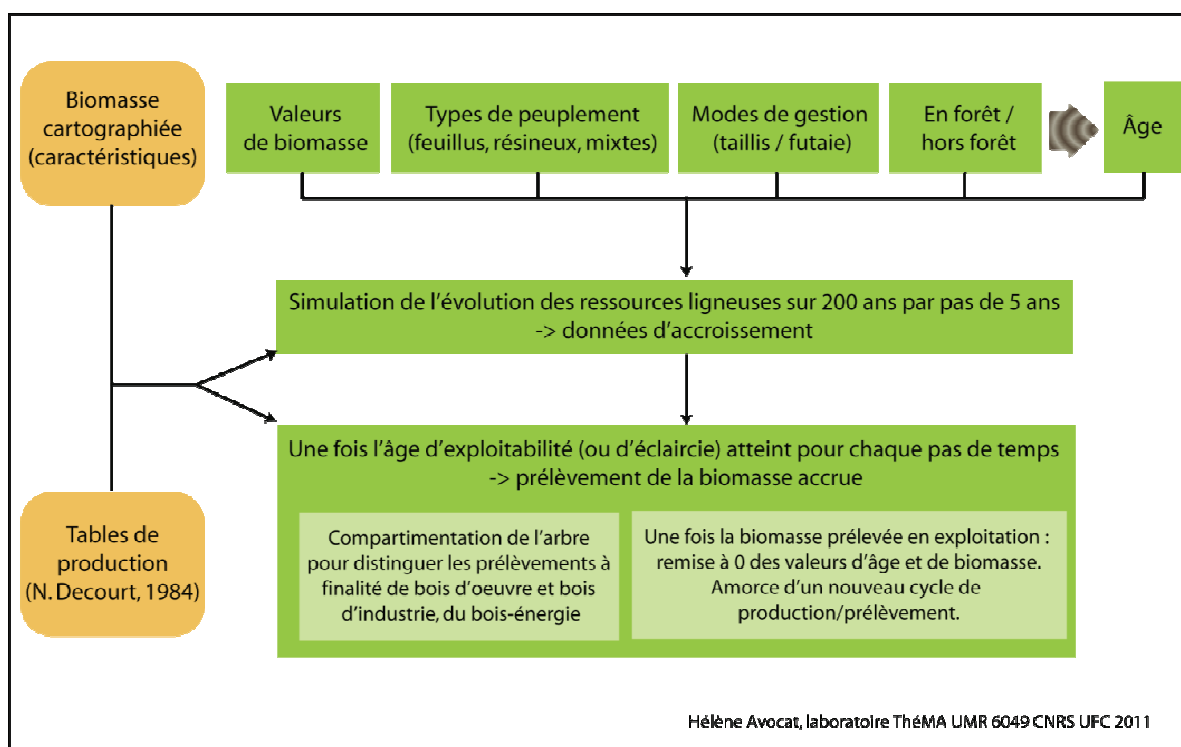


Figure 67 : principe du modèle de production / prélèvement

Cette partie du travail est dédiée à l'estimation de l'offre maximale portée par la ressource, que cette offre soit utilisée ou non. Elle permet pourtant en première lecture de connaître la capacité d'approvisionnement en bois-énergie d'un territoire donné, et de comparer cette capacité globale, durable, avec la demande en bois bûche et en plaquettes. Au-delà, ces résultats seront exploités pour les besoins de l'analyse suivante, qui propose de déterminer des bassins locaux d'approvisionnement durables autour de chaque chaufferie, les paramètres de l'approvisionnement durable étant issus de cette phase du travail.

2. Modélisation de bassins d'approvisionnement locaux : principes et démarche

Pour l'heure, aucune méthode fondée scientifiquement n'a été développée dans un contexte similaire à celui dans lequel nous travaillons, et la seule méthode (ou plus exactement une ébauche de réflexion) abondant en ce sens a été émise par l'Office National des Forêts. Dans le n° 15 des « *rendez-vous techniques* » de 2007 consacrés au bois-énergie, l'ONF consacre un chapitre à l'élaboration d'un plan d'approvisionnement en plaquettes forestières.

2.1. Zone de prospection et rayon d'approvisionnement : la méthode d'ONF Énergie

2.1.1. Principe de la démarche

La philosophie générale est qu'« une étude ressource conduit à évaluer un potentiel bois-énergie sur un territoire donné (région, département, communauté de communes) [alors que] l'élaboration d'un plan d'approvisionnement procède d'une logique différente. On part d'un besoin identifié (x milliers de tonnes par an) sur un site précis, la zone de prospection n'est donc pas fixée *a priori*. Et on étend la prospection jusqu'à atteindre la valeur des besoins affichés » (ONF, 2007).

Dans cette démarche, la zone de prospection est définie par un rayon d'approvisionnement, et ce rayon est fixé en fonction de la surface forestière qu'il permet d'inclure. Ainsi, « si le besoin est par exemple de 20000 tonnes de plaquettes forestières par an, et que dans la zone considérée on applique un taux de récolte potentielle bois-énergie plaquettes de 0,2 t/an/ha, on en déduit que la zone d'étude devra inclure un minimum de 100 000 ha de « forêts prospectables », ce qui permet alors de fixer le rayon d'approvisionnement ». Les taux de récolte proviennent de documents de gestion et d'études ressources. La notion de forêt prospectable se réfère à une forêt de production dont le propriétaire est identifié. Le résultat se présente sous forme cartographique, l'idéal étant, selon les auteurs, de pouvoir disposer des couches SIG des différents types de forêts (privée, publique) pour ventiler les surfaces par rayons d'approvisionnement progressifs (0-20 km, 20-40 km ...). Un premier écueil est la maille d'approche : « dans ce cas, le niveau de restitution minimum est le département ». Un second écueil, de taille, est que ce modèle ne prend pas en compte les rythmes de prélèvement et de renouvellement de la ressource : il ne s'agit donc pas d'une estimation qui intègre la notion de durabilité.

2.1.2. Formalisation

Détermination du rayon de prospection

Le calcul de la *surface prospectable* S_p s'exprime de la manière suivante :

$$S_p = \pi R^2 * t * c'$$

Avec R = rayon d'approvisionnement ; t = taux de boisement ; c' = ratio forêt prospectable/forêt

La formule précédente permet alors de calculer le rayon d'approvisionnement :

$$R \text{ (km)} = \sqrt{S_p / (t * c' * \pi)}$$

Source : (ONF, 2007)

Cette formule qui constitue l'une des rares pistes de réflexions sur les bassins d'approvisionnement, présente la limite majeure de ne s'appliquer que pour « UN besoin identifié », et s'inscrit dès lors dans le cadre d'une approche par projet telle que décrite dans la première partie de ces travaux⁷⁷. Or, un tel raisonnement n'est à notre avis pas viable, dans la mesure où il ne prend pas en compte l'ensemble de la structure de consommation. En effet, à aucun moment, la notion de seuil ou d'espace concurrentiel n'est évoquée, alors qu'il est tout à fait possible qu'une chaufferie localisée à proximité (et caractérisée par son propre rayon de prospection/approvisionnement) puisse entrer totalement ou partiellement dans la sphère d'influence d'une autre chaufferie. Cet aspect est sommairement évoqué dans l'étude réalisée par GCF en partenariat avec l'ONF : " afin de vérifier que le projet de centrale biomasse ne générera pas de tension sur les marchés classiques et l'approvisionnement des centrales déjà en fonction, nous réalisons une analyse des volumes commercialisés, par type de produit, dans le rayon d'approvisionnement". Néanmoins, encore une fois cet aspect ne concerne qu'un bassin d'approvisionnement, centré sur une seule chaufferie. Il n'y a pas de considération de l'ensemble de la structure de consommation, et des phénomènes de concurrence et/ou de coopération.

La démarche d'ONF Energie est une source intéressante. Toutefois, ses limites sur l'aire de restitution, sur le critère de durabilité et sur le problème concurrentiel nous paraissent rédhibitoires. Nous tentons donc de proposer une méthode qui dépasse ces limites.

2.2. Modélisation de bassins d'approvisionnement locaux

2.2.1. Objectifs

Notre but est de définir de manière exploratoire les bassins d'approvisionnement des chaufferies de nos terrains d'étude. Le bassin d'approvisionnement est la zone permettant de fournir les quantités nécessaires au fonctionnement de la chaufferie. La définition de chaque bassin d'approvisionnement doit satisfaire deux conditions :

- la valorisation des ressources locales (forestières et non forestières) par la minimisation des distances d'approvisionnement ;
- la durabilité des approvisionnements, *via* l'intégration des rythmes d'accroissement de la ressource ligneuse.

⁷⁷ Point 2 du chapitre 3 : la structuration actuelle des approvisionnements, fonctionnements et limites (une structuration de la filière par la demande).

2.2.2. Démarche

La démarche générale est volontairement présentée ici de façon sommaire, afin d'éviter les redondances avec le chapitre 11 de la partie 3, dans lequel cette démarche, ainsi que les données et les résultats sont exposés de manière approfondie. L'objectif final est d'arriver à déterminer et cartographier les bassins d'approvisionnement théoriques des différentes chaufferies, et de mettre en évidence les phénomènes de concurrence spatiale par le recouvrement des bassins.

Pour cela, nous considérons conjointement cinq éléments.

- La demande du secteur collectif : chaque chaufferie localisée en un lieu donné (demande), consomme une certaine quantité d'énergie (tonnes de matière sèche).
- La demande du secteur domestique (bois bûche).
- L'offre en biomasse ligneuse. Cette offre est décrite par une couverture cellulaire, où chaque cellule boisée est caractérisée par une valeur de biomasse en tonnes, un type de peuplement, et un mode de gestion.
- Les accroissements et les prélèvements durables, par pas de temps (5 ans) sur une perspective de deux siècles, et les fractions énergisables sur ces prélèvements.
- Ainsi que des contraintes de mobilisation. Ces dernières sont exprimées sous forme de classe de difficulté en fonction de leur accessibilité (distance au réseau routier et pente).

La satisfaction de la demande d'une chaufferie sur le long terme, en valorisant durablement les ressources locales implique de réaliser une double itération, spatiale et temporelle. Des bassins d'approvisionnement d'étape sont calculés pour chacune des 40 étapes quinquennales (soit 200 ans). Pour chaque étape temporelle, le bassin d'approvisionnement est calculé par itération de la distance à la chaufferie : chaque itération prend en compte potentiel de bois-énergie offert par les espaces boisés à l'étape donnée, jusqu'à ce que le total mobilisable satisfasse le besoin.

Pour chaque bassin d'approvisionnement d'étape, il est possible de distinguer ce qui a été exploité de ce qui a été éclairci. Ces bassins sont connus par leur emprise, et décrits par une table permettant d'analyser la contribution de chaque type de peuplement, en fonction de l'éloignement à la chaufferie.

Pour chaque chaufferie, le bassin d'approvisionnement final est formé par l'union de tous les bassins d'étape. La superposition de l'ensemble des bassins d'approvisionnement finaux des chaufferies d'un territoire permet enfin d'analyser les concurrences d'approvisionnement théoriques qu'il s'agisse de recouvrements entre bassins, ou de débordements au-delà du territoire considéré.

Le développement de la filière bois-énergie s'inscrivant dans une démarche de développement local durable, notre méthodologie vise ainsi à répondre à deux objectifs :

- a) calculer la biomasse énergisable durable potentielle d'un territoire ;
- b) calculer des bassins d'approvisionnement locaux dans le but d'étudier la concurrence spatiale entre les chaufferies, et en tenant compte de l'usage du bois bûche.

Cette démarche est novatrice par rapport à celle proposée par ONF Energie : nous pouvons cibler un territoire local, travailler sous contrainte de durabilité, et analyser les effets de concurrence.

Cette méthode a bien sûr de nombreuses limites. Tout d'abord, l'utilisation de valeurs moyennes puisées dans les tables forestières, pour établir les correspondances entre âge et biomasse, et calculer les quantités produites par exploitation et éclaircie au fil de l'accroissement. Ensuite, nous faisons le postulat d'une forêt toujours conduite de la même façon, qui ne s'étend pas, et ne se rétracte pas. Enfin, nous n'envisageons pas d'atteintes aux arbres et aux forêts, telles que les maladies, les tempêtes et autres aléas climatiques, les incendies, etc. La modélisation des bassins d'approvisionnement, malgré l'assortiment de données et de paramètres mobilisés est elle-même simplificatrice : nous considérons ainsi qu'un arbre peut être exploité indépendamment des statuts fonciers, des enjeux écologiques ou patrimoniaux, et indépendamment de tous jeux d'acteurs.

Conclusion de la partie 2

Par leur rôle de relation entre les espaces boisés et les chaufferies, les approvisionnements en plaquettes forestières soulèvent trois types de questionnement :

- Comment s'organisent les approvisionnements ? Quel est le rôle des déterminants spatiaux, notamment la distance ? La configuration des espaces boisés et la puissance des chaufferies impactent-elle sur les approvisionnements ?
- Quelle est la fraction énergisable de la biomasse aérienne ligneuse ? Quelles quantités de biomasse peut-on exploiter sans porter préjudice au renouvellement des ressources ?
- Comment valoriser au mieux les ressources de proximité ?

Afin de définir les quantités de biomasse disponibles à des fins énergétiques, nous avons opté pour un couplage entre des données d'imagerie satellitaire et des données volumétriques ponctuelles fournies par l'IFN (inventaire forestier). Cela nous permettra de cartographier dans un premier temps la biomasse aérienne forestière et non forestière. Afin d'estimer le volume ligneux prélevable durablement, nous utiliserons des tables de production pour les principaux types de peuplements, l'objectif étant de ne pas prélever des quantités de biomasse supérieures aux quantités régénérées. Les différents usages du bois sont également pris en compte, tout comme les impératifs de protection des sols par les rémanents d'exploitation forestière. Les contraintes technico-économiques, imputables essentiellement à la topographie et à la distance aux infrastructures de desserte, sont simplifiées à leur part imputable à la topographie et aux infrastructures de desserte. Nous écartons les contraintes induites par la fragmentation de la propriété forestière privée, relevant de processus comportementaux mal connus et difficilement généralisables.

Les approvisionnements étant l'expression d'interactions spatiales (flux) entre des lieux de production et de consommation, nous avons emprunté des méthodes initialement appliquées à l'étude des flux économiques ou migratoires (matrices de flux, modèles d'interaction spatiale), afin d'étudier la nature et l'intensité de ces interactions. Étant précurseurs dans le domaine dendroénergétique, nous nous interrogeons sur la validité de l'analogie gravitaire maintes fois observée en géographie. Cette dernière stipule en effet que l'intensité des interactions spatiales est proportionnelle à celle des masses, et décroît de manière inversement proportionnelle avec les distances. Bien que l'analogie gravitaire présente des limites, elle nous permet néanmoins de mettre en évidence des phénomènes d'attraction/polarisation, dont

la traduction surfacique correspond une forme de bassin d'approvisionnement des chaufferies. Enfin, nous avons posé les cheminements méthodologiques pour estimer la biomasse énergisable durable d'un territoire donné, et pour définir des aires d'approvisionnement optimales locales, développées de manière itérative et exploratoire, à partir desquelles nous pourrions analyser les effets de concurrence.

Partie 3

Application à deux terrains d'étude Résultats et discussion

Introduction de la partie 3

Après avoir donné des pistes méthodologiques, il convient maintenant d'en éprouver concrètement la faisabilité et la validité. Pour cela, nous avons choisi deux terrains d'étude aux caractéristiques dendroénergétiques différentes : la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon (CAGB), et le Pays Loue-Lison. Tous deux ont un important couvert boisé, mais leur structure de consommation diffère radicalement. Alors que la CAGB est fortement polarisée par Besançon, le Pays Loue-Lison présente une organisation plus disséminée, avec des installations de moindre puissance. Les ressources ligneuses de ces territoires sont-elles en mesure de satisfaire durablement l'approvisionnement des installations en fonctionnement et en projet, sans porter préjudice aux autres usages de la matière ligneuse ? A l'heure actuelle les approvisionnements diffèrent-ils selon l'importance de l'installation ? Les grands massifs forestiers ont-ils un rôle structurant ? Comment satisfaire durablement les besoins des chaufferies en valorisant les ressources de proximité ? Quelles concurrences sont-elles déjà à l'œuvre sur l'espace pour satisfaire les approvisionnements ? Ces différents points sont abordés dans les cinq chapitres de cette troisième partie.

Le chapitre 7 présente les deux terrains d'étude et leurs caractéristiques dendroénergétiques.

Le chapitre 8 porte sur l'analyse des données de traçabilité de deux installations de puissances respectives de 1 et 6 MW. L'objectif est d'étudier les approvisionnements suivant un modèle d'interactions spatiales, pour analyser l'intensité et la portée de ces interactions, considérant la puissance des chaufferies (attractivité), la structure du couvert boisé (émissivité), et la distance parcourue.

Les trois chapitres suivants procèdent d'une autre logique : il ne s'agit plus de comprendre comment les approvisionnements se structurent aujourd'hui, mais d'estimer les potentialités locales durables pour ces approvisionnements. Cela suppose de bien connaître la ressource ligneuse, et ce que l'on peut durablement prélever, sans faire diminuer le capital ligneux et sans porter préjudice aux autres usages de la matière ligneuse.

Le chapitre 9 est ainsi consacré à la quantification et à la cartographie de la biomasse ligneuse des différents types de peuplements : feuillus (futaie et taillis), résineux, et mixtes.

Le chapitre 10 présente le modèle de production/prélèvements et les résultats pour les deux terrains d'étude.

Le chapitre 11 s'appuie sur les résultats des deux chapitres précédents pour proposer une modélisation exploratoire et itérative des bassins d'approvisionnement locaux.

La figure 68 présente la structure de la démarche et indique les principaux résultats recherchés.

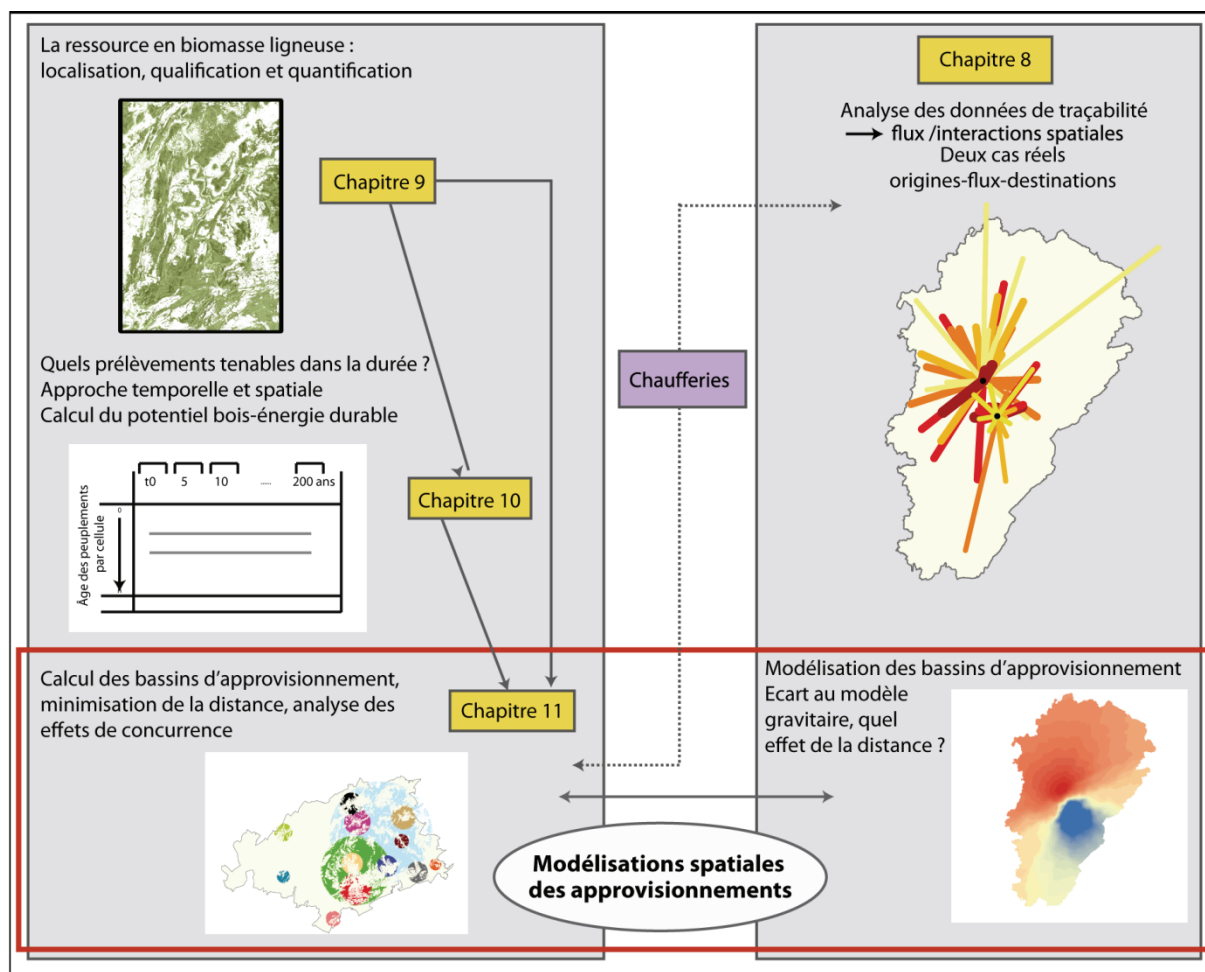


Figure 68 : synopsis de la partie 3

Chapitre 7

Deux territoires aux caractéristiques dendroénergétiques différentes

Nous avons choisi de travailler sur deux terrains d'étude correspondant à des "territoires de projet" (au sens de LOADDT⁷⁸), réputés former des entités géographiques cohérentes. Partant du postulat que les caractéristiques territoriales ont une influence décisive sur la configuration dendroénergétique, nous avons sélectionné des territoires aux profils et structures différents (une communauté d'agglomération et un pays rural), de manière à pouvoir effectuer des tests et des comparaisons. Le choix de ces deux terrains s'est aussi effectué de manière très pragmatique en fonction de la disponibilité des données et de la volonté d'implication des acteurs de la filière d'une part, et des études menées d'autre part. En effet, dans un secteur en développement et fortement concurrentiel, il est extrêmement difficile de se procurer des données sur la traçabilité des combustibles. ONF Énergie ayant manifesté une volonté de coopération au niveau de l'approvisionnement des chaufferies bisontines, cela nous a incité à choisir de prime abord le territoire de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon (CAGB). En second lieu nous avons opté pour le Pays Loue-Lison sur lequel avait déjà été mené un Plan d'Approvisionnement Territorial, auquel nous pourrions confronter nos conclusions. Ajoutons que la communauté d'agglomération du Grand Besançon et le Pays Loue-Lison sont limitrophes et forment une continuité d'ensemble.

1. Cadre général

Situé au cœur de la Franche-Comté, l'ensemble étudié couvre environ 40 km d'est en ouest et 50 km du nord au sud, et s'inscrit sur le rebord septentrional du massif jurassien (figure 69). La CAGB (43000 ha) est précisément placée sur la bordure jurassienne, axée sur la vallée du Doubs, avec au nord l'ensemble collinaire des avant-monts, et au sud l'amorce du premier

⁷⁸ Loi du 25 juin 1999 d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire (dite loi Voynet ou LOADDT)

plateau. Le pôle urbain bisontin, allongé dans le sens NNE - SSW, est auréolé d'une demi-couronne dense de villages périurbains sur les secteurs nord et ouest, alors que le bâti est plus rare sur le secteur du plateau, même si l'influence de Besançon y est marquée. Le Pays Loue-Lison s'étend (68000 ha), sur une partie du premier plateau, entaillé par les vallées en canyons de la Loue, du Lison et de leurs petits affluents. Au sud, les altitudes atteignent 800 mètres, et la forêt passe des feuillus aux résineux. A l'ouest, le Pays Loue-Lison borde le vaste massif forestier de la Chaux.

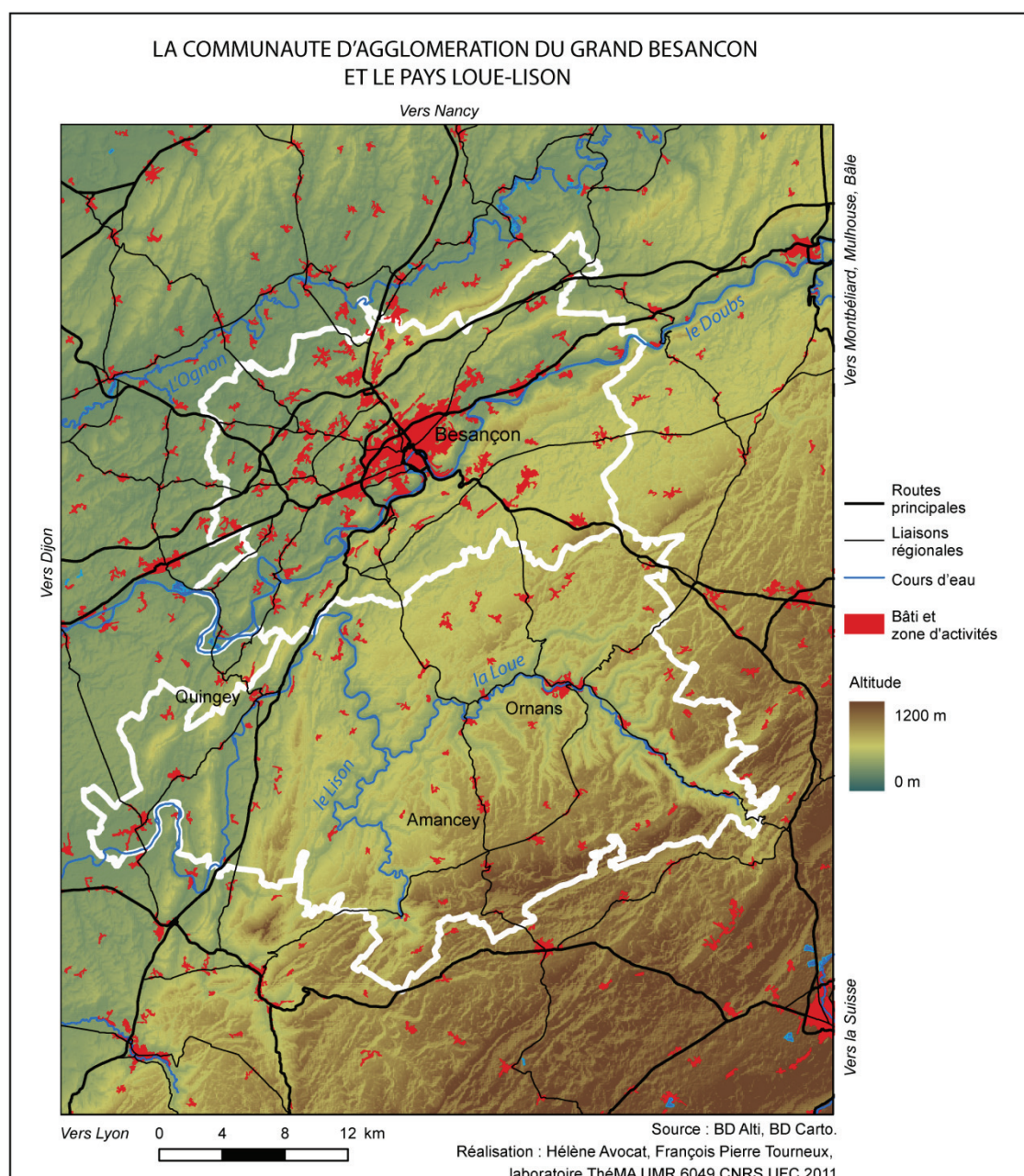


Figure 69 : le cadre des terrains d'étude

D'un point de vue institutionnel, le Pays Loue-Lison regroupe trois intercommunalités (la Communauté de Communes Amancey-Loue-Lison, la Communauté de Communes du Canton

de Quingey, et la Communauté de Communes du Pays d'Ornans). Le pays désigne un territoire présentant une « cohésion géographique, économique, culturelle ou sociale, à l'échelle d'un bassin de vie ou d'emploi » afin d'exprimer « la communauté d'intérêts économiques, culturels et sociaux de ses membres » et de permettre l'étude et la réalisation de projets de développement⁷⁹. Les enjeux et les objectifs en matière de développement sont fixés dans la Charte de pays, par le conseil de développement, qui réunit les élus et les acteurs sociaux, culturels ou associatifs. Il s'agit d'un organe de réflexion sur la politique du développement du territoire à mener. Dans les communautés d'agglomération (qui se définissent comme un regroupement de plusieurs communes formant, à la date de la création, un ensemble de plus de 50 000 habitants d'un seul tenant et sans enclave, autour d'une ou plusieurs communes centres de plus de 15 000 habitants⁸⁰), la gestion se fait par un conseil communautaire, composé de conseillers municipaux des communes membres. Les communautés d'agglomération se voient attribuer par le code général des collectivités territoriales certaines compétences : développement économique, aménagement de l'espace communautaire, équilibre social de l'habitat, transport urbain, assainissement, protection et mise en valeur de l'environnement, etc.

La CAGB regroupe 176 000 habitants (cf. figure 70), majoritairement installés (pour 120 000 d'entre eux) dans la seule commune de Besançon. Les 58 autres communes, de taille beaucoup plus modeste, comptent de 80 à 3000 habitants, avec une part forte pour les petites communes : 31 comptent moins de 1000 habitants. Le Pays Loue-Lison totalise pour sa part 23000 habitants. Les pôles locaux sont de taille modeste : Ornans culmine avec 4100 habitants, Quingey regroupe environ 1100 habitants (malgré l'influence bisontine et la périurbanisation qui s'y affirme). Amancey, pour sa part compte moins de 700 habitants. On trouve beaucoup de très petits villages, avec 24 communes sur 77 qui comptent moins de 100 habitants.

⁷⁹ Article 22 de la loi du 4 février 1995

⁸⁰ Début de l'article L 5216-1 du Code général des collectivités territoriales

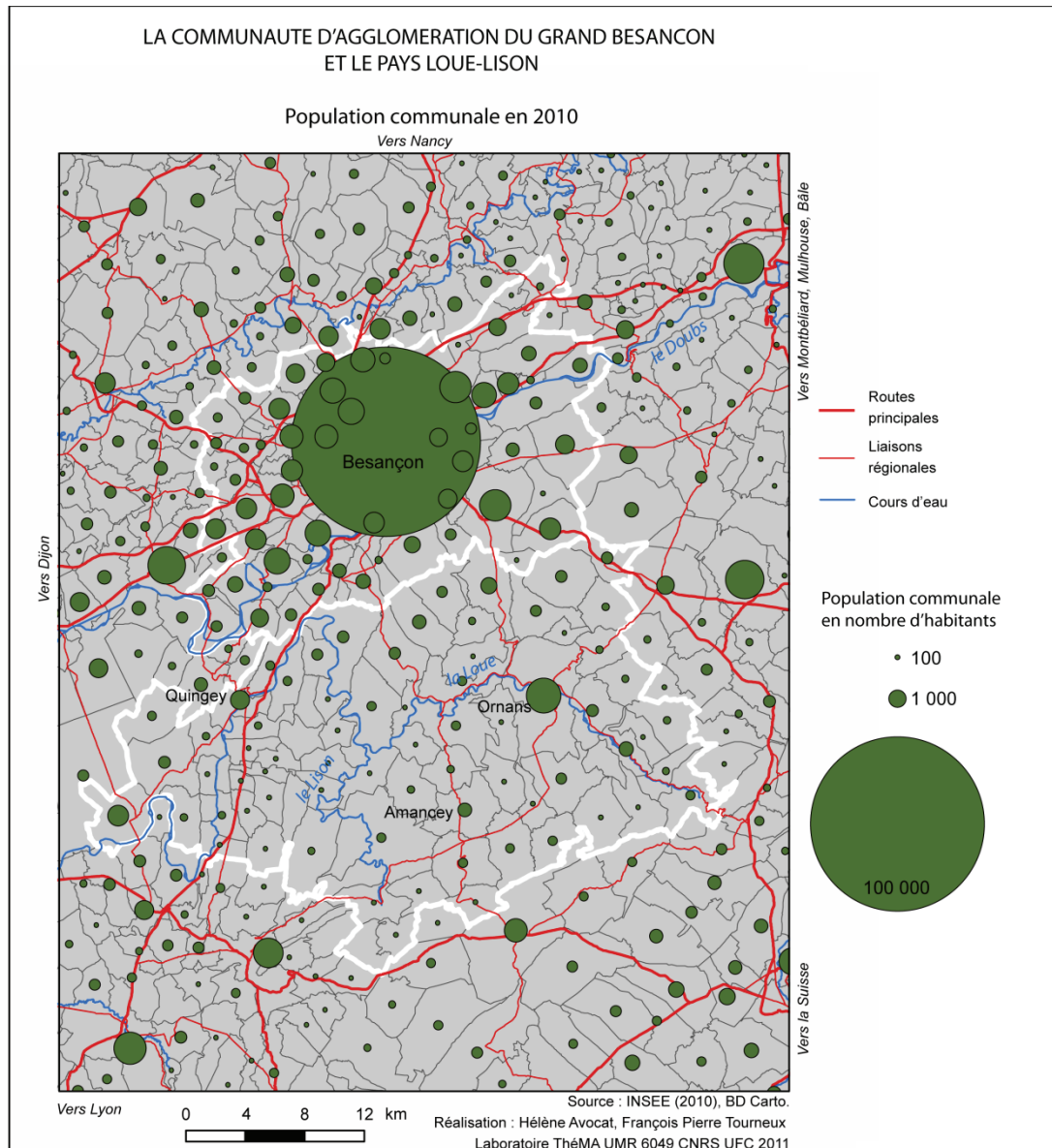


Figure 70 : la population communale de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon et du Pays Loue-Lison

Ville au nord, campagne au sud : au-delà de la polarisation bisontine, ce territoire présente aussi les gradients qui nuancent l'espace rural (cf. figure 71). La CAGB, de par son pôle urbain resserré, est totalement inscrite dans l'espace périurbain tel que le caractérise le zonage en aires urbaines de l'espace rural (ZAUER), avec l'aire urbaine de Besançon, qui dépasse très largement les limites de la communauté d'agglomération. Au sud, l'ensemble des communes monopolisées par Besançon couvre presque la moitié du Pays Loue-Lison. Le sud du Pays Loue-Lison appartient pour sa part à l'espace dit à dominante rurale, avec la seule commune d'Ornans qui atteint le statut de pôle rural au titre du ZAUER. Notons cependant que l'extrémité sud-est du Pays Loue-Lison arrive au contact de l'aire urbaine de Pontarlier et de la région frontalière de la Suisse.

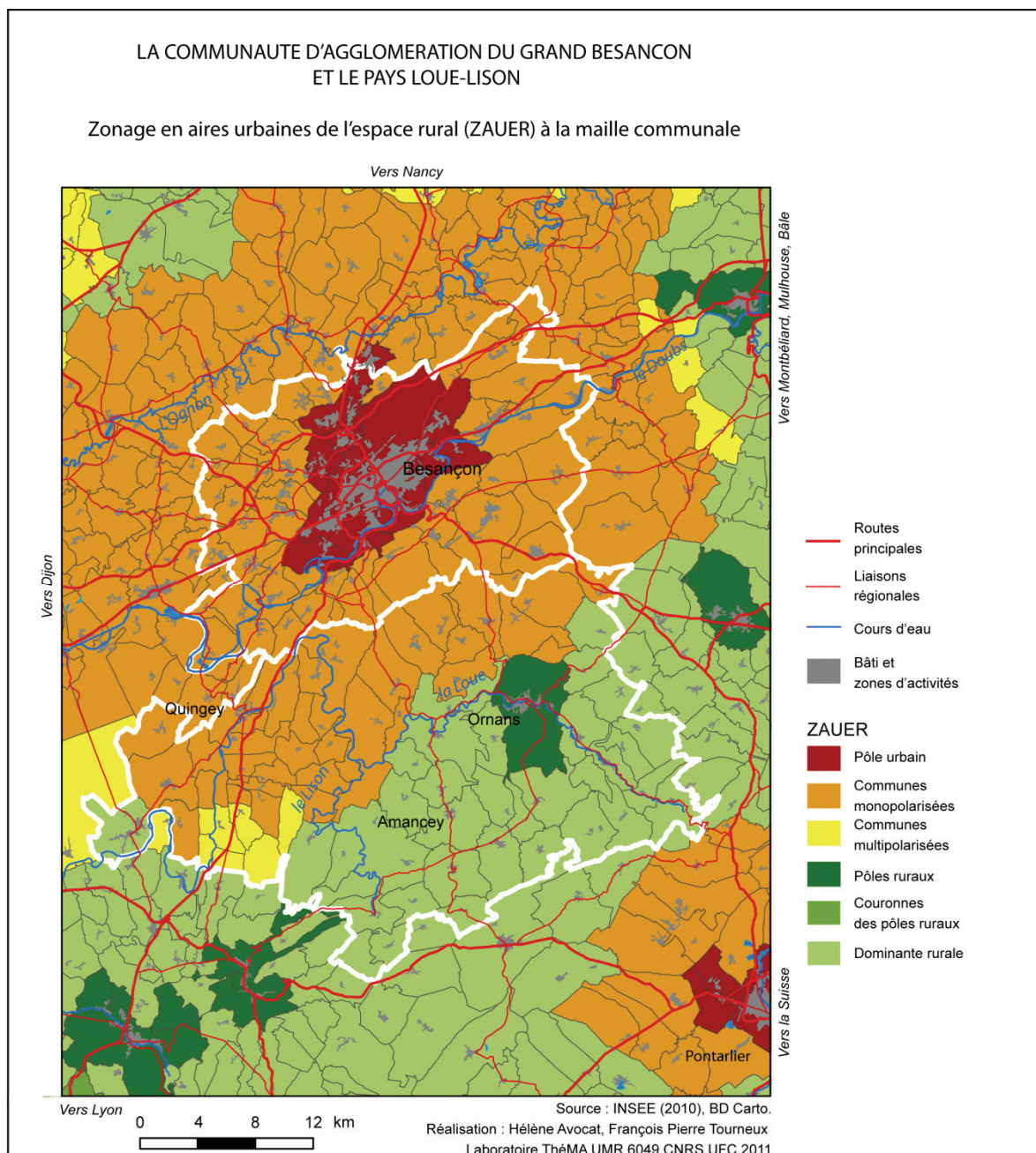


Figure 71 : zonage en aires urbaines de l'espace rural (ZAUER) des terrains d'étude

2. D'importantes ressources ligneuses

Les 54 000 hectares de forêts cartographiés par l'IFN couvrent la moitié de la CAGB et du Pays Loue-Lison (cf. figure 72). Les boisements sont donc une composante essentielle du paysage (cf. figures 73 et 74), avec des taux de boisement de 44 % pour la CAGB et 50% pour le Pays Loue-Lison.

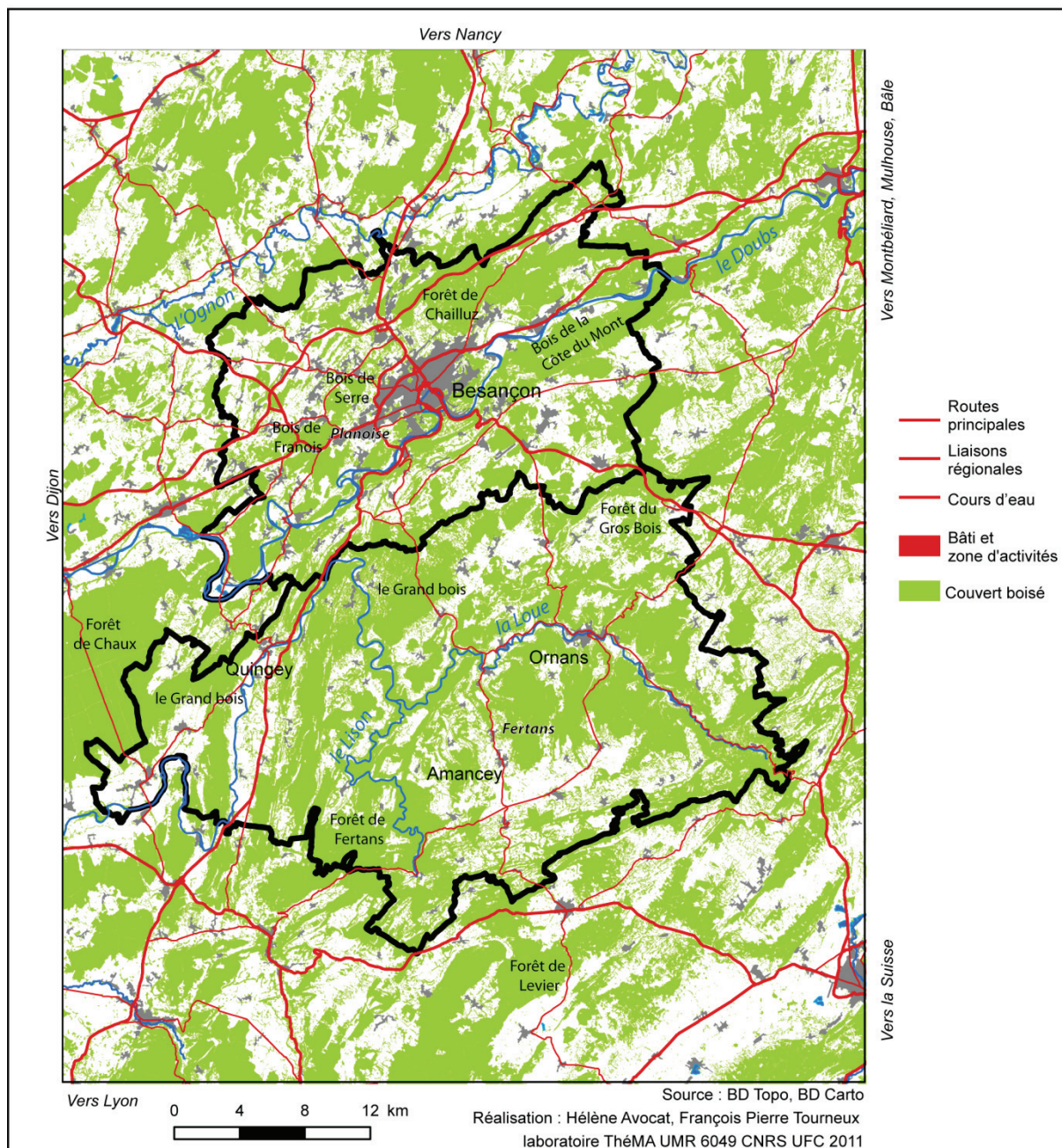


Figure 72 : couvert boisé et principaux massifs forestiers



Figure 73 : la forêt du Pays Loue-Lison

Source : Hélène Avocat, 2010.
Localisation : commune de Cléron.

Figure 74 : vue sur le couvert boisé de la CAGB, depuis la colline de Rosemont

Source : Hélène Avocat, 2010
Localisation : commune de Besançon



Le couvert boisé est caractérisé par une prédominance des essences feuillues, principalement des futaies de chênes et de hêtres mélangées à des taillis. Néanmoins, l'étagement forestier évoqué dans le chapitre 2 est visible : le sud du territoire est marqué par la présence d'essences résineuses (figure 76). À mesure que l'on se dirige vers le sud, les futaies de sapins laissent la place aux futaies mélangées de sapin-épicéa. La futaie mixte occupe également une proportion importante du couvert forestier.

La forêt de Chailluz, au nord-ouest de Besançon, constitue le plus important massif boisé de la CAGB. Des chantiers d'exploitation forestière à des fins spécifiquement énergétiques y sont réalisés (cf. figure 75).



Figure 75 : chantier de production de plaquettes forestières dans la forêt de Chailluz

Source : Hélène Avocat, 2008, avec l'autorisation d'ONF Énergie

Au sud-est de la forêt de Chailluz se trouve un autre massif important : le Bois de la Côte du Mont. À proximité immédiate de Besançon (ouest), les Bois de Serre et de François constituent également des potentiels intéressants. La forêt de Chaux, qui se situe en dehors du territoire de la CAGB, est la deuxième plus vaste forêt domaniale de France avec 20 493 hectares (environ 28 km de long x 16 km de large). Elle constitue une importante source de plaquettes forestières pour les chaufferies bisontines.

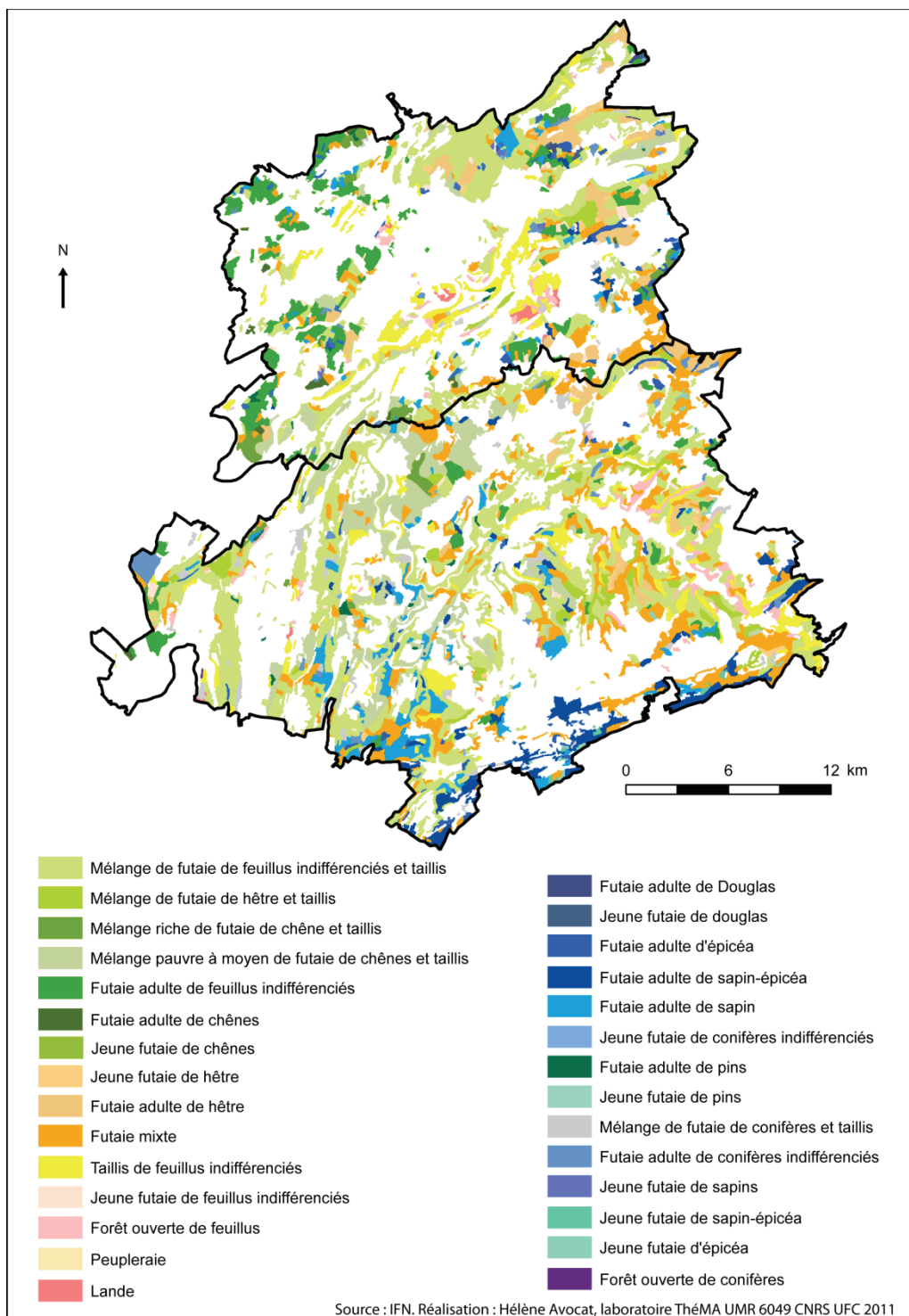


Figure 76 : les types forestiers départementaux de l'IFN (département du Doubs)

3. Les chaufferies bois : petites structures dans le Pays Loue-Lison et polarisation bisontine dans la CAGB

3.1. Un réseau de chaufferies de taille modeste dans le Pays Loue-Lison

En dépit d'un nombre relativement important de chaufferies (22), le Pays Loue Lison ne totalise qu'à peine plus de 4 MW de puissance cumulée (cf. figure 77 et tableau 10). Cela est imputable à l'importante proportion de chaufferies de petite puissance. Plus de 80 % des chaufferies ont une puissance inférieure à 1 MW, et 18 d'entre elles ont une puissance inférieure à 100 kW. Les caractéristiques de l'habitat, majoritairement rural et caractérisé par de faibles densités de bâti et une faible importance du secteur collectif expliquent en partie ces disparités spatiales et structurelles.

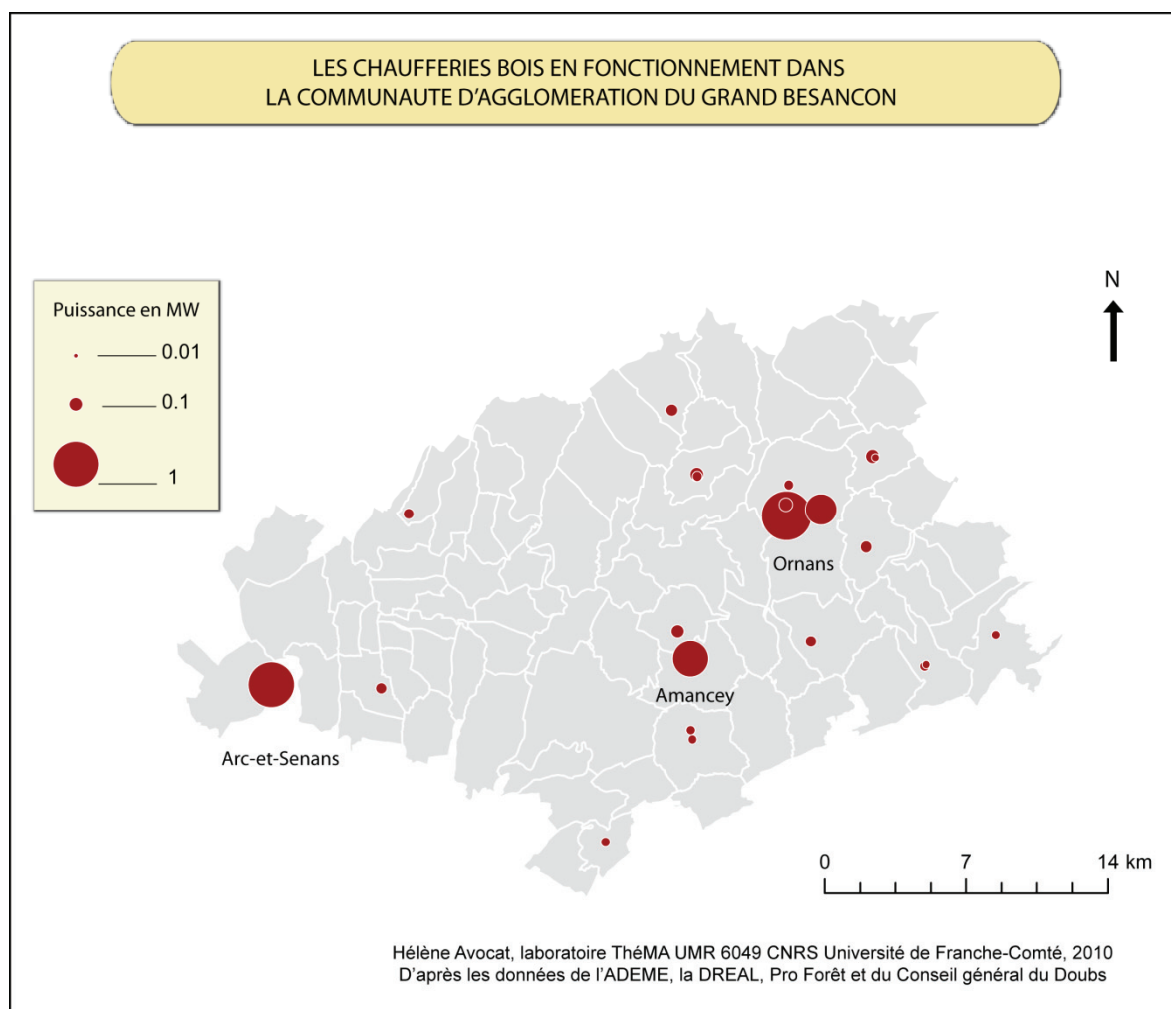


Figure 77 : structure de la consommation dendroénergétique du Pays loue-Lison

Mise à part la chaufferie d’Arc-et-Senans, les chaufferies du Pays Loue-Lison sont le fait du secteur collectif/tertiaire ou privé. Les chaufferies à maîtrise d’ouvrage privée concernent les habitations des particuliers, qu’ils soient seuls, en co-propriété, bailleurs sociaux ou en société civile immobilière (SCI). Elles sont nombreuses, mais leur puissance moyenne est extrêmement faible, de l’ordre de 50 kW. Le développement des chaufferies collectives est très récent dans le Pays Loue-Lison puisque la première chaufferie a été créée en 2002 (cf. tableau 10). La croissance est ensuite soutenue, avec un maximum de cinq chaufferies créées par an (maximum atteint en 2008). Nous n’avons réussi à obtenir des données de traçabilité de plaquettes forestières que pour trois de ces chaufferies : Malbrans (0,1 MW), Ornans (0,45 MW) et Amancey (0,6 MW). Par ailleurs, nous ne savons pas précisément quels types d’établissements sont concernés par ces chaufferies (logements sociaux à Ornans, industrie à Arc-et-Senans...).

Commune	Nombre de chaufferies	Date de mise en service	Puissance en MW	Type de maîtrise d'ouvrage	Secteur
AMANCEY	1	2009	0.6	Publique	Collectif tertiaire
ARC ET SENANS	1	2004	1	Industrie de la deuxième transformation du bois	Industriel
CHANTRANS	1	2005	0.06	Privée (particulier)	Collectif tertiaire
CHAY	1	2008	0.055	Publique	Collectif tertiaire
CHOUZELOT	1	2006	0.06	Privée (SCI)	Collectif tertiaire
CROUZET-MIGETTE	1	2004	0.04	Privée (particulier)	Collectif tertiaire
DESERVILLERS	2	2005	0.04	Privée (copropriété)	Collectif tertiaire
		2005	0.04	Privée (particulier)	
FERTANS	1	2003	0.08	Privée (particulier)	Collectif tertiaire
LONGEVILLE	2	2008	0.035	Privée (particulier)	Collectif tertiaire
		2006	0.05	Privée (particulier)	
MALBRANS	2	2005	0.1	Publique	Collectif tertiaire
		2003	0.05	Privée (particulier)	Collectif tertiaire
MEREY SOUS MONTRON	1	2008	0.07	Publique	Collectif tertiaire
MONTGESOYE	1	2008	0.07	Privée (SCI)	Collectif tertiaire
MOUTHIER HAUTE PIERRE	1	2002	0.04	Privée (particulier)	Collectif tertiaire

Commune	Nombre de chaufferies	Date de mise en service	Puissance en MW	Type de maîtrise d'ouvrage	Secteur
ORNANS	4	2006	0.05	Privée (particulier)	Collectif tertiaire
		2006	1.15	Privée (bailleurs sociaux)	
		2008	0.45	Publique	
		2003	0.09	Privée (SCI)	
SAULES	2	2003	0.09	Privée (particulier)	Collectif tertiaire
		2006	0.03	Privée (particulier)	

Tableau 10 : caractéristiques des chaufferies existantes dans le Pays Loue-Lison

3.2. Des projets eux aussi de faible envergure

À moyen terme (environ 5 ans), 8 chaufferies d'une puissance cumulée de 2,77 MW devraient voir le jour dans le Pays Loue-Lison. Ces dernières seraient en très grande majorité le fait de collectivités (des communes pour six d'entre elles). Les communes d'Ornans et de Longeville ont des projets de chaufferie de taille plus importante, de puissance respective de 0,4 et 0,6 MW, alimentées à partir de plaquettes forestières. La moitié des projets de chaufferie va se réaliser dans des communes en ayant déjà une ou plusieurs, et mise à part celle d'Arc-et-Senans (EPCC⁸¹ des Salines), il s'agit de projets de taille modeste, voire très modeste (cf. figure 78).

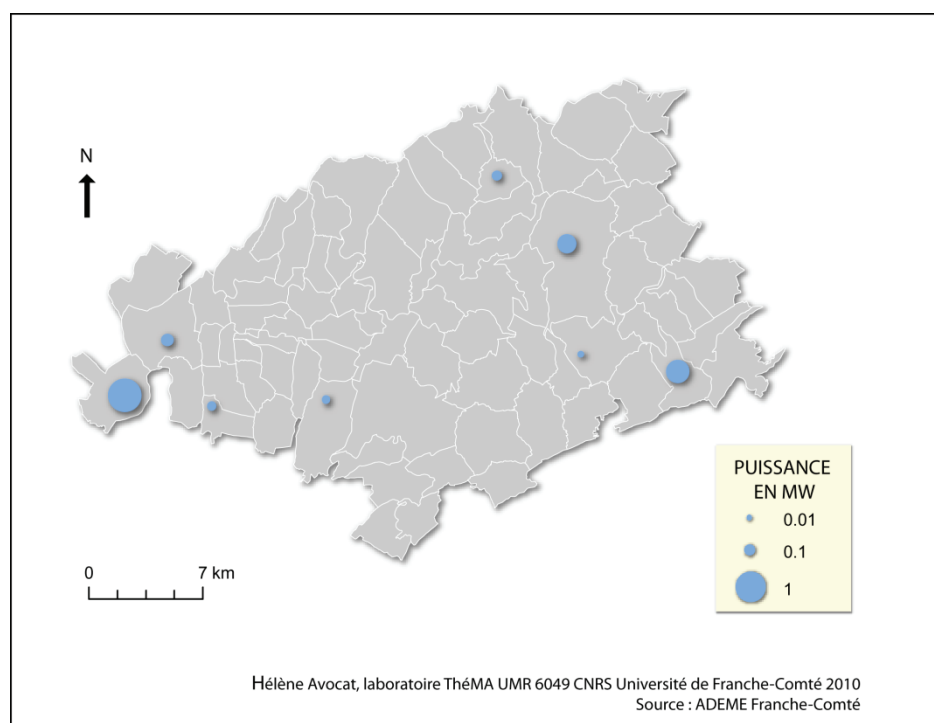


Figure 78 : chaufferies en projets dans le Pays Loue-Lison

⁸¹ Établissement Public de Coopération Culturelle

3.3. Une structure de consommation fortement polarisée par Besançon dans la CAGB

Après mise en commun et mise à jour des données de l'ADEME, de la DREAL, du Conseil Général du Doubs et de Pro-Forêt, il s'avère que la CAGB comporte au 1^{er} Janvier 2010, 20 chaufferies en fonctionnement réparties sur 12 communes, pour une puissance cumulée de 15,6 MW. A l'exception de la chaufferie de Franois (menuiserie) fonctionnant en autoconsommation de ses propres connexes, la totalité des chaufferies appartient au secteur collectif tertiaire (logements, services, établissements d'enseignement, etc.). Concernant la dynamique de la filière, nous constatons une forte corrélation entre d'une part, la création des premières chaufferies et d'autre part, l'apparition des "plans bois-énergie et développement local" initiés par l'ADEME en 1994. Si la croissance est relativement faible jusqu'en 2000 (date à laquelle il n'y avait que deux chaufferies), elle connaît en revanche ensuite une évolution soutenue, plus ou moins régulière, et la fin de la période (2007-2010) est marquée par une phase de croissance rapide.

Avec 9 chaufferies totalisant 13,8 MW (soit plus de 90% de la production de la CAGB), la commune de Besançon est le principal consommateur de bois-énergie du territoire de la CAGB. Pour la CAGB et la commune de Besançon, le recours massif à la plaquette forestière dans des installations de forte puissance permet d'afficher un rôle exemplaire en matière de développement durable, maîtrise énergétique, etc. A elles deux, les chaufferies de Planoise (alimentant le réseau de chaleur urbain, du grand quartier ouest de Besançon, largement dévolu à l'habitat social cf. figure 79) et de l'Université (sur le site de la Bouloie) représentent une puissance cumulée de 11 MW, soit les trois quarts de la puissance totale de la CAGB (cf. figure 80).

Figure 79 : chaufferie bois de Besançon Planoise

Source : Hélène Avocat, 2010



À l'échelle de la CAGB, les cinq chaufferies les plus modestes (inférieures à 60 kW) ont une maîtrise d'ouvrage privée, et servent au chauffage de logements collectifs (cf. tableau 11). Nous ne disposons d'aucune information sur les types de combustibles consommés par ces très petites structures ; et en raison de clauses de confidentialité imposées par l'ADEME vis-à-vis des maîtres d'ouvrage particuliers, il ne sera pas possible d'obtenir davantage de données que la puissance, la date de mise en service, et la consommation en tonnes équivalent pétrole calculée par l'ADEME. Au-delà de 100 kW, les maîtres d'ouvrage sont essentiellement des collectivités (communes) et des bailleurs sociaux (Office Départemental des HLM, Néolia).

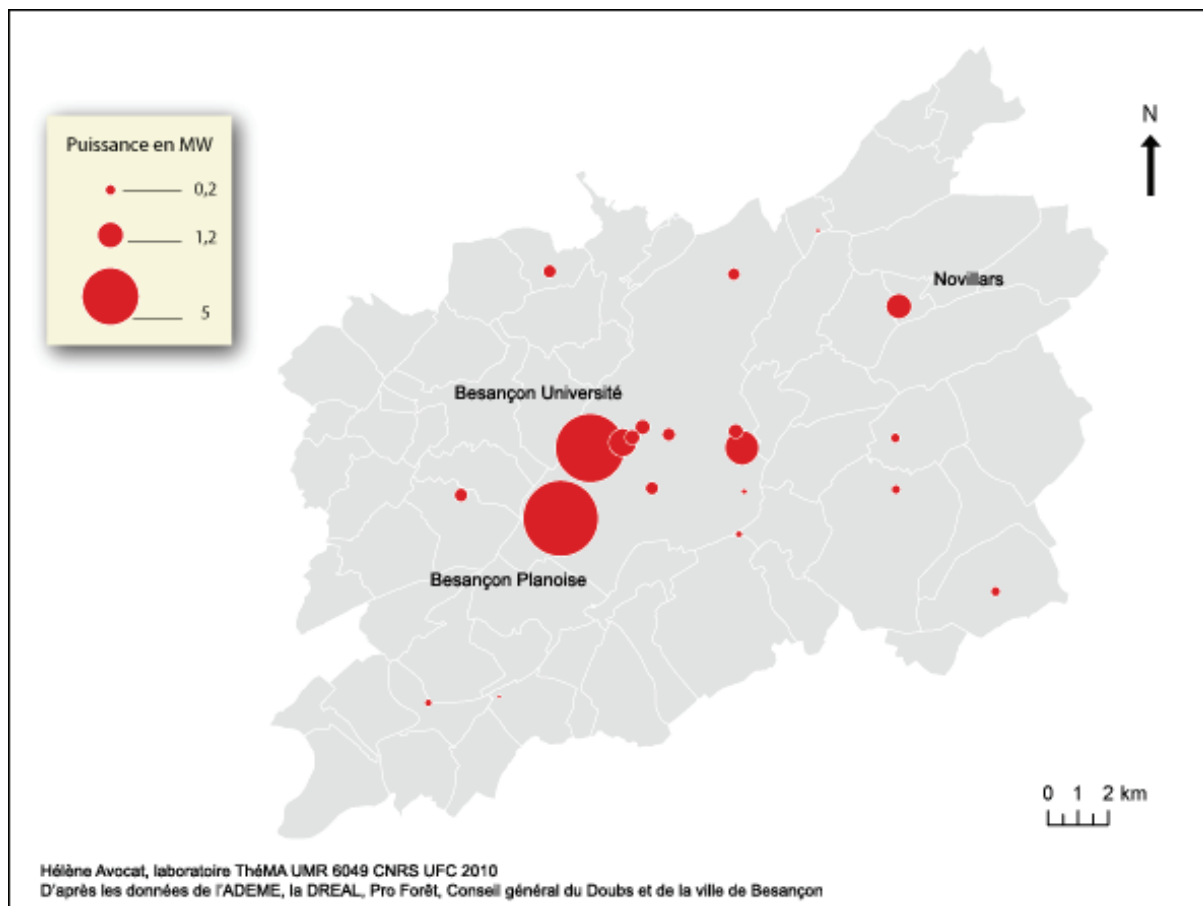


Figure 80 : les chaufferies existantes ou en cours de réalisation dans la CAGB

Le tableau 11 récapitule la structure de consommation de la CAGB :

Commune	Nombre de chaufferies	Date de mise en service	Puissance en MW	Secteur	Type de maîtrise d'ouvrage
AUXON-DESSUS	1	2010	0.2	Collectif tertiaire	Non communiqué
BESANCON	10	2001	0.04	Collectif tertiaire	Privée (particulier)
BESANCON		1998	0.15	Collectif tertiaire	Publique (commune)
BESANCON		2010	0.2	Collectif tertiaire	Publique (commune)
BESANCON		2007	0.22	Collectif tertiaire	Publique (commune)
BESANCON		2009	0.22	Collectif tertiaire	Publique (commune)
BESANCON		2008	0.8	Collectif tertiaire	Bailleurs sociaux
BESANCON		2000	1.2	Collectif tertiaire	Bailleurs sociaux
BESANCON		2004	5	Collectif tertiaire	Publique (université)
BESANCON		2002	6	Collectif tertiaire	Publique (commune)

Commune	Nombre de chaufferies	Date de mise en service	Puissance en MW	Secteur	Type de maîtrise d'ouvrage
BESANCON		2010	0.2	Collectif tertiaire	Publique (commune)
BRAILLANS	1	2007	0.03	Collectif tertiaire	Privée (particulier)
BUSY	1	2002	0.03	Collectif tertiaire	Privée (particulier)
FONTAIN	1	2004	0.06	Collectif tertiaire	Privée (particulier)
FRANOIS	1	2000	0.21	Industriel	Privée (industrie du bois)
GENNES	1	2002	0.1	Collectif tertiaire	Publique (commune)
MAMIROLLE	1	2008	0.11	Collectif tertiaire	Privée (entreprise)
NANCRAY	1	2007	0.22	Collectif tertiaire	Publique (commune)
NOVILLARS	1	1995	0.7	Collectif tertiaire	Bailleurs sociaux
SAONE	1	2002	0.1	Collectif tertiaire	Bailleurs sociaux
THORAISE	1	2004	0.05	Collectif tertiaire	Privée (particulier)

Tableau 11 : caractéristiques des chaufferies de la CAGB

3.4. De vastes projets de chaufferies pour la capitale franc-comtoise

La mise à jour du fichier transmis par l'ADEME Franche-Comté, *via* des entretiens avec les maîtres d'ouvrage, nous a permis d'avoir une vision de la demande à moyen terme. Néanmoins, cela ne saurait garantir la faisabilité effective des projets. En effet, tous les projets n'en sont pas au même stade d'avancement, et pour certains maîtres d'ouvrage il y a encore des incertitudes. Il s'agit en grande majorité de projets à l'initiative des communes, pour le chauffage de logements collectifs ou de bâtiments communaux.

À l'image de la structure actuelle, la commune de Besançon regroupe la grande majorité des projets de chaufferies à l'échelle de la CAGB, avec 8 projets sur un total de 11 à l'horizon des 5 prochaines années. "Planoise 2", avec une puissance prévisionnelle comprise entre 10 et 16 MW représente un projet d'envergure majeure et sera implantée à proximité de la chaufferie bois actuelle. Les projets prévus dans le cadre des zones d'aménagement concerté sont eux aussi de taille conséquente, avec respectivement 4 chaudières bois de 1,5 MW chacune (soit 6MW) pour la ZAC des Vaîtes, et 2 MW pour la ZAC Vauban (les futurs "éco-quartiers" de Besançon). Tous les autres projets sont de taille plus modeste, compris entre 0,15 et 0,6 MW.

Concernant les approvisionnements de ces installations, nous n'avons aucune information dans la mesure où les appels d'offre n'ont pas encore été passés.

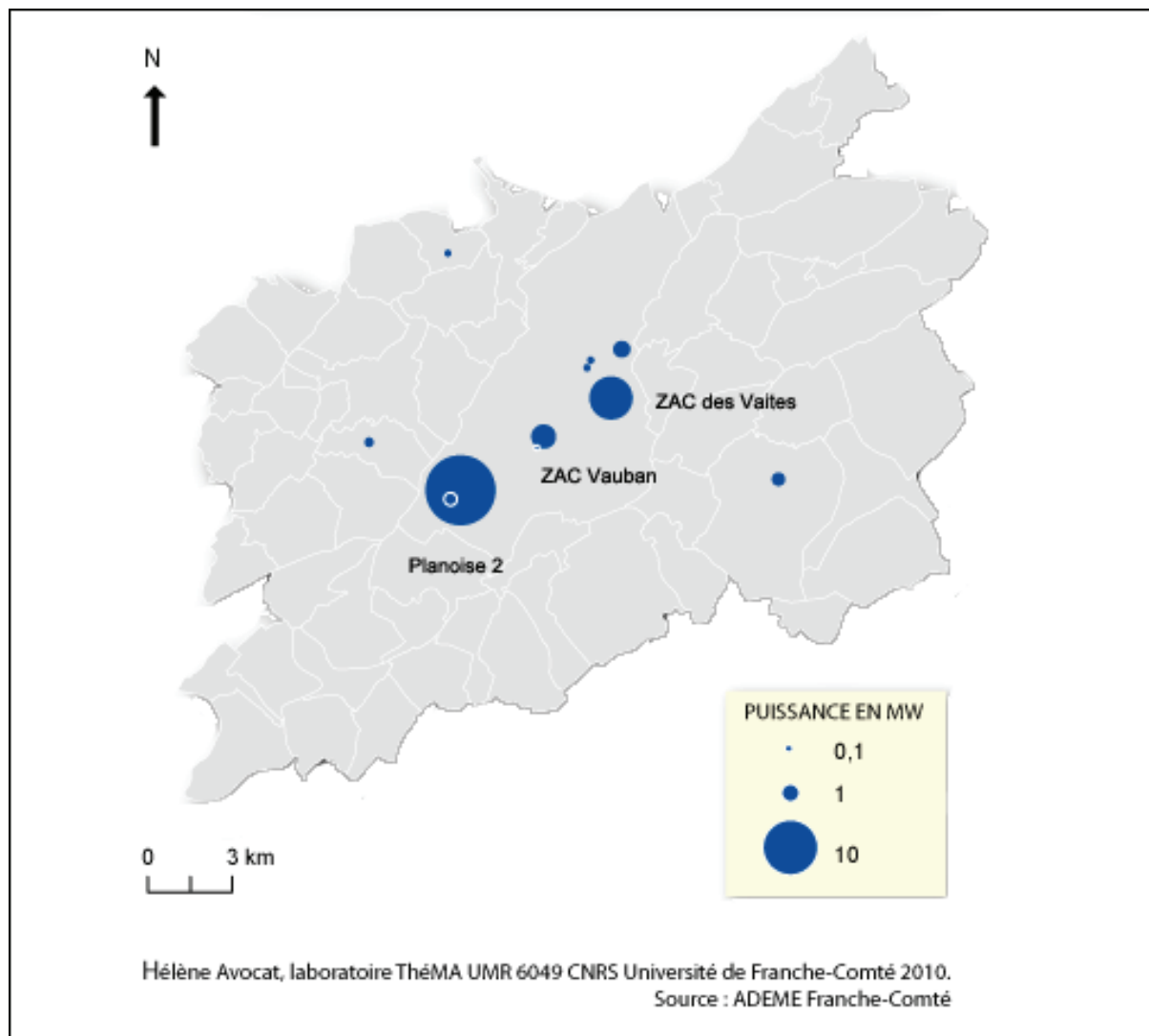


Figure 81 : les chaufferies en projet dans la CAGB

Conclusion du chapitre 7

La CAGB et le Pays Loue-Lison présentent d'importants contrastes, tant pour ce qui est de leur "profil territorial" que pour ce qui est de leur équipement en chaufferies bois, actuelles ou en projet. Ces différences sont intéressantes à maints égards, et, bien que nous ne disposions pas de données exhaustives concernant la traçabilité des plaquettes pour la totalité des chaufferies des deux territoires, il sera peut-être possible de tirer des conclusions intéressantes sur les pratiques d'approvisionnement en plaquettes forestières. La filière étant en pleine mutation et la demande appelée à augmenter de façon très importante dans les années à venir, le problème de l'approvisionnement de ces structures se pose de façon cruciale, et soulève bon nombre de questions.

Quelle est la fraction énergisable de la biomasse ligneuse ?

Quelles sont les aires d'approvisionnement des chaufferies et comment prendre en compte les phénomènes de concurrence spatiale (recouvrement des aires de chalandise) entre ces dernières ?

Chapitre 8

Analyse des données de traçabilité et test d'un modèle d'interaction spatiale simple

Les approvisionnements en plaquettes forestières dépendent de nombreux facteurs, spatiaux, et aspatiaux. Les facteurs aspatiaux s'inscrivent dans des logiques économiques et s'appréhendent au travers des jeux et stratégies d'acteurs. Ainsi, en milieu rural « l'approvisionnement en combustible fini des particuliers et des collectivités est pour bonne partie lié au réseau relationnel ou "bouche-à-oreille" et à la sensibilité pour le développement local. Ces paramètres ont moins d'importance dans le cas des chaudières d'industries et de collectivités en milieu urbain, dont l'approvisionnement est d'ailleurs plus fréquemment géré par des exploitants privés » (Projet BENEFITS, 2007-2011). Dans le cadre de ces travaux, nous avons choisi d'aborder les approvisionnements sous un angle différent, en étudiant leur organisation spatiale, à partir de données de traçabilité. Les deux approches sont complémentaires dans l'explication des logiques d'approvisionnement.

Les approvisionnements en plaquettes forestières sont considérés ici comme des interactions spatiales entre des lieux de production (forêts) et des lieux de consommation (chaufferies). Pour appréhender ces interactions, des analyses sont effectuées à partir des données de traçabilité fournies par ONF Énergie et l'entreprise Girard (entreprise de travaux forestiers localisée à Fertans). Les données de traçabilité représentent l'origine et l'importance des flux de plaquettes forestières. Un certain nombre de caractères transparaissent plus ou moins implicitement : lieux d'origine et de destination, importance des interactions, distances parcourues. L'analyse de ces données nous permet dans un premier temps d'étudier la distribution spatiale et statistique des flux (logique descriptive), puis de modéliser ces interactions, dont la traduction surfacique représente théoriquement les aires de chalandise.

Dans notre cas, trois variables sont pertinentes :

- la taille de la chaufferie (sa puissance), qui détermine l'importance quantitative des flux ;

- la distance parcourue, qui a une incidence économique et environnementale, et qui par conséquent doit être minimisée ;
- les quantités de plaquettes forestières acheminées, qui représentent l'importance des flux, et qui, dans une logique gravitaire sont liées à la distance séparant les lieux d'origine et de destination. Elles peuvent également servir à évaluer l'émissivité de certains espaces boisés, c'est-à-dire leur capacité à fournir de l'énergie.

Notre principal objectif est d'essayer d'expliquer la composante spatiale des processus d'approvisionnement en identifiant les variables les plus pertinentes puis de formaliser les relations qui les unissent. Nous nous interrogeons notamment sur le rôle des masses et de la distance dans les processus d'approvisionnement. Ce dernier paramètre est d'autant plus important que la filière bois-énergie base une grande partie de sa stratégie de communication sur le développement et la valorisation de ressources locales.

1. Traitements préalables des données

1.1. Géoréférencement des lieux d'origine et de destination

Étape préalable, le géoréférencement permet ici de calculer les distances séparant les lieux d'origine et de destination. Cette étape peut s'avérer problématique si la localisation du chantier forestier n'est désignée que par un nom de commune ou par le nom d'un massif (« forêt de Chauv », « forêt de Chailluz »). Cet aspect est d'autant plus important que l'on raisonne à l'échelle locale dans une optique de minimisation des distances de transports et que les forêts sont vastes : les biais inhérents à l'imprécision des localisations doivent être éliminés dans la mesure du possible. Pour les origines désignées par une commune, nous leur avons attribué par défaut les coordonnées du centroïde du ban communal. Cette méthode présente des biais dans la mesure où le centroïde de la commune n'est pas forcément boisé. Néanmoins, la taille moyenne des bans communaux étant relativement faible (moins de 10 km²), les biais ne sont pas très importants, quelques kilomètres tout au plus.

Pour les massifs forestiers importants, représentant une part importante de l'origine des flux (202 chantiers forestiers, soit 202 origines différentes mais non localisées précisément), nous considérons que les coordonnées du centroïde du massif constituent les coordonnées d'origine des flux agrégés. Nous aurions pu générer un semis aléatoire de points au sein de chacun de ces espaces forestiers, mais cela aurait abouti à des résultats sensiblement identiques à ceux obtenus avec un flux unique ayant pour origine le barycentre du massif. À titre indicatif, la distance par la route entre un point localisé à l'ouest de la forêt de Chauv et la chaufferie bois de Planoise (18 km) et celle entre un autre point situé à l'est du massif et la même chaufferie bois (46 km), varie selon un rapport de 2.5 (de 18 à 46 km). En ramenant l'origine des flux aux barycentres des massifs forestiers nous obtenons des distances intermédiaires. Si les

prélèvements se font de façon uniforme sur l'ensemble du massif, les biais imputables à la distance parcourue sont limités. Dans le cas d'une concentration des prélèvements à l'une des extrémités du massif, le recours à une telle méthode peut fausser les résultats par rapport aux trajets réellement effectués. En raison du manque d'informations précises sur la localisation des exploitations, il faudra prendre en compte une marge d'erreur dans les distances calculées pour la matrice de flux.

1.2. Quelle distance pour quel réseau de transport ?

Si les lieux d'origine et de destination, et l'importance des interactions transparaissent de manière assez implicite, les distances parcourues doivent elles, être calculées. Le choix d'un type de distance s'impose alors.

1.2.1. Distances euclidiennes versus distance réseau

La figure 82 expose les deux types de distances calculées à partir des données de traçabilité géoréférencées.

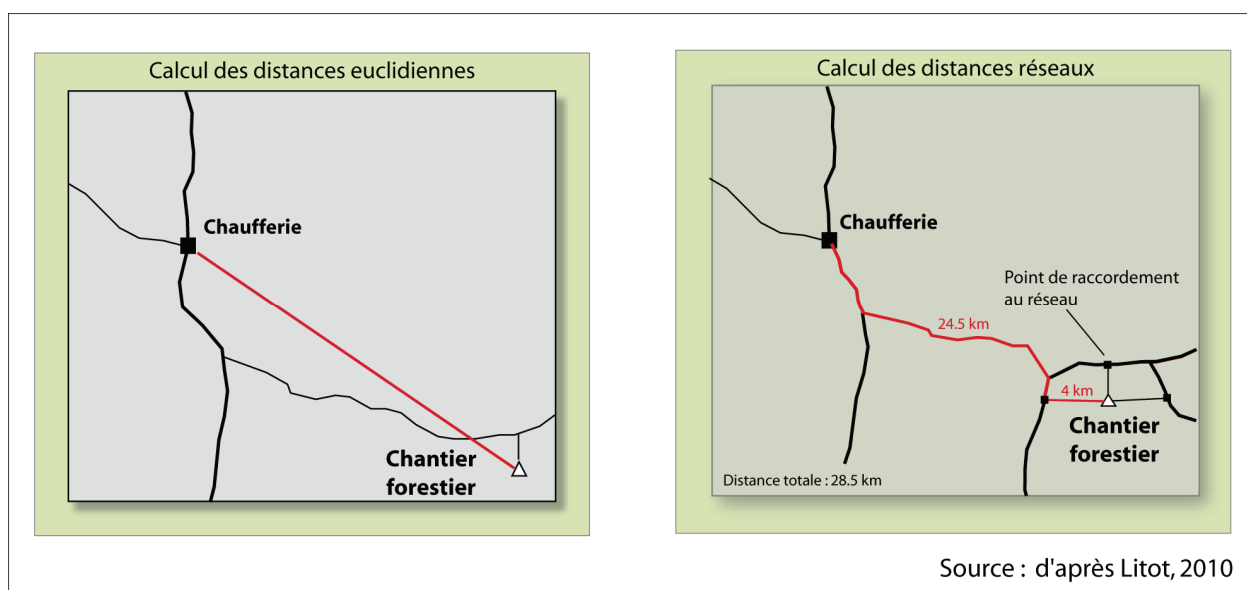


Figure 82 : distances réseaux et distances euclidiennes

Les distances euclidiennes sont communément utilisées pour l'étude de flux, d'interactions spatiales (Josselin et Nicot, 2003). Elles présentent une grande facilité de mise en œuvre et de calcul à partir des coordonnées géographiques, et sont intuitivement compatibles avec l'image de l'aire de chalandise telle qu'elle est schématisée par D. Pumain et al. (2001) comme une surface plus ou moins circulaire centrée sur le lieu de destination (figure 48 page 136). Ce type de distance peut néanmoins présenter des biais. Or, dans une optique d'analyse spatiale à

grande échelle, il convient d'être le plus précis possible. Des mesures de distances-réseau, basées par exemple sur le réseau routier de la BD Carto, permettent une mesure plus fine de la distance (Hammond et McCullagh, 1974). On peut dériver de ces distances des mesures de coût (économique ou environnemental) plus à même d'évaluer l'impact des approvisionnements.

1.2.2. Les spécificités du transport du bois

1.2.2.1. Une prévalence de la route

De manière générale, le transport du bois (y compris sous forme de plaquettes forestières) est caractérisé par une très forte prévalence de la voie routière (95% pour le transport du bois sous toutes ses formes, selon Bourcet et al., 2008). Bien que la réhabilitation de gares-bois soit évoquée en Franche-Comté, des entretiens avec les acteurs du bois-énergie révèlent que la totalité des livraisons de combustibles bois empruntent le réseau routier. Ce dernier présente une plus grande souplesse que le rail, dont l'usage induit nécessairement des frais inhérents à une rupture de charge, le transport routier intervenant de manière quasi systématique pour l'acheminement du bois depuis la forêt jusqu'à la voie ferrée, puis vers la chaufferie. D'après Bourcet et al. (2008), le rail devient économiquement intéressant à partir de 250 km. Dans une optique de développement et de valorisation des ressources locales induisant *a priori* une minimisation des distances de transport, il est peu probable que le transport par voie ferrée intervienne. Nous utilisons donc le réseau routier de la BD CARTO pour modéliser les distances parcourues.

Afin de compléter la matrice de flux, les distances sont calculées selon l'hypothèse du chemin le plus court, et les lieux d'origine et de destination sont raccordés au plus proche point du réseau par distance euclidienne.

1.2.2.2. Spécificités et contraintes du transport routier du bois

Le transport du bois emprunte un réseau routier varié : 1) pistes et routes forestières pour l'extraction de la ressource, 2) voies rurales, communales ou départementales secondaires 3) itinéraires de grande circulation (Bourcet et al., 2008). Il n'y a donc *a priori* pas besoin de hiérarchiser le réseau routier pour le contraindre à choisir préférentiellement les grands axes de transport. D'autant qu'un certain nombre de chaufferies se situent en milieu rural, loin des grands axes de circulation, et qu'il n'y a aucune contrainte au transport de bois sous forme de

plaquettes forestières, mise à part un poids total roulant limité à 40 tonnes⁸². Seul le transport de grumes nécessitant des véhicules hors gabarit est soumis à des contraintes (itinéraires « bois ronds identifiés par arrêt préfectoral départemental). Ce cas ne nous concerne pas dans la mesure où les grumes ne sont pas destinées à être transformées en plaquettes forestières. La hiérarchisation du réseau peut néanmoins s'avérer utile pour la définition de l'accessibilité aux ressources et aux chaufferies, ainsi que pour la détermination du coefficient de friction de la distance : par exemple un grand axe de type 2*2 voies a une friction moindre qu'une voie communale. Les trajets des distances-réseau effectués à partir des données de traçabilité emprunte donc indifféremment tous les types de tronçons routiers.

2. Distribution spatiale et statistique des flux en fonction de la puissance des chaufferies

Les données fournies par ONF Énergie et l'entreprise de travaux forestiers Girard permettent de mettre en évidence deux logiques d'approvisionnements distinctes : l'une concerne la plus grosse chaufferie du secteur collectif/tertiaire existant en Franche-Comté (ainsi que les petites chaufferies présentes sur la commune de Besançon, soit un total de presque 7 MW), l'autre concerne un réseau de trois chaufferies en secteur rural (pour une puissance cumulée de 1 MW). Bien que peu représentatives de l'ensemble des pratiques d'approvisionnement, les informations obtenues sur la traçabilité des plaquettes forestières permettent dans un premier temps d'effectuer une analyse descriptive de la distribution spatiale et statistique et des flux pour la saison de chauffe 2009-2010.

2.1. Un jeu de données incomplet, ne reflétant qu'imparfaitement la réalité

Le jeu de données étant incomplet (et *a fortiori* potentiellement peu représentatif des pratiques d'autres sociétés d'approvisionnement), il faut être prudent quant à l'interprétation des résultats. La grande majorité des sociétés d'approvisionnement que nous avons contactées en vue d'obtenir des données de traçabilité ont refusé de nous transmettre l'information. Le principal argument avancé était une crainte de diffusion de leur stratégie de commercialisation, le milieu étant fortement concurrentiel. D'autres sociétés ont affirmé ne pas disposer de traçabilité de leur produit, en raison de l'importance de la sous-traitance et du grand nombre d'intermédiaires intervenant dans la chaîne d'approvisionnement. Les deux jeux de données que nous avons obtenus ne reflètent donc qu'un sous-ensemble des

⁸² Ce qui est en conformité avec les données fournies par ONF Énergie : des convois moyens d'environ 20 tonnes de matière fraîche, auxquels on ajoute le poids moyen d'un camion forestier de 15 tonnes, ce qui fait un poids total roulant compris entre 30 et 40 tonnes selon les chantiers forestiers.

approvisionnement. Cela peut générer des biais en cas d'élaboration de modèles prédictifs d'approvisionnement.

2.2. Intensité et portée des interactions en fonction de la puissance de la chaufferie

2.2.1. Représentation cartographique des flux de plaquettes forestières

En important les données dans un système d'information géographique, il nous a été possible de visualiser les flux de plaquettes forestières en fonction de leur importance (cf. figures 83 et 84).

Les flux sont représentés de manière agrégée à la commune d'origine, ou par massif forestier. Les quantités ont été traduites en tonnes de matière sèche afin de faciliter les comparaisons entre les deux structures, et aussi avec notre modèle de biomasse. À première vue, l'intensité et la portée des flux diffèrent fortement entre les deux structures, ce qui *a priori* n'est pas très surprenant étant donné que la chaufferie de Planoise et des petites chaufferies attenantes au sein de la ville de Besançon ont une puissance 7 fois supérieure au trio de chaufferies du Pays Loue-Lison. Une lecture sommaire de la figure 83 révèle que la 90 % des besoins (soit plus de 3000 tonnes) des chaufferies de Malbrans, Ornans et Amancey sont assurés par les ressources ligneuses du Pays Loue Lison. Les flux moyens sont quatre fois plus élevés au sein du pays (en moyenne 180 tonnes) que les flux en provenance de communes situées en dehors du pays (en moyenne 45 tonnes).

La situation est sensiblement différente pour les chaufferies bisontines, en dépit de la présence de la forêt de Chailluz. La portée des flux est en effet beaucoup plus vaste, avec un rayonnement régional. En dehors de la forêt de Chailluz, qui s'étend sur plusieurs communes, il n'y a pas de secteurs pourvoyeurs de bois-énergie au sein de la communauté d'agglomération, à l'exception des zones déboisées à proximité du chantier de la ligne à grande vitesse, ou de la future caserne de pompiers à Besançon. Ce type d'aménagement, impliquant l'exploitation d'importantes quantités de bois ne s'inscrit pas dans une logique d'exploitation planifiée sur le long terme, et correspond donc à une offre ponctuelle, difficilement modélisable.

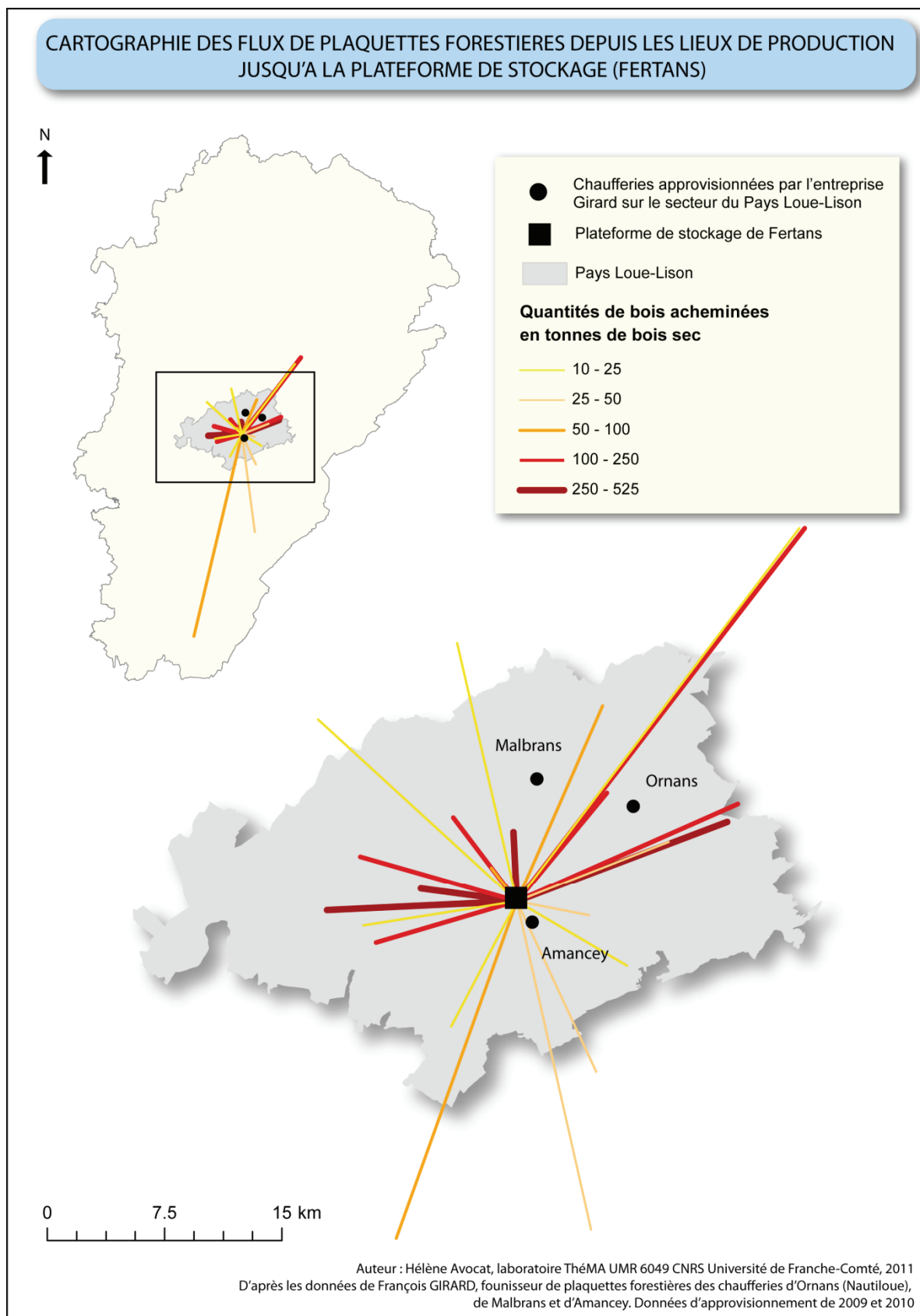


Figure 83 : flux de plaquettes forestières à destination de la plateforme de Fertans

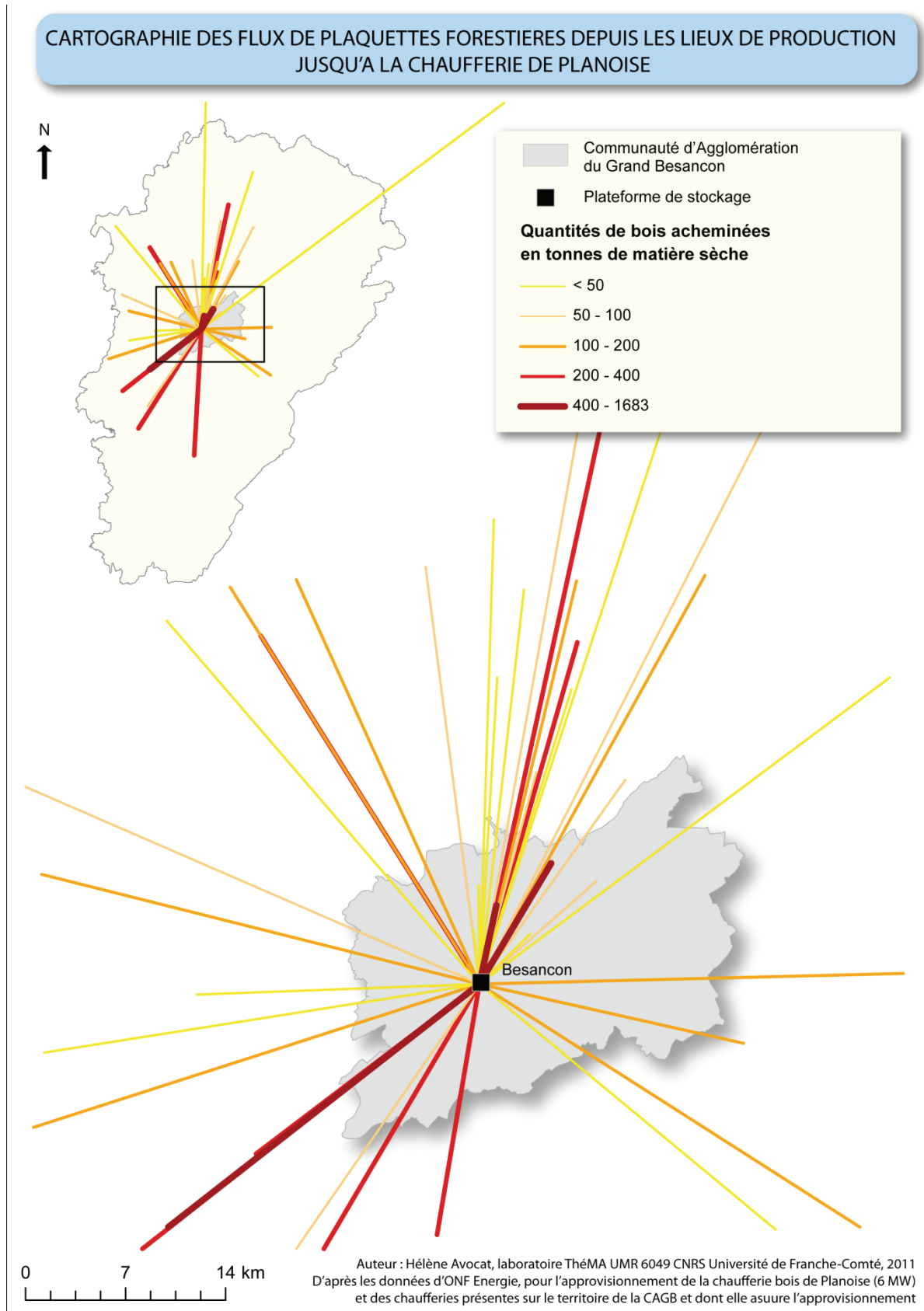


Figure 84 : flux de plaquettes forestières    destination de la chaufferie de Planoise

L'analyse des données met en évidence l'importance de la "masse" des grosses forêts, qui apparaissent comme des lieux préférentiels pour l'alimentation des chaufferies bisontines. Les forêts de Chaux et de Chailluz représentent 2700 tonnes de matière sèche issues de 202 chantiers différents, soit un tiers des plaquettes forestières consommées. Les trois principales sources de plaquettes forestières de Fertans sont les forêts privées de Ronchaux, Châtillon-sur-Lison et Cléron. Le tableau 12 récapitule les principales caractéristiques des approvisionnements des deux structures :

	Planoise	Fertans
Quantité transportée totale (en tonnes de matière sèche)	7980	3383
Quantité transportée minimum	9	10
Quantité transportée maximum	1683	525
Quantité transportée moyenne	190	140
Distance minimum parcourue en km (distance réseau)	4,7	1,5
Distance maximum	279	89
Distance moyenne	35	22

Tableau 12 : principales caractéristiques des approvisionnements de Planoise et de Fertans

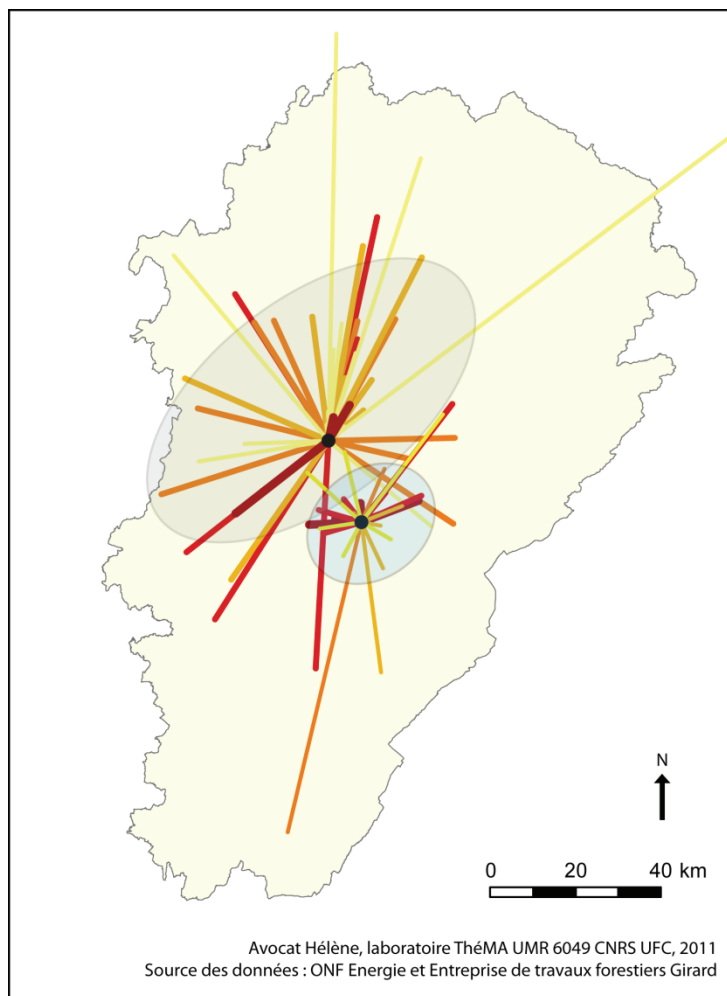
Outre les forêts de Chailluz et de Chaux qui constituent les principales sources d'approvisionnement pour la chaufferie de Planoise, la distribution des autres flux est similaire entre les deux chaufferies (bien que les flux à destination de Planoise soient un peu plus importants). Par contre, l'éloignement ne semble pas *a priori* avoir une incidence sur les quantités de bois transportées, ce qui soulève des doutes quant à la pertinence d'une logique gravitaire régissant les approvisionnements. Seules des analyses plus poussées avec introduction de variables complémentaires relatives aux masses forestières d'origine seront à même de valider ou d'invalider cette hypothèse.

Si la différence entre ces deux situations peut s'expliquer par la taille des chaufferies à alimenter, ainsi que par la présence d'importants massifs forestiers, le statut des deux entreprises peut également expliquer certaines pratiques différenciées se répercutant sur les flux. ONF Énergie est une filiale d'ONF dont le rôle est de gérer et d'exploiter la forêt publique française, elle a par conséquent un rayon d'action et des moyens très importants ; alors que la société Girard est une petite entreprise de travaux forestiers avec des moyens plus limités, aussi bien en termes d'exploitation que de transport, et de main-d'œuvre. Des analyses de la distribution spatiale et statistique plus poussées ont été effectuées, en étudiant notamment l'intensité et la portée des flux selon des gradients d'éloignement, et en mettant en exergue l'importance de la structure forestière, ainsi que le rôle structurant des grands massifs forestiers.

2.3.2. Des bassins d'approvisionnement fonction de la puissance des chaufferies ?

L'analyse de la structure de consommation effectuée en Franche-Comté dans la première partie a mis en évidence une forte hétérogénéité, tant au niveau qualitatif (type de maîtrise d'ouvrage) que quantitatif (niveau de puissance). Dans le cadre de ces travaux nous nous intéresserons plus spécifiquement à la composante quantitative de la consommation. Après entretien avec différents professionnels de la filière et acteurs de terrain, et lecture de quelques plans d'approvisionnement (depuis la chaufferie du petit collectif locatif à la grosse centrale de cogénération issue du programme CRE2), nous avons constaté que la taille de la chaufferie pouvait induire des différenciations dans les pratiques d'approvisionnement. Alors que certaines sociétés d'approvisionnement de chaufferies de taille modeste affirmaient que la réduction des distances de transport et la valorisation des ressources locales étaient des priorités, les centrales de cogénération en projet n'hésitaient pas à prélever des ressources dans plusieurs régions. Bien que la différence entre ces deux types d'installation soit sans commune mesure, et que nous n'ayons pas pu avoir davantage de renseignements en raison du manque de coopération des maîtres d'ouvrages et sociétés d'approvisionnement, nous avons posé l'hypothèse que la taille du bassin d'approvisionnement était dans une certaine mesure corrélée à la puissance de l'installation. Dans le cas présent, la structure de consommation bisontine (chaufferie de Planoise + petites chaufferies municipales) est sept fois plus importante que les trois chaufferies réunies du Pays Loue Lison. La forme générale des aires d'approvisionnement de ces deux structures est à première vue liée à l'importance de leur puissance (cf. figure 85). La présence d'importants massifs forestiers à proximité semble néanmoins avoir aussi un rôle structurant par rapport à certains flux.

Figure 85 : forme globale des aires d'approvisionnement de Planoise et des chaufferies alimentées par la plateforme de Fertans



2.2.3. Un rôle structurant des grands massifs forestiers ?

Les flux de plaquettes forestières sont le fait d'une différenciation spatiale entre des zones de production et de consommation, induisant un phénomène de complémentarité. Cette dernière est sensible aux économies d'échelle : on préfère parfois importer des produits d'une région plus lointaine si elle est capable de satisfaire la totalité de la demande, plutôt que de s'adresser à des fournisseurs plus proches mais ne pouvant répondre que partiellement (Gillon, 1997). Cela peut expliquer l'importance/la surreprésentation des massifs boisés importants comme la forêt de Chaux dans les approvisionnements de la chaufferie de Planoise, alors que l'on trouve des ressources ligneuses situées à proximité, mais non exploitées pour l'alimentation de la chaufferie (cf. figure 86).

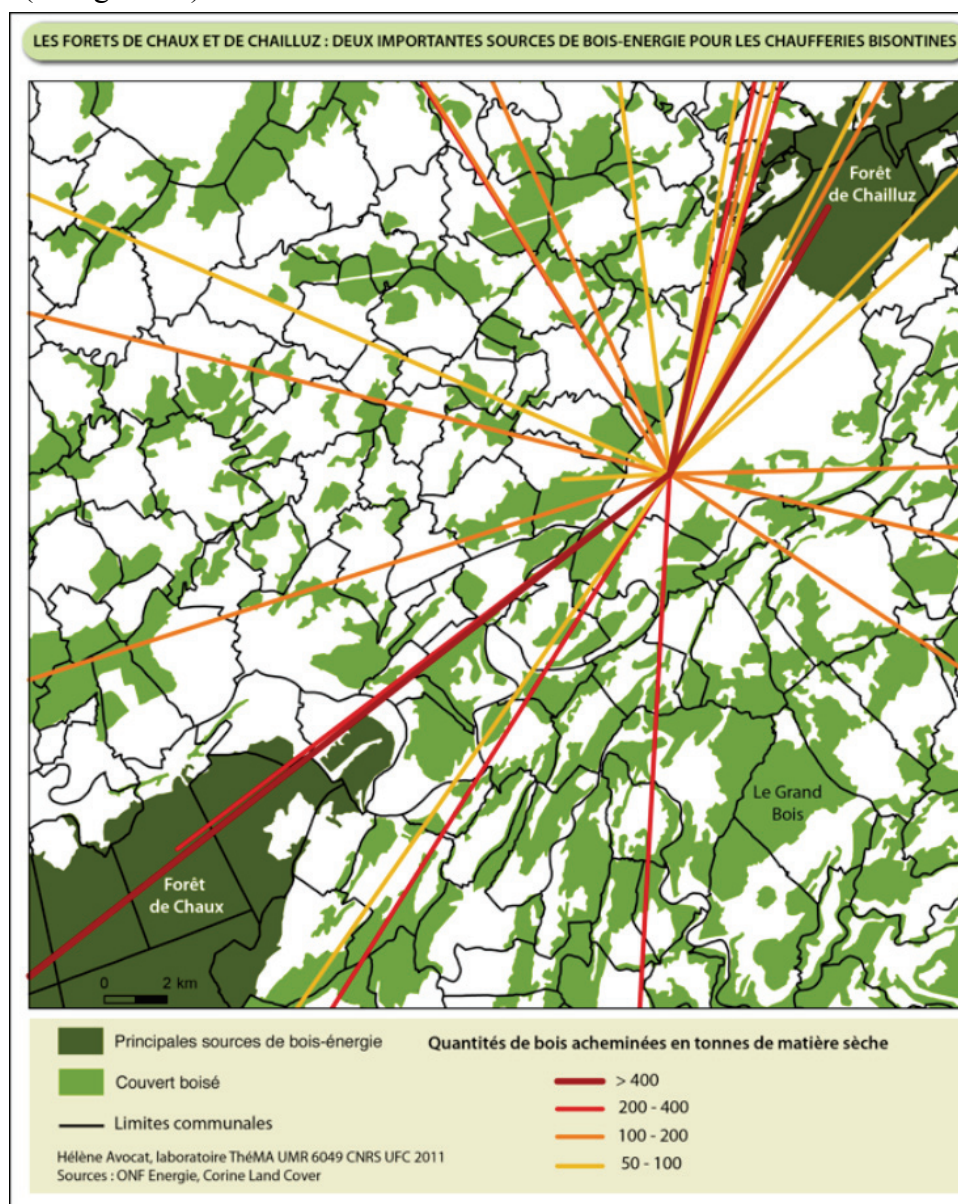


Figure 86 : rôle des forêts de Chailluz et de Chaux dans les approvisionnements des chaufferies bisontines

Les communes limitrophes, notamment celles situées à l'ouest et au sud-ouest de Besançon (Serre-les-Sapins, Chemaudin, Boussières, Osselle etc.), à l'exception de Franois (déjà exploitée), présentent d'importantes zones boisées et peu de contraintes topographiques. Plus proches que la Forêt de Chaux (et même que de la Forêt de Chailluz, étant donné la localisation de la chaufferie de Planoise), ces massifs de moindre importance pourraient constituer un gisement de bois-énergie intéressant. Bien que ces massifs soient des forêts communales (et que par conséquent l'exploitation pourrait en être facilitée étant donné qu'ONF Énergie est affiliée à un acteur public, ce qui pourrait accroître les synergies d'actions en forêt publique), la présence de gros blocs forestiers d'un seul tenant semble jouer une importance dans les approvisionnements de la chaufferie de Planoise, qui de fait ne décroissent pas régulièrement avec l'éloignement.

2.3. Importance des flux, gradients de distance et structure forestière

2.3.1. Flux et gradients d'éloignement

Afin d'estimer la relation entre l'intensité des flux et l'éloignement par rapport au lieu de consommation, nous avons effectué quelques analyses entre la proportion de plaquettes forestières acheminées et les distances parcourues (figure 87).

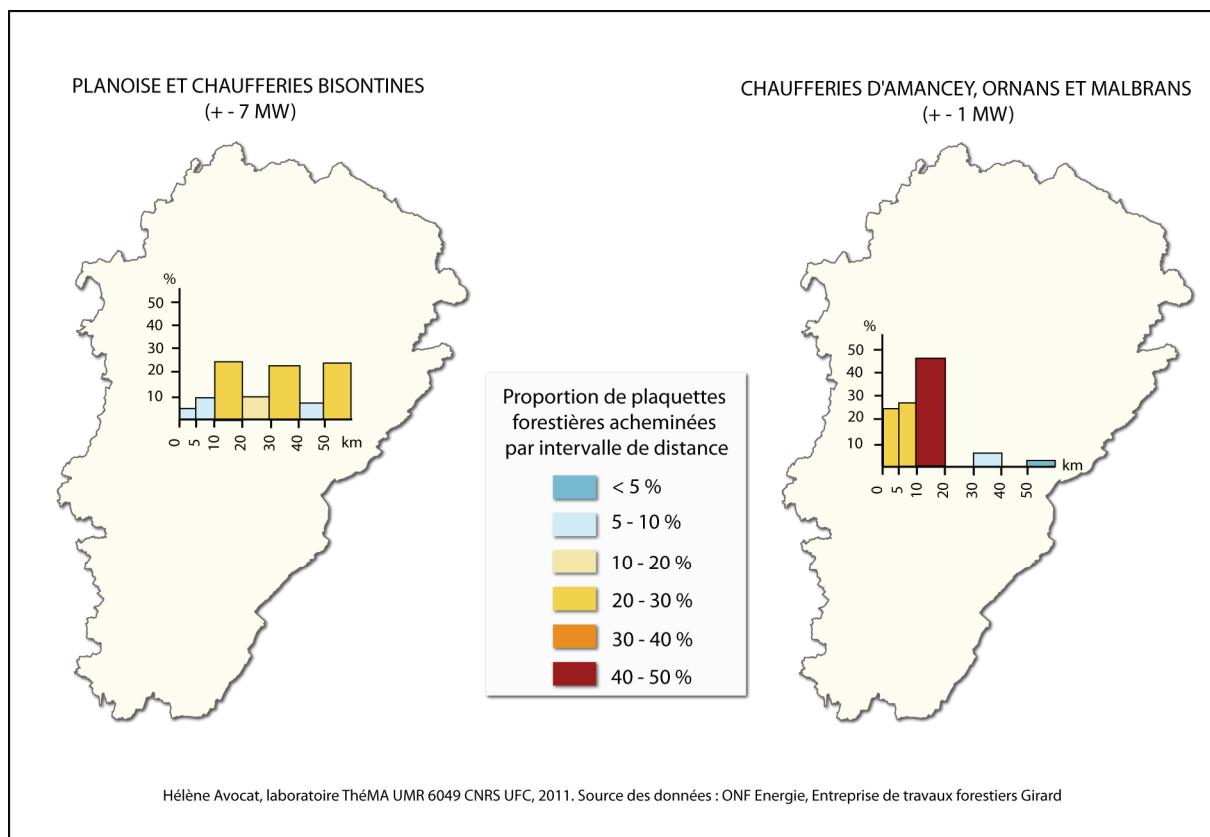


Figure 87 : flux et gradients d'éloignement

Si les ressources forestières étaient réparties de manière homogène sur le territoire, et que les contraintes d'exploitation étaient les mêmes partout, nous aurions logiquement observé une décroissance régulière de l'intensité des flux répondant à une logique de minimisation des distances de transport et de maximisation des profits (un peu dans l'esprit du modèle d'affection agricole développé par J. H. Von Thünen dans les années 1830). Mais l'espace géographique n'étant pas isotrope, et les espaces boisés ayant une emprise spatiale hétérogène, les approvisionnements en plaquettes forestières ne répondent pas forcément à cette logique, même si la figure 87 montre globalement une décroissance de l'intensité des interactions sur les longues distances (au-delà de 40 ou 50 km). La décroissance des interactions est plus forte pour les trois chaufferies du Pays Loue-Lison, puisque 95 % des ressources se situent dans un rayon de 20 km à vol d'oiseau. Cela conforte la forme générale des aires d'approvisionnement décrites dans la figure 85. Fait intéressant, la majorité des plaquettes forestières pour les deux structures ne dépasse pas un rayon compris entre 10 et 20 km. A peine 10 % des plaquettes forestières sont situées à l'intérieur d'un rayon inférieur à 10 km pour Besançon, contre pratiquement 50 % pour les chaufferies du Pays Loue Lison (cf. tableaux 13 et 14). Seulement 7 % des plaquettes acheminées vers Fertans (environ 250 tonnes) ont été exploitées à plus de 30km, contre un tiers des plaquettes consommées sur le site de Planoise, ce qui étaye l'hypothèse d'une relation entre puissance et taille du bassin d'approvisionnement.

2.3.2. Structure forestière et approvisionnements

2.3.2.1. Les données utilisées pour caractériser les espaces forestiers

Les approvisionnements des chaufferies bisontines allant au-delà de la zone d'étude sur laquelle nous avons travaillé dans le chapitre 9, cela nous oblige à mobiliser d'autres sources de données pour estimer la « masse » de nos lieux d'origine. L'objectif étant de mettre en évidence un éventuel rôle structurant des importantes masses forestières, nous avons choisi d'utiliser la couverture forestière de Corine Land Cover (classes 311, 312, 313 et 324 correspondant respectivement aux forêts de feuillus, de conifères, aux forêts mélangées et aux forêts et végétations arbustives en mutation). Avec une cartographie des espaces forestiers d'au moins 25 ha, Corine Land Cover met en évidence les principaux secteurs boisés, ce qui correspond à nos attentes. Cette limite de 25 ha correspond en outre à la taille minimum des forêts privées soumises à des plans simples de gestion (documents de planification forestière), et donc susceptibles d'être exploitées (ou du moins ayant davantage de chances d'être exploitées que d'autres formations forestières plus petites ou plus fragmentées).

2.3.2.2. Les indicateurs de composition, importants mais pas suffisants

L'intensité et la portée des interactions ne décroissant pas régulièrement avec la distance, il nous a semblé pertinent de tester plusieurs indicateurs de structure forestière afin d'analyser le rôle de cette dernière. L'importance du couvert forestier peut s'appréhender au moyen de deux indicateurs : la superficie boisée (mesure absolue, exprimée en ha), et le taux de boisement (mesure relative par rapport à la superficie communale). N'utiliser que le taux de boisement pour caractériser la « masse » des lieux d'origine n'est pas satisfaisant, même si c'est un moyen aisé de comparer l'emprise relative du couvert boisé. En effet, une zone A ayant un taux de boisement de 80%, mais une superficie totale de 90 ha aura une moindre masse ligneuse qu'une zone B de 3000 ha avec un taux de boisement de 20% (figure 88).

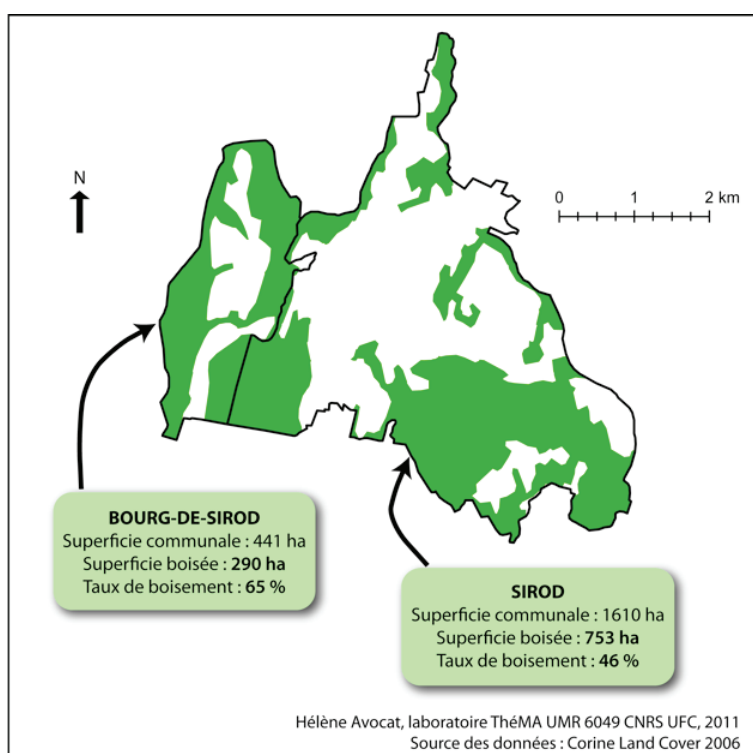


Figure 88 : couvert boisé et taux de boisement

Bien que ces deux indicateurs soient révélateurs de l'importance du couvert forestier (et *a fortiori* de la masse énérgisable), il apparaît néanmoins intéressant de compléter cet indicateur de composition par des informations sur la configuration des espaces boisés. Et ce d'autant plus que nous avons posé l'hypothèse que la configuration des espaces boisés (notamment leur fragmentation) pouvait être un frein à l'exploitation et donc interférer sur la probabilité d'interaction spatiale.

2.3.2.3. La configuration des espaces forestiers : un paramètre important

La mesure de la fragmentation est un indicateur essentiel de la structure du paysage (et du couvert forestier) largement utilisé en écologie du paysage pour l'analyse des déplacements et

des modes de vie des communautés animales. Un large panel d'indicateurs plus ou moins complexes a été développé, permettant d'appréhender la fragmentation ou l'homogénéité des milieux naturels. Par conséquent, il peut être intéressant pour nous d'analyser la structure forestière au moyen de ces indicateurs, et de les mettre en parallèle avec d'autres mesures des milieux forestiers (indicateurs de composition). Après avoir effectué une revue bibliographique, nous avons opté pour des indicateurs simples, et avons calculé :

- le nombre de taches, permettant d'avoir une vision rapide du degré de fragmentation forestière,
- la densité de taches (patch density), représentant le rapport du nombre de taches sur la surface totale de la zone d'étude. Plus le résultat est élevé plus la fragmentation est importante. Cet indicateur est à mettre en parallèle avec la taille moyenne des taches et le *largest patch index*.
- la taille moyenne de la surface des taches, qui est un bon indicateur de la structure globale du couvert boisé (de fortes valeurs pouvant être révélatrices d'un couvert forestier compact et relativement peu fragmenté⁸³),
- la taille minimale des polygones présents sur chaque espace. Dans notre cas, cet indicateur n'est pas révélateur de fragmentation dans la mesure où l'intersection des polygones forestiers avec les limites communales donne très souvent lieu à de très petites tailles de polygones.
- la taille de la plus grande tache permet d'identifier la présence de vastes espaces boisés non fragmentés. Elle peut être un bon indicateur du degré de fragmentation des milieux forestiers, et sert au calcul du *largest patch index*, indicateur mesurant la part de la taille la plus large par rapport à la superficie de la zone d'étude. Bien que se mesurant usuellement par rapport à d'autres classes d'occupation du sol, en permettant de déterminer la dominance d'une classe dans le paysage, nous l'utilisons ici. Associé avec le nombre de taches, il permet d'évaluer le degré de fragmentation ou au contraire d'agrégation du milieu forestier (les niveaux les plus élevés correspondant aux habitats les plus vastes). L'ensemble de ces indicateurs a été reporté dans les tableaux 13 et 14.

2.3.2.4. Quelles relations entre l'intensité des flux, la distance parcourue et la structure du couvert boisé ?

Afin de faciliter la lecture des tableaux, nous avons mis en place un code couleur identifiant les valeurs remarquables les plus élevées ou au contraire les plus faibles. Bien qu'il ne faille pas tirer de conclusions hâtives, compte tenu du manque d'exhaustivité et de représentativité des données, il semblerait que l'importance du couvert boisé et la configuration forestière

⁸³ À confirmer toutefois en croisant avec d'autres indicateurs de configuration



jouent un rôle par rapport à certains flux. Des indicateurs simples de composition (superficie, taux de boisement), et de configuration (morphologie –taille et densité- des taches forestières) permettent de mettre en parallèle l’offre et la satisfaction de la demande. La configuration du couvert boisé semble jouer un rôle, la taille moyenne des taches coïncidant avec la proportion de plaquettes acheminées. Le degré de fragmentation semble aussi avoir de l’importance.

Rayon en km	Pourcentage de plaquettes forestières	Superficie boisée en ha*	Taux de boisement*	Taille moyenne des taches de forêt en ha*	Taille minimum des taches de forêts en ha*	Taille maximum des taches de forêt en ha*	Densité de taches*	Part de la tache la plus large*
0-5	1	2306	29	135	0,002	627	0,216	8
5-10	9	9227	40	219	0,003	2325	0,178	10
10-20	31	42320	45	549	0,003	7894	0,081	8
20-30	26	70823	45	795	7	12125	0,056	7,7
30-40	11	88920	40	511	0,004	11739	0,079	5,3
40-50	15	96167	34	488	0,008	17124	0,069	6
> 50	7	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 13 : gradient de distance et flux de plaquettes forestières à destination du site de Planoise

Rayon en km	Pourcentage de plaquettes forestières	Superficie boisée en ha*	Taux de boisement*	Taille moyenne des taches de forêt en ha*	Taille minimum des taches de forêts en ha*	Taille maximum des taches de forêt en ha*	Densité de taches*	Part de la tache la plus large*
0-5	24	3550	45	507	2,4	1980	0,089	25,2
5-10	25	12447	53	2079	32	7703	0,025	32,7
10-20	44	42215	45	796	1,8	19543	0,056	20,7
20-30	0	67117	43	729	0,8	15776	0,058	10
30-40	5	92300	42	650	0,4	28491	0,064	13
40-50	0	99192	35	554	0,01	29017	0,063	10,2
> 50	2	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 14 : gradient de distance et flux de plaquettes forestières à destination du site de Fertans

	Mesures les plus élevées
	Mesures les plus faibles

* Tous les indicateurs de structure et de configuration forestière ont été calculés à partir de Corine Land Cover 2006, classes 321, 322 et 323. Les superficies cartographiées sont supérieures à 25 ha. Pour des raisons techniques (temps de calcul raccourcis), nous avons privilégié ce type de données par rapport à la couche végétation de la BD Topo. La taille minimum des taches (très largement inférieure à 25 ha), est imputable au processus d’intersection des polygones de forêt et des zones d’étude.

Dans le tableau 13 (Planoise), il y a en effet une proportion relativement faible (9%) de plaquettes forestières acheminées à l'intérieur d'un rayon de 5 à 10 km, en dépit d'un taux de boisement de 40%. La taille moyenne des taches, assez faible, ainsi qu'une forte densité de taches témoignent d'un couvert boisé assez fragmenté, et peut expliquer en partie ce phénomène (l'autre explication étant la proximité de très gros massifs exploités de façon préférentielle). Cependant, ici encore, il ne faut pas établir de généralités compte tenu du manque de représentativité des données, mais également du manque de recul par rapport à une filière encore peu structurée et dont le développement est très récent.

Il y a aussi des phénomènes qui ne s'expliquent pas par la simple proximité ou la configuration du couvert forestier. Ainsi comment expliquer que dans le tableau 14 (Fertans) aucune source de combustibles ne provienne d'un intervalle compris entre 20 et 30 km, alors que 5% des plaquettes acheminées sont situées entre 30 et 40 km de la plateforme de Fertans (cf. figure 87 sur les proportions de combustibles acheminés par gradient d'éloignement) ? Comment expliquer également que presque la moitié des combustibles provienne de 10 à 20 km, alors que les ressources ligneuses localisées dans un intervalle de distance allant de 5 à 10 km sont plus importantes (taux de boisement de 53 %), et moins fragmentées (la taille moyenne des taches dépassant 2000 ha, et la tache la plus importante couvrant presque un tiers de la superficie de cette zone) ? Cela peut s'expliquer par des paramètres difficilement modélisables ici, comme des relations interpersonnelles privilégiées entre deux types d'acteurs (nécessitant des entretiens avec ces derniers).

Pour les deux structures, les zones présentant les taux de boisement les plus élevés et les configurations *a priori* les plus favorables (faibles valeurs de densité de taches, fortes valeurs de taille moyenne de taches, et importance de la tache la plus vaste par rapport à l'ensemble des zones) sont également les zones pourvoyant le plus de plaquettes forestières. Simple coïncidence ou faut-il y voir un rôle structurant des importantes masses forestières dans les processus d'approvisionnement ? Seules des analyses complémentaires plus poussées et alimentées par des données plus complètes, établies par rapport à la « masse » des lieux de production, seraient à même de nous apporter davantage d'éléments de réponse et de valider ou non ces hypothèses.

3. Test du modèle gravitaire. Des interactions fonction de la masse et de la distance ?

Les géographes ont mis en évidence des phénomènes de régularité dans les échanges entre les entités spatiales (cf. chapitre 5). Très souvent, les interactions sont fonction des masses des objets considérés et de la distance qui les sépare (ce qui correspond à un comportement rationnel de volonté de minimiser les distances de déplacement). De multiples observations empiriques ont mis en évidence l'importance de cette dernière comme frein aux échanges

entre les unités spatiales (= friction de la distance). Bien que les masses et la distance ne soient pas les paramètres générateurs de l'interaction, ils sont en revanche d'excellents descripteurs des phénomènes d'interaction spatiale, au point que l'analogie gravitaire, mise en évidence pour la modélisation de nombreux phénomènes, soit citée comme un modèle incontournable. Bien que notre jeu de données ne soit pas exhaustif, il nous semble intéressant de tester la validité de l'analogie gravitaire, (décroissance de l'intensité des flux de plaquettes forestières avec l'éloignement à la chaufferie).

3.1. Démarche globale

Le travail de terrain (entretien avec les acteurs de la filière bois-énergie), ainsi que les diverses conclusions tirées de l'analyse d'études de faisabilité nous amènent à poser les hypothèses suivantes :

- la taille des bassins d'approvisionnement est dans une certaine mesure reliée à la puissance des chaufferies (cette dernière déterminant la quantité de plaquettes forestières consommée annuellement), ce qui peut poser des problèmes de concurrence ;
- l'importance et la configuration des espaces boisés jouent un rôle dans les modalités d'exploitation des ressources ligneuses, et donc sur la quantité de plaquettes forestières mobilisables ;
- les zones proches entretiennent davantage de relations que les zones éloignées, l'intensité des relations diminuant avec la distance.

En somme, plus une chaufferie a une puissance importante, plus elle attire de plaquettes forestières, et plus une forêt est importante, plus elle peut fournir de plaquettes forestières. En outre, plus les forêts sont éloignées des chaufferies, et moins elles ont de chances d'être exploitées. Parallèlement, des réflexions sur la modélisation des interactions spatiales mettent en évidence une analogie avec la loi de la gravitation, stipulant que les interactions entre des objets spatiaux sont d'autant plus fortes que les masses de ces objets est importante, et que la distance joue un rôle de frein dans la probabilité de réalisation d'une interaction.

Après avoir déterminé les masses des objets interagissant et la distance les séparant, nous testons la validité d'un modèle d'interactions spatiales de type gravitaire. Il s'agit d'un modèle théorique, fondé sur un raisonnement hypothético-déductif. Une fois le modèle élaboré, nous comparons les flux estimés (théoriques), et les flux réellement observés (figure 89). Cette démarche nous permet de valider ou d'invalider l'hypothèse de relations sous-tendues par une logique gravitaire, et de mettre en évidence le frein de la distance ainsi que le rôle structurant des grandes masses forestières.

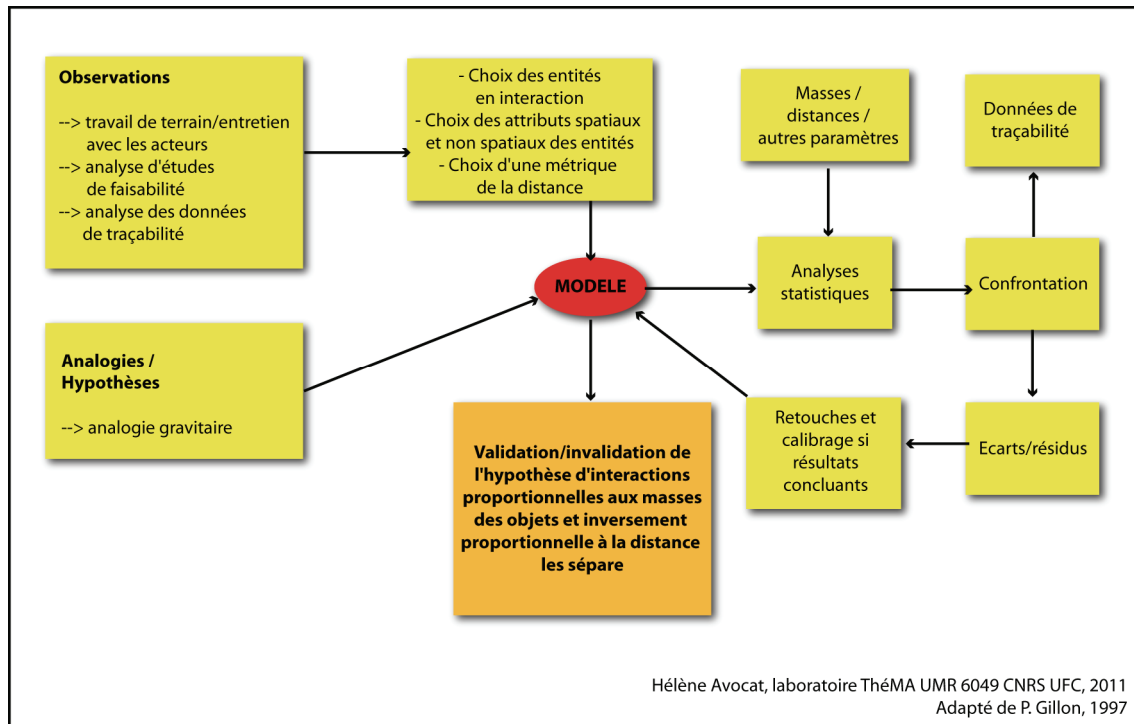


Figure 89 : démarche globale et test de l'analogie gravitaire

L. Gazull, dans ses travaux sur la modélisation du bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Bamako a mis en évidence une structuration des approvisionnements obéissant à une logique gravitaire. Dans son modèle, les masses forestières des lieux d'origine et la distance parcourue sont des paramètres très importants. Qu'en est-il dans un autre contexte ?

3.2. Test d'un modèle d'interaction concurrentiel spatiale simple (Huff)

Nous avons vu en deuxième partie les modèles gravitaires spatiaux. Nous utilisons le modèle D.-L. Huff (1964), formulation probabiliste de la loi de Reilly (1931), qui permet de prendre en compte à la fois l'attractivité propre des points de vente (ici des chaufferies), la notion de distance (accessibilité), et la concurrence présente (autrement dit de mesurer l'attractivité relative). Le modèle calcule la probabilité d'interaction entre une chaufferie i et une commune j , selon la formalisation suivante :

$$P_{cs} = \frac{U_s d_{cs}^{-\beta}}{\sum_{s=1}^N (U_s d_{cs}^{-\beta})}$$

Équation 5 : modèle probabiliste de Huff (équation)

Avec :

- P_{cs} = probabilité d'interaction entre une chaufferie s et un lieu c potentiellement pourvoyeur de plaquettes forestières,
- d = distance entre la chaufferie et les lieux de production de plaquettes forestières
- U_s = attractivité des chaufferies, symbolisée par leur puissance en MW
- β = exposant de la distance

Pour formaliser ce modèle, nous avons utilisé l'application *Market Analyst*, compatible avec ArcGis. Nous avons modélisé les probabilités d'interactions pour les chaufferies de Planoise (à laquelle nous avons agrégé les chaufferies "satellites" qui en dépendent), et de la plateforme de Fertans, alimentant les chaufferies d'Amancey, Ornans et Malbrans (cf. figure 90). Les entités spatiales présentant une probabilité d'interaction avec les chaufferies sont les communes, caractérisées par une superficie forestière. Le terrain d'étude est circonscrit non pas aux limites de la CAGB et du Pays Loue-Lison (en raison de l'importance des flux à destination de Planoise), mais à la Franche-Comté.

Le choix de l'exposant de la distance.

Un exposant de 0 est appliqué si la distance ne joue pas, un exposant de 1 si la distance joue de façon linéaire. Une augmentation des valeurs de l'exposant est appliquée si la distance joue un rôle plus important. Si le bien est rare, l'exposant est faible et la distance ne joue pas de rôle particulier dans les interactions spatiales ; alors que si le bien est courant, on va chercher à minimiser les distances (application d'un exposant fort). L'exposant de la distance retenu ici est de 2 (paramètres par défaut du modèle), ce qui correspond bien à la situation d'un bien courant (forêts) et d'un rôle important de la distance (volonté de privilégier les ressources locales).

Intérêts et limites du modèle.

La figure 90, intéressante à maints égards, présente cependant comme grosse limite de ne présenter que deux points d'attraction en concurrence. La limite entre ces deux pôles est bien visible, et le gradient colorimétrique symbolisant la probabilité d'interaction spatiale met en évidence la portée régionale de la chaufferie de Planoise par rapport à Fertans.

Comparaison avec les flux réels.

Nous avons superposé au résultat cartographié, les flux de plaquettes forestières connus afin d'effectuer une comparaison entre les résultats du modèle gravitaire et les flux connus. Bien qu'une relative organisation spatiale transparaisse à première vue avec les deux jeux de flux, une analyse plus fine des cartes laisse des doutes quant à une structuration des

approvisionnement basée sur une logique gravitaire. Ce problème a par ailleurs été soulevé dans la figure 87, représentant graphiquement l'importance des interactions et la distance parcourue. Cela sous-entend que les approvisionnements sont régis par d'autres paramètres que les masses et la distance. Une telle allégation est cependant difficile à affirmer sans avoir éprouvé statistiquement le degré de corrélation entre les flux, les masses émettrices et réceptrices et la distance séparant les lieux de production des lieux de consommation.

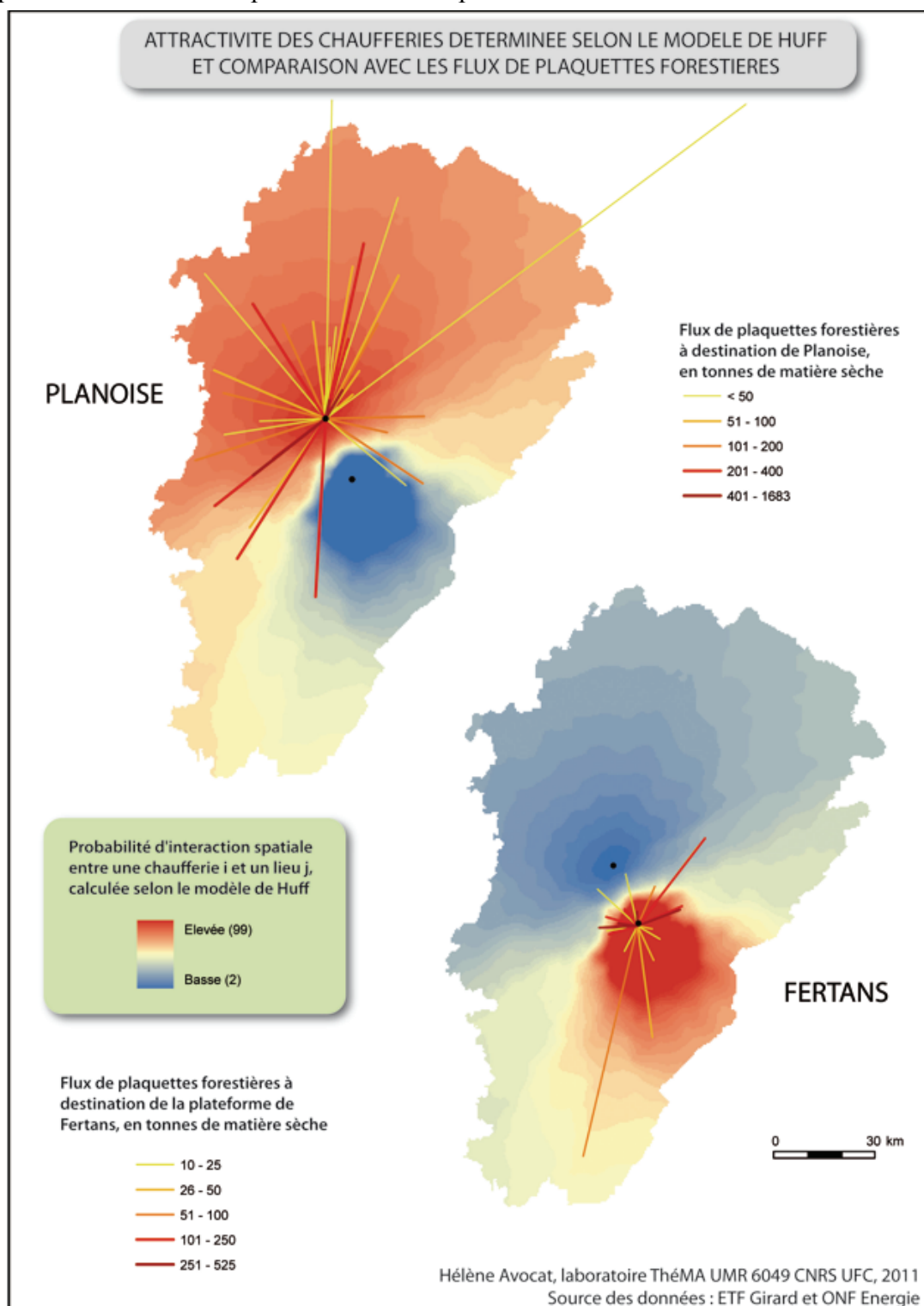


Figure 90 : attractivité des chaufferies de Planoise et de Fertans calculée selon le modèle de Huff

3.3. Formalisation du modèle et vérification des hypothèses

Dans une démarche hypothético-déductive visant à comprendre les processus d’approvisionnement, il nous semble important de tester le rôle des masses et de l’éloignement, maintes fois mis en évidence dans d’autres contextes.

3.3.1. Construction du modèle

3.3.1.1. Les entités spatiales en interaction : communes ou massifs forestiers ?

Les « masses forestières » des lieux d’origine faisant partie des variables explicatives du modèle, il faut arriver à les caractériser. Nous nous heurtons cependant à un problème majeur, lié à la nature des données et à l’emprise spatiale des massifs forestiers par rapport aux limites administratives.

95 % des données qui nous ont été fournies par les sociétés d’approvisionnement ne contiennent malheureusement pas les coordonnées précises des chantiers forestiers où sont exploitées les plaquettes forestières, mais seulement le nom de la commune dans laquelle a eu lieu l’exploitation. Les 5% des flux restants, représentant trois lieux d’origine sont désignés par le nom du massif. Deux d’entre eux sont des massifs spatialement bien définis (forêt de Chaux et forêt de la Serre), ce qui n’a pas posé de problème majeur pour la cartographie des flux par le centroïde du polygone. Le troisième massif, la forêt de Chailluz, est beaucoup plus problématique à définir, car la toponymie forestière est très floue. Cette forêt fait partie d’un continuum forestier très vaste, ce qui laisse le doute entre un massif de 1700 à plus de 14000 hectares (taille du polygone entier dans Corine Land Cover).

Des coordonnées précises nous auraient permis d’identifier précisément les polygones forestiers et de travailler à partir des ressources elles-mêmes et non pas d’un agrégat communal. Nous aurions ainsi pu déduire les principales caractéristiques des massifs forestiers en tenant compte de leur continuum, chose que nous ne pouvons pas faire en travaillant avec un maillage administratif, les limites communales ne coïncidant pas avec les limites de l’emprise forestière. N’ayant d’autre alternative que de travailler avec la contrainte des limites administratives, il faut donc trouver un moyen de caractériser les masses communales des ressources forestières, sachant que cela pose des problèmes de comparaison pour les trois lieux d’origine faisant référence à des massifs forestiers s’étendant sur plusieurs bans communaux.

Par ailleurs, nous avons tenté de nous affranchir des limites communales, pensant que le massif forestier était plus représentatif que la commune pour représenter la masse des lieux

d'origine. Pour cela, nous avons posé l'hypothèse que le polygone forestier le plus important avait davantage de chance d'être exploité, et avons affecté comme masse la superficie de ce polygone. Cette méthode a cependant très vite montré ses limites en raison de l'importance de certains polygones, présentant des continuum forestiers de plusieurs dizaines de milliers d'hectares, mais avec des formes singulièrement peu compactes. Ainsi, les trois plus importants polygones forestiers franc-comtois représentent à eux seuls plus de 40 % de la superficie forestière régionale (cf. figure 91). Nos tentatives de scinder ce continuum en plusieurs polygones se sont révélées infructueuses, en raison de la complexité morphologique des polygones. Cela supposait, de plus, de les diviser arbitrairement en postulant que les zones de rétrécissement (d'au moins 200 mètres) puisse marquer une scission entre des polygones de taille plus conséquente. À titre indicatif, 70 % des plaquettes forestières acheminées jusqu'à Fertans proviennent d'une tache forestière de plus de 185000 ha (la tache la plus au sud sur la figure 91), présentant un continuum forestier s'étendant sur plus de 150 km. Dans ces conditions, il n'est pas pertinent de se référer aux polygones forestiers. Une origine référencée à la commune est dans ce cas-là plus précise, et permet de mieux appréhender les distances parcourues qu'un agrégat de flux provenant du centroïde d'un polygone énorme (ce qui induirait de plus, un important biais par rapport aux distances parcourues).

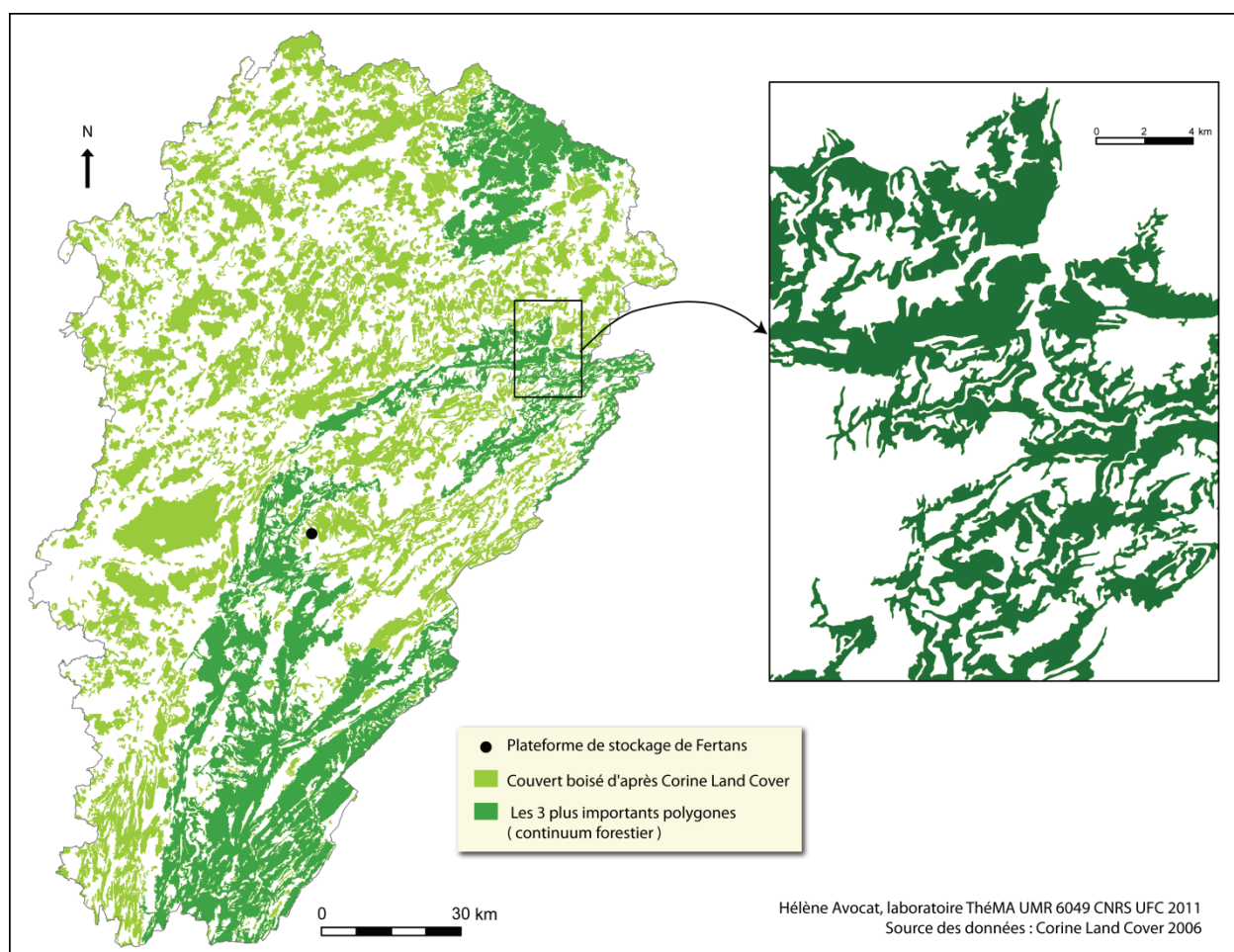


Figure 91 : taille des polygones et continuum forestier

3.3.1.2. L'indicateur retenu pour estimer la « masse » forestière

Bien qu'ayant posé l'hypothèse qu'un secteur boisé ait davantage de chance d'être exploité :

- si l'emprise forestière et le continuum forestier sont importants (ou du moins s'il atteint un certain seuil de rentabilité économique) ;
- et s'il est compact (la fragmentation pouvant être un obstacle à l'exploitation et à la gestion forestière, les formations boisées de petite taille, et morcelées faisant rarement l'objet d'une planification, même si elles constituent une ressource ligneuse potentiellement intéressante) ;

Il n'existe pas, à notre connaissance d'indicateur synthétique simple combinant composition et configuration. D'autre part, les problèmes de configuration précédemment évoqués peuvent constituer un obstacle à l'élaboration d'un indicateur tenant compte de la morphologie des espaces boisés et introduire des biais dans le modèle. Dans un premier temps, nous testons la validité du modèle à partir de la superficie boisée communale comme masse des lieux d'origine. Pour les trois origines se référant à un massif forestier s'étendant sur plusieurs bans communaux, nous prenons comme donnée de référence la superficie forestière des bans recouverts par les massifs concernés, et désagrégeons les flux au prorata du nombre de communes.

3.3.2. Forme du modèle et méthodes statistiques utilisées

La formalisation du modèle peut prendre plusieurs formes. Le langage mathématique est le plus adapté car il permet de réaliser des estimations chiffrées et donc de vérifier la pertinence des rapports entre les variables exprimées par l'équation (Gillon, 1997). Le modèle formalisé ici est de type contraint par la demande, son expression est en fait une expression de l'attractivité des destinations. Nous testons un modèle d'interaction simple, fidèle aux hypothèses communément admises dans la littérature, et ne retenant que les attributs concernant l'éloignement et les masses forestières pour lesquelles nous avons des informations :

$$F_i = k \cdot MF_i^\alpha \cdot d_i^\beta$$

Équation 6 : modélisation gravitaire des flux de plaquettes forestières

Avec F_i = variable à expliquer : flux de bois-énergie comptabilisés sur un an,

k , α , et β = coefficients d'ajustement recherchés

MF_i = masse forestière de i (masse forestière communale ou massif forestier, variable explicative)

d_i = distance entre la chaufferie et le lieu d'origine i (variable explicative)

Les données utilisées sont les données de traçabilité fournissant l'origine des combustibles pendant la saison de chauffe 2009-2010, données initialement fournies par camion, et agrégées au niveau communal. Ces informations sont considérées comme fiables dans la mesure où une pesée systématique du chargement des véhicules a été effectuée. Elles ne sont par contre absolument pas représentatives de l'intégralité des flux de plaquettes forestières acheminées à destination des chaufferies. Elles doivent donc à ce titre être considérées avec précaution.

3.3.1. Résultats et discussion

Pour modéliser les flux de plaquettes forestières selon la formalisation retenue (équation 5), nous avons procédé de manière itérative en effectuant des régressions linéaires multiples.

3.3.3.1. Des résultats mitigés

→ *Des premiers tests peu concluants*

Notre hypothèse de base est que les flux de plaquettes forestières (variable expliquée) dépendent à la fois de la puissance des chaufferies (masse des destinations), des caractéristiques des milieux forestiers (masse des origines) et de la distance parcourue (variables explicatives), ainsi que d'autres facteurs non modélisables ici. Une première régression a été effectuée pour l'ensemble des flux, c'est-à-dire en considérant conjointement les flux à destination des deux chaufferies. Nous avons utilisé comme variables de masse des origines les superficies forestières communales et les superficies des massifs (pour les origines initialement connues au massif forestier). Ce premier test a montré une corrélation globale plus satisfaisante, mais en réalité « tirée » par les masses de ces deux massifs, situés en dehors du nuage de points. Utiliser les origines « massifs » permet d'exploiter les données telles qu'elles nous ont été fournies, et non désagrégées à la commune (l'opération de désagrégation pouvant induire des biais par rapport à l'information initiale). Cependant cela implique de comparer des flux qui ne sont pas comparables compte tenu de l'effet d'agrégation des flux « massifs ». Les tests suivants ont donc été effectués à partir des flux « massifs » désagrégés à la commune.

Une régression simple, basée uniquement sur les superficies forestières communales (paramètre représentant la masse) et la distance (variables explicatives), n'explique que 7 % de la variance des flux, ce qui est insatisfaisant. La même analyse (mêmes variables explicatives) a été effectuée séparément pour chacune des deux groupes de chaufferies, afin de voir s'il se dégageait une logique spatiale différenciée compte tenu des différences de masses de destination. De meilleurs résultats ont été observés pour la chaufferie de Planoise.

Il est difficile d'exploiter les données fournies pour la plateforme de Fertans, qui ne contiennent que 24 flux, ce qui est très insuffisant pour obtenir un résultat significatif. Ce jeu de données ne montre absolument aucune corrélation entre les flux observés, la superficie forestière des communes d'origine et la distance. D'autre part, il est difficile de considérer la masse des chaufferies comme un paramètre du modèle dans la mesure où nous n'avons que deux individus à comparer.

Nous avons accordé une attention particulière au rôle potentiellement joué par l'éloignement des lieux d'origine, la distance étant un paramètre essentiel, et une variable à minimiser dans la mesure du possible. Les diverses analyses effectuées ont cependant révélé que le rapport masse/distance^α n'est à première vue pas explicatif, et ce, quelle que soit la valeur accordée à l'exposant α . En clair, la distance ne semble pas compter dans la répartition actuelle des approvisionnements, hormis pour la plateforme de Fertans (le constat étant plus empirique dans ce cas, en regard du faible nombre de flux).

→ ***Une légère amélioration des résultats après transformation logarithmique des variables et introduction de paramètres de configuration***

Nous nous sommes précédemment interrogés sur le rôle de la configuration des espaces boisés par rapport à l'exploitabilité des ressources, en avançant l'hypothèse que la fragmentation pouvait constituer une contrainte. La fragmentation peut faire référence au type de propriété (publique, privée), autant qu'à la structure même du couvert boisé (morphologie et emprise spatiale). Nous considérons ici la fragmentation sous l'angle morphologique, *via* les indicateurs de configuration évoqués dans la section 2.3.2.3 (nombre de taches forestières, taille et densité des taches etc.). Nous introduisons également plusieurs indicateurs topographiques relatifs à la pente et au dénivelé dans les espaces forestiers communaux (indicateurs simples liés aux contraintes technico-économiques de mobilisation des ressources ligneuses).

Compte tenu de la distribution statistique des variables (distributions fortement asymétriques pour certaines d'entre elles, avec de nombreuses valeurs faibles et quelques grandes valeurs ou au contraire des distributions présentant peu de contraste), il était justifié d'effectuer une transformation logarithmique. Après avoir étudié les matrices de corrélation entre les différentes variables et éliminé tout risque de colinéarité, nous avons effectué une régression avec quatre variables explicatives : la distance, la superficie forestières, le nombre de taches et la pente moyenne des espaces forestiers communaux.

L'équation prend alors la forme suivante :

$$\text{Log}(F_j) = k + \alpha \log(\text{MF}) - \beta \log(\text{distance}) - \sigma \log(\text{nb_taches}) - \delta \log(\text{pente})$$

Avec k , α , β , σ , et δ = coefficients d'ajustement, et MF = superficie forestière communale

Équation 7 : modélisation des flux après transformation logarithmique des variables

En dépit de la transformation logarithmique des variables, le modèle ne montre aucune amélioration pour les flux à destination de Fertans, déjà problématiques auparavant ($R^2 = 0,06$) en raison de leur faible effectif. Malgré tout, les grandes tendances révélées au travers de ces deux séries de tests statistiques dénotent d'un rôle plus important de la distance pour la chaufferie de Fertans, alors que la structure forestière apparaît peu discriminante. Cela peut s'expliquer par la différenciation entre les systèmes de tarification des transports des deux structures, ainsi que par les problèmes de continuum forestiers précédemment évoqués. Ainsi l'entreprise Girard est une petite structure qui possède ses propres camions, alors qu'ONF Energie sous-traite la phase de transport à des entreprises spécialisées, qui optent pour des systèmes de tarification journaliers ou hebdomadaires, dont le coût n'est pas forcément proportionnel à la distance parcourue. À l'inverse, pour Planoise, la masse forestière impacte davantage que la distance, les flux issus des forêts de Chailluz et de Chaux contribuant partiellement à ce phénomène. En raison du faible nombre d'individus et de la faible valeur explicative des variables pour Fertans, nous avons décidé de ne pas pousser davantage les traitements statistiques et de travailler uniquement à partir des données concernant les flux à destination de Planoise, plus nombreux.

La régression multiple log-linéaire ainsi réalisée montre que la distance joue un rôle négatif, tout comme la pente des versants et le nombre de taches forestières, alors que la masse forestière apparaît au contraire comme un paramètre impactant positivement les flux, ce qui est conforme à nos hypothèses de départ. La régression ainsi effectuée améliore les résultats, puisqu'elle explique 28 % de la variance des flux. La figure 92 illustre l'application de ce modèle à l'ensemble des communes franc-comtoises (l'approvisionnement étant d'envergure régionale).

La figure 92 révèle un rôle important des masses forestières localisées à proximité de la chaufferie (forêts bisontines, et de Chaux, mais aussi les massifs situés au sud et au sud-est de la chaîne du Jura, et qui sont aujourd'hui assez peu exploités pour l'alimentation de la chaufferie de Planoise). D'autres secteurs, situés au sud du Jura présentent des valeurs très élevées en dépit de l'éloignement et du relief accidenté. Ces résultats surprenants s'expliquent par l'importance du couvert forestier et de la taille des bans communaux, qui de fait annihilent le frein lié à l'éloignement et à la pente. Quelques communes présentent également des profils similaires en Haute-Saône. Il s'agit là d'une des principales limites du modèle (outre les limites inhérentes au modèle gravitaire, et à sa faible portée explicative). Bien que la

corrélation ait été améliorée, cela reste encore peu satisfaisant, notamment comparativement aux résultats de la modélisation de L. Gazull (2009), pour la ville de Bamako. Une confrontation des données modélisées avec les flux observés peut alors s'avérer utile et apporter quelques éléments de réponse quant au taux d'explication de la variance fourni par le modèle.

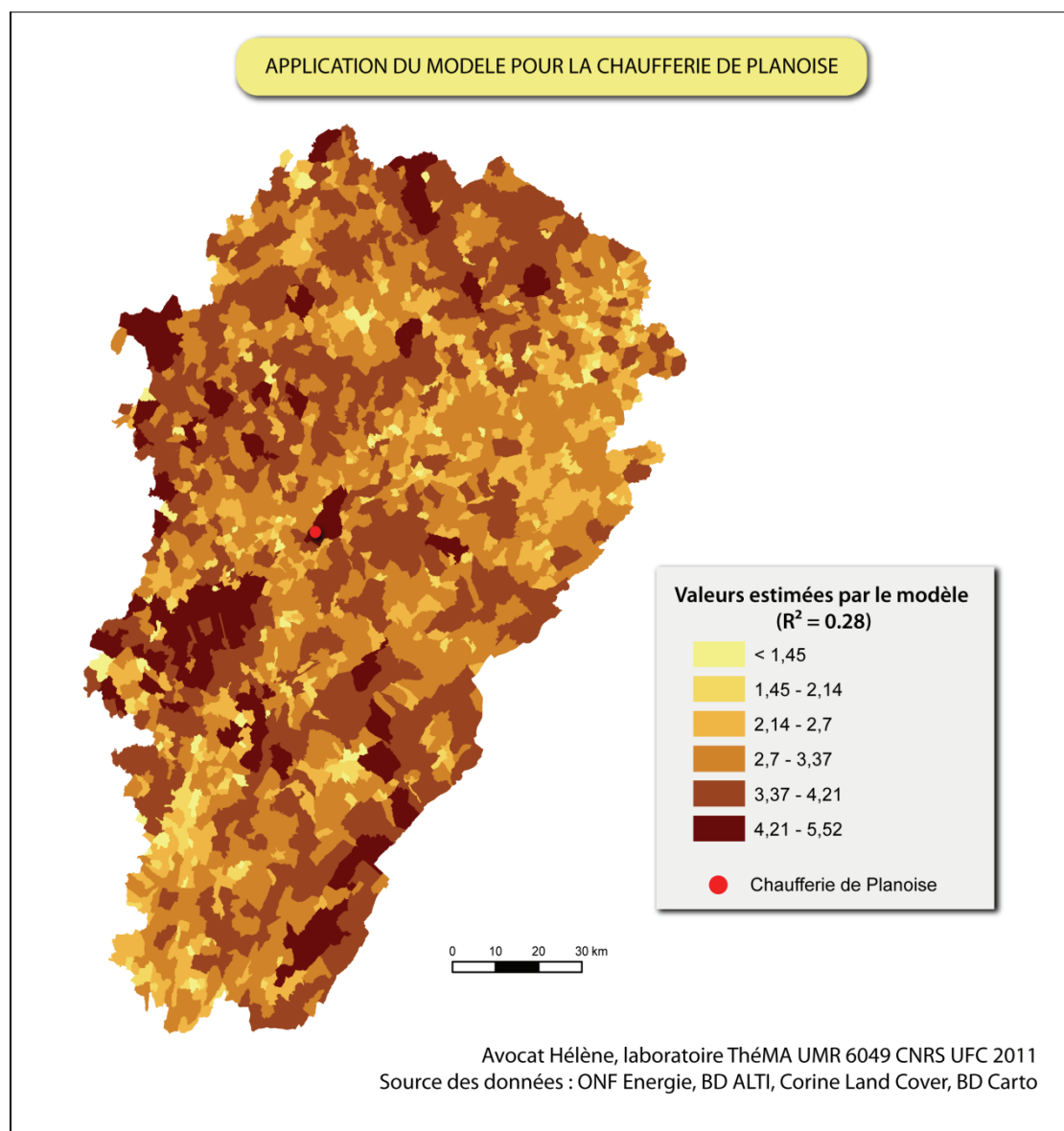


Figure 92 : application du modèle d'interaction spatiale à la chaufferie de Planoise

3.3.3.2. Confrontation avec les flux observés et analyse des résidus

Modéliser, c'est aussi peut-être et surtout confronter les résultats et les hypothèses sous-jacentes à la réalité. Et cette démarche réside dans l'idée que les écarts entre l'approche empirique des données de traçabilité et les prévisions des modèles (résidus), permettent de

mettre en évidence des irrégularités qui ont autant de sens que les régularités. L'étude de ces résidus est très instructive. Elle permet en outre d'améliorer la formalisation et conduit parfois à rejeter une des hypothèses du modèle.

Ici, l'analyse des résidus n'a pas apporté d'éléments de compréhension supplémentaires, et ce, malgré l'introduction d'autres variables explicatives dans le modèle. Les résidus et leur représentation cartographique (figure 93), sont difficilement interprétables. En ce qui concerne les flux à destination de Planoise, on peut observer une forte sous-estimation des flux en provenance des bans communaux intersectant avec le massif de la Serre et la forêt de Chaux. La désagrégation communale des flux explique peut-être partiellement ce phénomène. En revanche, les plus fortes surestimations concernent presque systématiquement les flux caractérisés par les distances les plus importantes (et ce quelle que soit la valeur de ces flux). Compte tenu de ces différents éléments et du peu d'informations à partir desquelles nous avons effectué les statistiques, il est donc difficile d'améliorer le modèle. L'analyse des résidus ne met pas en évidence de structures spatiales vraiment définies qui auraient pu nous permettre d'améliorer un modèle, qui à la base n'expliquait que 20 % de la variance des flux. Le principal enseignement de cette modélisation, outre le fait que davantage de données auraient peut-être pu mettre en évidence une logique gravitaire, et démontrer que la taille des bassins d'approvisionnement est effectivement corrélée à la puissance des chaufferies (ce qui faisait partie de nos objectifs initiaux), est que d'autres paramètres que la masse et la distance expliquent les flux.

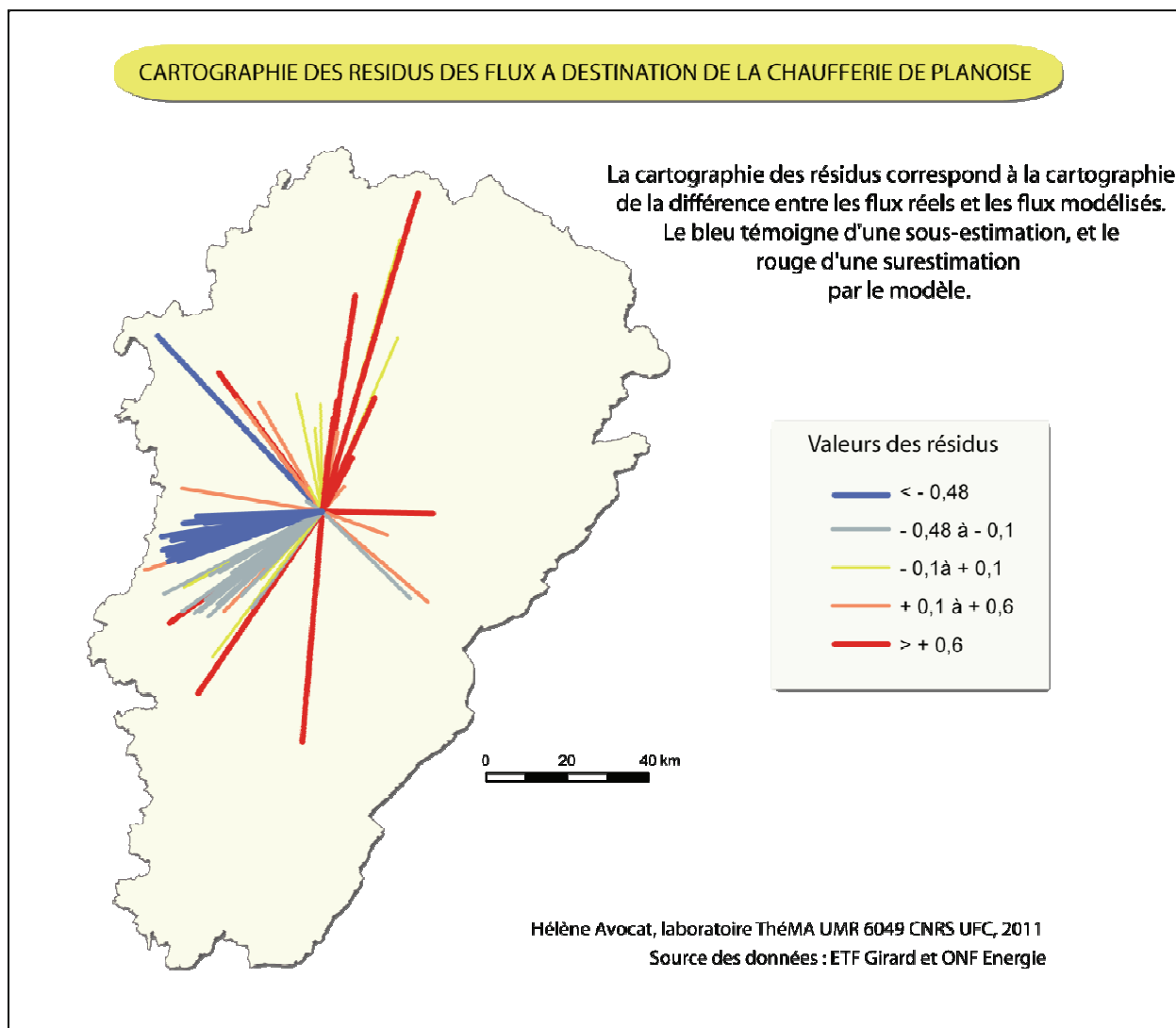


Figure 93 : cartographie des résidus entre les flux réels et les flux modélisés

3.3.3.3. Les approvisionnements, des processus complexes s'expliquant autrement que par la masse et la distance

Bien que la forme globale des deux aires d'approvisionnement de la figure 85 semble mettre en évidence une attractivité liée à l'importance des chaufferies, il nous est impossible de valider cette hypothèse en se basant sur des données aussi limitées et aussi peu représentatives de l'ensemble des chaufferies. Il aurait par exemple été très intéressant de comparer les bassins d'approvisionnement des chaufferies de Planoise (6 MW) et du campus de l'Université de Franche-Comté (5 MW). Cela nous aurait permis d'identifier les principales sources d'approvisionnement et d'analyser les distances parcourues de deux structures similaires en termes de puissance et de consommation de plaquettes forestières.

N'ayant pu mettre en évidence l'attractivité des chaufferies en comparant un échantillon représentatif d'installations, nous avons donc tenté d'expliquer les flux de plaquettes

forestières (portée et intensité) par la configuration de la structure forestière d'origine et par la distance à la chaufferie, en postulant qu'une logique gravitaire pouvait en partie expliquer les phénomènes observés. Malgré de nombreux tests statistiques visant à étudier la corrélation entre les flux, la structure forestière (composition et configuration), et la distance, les résultats obtenus ne sont pas à la hauteur de nos attentes pour les deux structures, même si des phénomènes intéressants méritent d'être soulignés. Notamment un rôle plus important des masses forestières (superficie boisée) pour la chaufferie de Planoise, avec un rôle moindre de la distance, alors qu'*a contrario* cette dernière a davantage d'importance pour la plateforme de Fertans. Cependant rien ne nous autorise à effectuer des conclusions hâtives par rapport à d'éventuelles différences de logiques d'approvisionnement entre des structures de taille différenciées. De multiples raisons peuvent expliquer ici l'invalidation de l'hypothèse d'approvisionnements régis (entre autres) par une logique gravitaire. Selon Poinot (2004), il existe deux moyens d'expliquer la non significativité des coefficients de corrélations : « le lien existe mais il n'y avait pas suffisamment de données pour le mettre en évidence, ou il n'y a tout bonnement pas de lien ».

La seule référence à la fois thématique et méthodologique à laquelle nous puissions nous comparer (bien que cela soit discutable étant donné les différences de contexte) est la thèse de L. Gazull (2009), qui a testé un modèle gravitaire pour expliquer les flux de bois-énergie à destination de la ville de Bamako. Dans le cadre de ses recherches, plus de la moitié de la déviance des flux (54%) est expliquée par les seuls paramètres « stock de bois » (défini par la valeur moyenne NDVI multipliée par la surface du village), « population » (constituant une force de travail, et donc la quantité de production potentielle), et « distance ». En procédant par ajustements statistiques et en considérant d'autres attributs (présence d'un marché rural ou d'un point de contrôle, distance aux axes de communication etc.), le modèle explique 74% de la variance des flux. Les contextes sont cependant totalement différents, et il ne nous a pas été possible d'avoir des informations équivalentes pour mieux comprendre la localisation des chantiers forestiers et donc calibrer le modèle. Les approvisionnements en plaquettes forestières sont des processus complexes, et la réalisation d'une interaction dépend de la conjonction d'un certain nombre de facteurs, dont certains ne sont pas modélisables en raison de leur caractère ponctuel et aléatoire (déboisement lié à la réalisation d'une infrastructure de transport, affinités entre des propriétaires et des exploitants forestiers, problèmes d'ordre organisationnel, économique, politique, etc.).

En somme, bien que nous pensions que les approvisionnements en plaquettes forestières puissent être partiellement régis par une logique de type gravitaire, il ne nous a pas été possible de valider cette hypothèse. À cela plusieurs raisons :

- a) Des données insuffisantes (absolument pas d'exhaustivité), puisque nous avons sur nos terrains d'étude 42 chaufferies fonctionnant seules ou en réseau et que nos données n'en

concernent que 3 sur 22 pour le Pays Loue Lison et que 5 sur 20 pour la CAGB (sachant que la chaufferie de Planoise a un effet très fortement structurant, les autres chaufferies étant de puissance très modeste). Par ailleurs, ces données ne sont pas représentatives de toutes les logiques d'approvisionnement, les gros opérateurs n'ayant pas les mêmes objectifs ni les mêmes moyens que les petites sociétés d'approvisionnement.

- b) Des problèmes relatifs aux lieux d'origine : secteurs géographiques peu comparables (communes et massifs forestiers) ainsi que des ordres de grandeurs de flux eux aussi sans commune mesure. Quelles que soient les options choisies pour s'affranchir des limites communales ou de la contrainte inhérente à un vaste continuum forestier, les solutions n'étaient pas satisfaisantes et présentaient des biais.
- c) Des systèmes de tarification des transports (système forfaitaire journalier ou hebdomadaire), dont le coût n'est pas linéairement indexé sur la distance parcourue, ce qui peut avoir des répercussions sur la volonté de minimiser les distances de transport. On constate cependant, au travers de ces deux exemples, que les distances parcourues par la petite entreprise de travaux forestiers Girard (qui assure le transport avec ses propres véhicules) sont nettement moindres que celles parcourues par la société ONF Énergie, qui sous-traite le transport des plaquettes à des entreprises spécialisées pratiquant les systèmes forfaitaires de tarification précédemment évoqués. Cependant, nous n'avons pas les moyens de prouver que ces différences de distances s'expliquent par la différence des pratiques de transport, ou au contraire par la puissance de la chaufferie (plus la puissance est importante et plus le bassin d'approvisionnement est étendu). D'autre part, d'autres facteurs peuvent intervenir : dimension commerciale, logiques de marché etc.
- d) L'émergence des chaufferies collectives est un phénomène récent, et leur approvisionnement, qui dépend aussi beaucoup des jeux d'acteurs, n'est pas encore bien structuré et dépend en grandes parties de stratégies commerciales, qui, pour l'heure ont davantage d'impact que la configuration de la ressource et la distance parcourue. Ce dernier paramètre jouerait peut-être un rôle plus important si le système de tarification de la demande venait à changer pour être indexé sur les distances parcourues, et si la volonté de valoriser des ressources locales était manifeste pour tous les maîtres d'ouvrage. Peut-être qu'avec plus de données de traçabilité, nous aurions mis en évidence un rôle plus structurant des distances parcourues dans les logiques d'approvisionnement.

Conclusion du chapitre 8

Les processus d'approvisionnement sont complexes et dépendent de nombreux facteurs, spatiaux et aspatiaux. Les facteurs spatiaux susceptibles d'avoir une influence sur les approvisionnements sont la localisation et la configuration des ressources ligneuses (les contraintes de mobilisation relatives aux caractéristiques locales, comme la pente des versants ou le substrat pédologique). Mais les approvisionnements dépendent aussi de stratégies commerciales et relationnelles, de jeux d'acteurs répondant peut-être à une logique économique de minimisation des coûts globaux des combustibles. A cela s'ajoute une dimension aléatoire, liées aux opportunités des chantiers forestiers, dont nous avons peu de visibilité à moyen et long terme, spécialement lorsqu'il s'agit d'opérations de déboisement ponctuelles liées par exemple à l'aménagement d'infrastructures de transport. Ces opportunités sont difficilement modélisables car elles n'entrent pas dans le cadre d'une exploitation forestière planifiée sur le long terme. Or, « il est remarqué que le gisement de forêt gérée (c'est-à-dire disposant de plan d'aménagement ou de plans simples de gestion) est loin d'être celui majoritairement concerné par la production de plaquettes forestières (hormis pour Planoise, qui est approvisionnée par ONF Energie). Une grande partie de la biomasse mobilisée actuellement ne provient pas de forêts en gestion récurrente. En effet, les plaquettes forestières actuellement mobilisées proviennent principalement de forêts non gérées, ainsi que d'opérations ponctuelles de type chantier de défrichage, de nettoyage, infrastructures (lignes TGV, EDT, autoroutes, ...) représentant un pourcentage significatif (30% voire plus) des approvisionnements des fournisseurs. Ces gisements occasionnels sont importants mais opportunistes et variables » (Boittin et al. 2010).

N'ayant pu mettre en évidence que partiellement l'influence de la configuration spatiale et la proximité du couvert forestier pour expliquer les processus d'approvisionnement en fonction de la puissance des chaufferies, nous avons choisi d'aborder le problème sous un autre angle. Connaissant la consommation annuelle de plaquettes forestières des chaufferies en fonctionnement et en projet sur nos deux terrains d'étude, l'objectif est maintenant de définir des aires d'approvisionnement optimisées, tenant compte des contraintes de renouvelabilité des ressources ligneuses (durabilité des approvisionnements), et en maximisant la valorisation des ressources forestières et non forestières locales. Ce faisant, nous apportons des éléments de réponse et de réflexion aux enjeux d'aménagement territorial lié à l'utilisation du bois-énergie (réduction des émissions polluantes liées au transport, lutte contre la fermeture des paysages, création d'une richesse locale à partir d'une ressource peu valorisée, accroissement l'autonomie énergétique etc.). Mais cela ne peut se faire sans une connaissance fine de la biomasse ligneuse (forestière et non forestière), et de sa fraction énergisable. Ces aspects sont traités dans les chapitres 9 et 10.

Chapitre 9

Évaluation de la ressource ligneuse et du potentiel dendroénergétique

Aujourd'hui, les potentiels dendroénergétiques sont mal connus, notamment en raison des limites de connaissance des ressources ligneuses, malgré les éléments fournis par les inventaires. Nous disposons d'un certain nombre d'informations publiques sur les forêts françaises (cartographie des types de peuplement, relevés d'inventaire), mais une partie de ces informations sont lacunaires (forêt privée, arbres hors forêt) ou difficilement exploitables au niveau local.

Ce chapitre présente la démarche que nous avons suivie pour qualifier et quantifier la biomasse aérienne sur nos terrains d'étude, par croisement d'images Landsat, des données d'inventaire de l'IFN et des mesures dendrométriques. Cet état de la biomasse servira d'entrée aux calculs des fractions énergisables locales présentées dans les chapitres suivants.

1. Démarche générale pour l'estimation et la cartographie de la biomasse ligneuse aérienne

Le schéma de la figure 94 résume la démarche suivie pour la cartographie de la biomasse ligneuse aérienne. Le but est d'estimer, en suivant un maillage spatial fin :

- 1) la quantité de biomasse ligneuse aérienne (en tonnes) présente dans chaque maille ;
- 2) les grandes catégories de peuplement concernées (futaie de feuillus, de résineux, futaies mixtes, taillis, arbres isolés) ;

3) ceci en couvrant l'ensemble de nos terrains d'étude et leur proche périphérie.

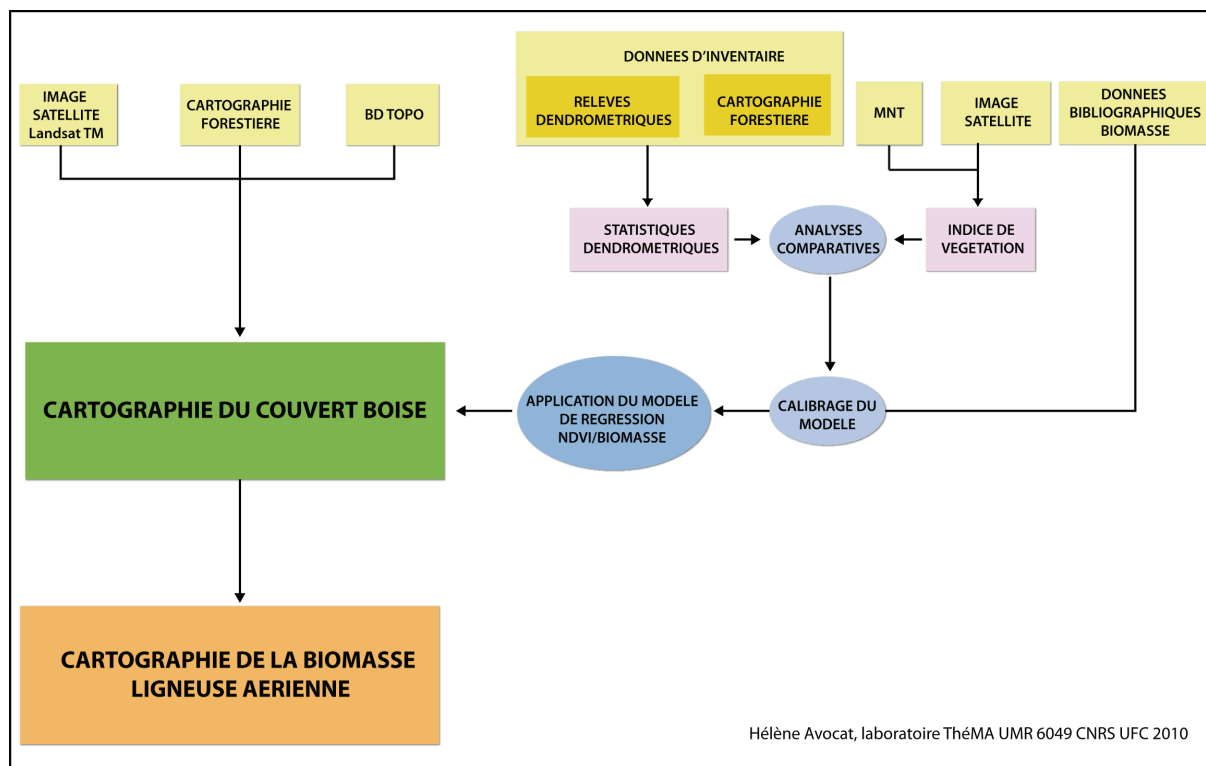


Figure 94 : Méthode d'estimation et de cartographie de la biomasse ligneuse

Ces éléments constitueront l'information sur la ressource nécessaire en entrée des étapes suivantes, le potentiel dendroénergétique étant une fraction de la biomasse ligneuse aérienne exploitable et variant selon les types de peuplement. Le choix d'un maillage fin (30 mètres) est motivé par deux raisons :

- d'une part, nous souhaitons étudier la ressource potentielle offerte par les arbres hors forêt, caractérisés par de faibles emprises au sol ;
- d'autre part, nous souhaitons déterminer des bassins d'approvisionnement à l'échelle locale, minimisant les distances de transport.

Par commodité, le pas de ce maillage sera directement repris de la résolution des images Landsat TM (ici 30 mètres), qui permet de satisfaire, au moins de façon grossière, nos contraintes de précision (reconnaissance d'arbres isolés). Nous travaillerons donc avec un modèle matriciel ou cellulaire à maille carrée (raster par simplification).

Enfin, les surfaces d'approvisionnement ne devant pas être a priori limitées à des entités territoriales ou administratives, nous avons retenu un espace de travail englobant de façon assez large les périmètres de la CAGB et du Pays Loue-Lison. Pratiquement, il s'agira d'une fenêtre rectangulaire de 56 km du nord au sud et de 50 km d'est en ouest.

La cartographie de la biomasse ligneuse aérienne est obtenue par croisement de la cartographie des couverts boisés (emprise des grands types de peuplement) et d'un indice de végétation (NDVI) couplé à un modèle de régression permettant d'estimer la biomasse ligneuse aérienne. On trouve donc trois blocs en entrée du modèle (cf. figure 94).

- Pour la détermination des couverts boisés, nous faisons appel à la cartographie forestière (c'est-à-dire la cartographie des types forestiers départementaux proposée par l'IFN), à la couche "végétation" de la BD Topo de l'IGN qui relève les éléments boisés de plus petite taille, et à l'imagerie satellitaire (Landsat TM) pour détecter les arbres isolés et bosquets non couverts par la BD Topo, et pour qualifier (par classification), les types forestiers des arbres ou espaces boisés non couverts par l'IFN.
- L'indice de végétation est dérivé des canaux rouge (TM3) et proche infra-rouge (TM4) de l'image Landsat TM. Il est corrigé, dans la mesure du possible, des contrastes d'exposition dus à la combinaison du relief et de la direction des rayons solaires (azimut et incidence) au moment de l'acquisition de l'image par le capteur TM. Cette correction fait appel à un modèle numérique de terrain (ici la BD Alti de l'IGN).
- Le modèle de régression permettant d'estimer la biomasse ligneuse aérienne à partir des valeurs de NDVI utilise des éléments d'inventaire de l'IFN, des relevés dendrométriques localisés et gracieusement mis à disposition par des chercheurs du laboratoire de Chrono-Environnement, et fait appel à des valeurs typiques de biomasse suivant les peuplements puisées dans la bibliographie.

Cette vue d'ensemble de la démarche étant présentée, abordons maintenant la mise en œuvre de chaque étape :

- traitement de l'image satellitaire pour la classification des peuplements et le calcul du NDVI ;
- présentation des sources d'information localisées sur la biomasse ;
- corrélation entre NDVI et biomasse ;
- mise en place de modèles d'estimation de biomasse suivant les peuplements, et résultat final.

2. Les traitements de l'imagerie satellitaire et leurs résultats

Les traitements de l'image Landsat TM ont une double finalité.

- a) Cartographier de manière exhaustive le couvert boisé en distinguant les trois catégories de peuplements (feuillus, résineux et mixtes), *via* une classification que l'on compare avec d'autres sources d'informations (BD Topo, orthophotos, cartographie forestière). Cette cartographie nous servira de support pour l'application du modèle d'estimation de biomasse ligneuse.
- b) Calculer l'indice de végétation, révélateur de l'activité chlorophyllienne et indirectement de la biomasse.

2.1. La cartographie du couvert boisé

Les données concernant la cartographie de l'emprise des espaces boisés sont lacunaires, tant au niveau de l'exhaustivité spatiale pour la cartographie de l'IFN disponible en ligne⁸⁴, qu'au niveau des ressources de la BD Topo (qui ne fournit pas d'informations sur la distinction entre feuillus et résineux⁸⁵). L'objectif est de constituer une information exhaustive sur l'emprise des couverts de feuillus et de résineux. L'ensemble de la procédure est présentée dans la figure 95.

⁸⁴ La cartographie en ligne de l'IFN ne donne des informations que pour les espaces supérieurs à 2,25 ha si l'échelle des cartes est au 1/25000 et 4 ha si l'échelle de base est 1/50000.

⁸⁵ Seul le vocable "végétation arborée" est pour l'heure utilisé. Un travail en collaboration avec l'IFN devrait mettre en évidence 12 types différenciés dans les prochaines années.

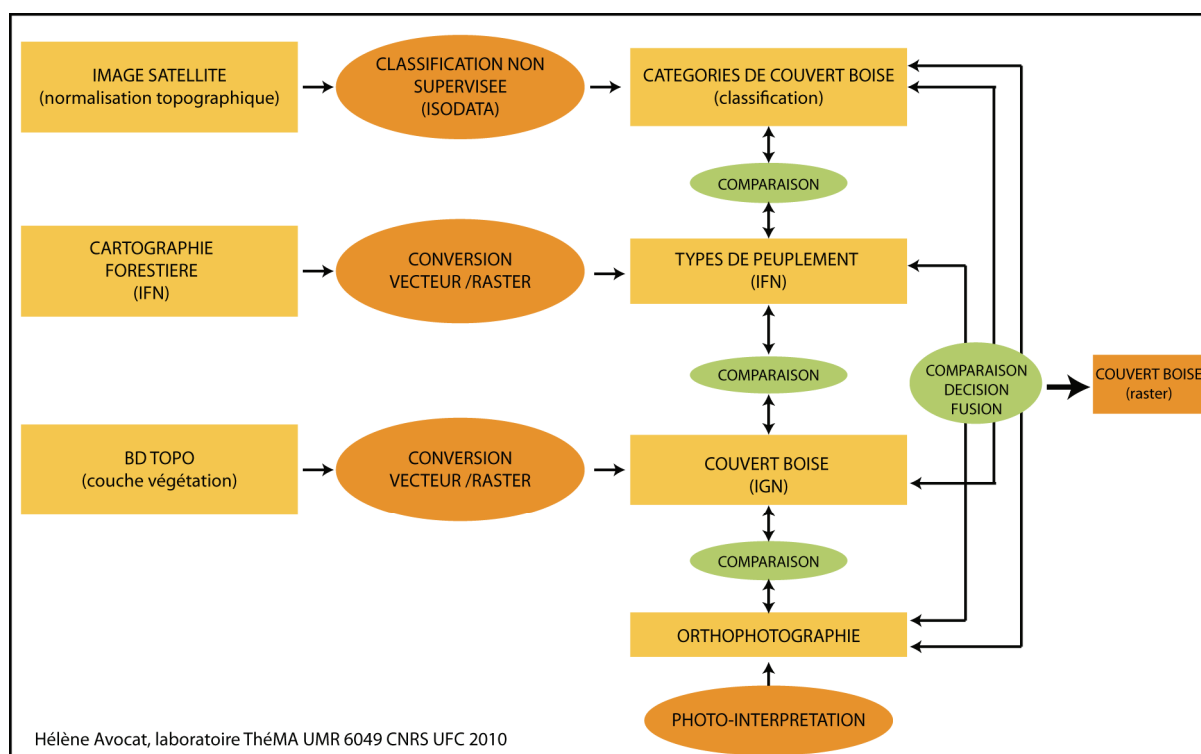


Figure 95 : données et méthodes pour la cartographie du couvert boisé

2.1.1. Choix de l'image et prétraitement

Nous avons choisi d'utiliser une image Landsat 7 TM, dont la résolution spatiale de 30 mètres satisfait nos besoins, et dont la résolution spectrale est largement éprouvée pour le type de classification envisagée et le calcul du NDVI. Plus précisément, ce choix s'est porté sur une scène acquise le 02 septembre 1999.

- L'année 1999 est proche de l'année des relevés réalisés par l'IFN (1994). Mais c'est également l'année de la tempête. Cette dernière a eu lieu en décembre, après que notre cliché ait été pris. Les dégâts n'y sont pas visibles. Cependant les dommages liés à la tempête sont nettement moindres dans notre secteur d'étude que dans le Nord de la Haute-Saône, et l'Ouest du Jura (zones les plus sinistrées).
- Le créneau saisonnier est favorable à une bonne discrimination des différents états d'occupation du sol (les principales cultures sont récoltées, à l'exception du maïs, les prairies fauchées ou largement pâturées et se confondent peu avec les forêts feuillues, laissant un fort contraste avec les arbres isolés, tandis que les pousses annuelles des résineux ont perdu leur aspect tendre, prévenant ainsi les confusions entre feuillus et résineux toujours possibles sur les images printanières. Le NDVI ciblant l'activité chlorophyllienne, il n'était pas envisageable d'utiliser une image d'hiver.

- Enfin l'incidence solaire n'est pas trop basse, ce qui limite l'ampleur des ombres portées.

Cette scène, répertoriée en position Path 196 Row 027 dans le système de référence mondial Landsat TM, acquise auprès de l'USGS par le laboratoire Théma dans le cadre de recherches précédentes, avait fait l'objet de corrections géométriques assurant sa correspondance avec la projection Lambert conique conforme française (zone centrale étendue, familièrement appelée Lambert 2 étendu).

Suite à une première tentative de classification peu fructueuse pour cause de fortes confusions dans les zones les plus accidentées par le relief, nous avons tenté de minorer les effets d'ombre (versants nord-ouest, opposés au soleil du matin, et de surexposition (versants sud-est, baignés par le soleil du matin) par une normalisation topographique, à l'aide du logiciel ERDAS. Le principe général de cette opération (Leica, 2002) est de majorer les valeurs radiométriques enregistrées dans les zones ombrées, et réciproquement de minorer les valeurs enregistrées dans les zones surexposées. Ceci implique donc l'utilisation d'un MNT pour caractériser les pentes et leurs orientations, ainsi que l'utilisation de métadonnées initiales de l'image satellitaire : l'azimut et l'incidence solaire au moment de l'acquisition. Le résultat fournit une image où les versants se présentent de façon plus équilibrée, mais sans résoudre pour autant tous les contrastes d'éclairage, et avec des valeurs déconcertantes dans les zones initialement ombrées les plus pentues (en raison de la grande faiblesse du signal enregistré de façon initiale, très difficile à corriger). La figure 96 montre l'effet de cette normalisation, en laissant clairement apparaître les problèmes rencontrés sur les versants orientés au nord-ouest des canyons de la Loue et du Lison. Cette normalisation ne résout pas tous les problèmes d'illumination (et les empire localement !), mais a pourtant permis une nette amélioration de la classification, présentée maintenant.

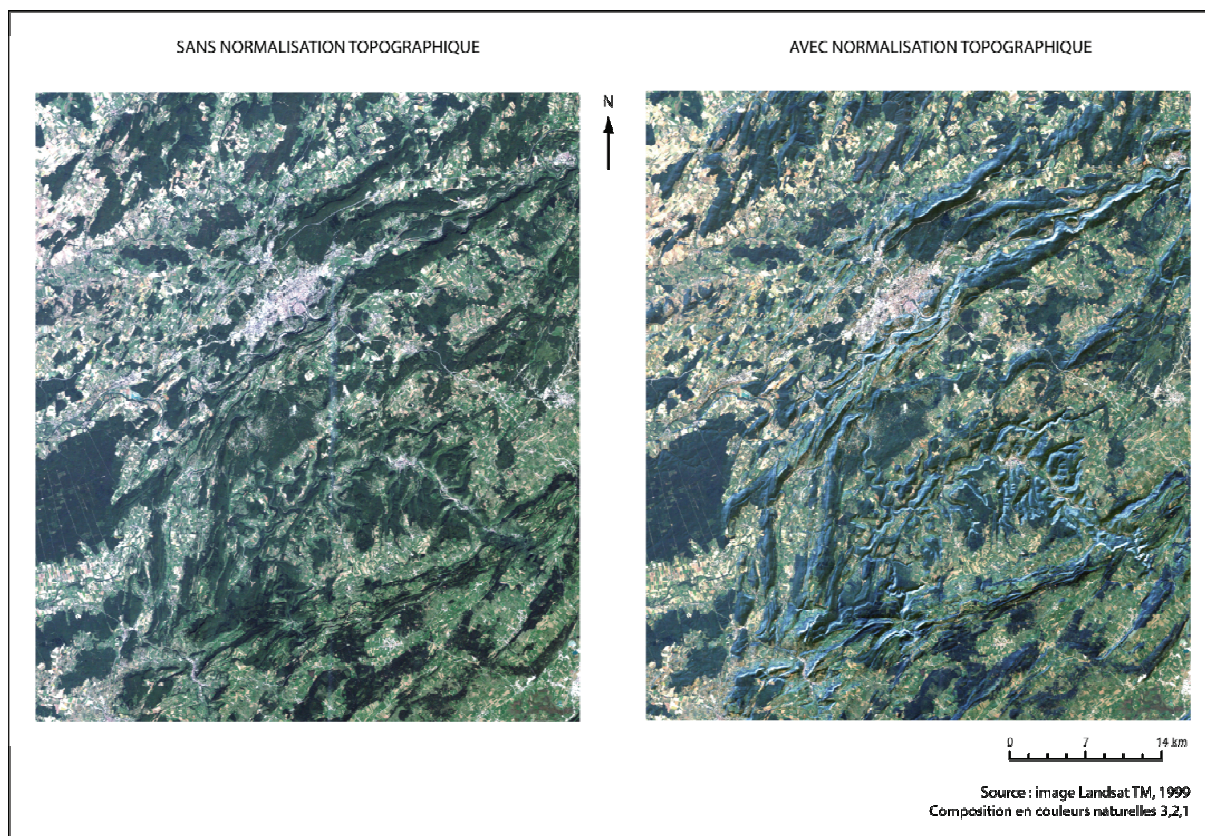


Figure 96 : image Landsat TM avec et sans normalisation topographique

2.1.2. Première cartographie de la couverture du sol par classification non supervisée

La classification nous permet de cartographier les principaux types de peuplements boisés, forestiers et non forestiers.

La procédure de traitement par classification non supervisée

Parmi les travaux relatifs à l'étude de l'occupation du sol par télédétection, on peut distinguer trois ensembles de méthodes de détection (Andrieux et Mering, 2008) :

- La première méthode, dite de classification dirigée (ou supervisée) se base sur le principe de la reconnaissance des catégories d'objets suivant leurs valeurs numériques, dans une ou plusieurs bandes spectrales. Cette méthode implique l'utilisation de zones témoins issue d'une étude exploratoire, localisées précisément et auxquelles on peut se référer avec certitude. Ne disposant pas de ce genre de données (l'IFN ne couvrant pas les petits espaces boisés), nous n'avons pas pu utiliser cette méthode.

- La deuxième méthode " consiste à effectuer une classification non dirigée en autant de pixels que l'on a défini a priori d'états de surface. Cependant, cette méthode est inappropriée lorsqu'on se réfère à une nomenclature qui n'est pas définie en fonction des signatures spectrales des états de surface mais en fonction de classes thématiques d'occupation du sol dont les signatures spectrales ne sont pas toujours suffisamment homogènes intrinsèquement ni contrastées d'une classe à l'autre pour pouvoir être reconnues automatiquement" (Andrieux et Mering, 2008). C'est la raison pour laquelle nous n'avons pas retenu non plus cette méthode et avons opté pour une procédure de classification non supervisée.
- La classification non supervisée consiste à regrouper les pixels sur la base de signatures spectrales similaires, en un nombre de classes suffisamment important pour procéder à l'élaboration de la catégorisation finale par regroupement de ces classes. Nous avons opté pour cette méthode en raison de sa rapidité d'exécution et sa relative souplesse, qui s'avère utile dans le cas où l'on ne dispose pas d'une banque de données de terrain. Néanmoins, dans la mesure où cette classification ne se base que sur les signatures spectrales qui ne correspondent pas toujours à des catégories naturelles d'occupation du sol, les résultats obtenus peuvent parfois prêter à confusion. Ainsi, selon la pente et l'exposition, des pixels de feuillus peuvent avoir la même "signature" radiométrique que certaines prairies.

Les premiers résultats

La première étape de notre démarche consiste à faire émerger par la méthode des ISODATA⁸⁶ une trentaine de classes de pixels aux signatures spectrales similaires. Parmi les clusters ressortant de cette première étape de classification (cf. figure 97), certains peuvent d'ores et déjà être regroupés pour former des grandes catégories d'occupation du sol (prairies, cultures, bâti et routes = sols artificialisés, feuillus, résineux). Cependant, parmi les secteurs forestiers que l'on cherche à cartographier, certains sont faiblement contrastés entre eux (c'est par exemple le cas des feuillus sur ou sous-exposés et de certaines prairies). Or, sachant que « les classifications multispectrales sur une image totale opèrent à partir de contrastes radiométriques entre les pixels ; il est peu vraisemblable qu'une seule étape de classification permette de séparer en plusieurs classes des états de surface radiométriquement proches » (Andrieux et Mering, 2008). Dans la figure 97, nous voyons ainsi très nettement que le tracé des cours d'eau (Doubs, Loue, Ognon) a la même signature radiométrique que certaines formations boisées (les classes hors forêt sont laissées en blanc).

⁸⁶ Dans ERDAS, l'algorithme des ISODATA est utilisé pour améliorer les performances d'une classification non supervisée, en se basant sur la minimisation de la distance spectrale pour la formation des clusters (classes de valeurs spectrales semblables).

Ainsi, la classification non supervisée invite à donner une signification aux classes après leur établissement (contrairement aux classifications supervisées). Ces significations ont été établies, pour chaque classe, par interprétation des compositions colorées et comparaison avec la cartographie IFN. Si certaines classes ne prêtent pas à confusion (cf. exemple des classes 5 à 7 dans la figure 97) et peuvent éventuellement faire l'objet de regroupement, d'autres sont beaucoup moins discriminantes. Dans ce dernier cas, la classification doit être suivie de traitements complémentaires (cf. figure 98), par exemple en croisant les résultats obtenus avec d'autres sources d'information qui permettent de lever les confusions.

A l'issue de la première classification, un regroupement des classes au contenu similaire permet d'obtenir six grandes catégories :

- feuillus
- vieux résineux (dont eau),
- peuplements présentant une ambiguïté par rapport à l'étagement forestier,
- friches, tourbières, forêts humides
- résineux mixtes + feuillus
- autres (bâti, sols nus, routes, cultures, prairies etc).

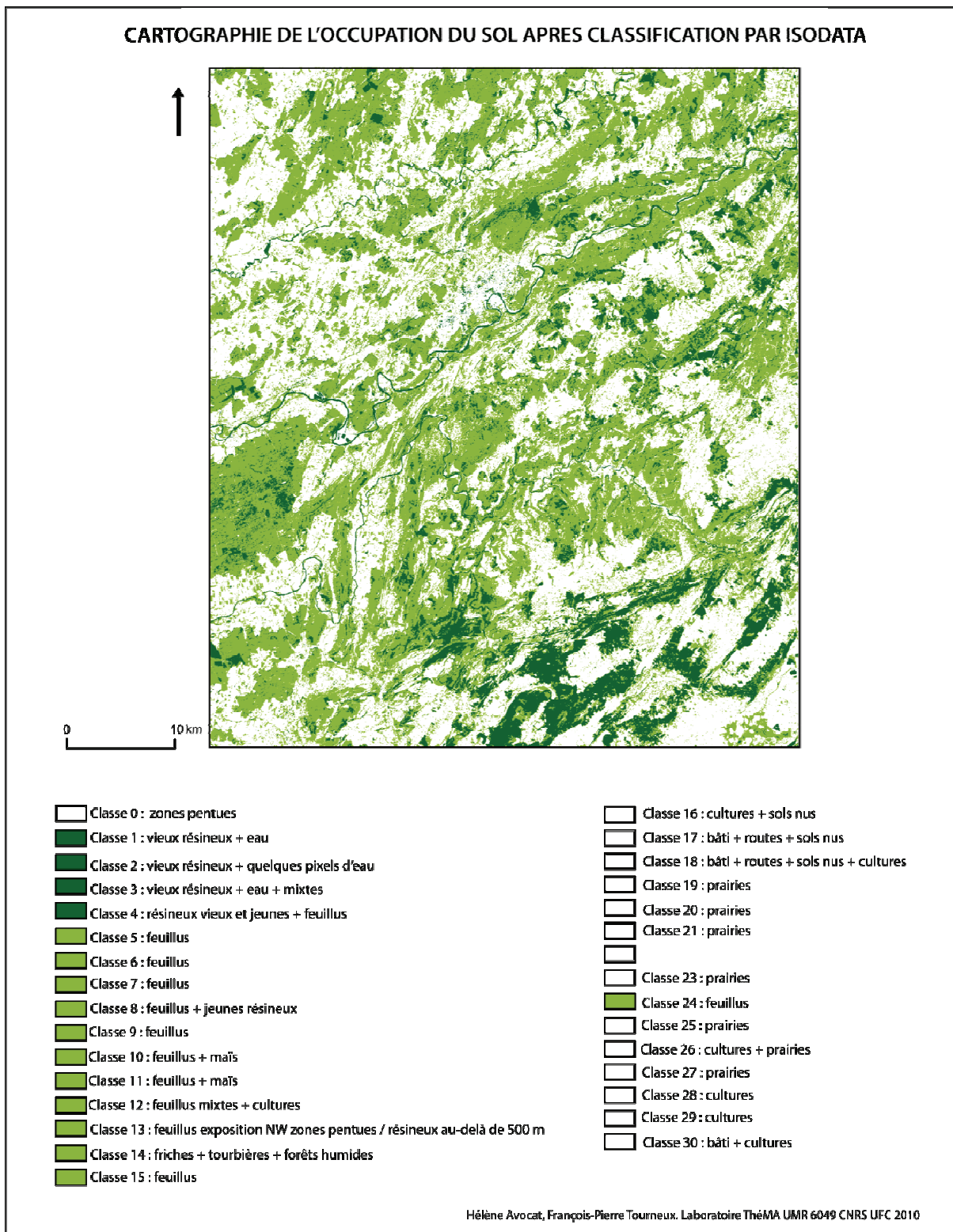


Figure 97 : premier résultat de cartographie du couvert forestier

Si la première et la dernière catégorie ne posent pas de problème, les autres nécessitent des traitements complémentaires (cf. figure 98).

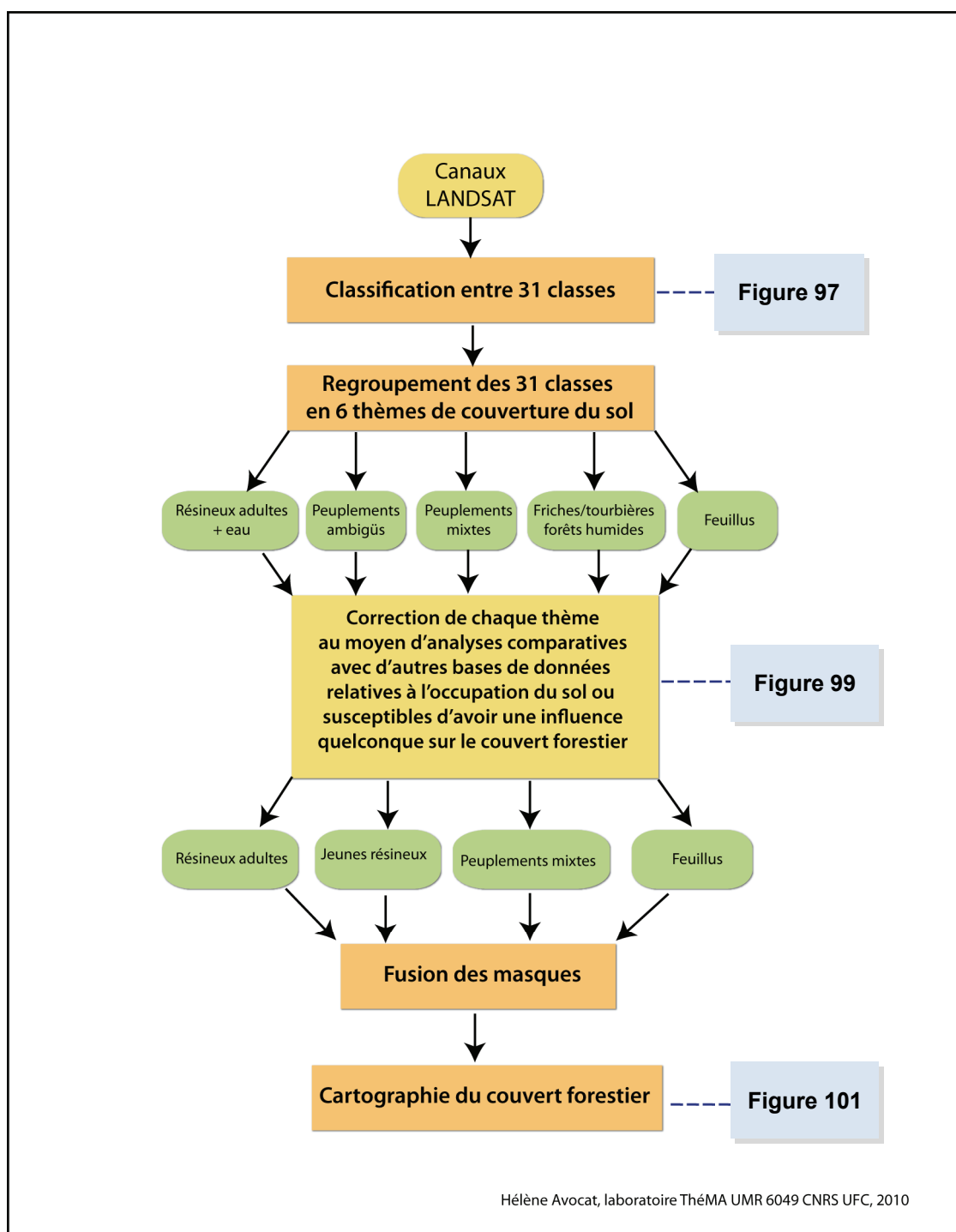


Figure 98 : méthodologie de cartographie du couvert forestier

2.1.3. Traitements complémentaires et résultats

Pour chaque catégorie confuse, nous avons effectué une vérification préalable *via* des orthophotos. Ensuite nous avons mobilisé plusieurs types d'informations en fonction des modifications à apporter (cf. figure 99).

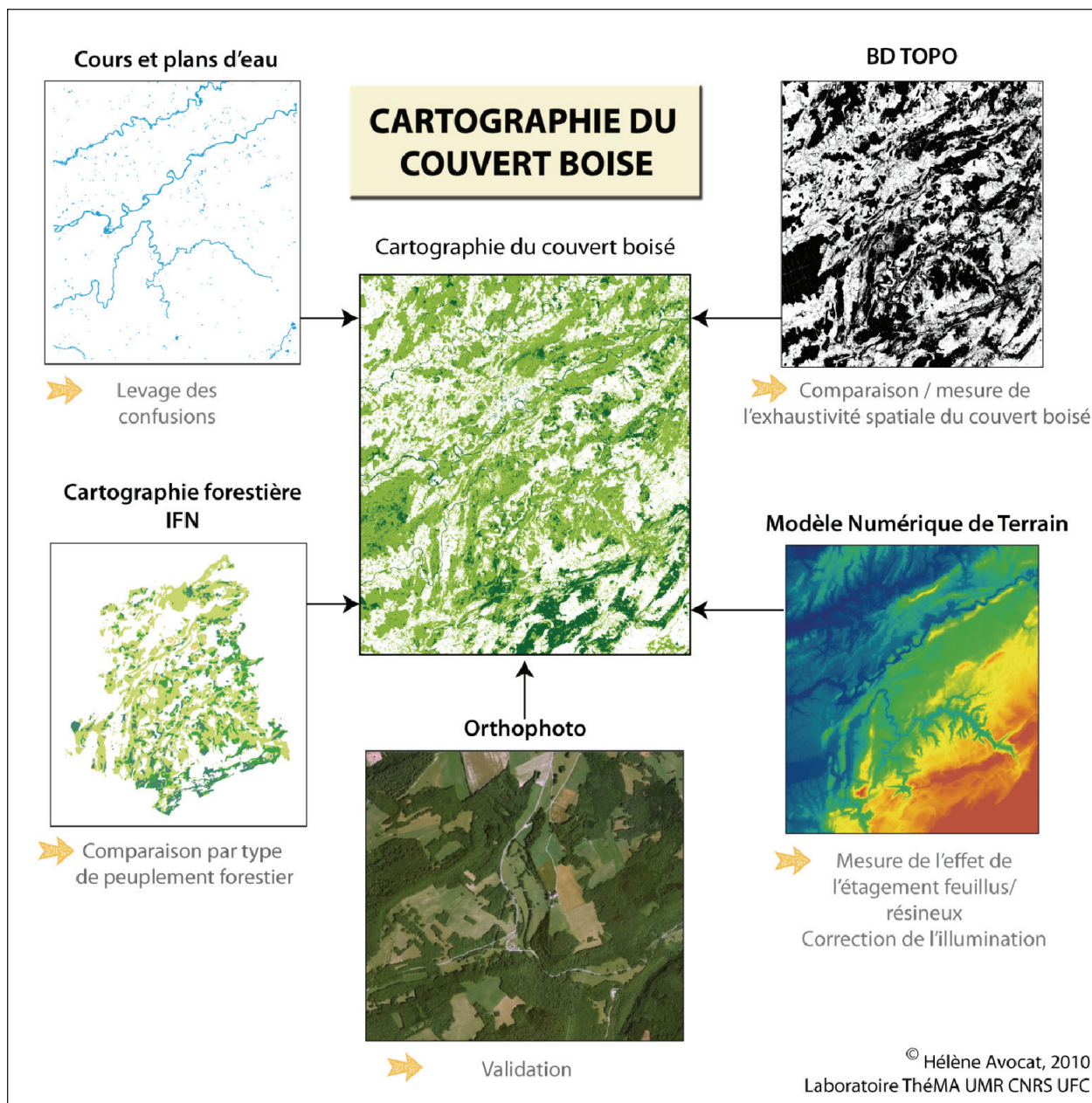


Figure 99 : Données mobilisées pour lever les confusions de la cartographie du couvert forestier par classification

a) Après contrôle par photo-interprétation, nous ne sommes pas intervenus sur les pixels représentant les peuplements feuillus, résineux adultes et mixtes concordant avec la couche végétation de la BD TOPO (qui cartographie de manière exhaustive le couvert boisé, y compris les haies, arbres isolés et bosquets, mais toutefois sans distinction feuillus/résineux).

b) En vue d'écarter les champs de maïs ou les cultures ayant la même signature radiométrique que certaines essences feuillues, nous avons mobilisé la couche « végétation » de la BD TOPO. Nous avons identifié les pixels concordant spatialement avec le couvert boisé, et supprimé les autres de la cartographie.

c) La procédure a été similaire pour les zones de friches, de tourbières et de forêts humides, comprenant quelques zones bâties. Nous avons utilisé la couche végétation de la BD Topo, ce qui nous a permis d'éliminer les pixels de friches, de tourbières et de bâti. Pour ce qui est des forêts humides, le problème n'a pas pu être résolu de cette manière, et nous avons assimilé ces pixels à des feuillus, après vérification sur les orthophotos. Ce type de formation, minoritaire à l'échelle de notre terrain d'étude nous posera néanmoins problème lors de l'utilisation de l'indice de végétation, en raison de la moindre réflectance due à l'humidité.

d) Pour les résineux adultes dont la signature était analogue à celle des cours d'eau, nous avons utilisé la couche « eau » de la BD Topo pour éliminer les pixels problématiques de l'image classifiée.

e) Pour les pixels mixtes, couverts en partie de végétation, et présentant de fait une incertitude, nous avons eu recours à la BD Topo pour identifier les pixels effectivement boisés. De même, nous avons assimilé à des feuillus les rares pixels mixtes qui n'avaient pas été considérés comme relevant de la végétation lors de la première classification.

À ce stade, l'image classifiée obtenue présente plus de 97 % de concordance avec la cartographie forestière de l'IFN⁸⁷ pour les classes « résineux », « feuillus » et « mixtes » (figure 100). Pour les arbres hors forêts, haies et bosquets, seules des comparaisons avec les orthophotos nous permettent de vérifier la qualité de notre classification. Néanmoins, compte tenu de la nature des orthophotos, des logiciels dont nous disposons et du temps qui nous est imparti, il nous est impossible d'automatiser la procédure afin de chiffrer précisément la concordance entre notre image classifiée et les orthophotos.

A l'échelle de nos terrains d'étude, l'image classifiée compte 7751 hectares d'espaces boisés en plus par rapport à la cartographie forestière de l'IFN (55000 hectares). La figure 100 présente ces résultats, mettant en évidence de nombreux bosquets et arbres isolés. La majorité (presque 80%) des peuplements sont feuillus. La proportion de résineux est un peu plus importante dans le Pays Loue-Lison du fait de l'étagement forestier. Ces résineux sont essentiellement localisés dans l'extrême sud du Pays, et les peuplements mixtes représentent environ 13 % de la superficie boisée.

⁸⁷ Pour les espaces cartographiés, supérieurs à 2,25 ou 4 ha suivant l'échelle considérée.

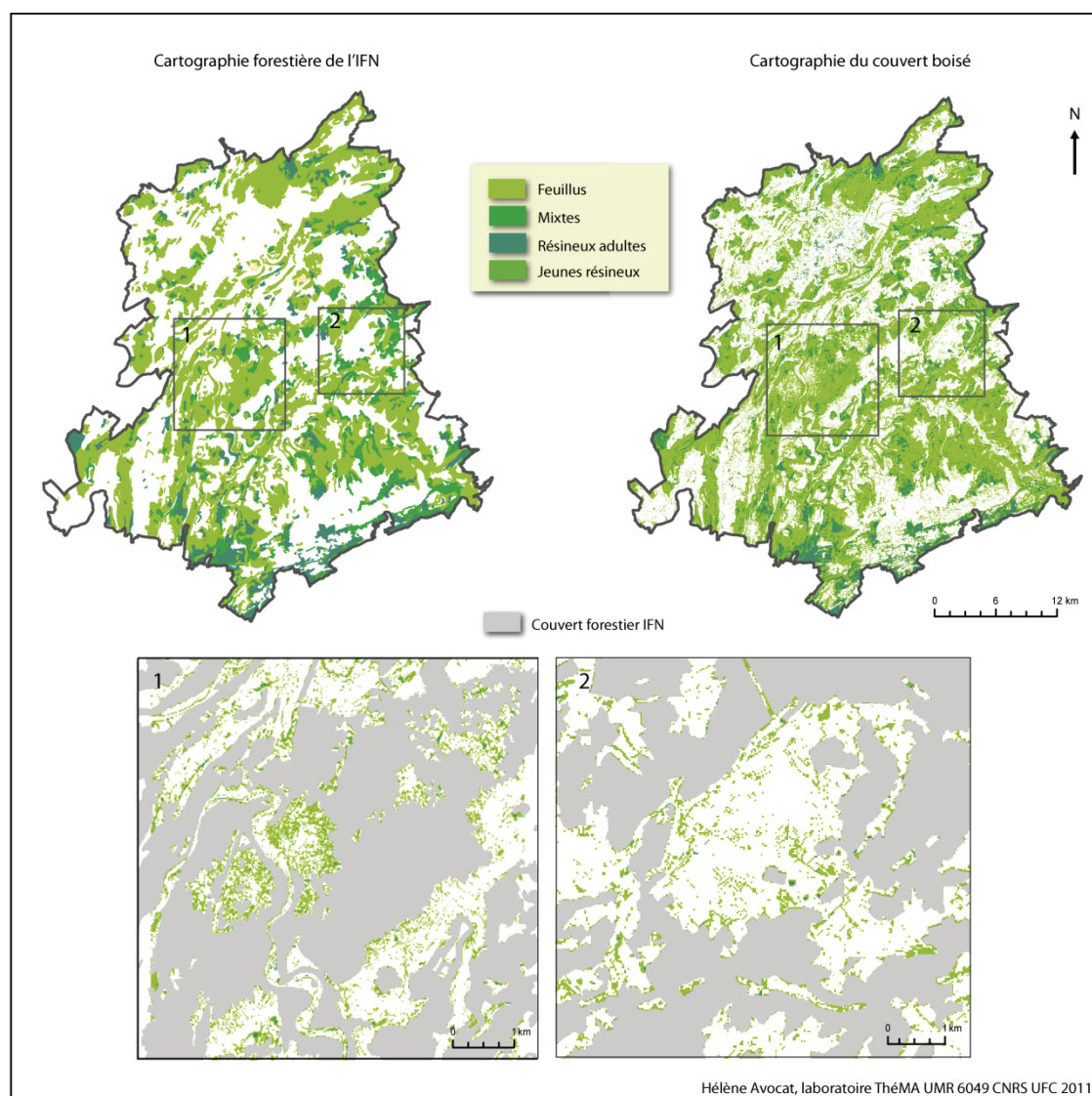


Figure 100 : cartographie forestière versus cartographie du couvert boisé

e) Enfin, en vue de parfaire la cartographie des quatre types de formations arborées sur lesquelles nous calibrerons notre modèle de biomasse, il nous faut distinguer les jeunes résineux des résineux adultes. Les jeunes résineux sont très peu présents sur notre territoire et se confondent radiométriquement avec certains feuillus. Afin de les identifier, on a utilisé la cartographie forestière de l'IFN. À ce stade, on obtient donc une cartographie du couvert boisé avec les classes suivantes (figure 101):

- 0 = pas de couvert boisé
- 1 = résineux adultes
- 2 = peuplements mixtes
- 3 = feuillus
- 4 = jeunes résineux

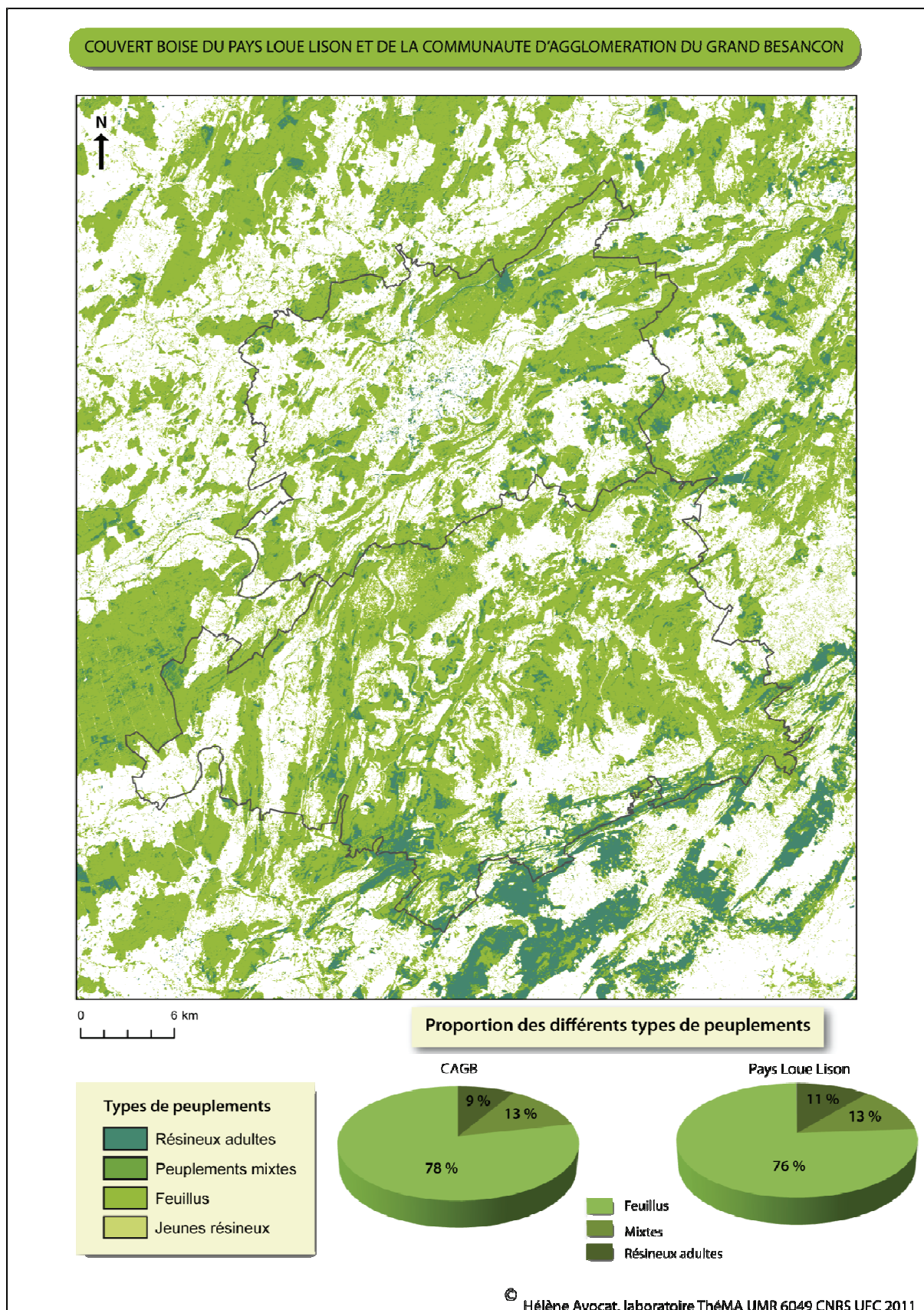


Figure 101 : cartographie du couvert boisé dans le Pays Loue Lison et la CAGB

2.2. L'indice de végétation normalisé : cartographie et intervalles de valeurs

Basés sur le caractère multispectral des données satellitaires, les indices de végétation permettent d'estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme la surface foliaire, l'activité photosynthétique, ou encore la biomasse (source : UVED⁸⁸). Ce dernier paramètre nous intéresse particulièrement, puisque c'est à partir de l'estimation de la biomasse ligneuse que nous déterminerons des quantités de biomasse énergisables. Localement, certaines maladies peuvent avoir une incidence sur la valeur l'indice de végétation en affectant l'activité photosynthétique. Pour les arbres concernés, heureusement fort peu nombreux, la valeur de l'indice de végétation est minorée alors que la biomasse brune peut être importante.

Pour des raisons évoquées dans le chapitre 5, nous avons opté pour l'utilisation d'un indice de végétation normalisé (NDVI) ou indice de Tucker, obtenu en faisant la différence normalisée des valeurs des bandes Rouge et Proche Infrarouge : $NDVI = (PIR-R) / (PIR+R)$ (Rouse et al., 1994). La normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire les effets d'éclairement. L'indice conserve ainsi une valeur constante quelque soit l'éclairement global, contrairement à la simple différence qui est très sensible aux variations d'éclairement (UVED). À la différence de la procédure de classification précédemment évoquée, qui nécessitait une normalisation topographique en vue de simplifier l'ensemble de la procédure, le NDVI a été calculé à partir d'une image Landsat TM sans correction radiométrique. La figure 102 présente le résultat de cet indice sur notre fenêtre d'étude, autour de la CAGB et du Pays Loue-Lison. Il s'agit du résultat initial, sans distinction de type d'occupation du sol.

⁸⁸ Université Virtuelle Environnement et Développement durable.

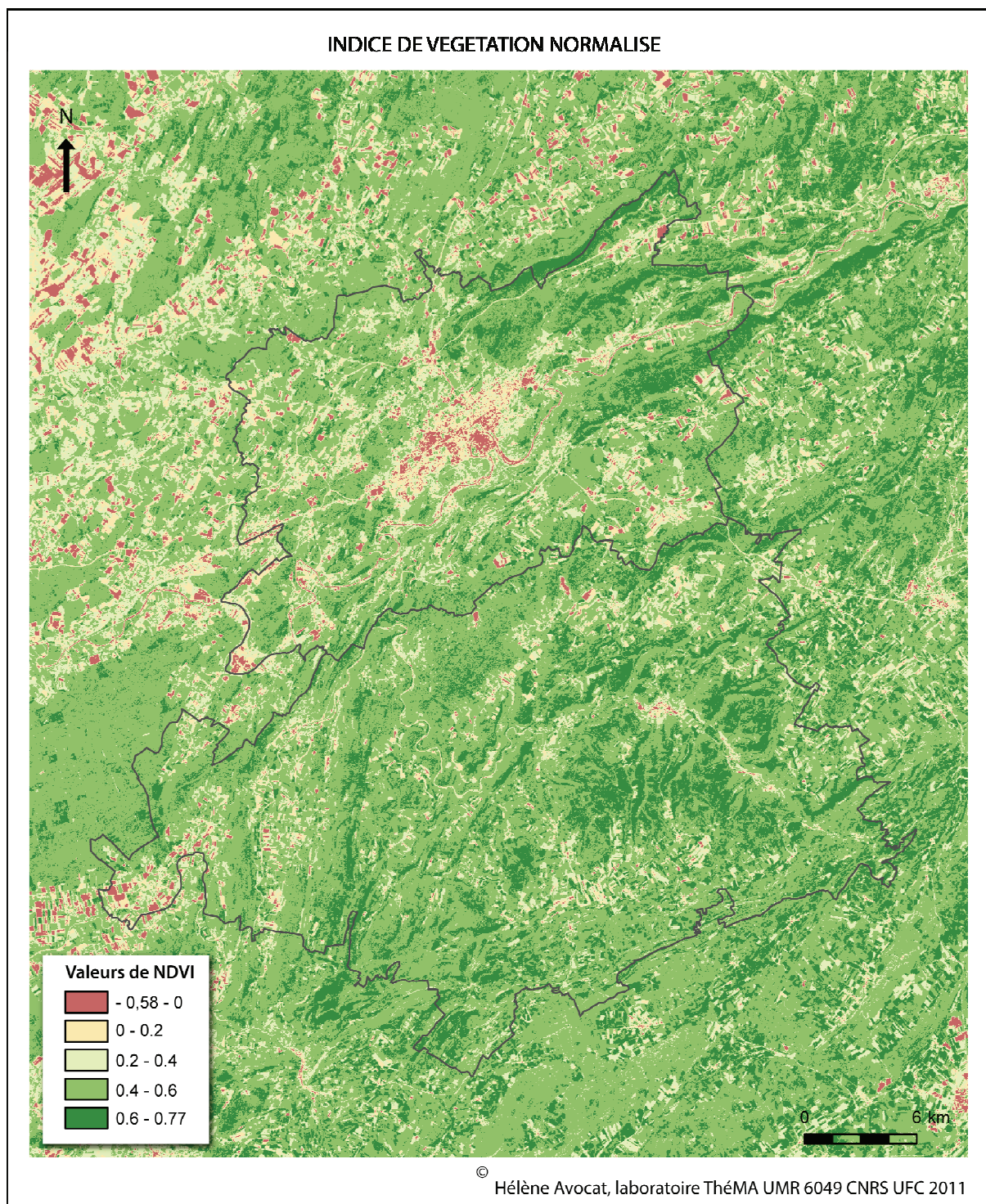


Figure 102 : cartographie du NDVI

Les valeurs sont toujours comprises entre -1 et +1. Dans le cas présent, l'intervalle des valeurs s'étend de - 0,58 à + 0,77. Les valeurs négatives correspondent aux surfaces autres que les couverts végétaux, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Les formations boisées ont des valeurs de NDVI généralement positives, la plupart du temps comprises entre + 0,1 et + 0,7 (les valeurs les plus élevées correspondant aux

couverts les plus denses). Les valeurs de NDVI pour les espaces identifiés comme boisés dans notre cartographie forestière (figure 103), montrent des valeurs comprises entre - 0,41 et + 0,769. Les faibles valeurs concernent souvent les lisières de forêt, ou les arbres isolés (pixels mixtes) et peuvent s'expliquer par l'influence de la réflectance des sols du fait de la diminution de l'emprise surfacique du couvert végétal (pixels "mixtes").

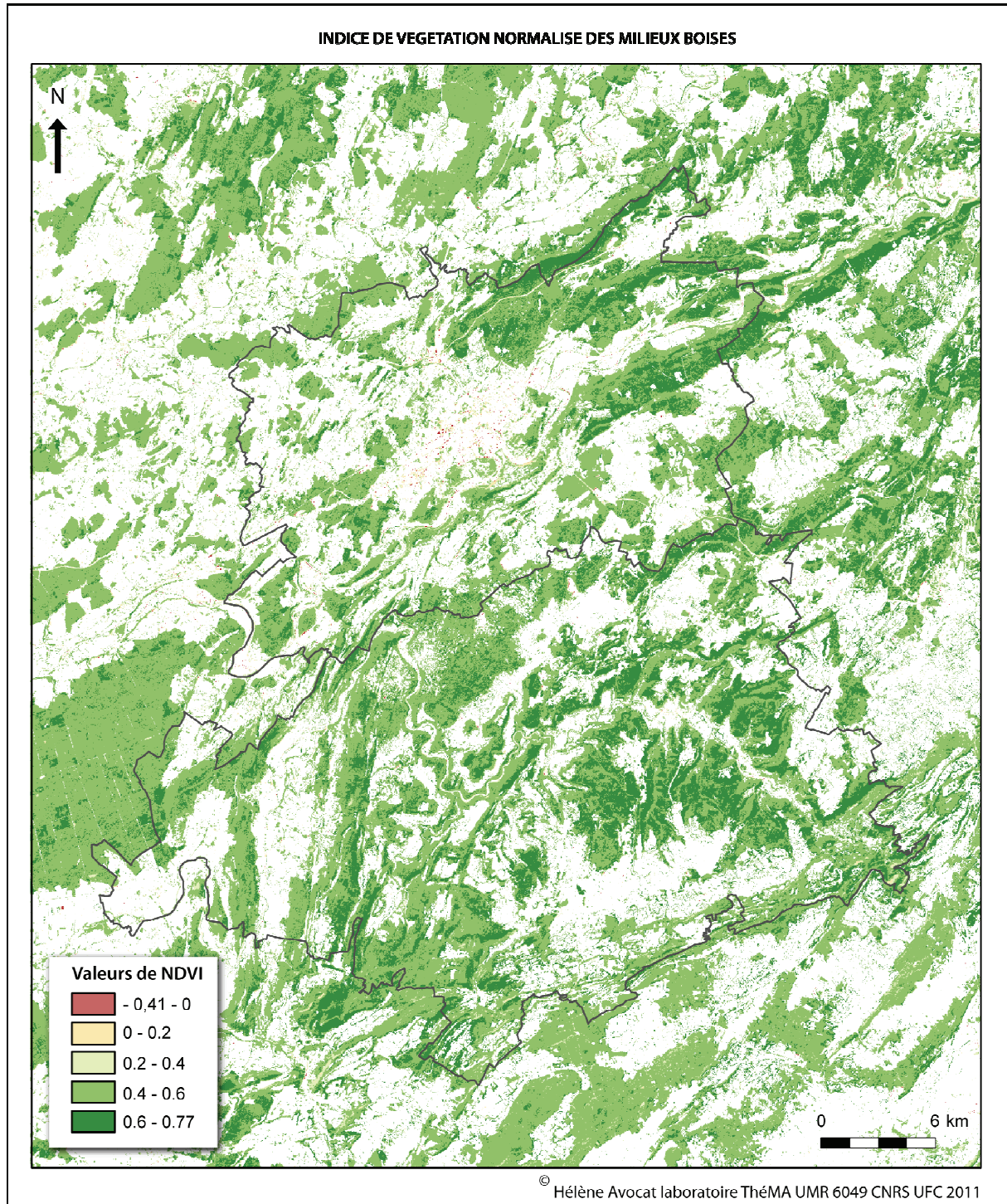


Figure 103 : indice de végétation et couvert boisé

Les valeurs de NDVI peuvent également présenter des surestimations ou des sous-estimations en fonction de l'éclairage : ainsi les zones ombragées sont en général caractérisées par des

valeurs faibles ou négatives alors que la biomasse aérienne est importante. L'humidité de certains secteurs a également tendance à minorer l'activité chlorophyllienne. Inversement, les zones surexposées peuvent présenter des valeurs plus importantes.

3. Caractérisation de la ressource ligneuse via les données d'inventaires et levés dendrométriques du laboratoire de Chrono-Environnement

Si l'imagerie satellitaire offre des informations très intéressantes sur les formations boisées, elle ne peut en aucun cas se substituer à un travail de terrain renseignant précisément les caractéristiques dendrométriques des peuplements. Or, l'IFN *via* ses campagnes d'inventaires effectue de nombreuses mesures des ressources ligneuses. Les données qui nous ont été fournies sont des données volumétriques estimées en m³ de bois fort à l'hectare, alors que les données fournies par Chrono-Environnement sont des mesures de biomasse exprimées en tonnes par hectare.

3.1. Les données du laboratoire Chrono-Environnement

Les relevés de biomasse effectués par le laboratoire de Chrono-Environnement ont l'avantage d'être plus précis, plus exhaustifs que les données de l'IFN puisque les chercheurs recensent toute la biomasse ligneuse sur des parcelles de 30 m x 30 m, et que les coordonnées géographiques des placettes étudiées nous ont été communiquées sans dégradation (contrairement aux relevés IFN).

3.1.1. Localisation des zones inventoriées

Les points inventoriés se situent dans le Doubs (à une vingtaine de km au sud de Besançon) et dans le Jura (en forêt de Chaux). Très peu de points sont inventoriés en raison de l'ampleur de ce travail, et du peu de personnel attelé à cette tâche. Cela constitue une considérable limite pour la réalisation de statistiques fiables (notamment pour l'analyse de la corrélation avec les valeurs de NDVI).

3.1.2. Valeurs de biomasse selon les caractéristiques forestières

Le tableau 15 donne les valeurs des sept stations inventoriées. Pour les stations situées en forêt de Chaux, il s'agit de valeurs moyennes sur plusieurs années.

Numéro de station	Espèce dominante et caractéristiques du terrain	Biomasse totale (t/ha)	Biomasse du tronc (t/ha)
1	Chêne, forêt de Chaux	306	220
2	Chêne et hêtre, forêt de Chaux	352	250
3	Chêne, forêt de Chaux	346	248
4	Épicéa	399	314
5	Épicéa (coupe)	133	98
6	Hêtre	296	241
7	Hêtre (terrain en pente, éboulis)	102	83

Tableau 15 : valeurs de biomasse fournies par Chrono-Environnement

3.2. Les données de l'Inventaire Forestier National

3.2.1. Répartition des points d'inventaire et caractéristiques dendrométriques

À l'échelle de la CAGB et du Pays Loue Lison, 326 placettes d'inventaire (et 4051 arbres) ont été renseignées par l'IFN lors de la campagne d'inventaire de 1994 (figure 104). Ces placettes se répartissent de la manière suivante :

Pays Loue-Lison

1102 points d'inventaires en forêt levée et non levée issus de la photointerprétation

- dont **220** points situés en forêt levée (c'est-à-dire pour lesquels on dispose d'informations), soit 19,9 % du total des points d'inventaire
- dont 874 points situés en forêt non levée (pas d'information)
- dont 8 placettes catégorisées « autre forêt » (pas d'information)

Communauté d'Agglomération du Grand Besançon

606 points d'inventaires au total

- dont **106** points situés en forêt levée, soit 17,5 % du total des points d'inventaire
- dont 494 points situés en forêt non levée (pas d'information)
- dont 6 placettes catégorisées « autre forêt » (pas d'information)

La proportion de points d'inventaire renseignés est donc assez faible (moins de 20%). A cela s'ajoute le problème précédemment évoqué concernant l'imprécision de localisation de ces points (± 200 mètres).

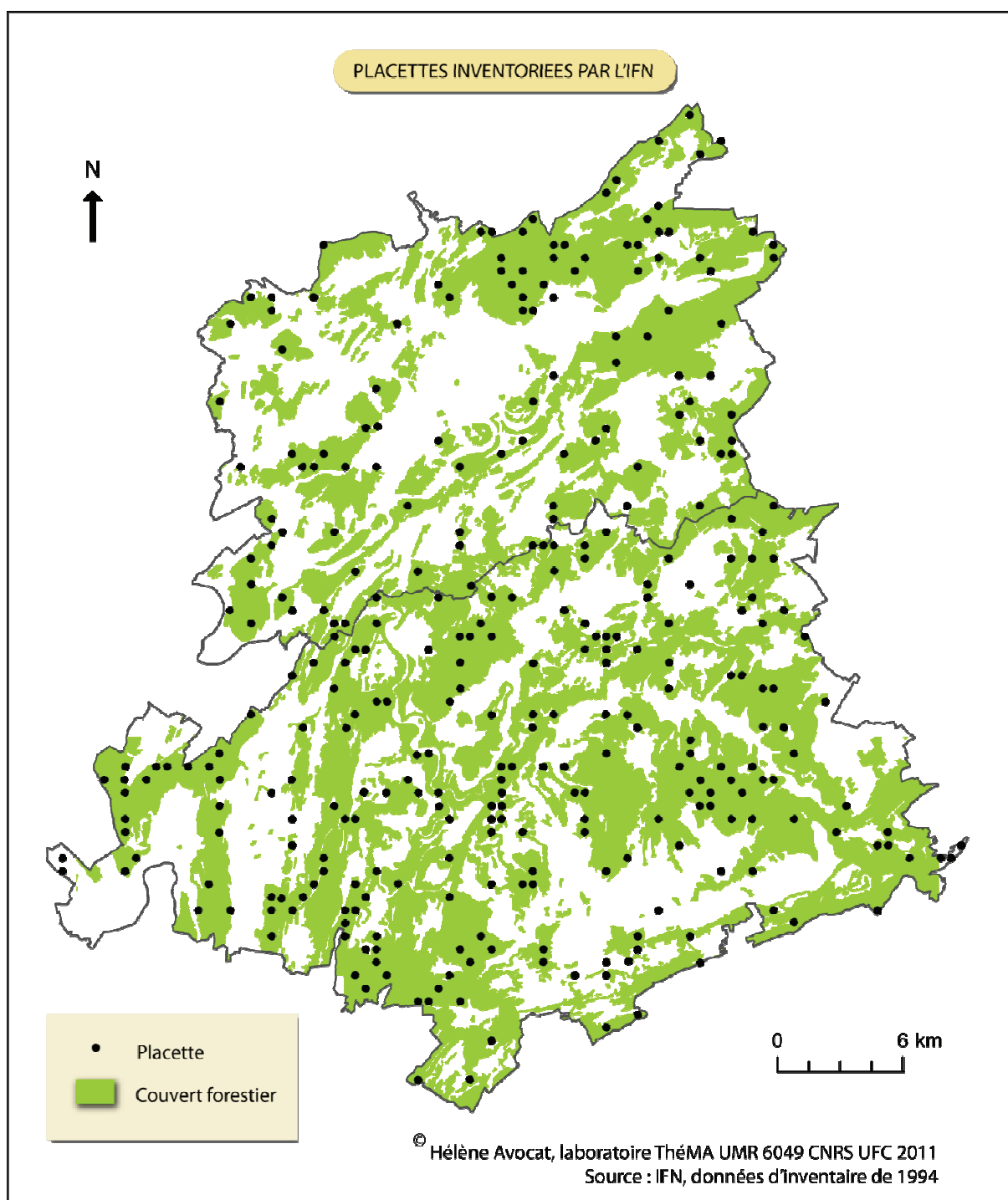


Figure 104 : répartition des points d'inventaire renseignés par l'IFN

3.2.2. Améliorer la précision des données avec des équations allométriques et des facteurs d'expansion de biomasse

Depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, un grand nombre de fonctions d'estimation de volume ligneux et de biomasse aérienne ont été développées pour de multiples espèces d'arbres (West, 2003). Dans le cadre de nos recherches, nous nous appuyons ainsi sur les

résultats de ces travaux. Selon Zianis et al. (2005) des équations de volume et de forme de biomasse peuvent être appliquées directement aux données des relevés dendrométriques issus des campagnes d'inventaire (mensurations des arbres, hauteur, diamètre) en intervenant sur chaque individu statistique, ou alors en appliquant des facteurs d'expansion de biomasse (*Biomass Expansion Factors / BEF*) au niveau des individus d'une placette d'inventaire. Bien que des équations très poussées aient été élaborées (pensons notamment aux travaux de Parresol, 1999, Vallet et al., 2006, Zianis et al., 2005, Zianis, 2004, etc.). L'objectif de cette démarche est d'améliorer les données qui nous ont été fournies par l'IFN ; données non exhaustives et comportant un certain nombre de biais statistiques inhérents aux méthodes d'échantillonnage.

Les équations allométriques, une méthode très utilisée et abondamment développée dans la littérature scientifique

En biologie, le terme d'allométrie désigne la corrélation entre la taille d'un organisme et certains de ses paramètres biologiques. Par extension, l'allométrie des arbres établit des relations quantitatives entre certains aspects des caractéristiques clés des arbres (faciles à mesurer, comme le diamètre du tronc) et d'autres propriétés, plus difficiles à mesurer (houppier). De nombreux chercheurs ont mis en évidence des relations allométriques entre le diamètre de la tige principale, la hauteur de la formation ligneuse et le volume total de biomasse ligneuse (Parresol, 1999, Vallet et al., 2006, Zianis, 2004, etc.). La grande majorité des équations recensées par Zianis (2004) mettent en évidence une relation allométrique simple de forme:

$$M = aD^b$$

Équation 8 : équation allométrique de détermination de biomasse

Source : Zianis (2004)

Où M est la biomasse et où D représente le diamètre de la tige principale à hauteur de poitrine (1,30 m du sol), alors qu'a et b se réfèrent à des paramètres estimés par les différents auteurs (*scaling coefficients*), faisant respectivement référence aux coefficients allométriques des reliant le volume de biomasse et le diamètre de la tige (D) d'une part, et entre le volume de la biomasse et la hauteur d'autre part. Ces équations peuvent être utilisées pour l'évaluation de biomasse ligneuse sur de vastes échelles géographiques, pour la validation de modèles théoriques et la planification forestière (Zianis, 2005). Néanmoins, les variables diamètre et hauteur ne nous ayant pas été fournies par l'IFN, nous n'avons par conséquent pas pu explorer en détail cette piste et tester les différentes équations définies par les auteurs. Cela pourrait faire l'objet d'une étude ultérieure, dans laquelle les potentialités des équations allométriques pourraient être couplées à des relevés de terrains et des méthodes fondées sur la géométrie des objets « arbres », de façon à obtenir des données précises et généralisables sur la biomasse ligneuse.

Les facteurs d'expansion de biomasse

Les inventaires forestiers nationaux indiquant généralement des estimations des volumes des tiges principales, il en résulte une carence de mesure directe de biomasse (Lehtonen, 2004) pouvant être préjudiciable dans un contexte de valorisation de l'intégralité de la biomasse ligneuse. Cela est notamment vrai dans le domaine énergétique où des estimations de biomasses précises sont requises pour l'évaluation de la quantité d'énergie primaire issue des forêts (Zianis, 2004).

La méthode des facteurs d'expansion, que nous utiliserons dans le cadre de ces travaux, a été élaborée à l'aide de volumes représentatifs de certaines essences couplées à des équations de biomasse. Le facteur d'expansion de biomasse est un facteur multiplicatif à appliquer au tronc (bois fort tige) dans le but d'obtenir le volume total de biomasse ligneuse aérienne. Initialement le calcul de biomasse d'une forêt se fait en deux étapes : en convertissant tout d'abord les volumes de bois en masse sèche (en déterminant un facteur de densité), et par la suite en quantité de biomasse totale, en utilisant un facteur d'expansion (Lehtonen, 2004). Ces deux facteurs peuvent cependant être remplacés par un seul facteur, convertissant directement les volumes de tiges en volume de biomasse globale (Lehtonen, 2004 ; Shroeder et al., 1997 ; Fang et al., 1998). Tout comme pour les deux méthodes précédemment évoquées, certains chercheurs sont allés très loin dans l'élaboration de leurs facteurs d'expansion en raison de la forte hétérogénéité des formations boisées, et l'une des principales conclusions de ces travaux est que ces derniers dépendent fortement de l'âge de la formation ligneuse et de la phase de croissance du peuplement. En toute connaissance de cause, et bien que les facteurs d'expansion de biomasse puissent différer notablement, nous utiliserons des facteurs d'expansion que l'on pourrait qualifier de « génériques », et que l'on peut définir comme un ratio de biomasse déterminé à partir d'une ou plusieurs mensurations du volume de la tige (Weier et Herring, 2010). D'un point de vue conceptuel, on se réfère ainsi au concept de compartimentation de l'arbre évoqué plus haut. Bien que certains auteurs préfèrent calculer les facteurs d'expansion de biomasse (pensons notamment à Vallet et al., (2006)) à partir de la circonférence et de la hauteur totale, nous serons obligés dans le cadre de ces travaux d'utiliser des facteurs de conversion directe à partir du « volume IFN ».

Même si les calculs conduisant à l'élaboration de ces ratios peuvent être très complexes, le principe est relativement simple à mettre en œuvre, une fois ces coefficients déterminés. G. Pignard in Loustau (2004), a appliqué les équations de volume présentées ultérieurement par Vallet et al., (2006) à toutes les parcelles levées par l'IFN et calculé des ratios entre les volumes totaux estimés et les volumes commercialisables. Pour la France entière, les ratios moyens s'élèvent 1,61 pour les feuillus, et 1,335 pour les conifères. Pour les taillis de feuillus le ratio est de 1,72, et pour les taillis sous futaie, le ratio est de 1,57 pour les chênes, 1,86 pour les hêtres et 1,99 pour les autres feuillus. Vallet et al., (2006) notent que ces résultats

corroborent ceux de Bouchon et al. (1981). Il est intéressant de remarquer que ces ratios tiennent compte de la structure de la formation forestière (taillis, futaie, TSF).

Dans le cadre de ces travaux, nous nous appuyerons sur des facteurs multiplicatifs moyens⁸⁹ élaborés par les acteurs de la filière forêt-bois d'Auvergne, l'IFN, et AFOCEL⁹⁰, relativement similaires à ceux calculés par G. Pignard. Le facteur d'expansion qu'ils ont mis au point permet d'obtenir le volume aérien (tiges et branches) à partir du seul volume de la tige à la découpe 7 cm (volume mesuré par l'IFN). En pratique, le facteur d'expansion a été calculé par classe de diamètre, et la valeur retenue est donnée dans le tableau suivant :

Groupes d'essences	Essence	Facteur multiplicatif moyen à appliquer au volume bois fort de la tige
Feuillus	Chênes	1,49
	Hêtres	1,64
	Autres feuillus	1,70
Résineux	Pin sylvestre	1,33
	Épicéa commun	1,23
	Sapin pectiné	1,28
	Douglas	1,15
	Autres résineux	1,31

Tableau 16 : Quelques facteurs d'expansion de biomasse.

Source : IFN, et AFOCEL, résultats publiés sur dispoboisauvergne.fr

Ainsi, lorsque l'IFN rapporte 1m³ de bois de chêne en disponibilité ou en volume sur pied, le volume total aérien correspondant est de 1,49 m³. C'est-à-dire que les branches et la partie de la tige comprise entre la découpe de bois fort (7 cm) et la cime de l'arbre représente en moyenne 49 % du volume de la tige jusqu'à une découpe de 7 cm. Bien que certaines réserves puissent être émises relativement aux limites induites par les facteurs d'expansion directe, ils constituent néanmoins une piste extrêmement intéressante car relativement simple à mettre en œuvre et d'un degré de simplification compatible avec les données dont nous disposons et nos objectifs de travail, dans une démarche de modélisation de la biomasse ligneuse à grande échelle.

⁸⁹ Disponibles sur Internet à l'url suivante : www.dispoboisauvergne.ifn.fr. Consulté le 19 juillet 2010.

⁹⁰ Association Forêt Cellulose, organisme privé de recherches.

3.2.3. Estimer la volumétrie ligneuse moyenne pour chaque placette

Afin d'estimer la volumétrie ligneuse moyenne de chaque placette, nous travaillons dans un premier temps à partir du fichier de données dendrométriques (cf. chapitre 6 sur la structure de la base de données de l'IFN). Chaque placette située en forêt levée est caractérisée par la description d'un nombre variable d'arbres (en l'occurrence ici de 1 à 38). Les étapes suivantes expliquent la démarche d'estimation de la volumétrie ligneuse :

- Chaque arbre est caractérisé par un type d'essence et un volume de bois fort tige. Nous réaffectons un coefficient d'expansion de biomasse (cf. tableau 16), en vue d'obtenir le volume ligneux total de chaque arbre inventorié.
- En multipliant le volume ligneux total ainsi obtenu de chaque arbre par son poids statistique (qui rappelons-le, est l'extension en nombre à l'hectare sur ce point), on obtient un volume à l'hectare représentatif de cet arbre.
- Et en sommant l'ensemble de ces résultats, on obtient un volume en m^3/ha pour chaque placette (figure 105).

PLACETTE	SURFACE EXTENSION (hectare)	ARBRE n°	POIDS STATISTIQUE	VOLUME BOIS FORT TIGE	COEFFICIENT D'EXPANSION	VOLUME m^3/ha
1	---	1	14,14	1,21	1,70	
		2	88,41	0,14	1,49	
		3	88,41	0,21	1,23	
		4	88,41	---	---	
		5	33,29	---	---	
2	---	1	14,14	---	---	
		2	33,29	---	---	
		3	88,41	---	---	
		4	88,41	---	---	
		5	14,14	---	---	
3	---	1	33,29	---	---	
		2	88,41	---	---	
		3	88,41	---	---	
		4	33,29	---	---	
		5	14,14	---	---	

Extension en nombre à l'hectare sur ce point

Multiplication

En multipliant le volume en m^3 par le poids statistique on obtient un volume à l'hectare représentatif de chaque arbre

Et en sommant ces résultats, on obtient un volume en m^3/ha pour chaque placette

Poids statistique
 14,14 = gros arbre
 33,29 = arbre moyen
 88,41 = petit arbre

© Hélène Avocat, laboratoire ThéMA UMR 6049 CNRS UFC 2011

Figure 105 : détermination de la volumétrie ligneuse pour chaque placette inventoriée par l'IFN

Les résultats issus de ces calculs sont présentés dans la figure 106. Tous les types de peuplements et d'essences sont considérés, du taillis de feuillus à la futaie de résineux. La distribution est d'allure gaussienne mais dissymétrique, avec une classe modale comprise entre 220 et 280 m³/ha. Il convient néanmoins de souligner que ces inventaires comprennent un nombre relativement important de placettes comptabilisant moins de 5 arbres inventoriés (soit 52 placettes dont la représentativité peut être remise en question compte tenu du peu d'arbres mesurés).

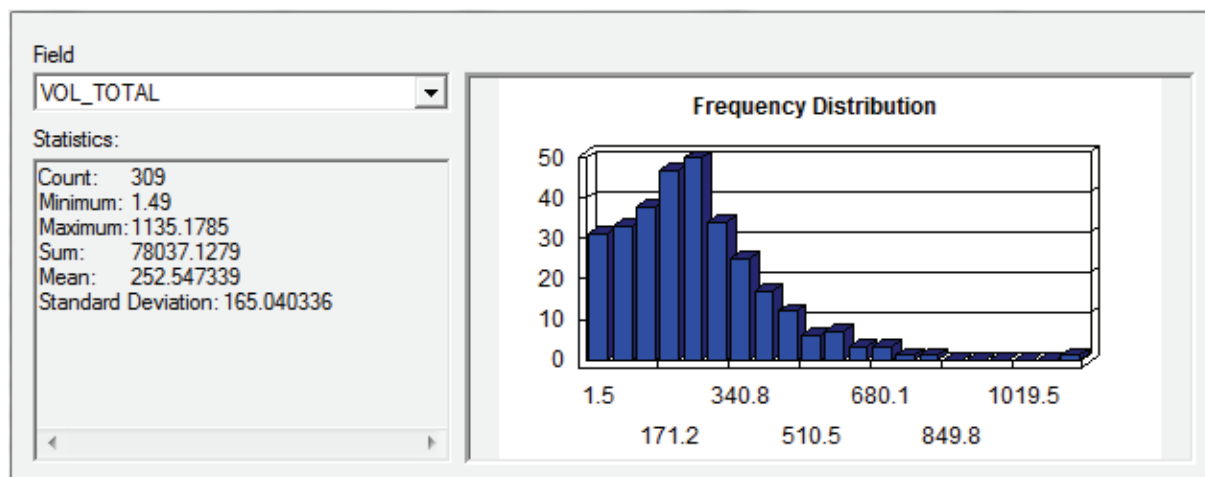


Figure 106 : histogramme de distribution de la volumétrie ligneuse des placettes inventoriées par l'IFN

Compte tenu de l'hétérogénéité des espaces boisés et des paramètres estimés lors des inventaires spatialement ponctuels, il paraît très hasardeux de réaliser, sur ces éléments, une interpolation spatiale en vue de cartographier la volumétrie ligneuse. Il est donc préférable d'analyser la corrélation entre les variables dendrométriques (de l'IFN et de Chrono-Environnement) et les valeurs d'indice de végétation correspondantes.

4. Corrélation entre caractéristiques dendrométriques et indices de végétation

L'objectif de cette partie est d'étudier la corrélation entre le NDVI des espaces boisés et des mesures dendrométriques (volumes ou masses de matière ligneuse) afin de calibrer un modèle nous permettant de cartographier la biomasse ligneuse. Le postulat de base est que l'indice de végétation (qui reflète l'intensité de l'activité chlorophyllienne) est globalement corrélé à la quantité de biomasse ligneuse (Luther et al, 2006 ; Warren et al, 1992 ; Bencherif, 2009 ; Hall et al, 2006 ; Roy et Ravan, 1996 ; Gonzales-Alfonso et al, 2008 ; Mäkela et Pekkarinen, 2004 ; Warren et al., 1992).

4.1. Des corrélations peu significatives avec les données ponctuelles de l'IFN et de Chrono-Environnement

Bien que les données qui nous ont été transmises par l'IFN soient exprimées en volume et celles de Chrono-Environnement en masse ; il est néanmoins possible selon les essences, d'établir un lien entre ces deux paramètres *via* le prisme de la masse volumique (densité). Il existe ainsi quantité de tables de conversion exprimant ce rapport selon le taux d'humidité, les types d'essences, etc. Néanmoins de manière globale, on peut observer une dichotomie grossière entre feuillus et résineux, ces derniers étant moins denses (à volume égal et à même degré d'humidité). Le fait d'effectuer des statistiques sur les volumes ne pose ainsi pas de problème, même si les unités de masse, sont privilégiées par les scientifiques précédemment cités pour établir la relation entre indice de végétation et quantité de matière ligneuse.

4.1.1. Les relations NDVI / volumétrie ligneuse par type d'essence

Les placettes de mesure du laboratoire de Chrono-Environnement étant trop peu nombreuses, il n'était pas possible d'analyser les liens entre le NDVI et les placettes correspondantes. A cela s'ajoutait un problème de précision dans la localisation de certaines placettes, et la présence d'un chantier forestier récent (coupe) qui n'était pas présent sur l'image satellite de 1999.

Les graphiques suivants nous renseignent sur le degré de corrélation entre les volumes moyens en m³/ha pour chaque placette inventoriée par l'IFN, et les valeurs de NDVI correspondants. Compte tenu des différences de relation entre réponse spectrale et masse volumique pour les feuillus, résineux et peuplements mixtes, nous avons effectué des analyses séparées. Il convient ainsi de relever la particularité de la signature radiométrique des résineux adultes, qui présente en général de plus faibles valeurs que les feuillus ou les peuplements mixtes en raison de leur couleur vert foncé, témoignant d'une forte absorption du rayonnement solaire.

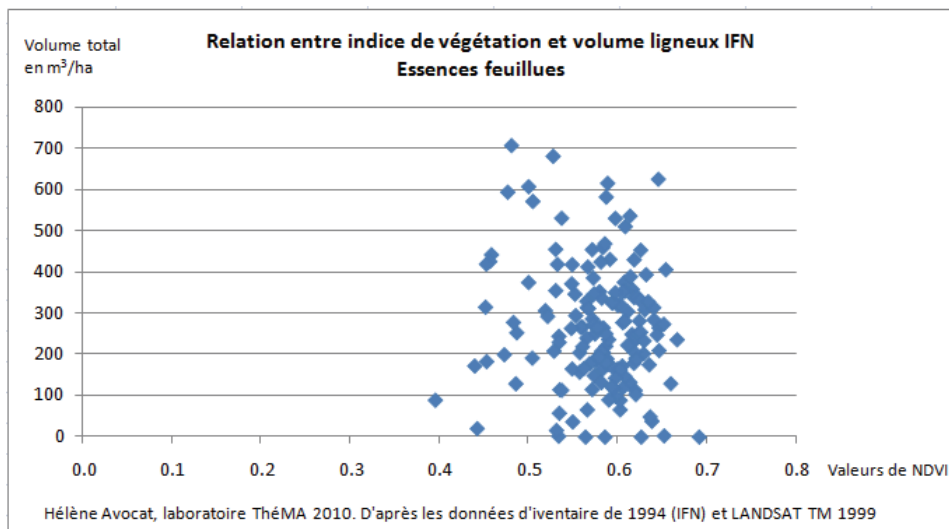


Figure 107 : corrélation volumétrie ligneuse /NDVI des essences feuillues

La majorité des placettes inventoriées concernent des espèces feuillues. Cependant la corrélation n'apparaît pas du tout significative. Le nuage de points est véritablement "éclaté". Aucune courbe de tendance ne se distingue, il n'y a pas de corrélation ($R^2 = 0,014$).

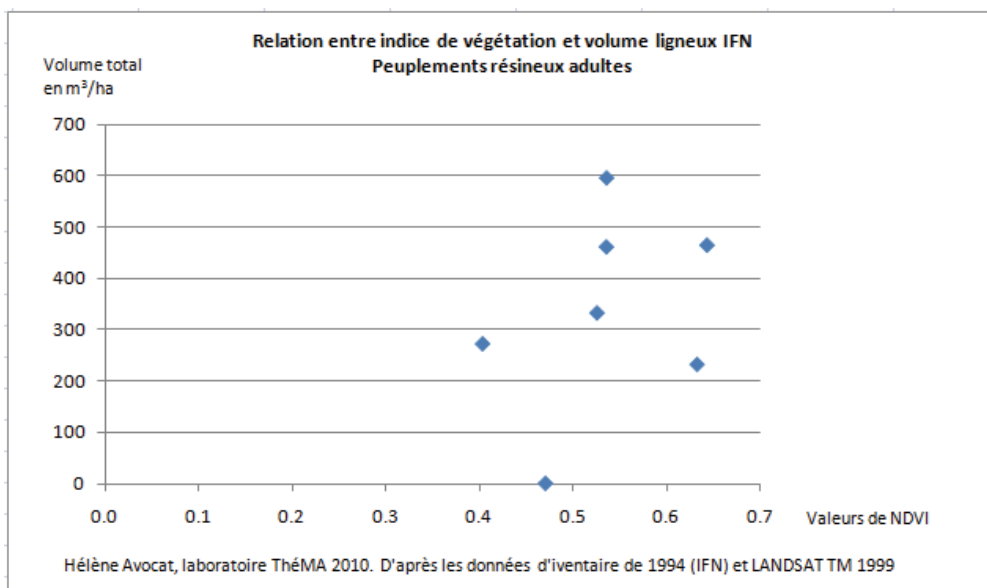


Figure 108 : corrélation volumétrie ligneuse /NDVI des essences résineuses

Pour les placettes de résineux, il n'y a malheureusement pas assez d'individus pour établir des statistiques fiables. Mais le problème est le même que pour les formations feuillues : il n'y a pas de corrélation entre les deux variables ($R^2 = 0,12$).

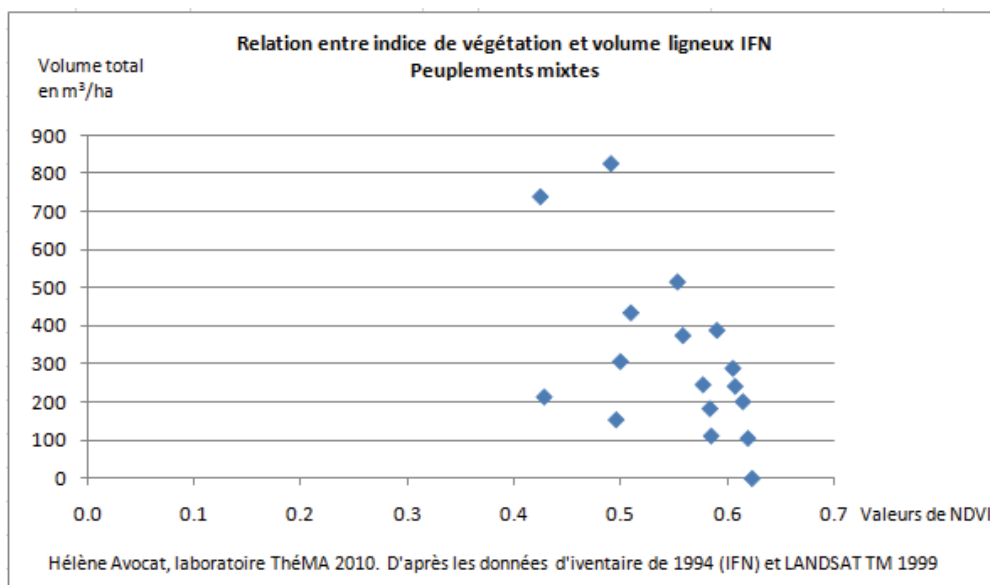


Figure 109 : corrélation volumétrique ligneuse /NDVI des peuplements mixtes

Le même problème de non-corrélation se pose pour les peuplements mixtes, avec même une tendance à la décroissance des volumes à mesure de l'augmentation du NDVI, ce qui est tout à fait anormal, puisque la quantité de matière ligneuse devrait théoriquement être corrélée plus ou moins positivement à l'indice de végétation.

4.1.2. Les raisons de l'absence de corrélation statistique

L'absence de corrélation statistique entre les deux variables peut s'expliquer de différentes façons. Tout d'abord par la localisation des placettes d'inventaire, imprécises par nature et floutées dans un intervalle de 200 m. Pour palier ce problème nous avons tenté de reproduire les calculs, mais en prenant les valeurs moyennes de NDVI dans une fenêtre de 6 x 6 pixels (environ 200 m). Pour Hall et al. (2006), ce type de procédure est supposé réduire les erreurs inhérentes à un mauvais positionnement spatial des échantillons, engendrant un problème de concordance avec les autres sources de données (images satellites notamment). Néanmoins, une telle démarche peut également fausser les résultats en raison de l'influence des autres types d'occupation du sol ; effet pernicieux particulièrement visible en lisière de forêt. Cette approche n'ayant pas amélioré la corrélation entre les variables, nous avons répété l'opération en excluant les points se situant à moins de 200 m des lisières de forêt (le floutage des coordonnées étant particulièrement problématique dans ces zones d'interface entre la forêt et les autres classes d'occupation du sol). Il ne restait plus qu'un tiers des points d'inventaire, et cela n'a pas amélioré les résultats de manière significative.

Face à cet écueil, nous avons décidé d'exploiter la cartographie forestière et la signature radiométrique des différents types de peuplements, ainsi que les valeurs standards de biomasse disponibles dans la littérature.

4.1.3. Signature radiométrique et valeurs de NDVI des types de peuplements issus de la cartographie forestière

Les statistiques détaillées des valeurs de NDVI par type de peuplement sont présentés dans l'annexe 3. Les valeurs moyennes s'échelonnent de 0,444 pour la forêt ouverte de conifères à 0.626 pour la jeune futaie de pins.

Les tendances globales sont les suivantes (figure 110) : de part leur forte activité photosynthétique, les jeunes futaies présentent de fortes valeurs de NDVI, et ce, qu'elles soient d'essence feuillue ou résineuse. Les cinq premières positions sont ainsi allouées par ordre décroissant à la jeune futaie de pins → jeune futaie de feuillus indifférenciés → jeune futaie de sapins → jeune futaie de hêtre → jeune futaie de douglas. Les jeunes peuplements se caractérisent par une couleur de feuillage ou d'aiguilles plus claire que les peuplements adultes. Les peuplements feuillus adultes se caractérisent par des valeurs de NDVI fortes, témoignant d'une forte activité photosynthétique et d'une importante biomasse verte.

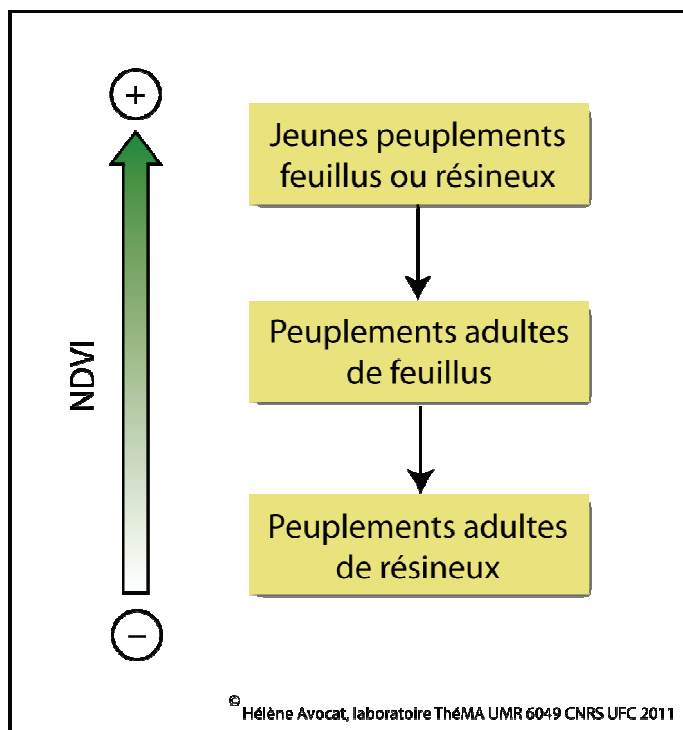


Figure 110 : valeurs de NDVI et types de peuplements forestiers

Trois types d'espèces feuillues sont cartographiées d'après la carte des peuplements IFN : chênes, hêtres, et feuillus indifférenciés, pour trois types de formations forestières : futaie, taillis, et mélange de futaie et de taillis. Les formations contenant du hêtre présentent des

valeurs de NDVI supérieures, à celles contenant du chêne. Cela s'explique par la forme de la canopée, plus fournie et plus dense chez le hêtre. Le taillis de feuillus indifférenciés présente une valeur plus faible (0,551). Les forêts ouvertes de feuillus sont également caractérisées par de faibles valeurs. Le faible taux de couverture explique une forte proportion de pixels mixtes, et l'influence d'autres types de couverts du sol ayant tendance à faire baisser les valeurs d'indice de végétation.

Bien que nous ne connaissions ni l'âge des formations mixtes, ni les proportions respectives de feuillus et de résineux susceptibles d'influencer les valeurs de NDVI, la futaie mixte présente une valeur moyenne de NDVI (0,557). Elle se situe ainsi à l'interface entre les peuplements feuillus (valeurs hautes) et résineux adultes (valeurs basses).

Les futaies adultes de résineux (conifères indifférenciés, sapins, épicéas, pins) présentent de faibles valeurs d'indice de végétation en raison de leur couleur vert sombre, et d'une moindre réflectance que les feuillus. Les valeurs s'échelonnent de 0,444 pour la forêt ouverte de conifères, à 0,556 pour le mélange de futaie de conifères et taillis).

L'hétérogénéité des formations forestières et les différences de comportements spectraux laissent entrevoir quatre catégories de formations boisées aux caractéristiques sensiblement similaires : les jeunes résineux, les résineux adultes, les peuplements mixtes et les feuillus. Ces quatre catégories vont nous servir de base pour le calibrage de quatre modèles de biomasse, qui une fois assemblés permettront une cartographie de la biomasse ligneuse.

5. Calibrage du modèle et cartographie de la biomasse ligneuse

5.1. Méthodologie

Nous partons toujours du postulat que l'activité photosynthétique des arbres, qui influe les valeurs des indices de végétation, est corrélée de manière plus ou moins importante à la quantité de matière ligneuse. À la différence des travaux précédemment évoqués (Luther et al, 2006 ; Warren et al, 1992 ; Bencherif, 2009 ; Hall et al, 2006 ; Roy et Ravan, 1996 ; Gonzales-Alfonso et al, 2008 ; Mäkela et Pekkarinen, 2004 ; Warren et al., 1992), nous n'avons pu mettre en évidence aucune corrélation significative entre les valeurs d'indices de végétation et les quantités de matière ligneuse sur les placettes d'inventaire. Les valeurs de NDVI par type de peuplement témoignent par ailleurs d'un comportement "normal" de l'activité végétale. Forts de ce constat, nous avons choisi de nous appuyer sur les valeurs de biomasse des forêts tempérées (par type d'essences) pour calibrer quatre modèles d'estimation de biomasse ligneuse aérienne (tronc + branches).

La différence de signature spectrale et d'indice de végétation est telle entre feuillus et résineux, qu'il est impossible de les modéliser simultanément. Aussi le modèle d'estimation de biomasse sera élaboré séparément pour les peuplements mixtes, les formations feuillues (jeunes et adultes), les jeunes résineux et les résineux adultes.

Concrètement, nous utilisons les valeurs de NDVI des différents types de peuplements cartographiés représentant chacune des quatre catégories de biomasse à estimer, et les comparons aux valeurs de biomasse de référence issues de la littérature. Une fois le modèle calibré, les tests effectués, et les écueils corrigés, nous appliquons la régression à chacun des quatre groupes d'essences dont l'emprise spatiale a été définie précédemment (cf. début du chapitre sur la cartographie du couvert boisé).

5.2. Le calibrage des différents modèles de biomasse

Avant toute chose, il convient de souligner que les données de biomasse "moyenne" ou "standard" sont extrêmement difficiles à trouver. On trouve une foule de publications sur les relations allométriques entre les différents compartiments de l'arbre, mais très peu de données moyennes, exprimées en t/ha. De manière générale, les jeux de données concernant la biomasse ligneuse sont relativement rares, en raison des destructions d'arbres qu'elles peuvent impliquer et de leur coût important. De plus, lorsqu'ils sont disponibles, ces jeux tendent à être représentatifs de peuplements spécifiques et de conditions locales (Shroeder et al., 1997). Nous avons ainsi considéré toutes les sources de données correspondant aux forêts tempérées, sachant toutefois que les conditions stationnelles locales (climat, pédologie) ont une influence considérable sur la biomasse. Bien que la FAO ait publié en 2010 des statistiques sur l'état de la forêt mondiale ventilée par région du monde, nous n'avons pas retenu les valeurs publiées dans ce rapport. Il s'agit en effet d'une valeur de biomasse moyenne pour l'Europe entière, toutes essences confondues, dont les ordres de grandeur sont quasiment divisés de moitié par rapport aux relevés dendrométriques issus de la littérature scientifique. La faible biomasse aérienne des forêts boréales peut en partie expliquer ce résultat. Aucune source n'étant citée dans ce rapport et aucune distinction n'étant faite entre feuillus et résineux (ce dont nous avons impérativement besoin), nous avons pris le parti de calibrer notre modèle en fonction des valeurs publiées dans la littérature scientifique (tableau 17). De plus, ces valeurs présentent les mêmes ordres de grandeur que les relevés dendrométriques effectués par le laboratoire de Chrono-Environnement à proximité ou dans nos terrains d'étude.

D'autre part, il convient de souligner que le calibrage du modèle de biomasse nécessite de prendre en considération le comportement du NDVI. Ce dernier n'est pas corrélé linéairement à la densité de biomasse. Il présente une relation de type exponentiel avec la densité de végétation verte et sature en présence d'une épaisse couverture végétale, de sorte que sa sensibilité est intéressante surtout pour les couverts peu denses (Holben, 1986).

5.2.1. Modéliser la biomasse aérienne des feuillus

L'objectif est ici d'estimer la biomasse aérienne des différentes essences feuillues à partir de leur valeur de NDVI (cf. figure 111). Les valeurs de NDVI des différentes essences sont estimées grâce à la cartographie des types forestiers départementaux de l'IFN.

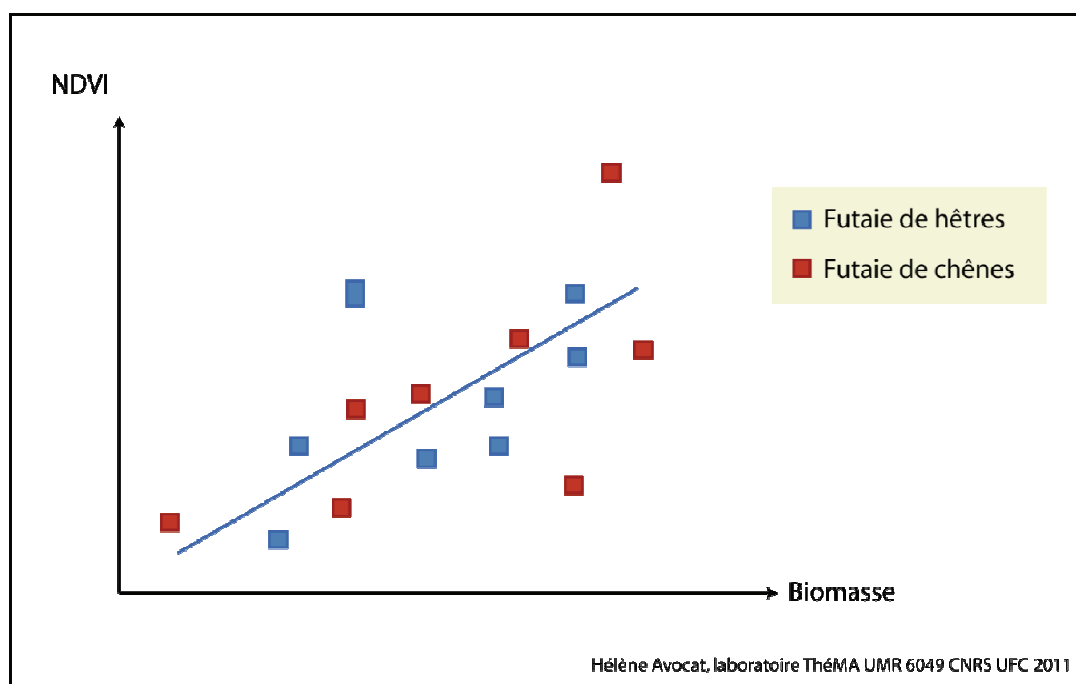


Figure 111 : représentation schématique de la relation entre NDVI et biomasse

Données de référence et valeurs de NDVI

Le tableau 17 nous renseigne sur les valeurs de biomasse de différentes essences feuillues trouvées dans la littérature scientifique. Le maximum de biomasse aérienne moyenne communément admis en forêt tempérée est de 400 t/ha (les forêts ombrophiles tropicales ont des biomasses aériennes de l'ordre de 500 t/ha).

Les valeurs de NDVI correspondant aux types peuplements feuillus cartographiés par l'IFN s'échelonnent de 0,551 pour les formations de taillis à 0,602 pour la jeune futaie de feuillus indifférenciés (cf. annexe 3 pour l'exhaustivité des statistiques des différents types de peuplements). La cartographie forestière recense 11 catégories de peuplements forestiers qui nous servent au calibrage du modèle.

Essence	Valeurs de biomasse en t/ha	Source
Chêne Rouvre (66 ans)	167	J. Pardé (1977)
Chêne Pédonculé (100 ans)	310	J. Pardé (1977)
Chêne vert (150 ans)	262	J. Pardé (1977)
Hêtre (144 ans)	369	J. Pardé (1977)
Chênaie moyenne forêt tempérée	250	Université de Saint-Étienne
Hêtraie moyenne forêt tempérée	350	Université de Saint-Étienne
Chênaie-frênaie	380	E. Robert (écologie)
Chêne Pédonculé	242	C. Le Guillon
Hêtre	332	C. Le Guillon
Hêtraie	325	C. Martin (2004)
Hêtraie	246	G. Lemée (1978)
Peuplements feuillus (moyenne forêt tempérée)	300	Y. Veyret (1997)

Tableau 17 : valeurs de biomasse des essences feuillues

Cependant cette typologie soulève plusieurs interrogations, qui ont eu des incidences sur les choix retenus pour le calibrage du modèle.

a) La nomenclature forestière et les typologies de peuplement n'étant pas stables (en témoignent les différences entre les deux dernières typologies des cartographies forestières de l'IFN), nous avons préféré calibrer notre modèle sur des types de peuplement "immuables" au niveau de la cartographie nationale, et dont on peut trouver des références dans la littérature scientifique à un niveau national et international. A titre indicatif, les types particuliers comme "mélange de futaie et taillis" n'ont pas de valeur de biomasse correspondante dans la littérature.

b) L'âge des peuplements pose également question. Qu'est ce qu'une jeune futaie ? Aucune référence bibliographique, ni aucune information dans la typologie départementale du Doubs fournie par l'IFN n'a pu apporter d'éléments de réponse. De plus, à la différence des résineux, la signature radiométrique entre les feuillus "jeunes" et les feuillus "adultes" est difficilement perceptible au niveau de l'image satellite. Faute d'informations (les données issues de la bibliographie concernant exclusivement des peuplements que nous supposons adultes puisque l'âge quand il est mentionné est supérieur à 100 ans), nous avons donc pris le parti d'exclure

les jeunes peuplements du calibrage du modèle, pour ne prendre en compte que des données dont nous étions sûrs.

c) La deuxième interrogation portait sur les typologies de peuplements comportant des mélanges de futaie et de taillis. Hormis des précisions de nature qualitative : "mélange riche" ou "mélange pauvre à moyen", il n'est pas possible de déterminer la proportion de chacune de ces formations. Pour ces catégories de peuplements, nous avons déterminé empiriquement des valeurs en nous appuyant sur les valeurs hautes et basses trouvées dans la littérature et en tenant compte des indications qualitatives précédemment évoquées.

d) Le problème des taillis. En comparaison aux futaies qui sont des peuplements entretenus et exploités régulièrement, ce qui a tendance à générer une certaine homogénéisation des peuplements (même si encore une fois tout est relatif, et que les conditions peuvent différer d'une futaie à l'autre), les taillis sont caractérisés par une très forte hétérogénéité. Le mieux serait d'établir un modèle de biomasse à part entière pour les taillis, et ce d'autant plus que ces formations ont la particularité de présenter une biomasse énergisable importante dans les nombreuses tiges non marchandes. Cependant, cela aurait impliqué un important travail de terrain (relevés dendrométriques). Nous avons donc choisi d'intégrer la formation "taillis de feuillus indifférenciés" dans le modèle global de biomasse des ligneux feuillus.

Calibrage du modèle : régressions statistiques et écueils rencontrés

Nous avons d'abord testé une régression linéaire simple entre les valeurs moyennes de NDVI des types de peuplements (variables explicatives) et les valeurs de biomasse (variables expliquées). Le but était d'apprécier les premiers résultats et les corrections à apporter au modèle, compte tenu des valeurs de biomasse hautes et basses et du comportement de l'indice de végétation. Le résultat obtenu témoignait de fortes surestimations des valeurs de biomasse pour certaines zones surexposées, et *a contrario* de valeurs négatives pour les zones sous-exposées ou de faible densité boisée (pixels mixtes, lisières). Bien que la normalisation par la somme des deux bandes tende à réduire les effets d'éclairement ou de pente sur le NDVI (permettant ainsi une comparaison de la couverture végétale en relative indépendance du relief), elle ne les annihile toutefois pas complètement (Calloz, 2002).

Mais le problème n'était pas seulement imputable à l'exposition et à la linéarité de la régression. Compte tenu de la distribution statistique des valeurs de NDVI au sein des différents types de peuplements, le même test (même régression) effectué avec les valeurs modales (et non les valeurs moyennes) donnait des résultats beaucoup plus satisfaisants, avec des écarts dans les extrêmes nettement moindres. Les valeurs de biomasse ainsi obtenues sont beaucoup plus cohérentes, même s'il subsiste des problèmes de sous-estimation et de surestimation (figure 112), en partie imputables à l'exposition (figure 113).

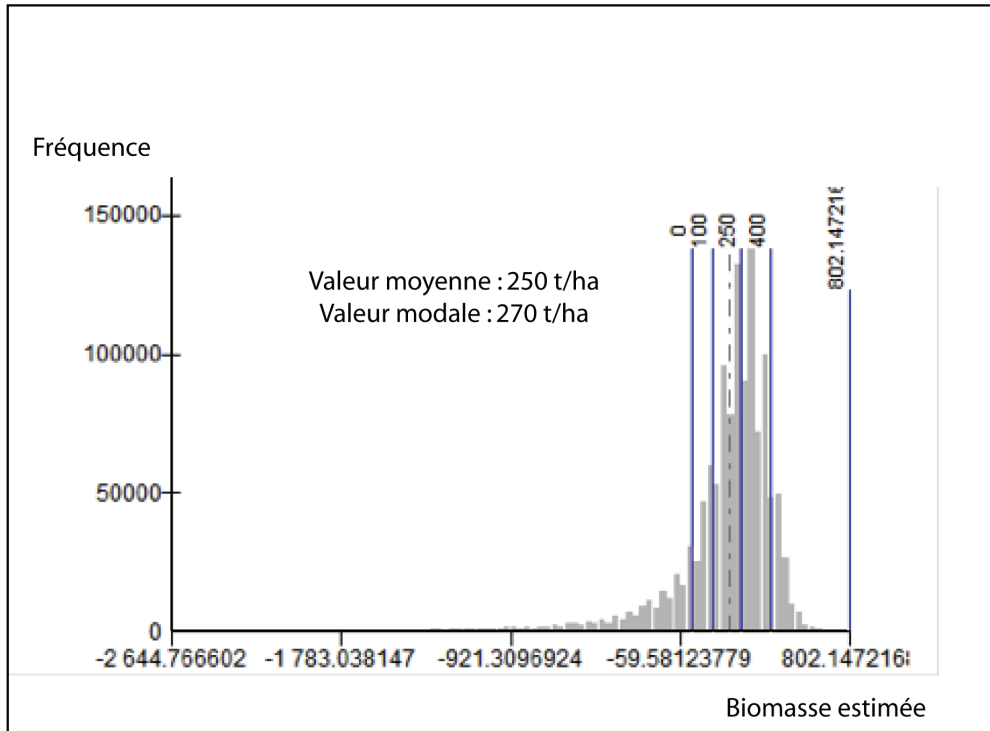


Figure 112 : histogramme de distribution des valeurs de biomasse (futaies de feuillus) après régression statistique sur les valeurs modales de NDVI

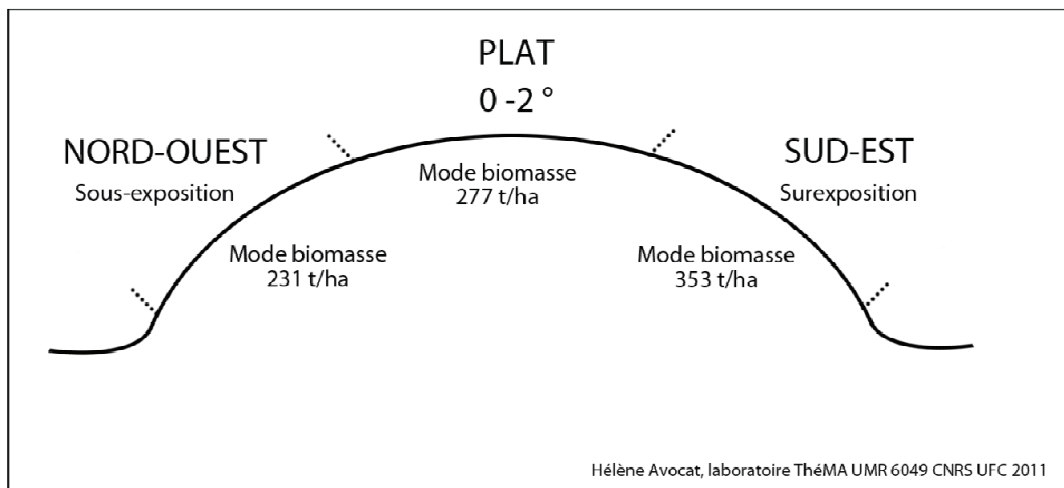


Figure 113 : valeurs de biomasse et exposition

Pour pallier en partie ces problèmes, nous avons commencé par procéder à une normalisation par la surface développée, en fonction de la pente (la surface réelle des pixels en pente étant plus importante, cela peut induire des biais). Pour les problèmes de sur et de sous-estimation, nous avons également effectué des corrections du NDVI suivant la pente et l'exposition.

Rectifier les problèmes de surestimation de la biomasse ligneuse

Bien que de forts décrochements soient observés sur la figure 112 à partir de 400 puis 450 tonnes de biomasse à l'hectare, il persiste des problèmes de surestimation de la biomasse ligneuse feuillue. Ces derniers concernent les versants surexposés, et témoignent d'une dérive du modèle sur les pentes fortes en fonction de l'exposition solaire. Nous avons rectifié ce problème en nous basant sur les valeurs modales de biomasse en fonction du degré d'exposition, le but étant d'essayer de minorer ces valeurs de biomasse surestimées pour nous rapprocher des valeurs observées en zone plane.

Les biomasses des formations de taillis ayant été calibrées avec les feuillus (faute de données suffisantes), il en résulte une surestimation de leur biomasse (lorsqu'on les compare aux quelques données de référence disponibles). Or, les taillis ne présentent pas la même structure que les futaies : moins de bois fort, plus de houppier et de feuillage. Afin de corriger ces surestimations, les valeurs de biomasse ont été recalculées avec un ratio de correction, correspondant au maximum de biomasse feuillue à 30 ans (correspondant à l'âge d'exploitabilité du taillis) sur la valeur maximum estimée par le modèle de régression de biomasse feuillue. Cette procédure permet de ramener les résultats de biomasse des taillis à des valeurs cohérentes pour ce type de formation boisée.

Sous-estimation et valeurs négatives : causes du problème et amélioration des résultats

Les valeurs négatives sont imputables à la pente, à la sous-exposition, à l'influence de la réflectance des sols et à l'humidité. En l'absence de données sur les forêts humides, il est malheureusement difficile de corriger ce dernier problème. Heureusement, cela ne concerne qu'une zone peu étendue par rapport à la superficie boisée totale. Concernant la pente et l'exposition, l'application de facteurs correctifs issus des métadonnées de l'image satellite (azimut et élévation solaire), a permis une amélioration des résultats. Cependant pour les zones les plus pentues et les moins bien exposées, les facteurs correctifs n'ont pas produit l'effet escompté, et la réponse de l'indice de végétation reste négative. L'application d'une régression donnait *a fortiori* un résultat négatif.

Pour les pixels mixtes correspondant à des arbres isolés, les valeurs sont faibles, voire négatives, car la part de biomasse détectable du pixel est faible. Ces pixels ont en général été identifiés par le biais de la BD TOPO. Ce phénomène est imputable à l'influence de la réponse spectrale des sols, notamment lorsque la végétation est peu couvrante et peu dense. La réponse spectrale du pixel est affectée par la réflectance des sols et la réponse de la végétation se trouve de fait minorée à l'échelle du pixel, dont les valeurs de biomasse sont estimées à 30

t/ha. Cette valeur, qui équivaut au dixième de la valeur modale estimées par le modèle⁹¹, a été estimée empiriquement en partant du postulat que si la couverture végétale couvre moins d'un dixième du pixel, elle est indétectable par les capteurs satellitaires.

Les lisières de forêt, bosquets et formations linéaires peuvent également présenter des problèmes de sous-estimation pour les mêmes raisons que les arbres isolés (pixels mixtes). Certains pixels en lisière de forêt ressortent négativement ou de façon très sous-estimée en raison des effets d'ombrage/d'exposition ou de la mixité des parcelles (les lisières étant des zones moins densément peuplées, "mitées" où la réflectance des sols influe sur la valeur de l'indice de végétation). Après identification des lisières, nous avons procédé de la même façon que pour les pixels mixtes, partant du principe de présence de végétation en dépit d'un faible signal de cette dernière. Nous avons donc réévalué les valeurs négatives à la plus petite valeur de biomasse détectable (soit 30 t/ha).

5.2.2. Modéliser la biomasse aérienne des résineux adultes

Les formations résineuses adultes présentent des valeurs de biomasse aérienne élevées, mais sont caractérisées par de faibles valeurs d'indices de végétation, imputables à leur couleur vert foncé témoignant d'une moindre activité photosynthétique. Il était donc nécessaire d'établir un modèle de biomasse aérienne spécifique à ces peuplements.

Données de référence et valeurs de NDVI

. Les valeurs de biomasse aérienne moyennes des résineux adultes varient considérablement selon les espèces. De manière générale, à âge égal, les pins ont des biomasses plus faibles que les autres résineux. Les valeurs s'échelonnent ainsi de 120 t/ha pour un peuplement de pin Sylvestre d'une cinquantaine d'années à plus de 400 t/ha pour des peuplements de Douglas âgés de 60 à 70 ans. Néanmoins, là encore nous ne disposons pas d'informations sur l'âge des différents peuplements, ce qui rend difficile le calibrage du modèle, et introduit une marge d'erreur supplémentaire. Faute d'informations, nous avons donc calibré notre modèle avec des valeurs de biomasse de peuplements d'âge similaire.

Le tableau 18 récapitule les valeurs de biomasse de différentes espèces résineuses

⁹¹ 270 t/ha, ce qui concorde avec les valeurs moyennes trouvées dans la littérature

Essence	Valeurs de biomasse en t/ha	Source
Sapin pectiné (51 ans)	112	J. Pardé (1977)
Épicéa commun (55 ans)	185	J. Pardé (1977)
Épicéa commun (76 ans)	296	J. Pardé (1977)
Douglas (70 ans)	396	J. Pardé (1977)
Pin Sylvestre (46 ans)	120	M.-T. LIM (1986)
Épicéa + pin à crochets	120	C. Martin (2004)
Épicéa commun (85 ans), forte production	428	J. Ranger et al. (1992)
Épicéa commun (50 ans)	182	D. Ranger et al. (1981)
Épicéa (47 ans), fertilité riche	263	J.-D. Ovington (1962)
Épicéa (47 ans), fertilité pauvre	140	J.-D. Ovington (1962)
Douglas (53 ans) fertilité riche	318	Bigger et al. (1983)
Douglas (53 ans) fertilité pauvre	164	Bigger et al. (1983)
Douglas (20 ans)	99,7	J. Ranger et al. (1996)
Douglas (40 ans)	262	J. Ranger et al. (1996)
Douglas (60 ans)	417,8	J. Ranger et al. (1996)

Tableau 18 : synthèse des valeurs de biomasse de différentes essences résineuses

Calibrage du modèle

A l'instar des peuplements feuillus, une régression statistique basée sur les valeurs modales de NDVI par type de peuplement (au lieu des valeurs moyennes) a donné de meilleurs résultats, que nous avons ensuite amélioré en appliquant des facteurs correctifs de surface développée, pour les zones pentues. L'analyse de l'histogramme révélait néanmoins une proportion relativement importante de pixels dont les valeurs étaient comprises entre 100 et 200 t/ha, ce qui peut avoir pour corollaire une légère sous-estimation de la biomasse aérienne résineuse. Néanmoins, faute d'informations sur le comportement du NDVI pour les essences résineuses, et les densités des peuplements, nous n'avons pas pu régler ce problème (après contrôle de la localisation de ces pixels, ce biais n'est en effet pas imputable à des facteurs topographiques ou d'orientation). Seule une campagne de terrain aurait pu lever les doutes. Au final, les valeurs moyenne et modale de biomasse aérienne résineuse issues du modèle sont respectivement égales à 214 et 216 t/ha.

5.2.3. La biomasse aérienne des peuplements mixtes

L'IFN et la cartographie du couvert boisé que nous avons établie ne font ressortir qu'une seule classe pour les peuplements mixtes, bien que ces derniers soient extrêmement complexes et diversifiés, tant au niveau des espèces que des régimes, de l'âge des peuplements ou de la

répartition possible entre feuillus et résineux. Compte tenu des valeurs de NDVI (exactement à l'interface entre les valeurs moyennes des feuillus et des résineux adultes), nous avons déterminé les valeurs de biomasse mixte au moyen des deux modèles précédents, en posant l'hypothèse d'une population égale des pixels feuillus et résineux. Les futaies mixtes étant très diversifiées, nous avons conscience des biais pouvant être induits par une telle démarche simplificatrice. Néanmoins, dans la mesure où nous n'avons aucune information disponible sur les caractéristiques de ces peuplements, il nous est impossible de procéder autrement.

5.2.4. Le modèle "biomasse jeunes résineux"

Manquant d'informations sur l'âge des "jeunes" résineux, et sur les valeurs de biomasses correspondantes par espèces, nous avons choisi de n'affecter qu'une seule valeur de biomasse de 100 t/ha, correspondant à un peuplement de douglas âgé de 20 ans (Ranger et al., 1996). Nous sommes bien conscients que l'affectation d'une seule valeur n'est pas à même de représenter l'hétérogénéité des peuplements de différentes espèces de jeunes résineux, et qu'il eût été préférable d'établir une régression statistique entre les valeurs de NDVI et de biomasse (à l'instar des peuplements feuillus et résineux adultes). Cependant, ces derniers étant très minoritaires à l'échelle de nos terrains d'étude (moins de 0,5 % de la surface boisée cartographiée), cela n'a que peu d'impact sur la cartographie finale de la biomasse.

5.3. Cartographie de la biomasse ligneuse aérienne

Les figures 114 et 155 présentent les résultats de notre modélisation sous forme cartographique, pour les feuillus et les résineux adultes d'une part (avec les histogrammes de distribution pour chaque groupe d'essence), et pour l'ensemble de la biomasse aérienne ligneuse d'autre part. L'analyse de la figure 114, où feuillus et résineux adultes sont présentés conjointement, permet de mettre en évidence :

- l'emprise spatiale de chacune de ces formations forestières (prédominance de feuillus) et l'étagement forestier (davantage de résineux au sud) ;
- des valeurs de biomasse différenciées entre feuillus et résineux, ces derniers ayant des valeurs globalement plus faibles que les résineux.

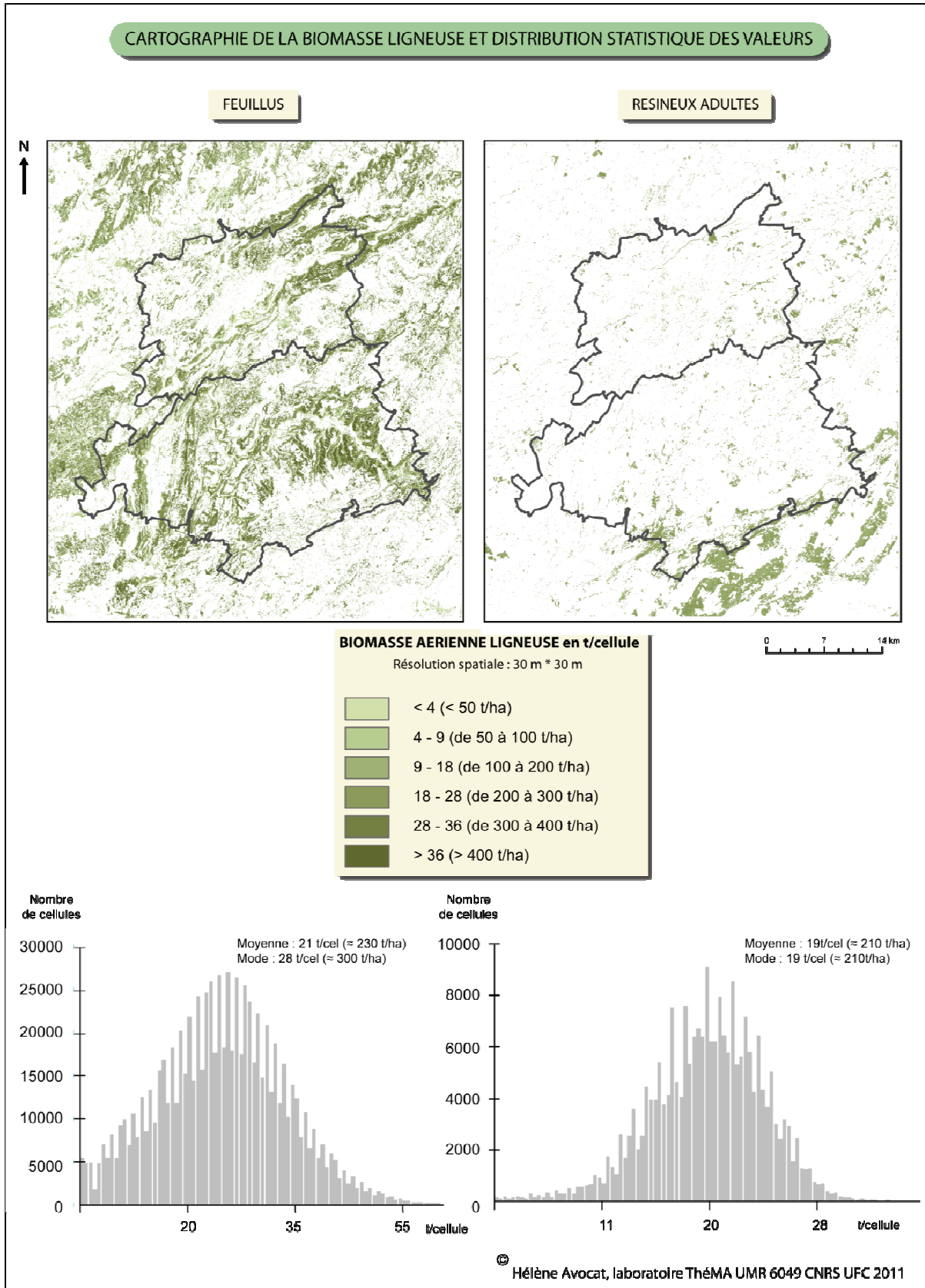


Figure 114 : biomasse aérienne des peuplements feuillus et résineux adultes

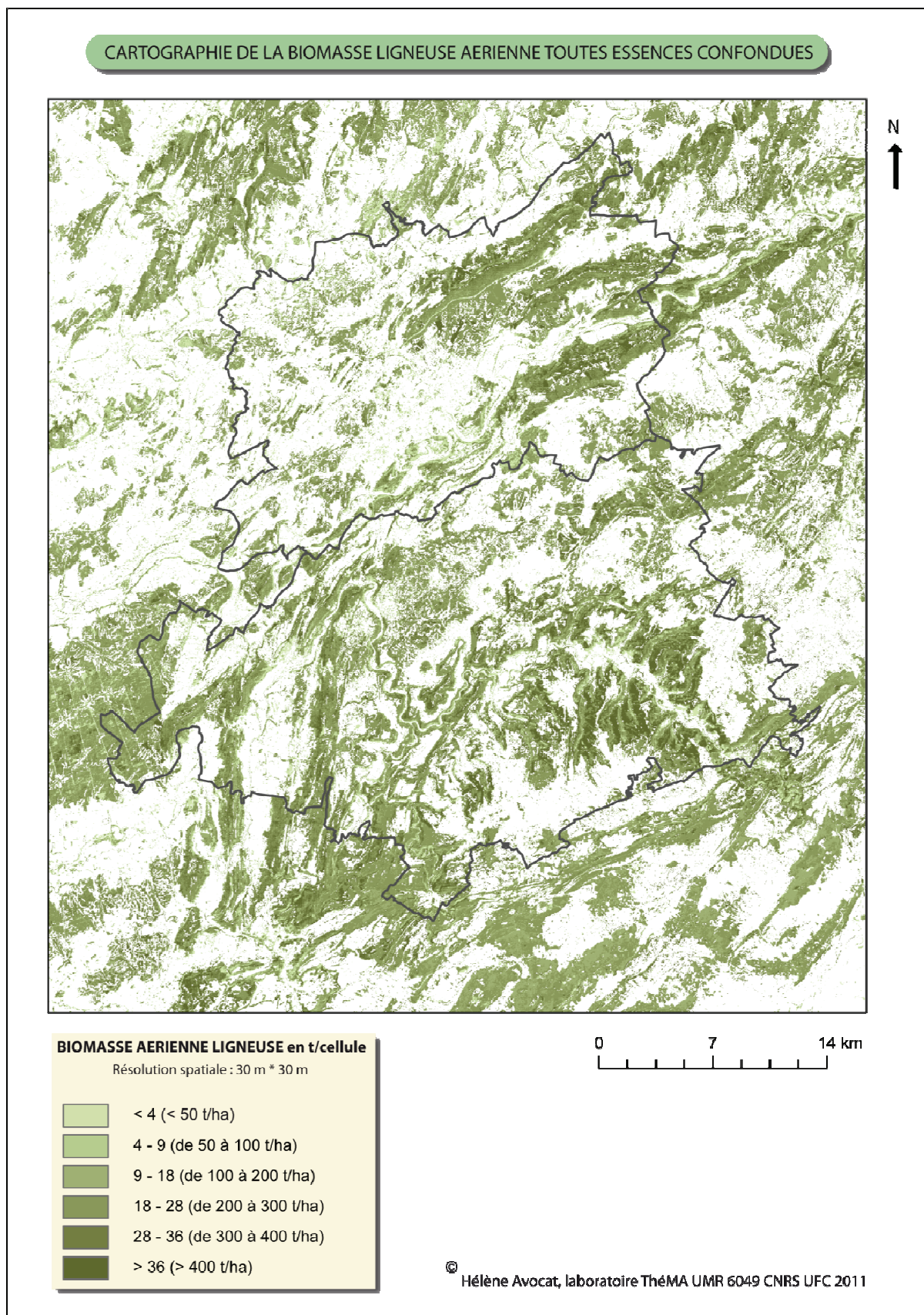


Figure 115 : cartographie de la biomasse aérienne

La figure 115 témoigne de l'hétérogénéité du couvert forestier et de la biomasse ligneuse aérienne, tant au niveau de la répartition spatiale que de la distribution statistique des valeurs. Le sud du pays Loue-Lison (notamment au niveau des vallées encaissées) est caractérisé par des contrastes dans la biomasse cartographiée, montrant que nous n'avons pas pu totalement nous affranchir des biais inhérents à la topographie et à l'exposition. Si l'on se réfère à notre modèle, il y aurait dans cette zone environ 1,3 millions de tonnes de biomasse ligneuse située dans des cellules en dehors des espaces forestiers à proprement parler (arbres isolés, bosquets, haies, etc.). Bien entendu il faut considérer ce résultat avec précaution compte tenu des incertitudes liées aux valeurs de références qui nous ont servi au calibrage du modèle et aux limites inhérentes à l'imagerie satellitaire. De plus, il convient de souligner qu'il s'agit là de la biomasse aérienne globale, et non du potentiel énérgisable, qui lui, sera minoré en fonction de la compartimentation de la biomasse et des contraintes de mobilisation.

Conclusion du chapitre 9

Intérêts et limites du modèle

L'augmentation importante du nombre de chaufferies bois et *a fortiori* de la demande en plaquettes forestières dans le secteur collectif/tertiaire nécessite une connaissance précise des potentiels ligneux valorisables à des fins énérgétiques. L'estimation et la cartographie de la biomasse aérienne sont une étape préalable à la définition de la fraction énérgisable. Des modèles d'estimation de biomasse sont élaborés en biologie végétale, étudiant la relation entre biomasse et indices dérivés de l'imagerie satellitaire (indices de végétation, indice de surface foliaire, etc.).

L'objectif de notre démarche était dans un premier temps d'exploiter la relation NDVI/biomasse pour arriver à cartographier, sous forme de modèle cellulaire ou raster, la biomasse ligneuse aérienne pour l'ensemble du couvert boisé, forestier et non forestier. Or, les données d'inventaire de l'IFN ne nous permettent pas d'effectuer une telle cartographie en raison de l'impossibilité de générer une interpolation spatiale des données des placettes ponctuelles d'inventaire et les publications scientifiques ne font pour l'heure pas état d'une telle entreprise appliquée à un terrain d'étude français. Il s'agit donc d'une démarche originale et novatrice, bien que la corrélation entre indice de végétation et biomasse ait déjà été mise en évidence par plusieurs auteurs (Luther et al, 2006 ; Warren et al, 1992 ; Bencherif, 2009 ; Hall et al, 2006 ; Roy et Ravan, 1996 ; Gonzales-Alfonso et al, 2008 ; Mäkela et Pekkarinen, 2004 ; Warren et al., 1992). Ces auteurs ont établi une relation directe entre des données

dendrométriques issues de campagne de terrain et des indices de végétation, ce que nous n'avons malheureusement pas pu faire en raison de l'imprécision géographique des placettes d'inventaire. Nous avons donc calibré notre modèle en exploitant la signature radiométrique des types de peuplements et les valeurs de biomasse correspondantes issues d'une revue bibliographique. Une telle opération a pour corollaire l'introduction d'une marge d'erreur plus importante, comportant des risques de sous-estimation ou de surestimation pour certaines formations boisées. Ainsi, malgré des ajustements par l'application de facteurs permettant de corriger les effets dus à la pente, à l'exposition ou à la surface développée, il persiste des biais inhérents à l'imagerie satellitaire et aux références de biomasse. Ainsi, il est parfois impossible d'atténuer les effets d'une pente très forte et sous-exposée, dont la réponse reste faible et l'indice de végétation négatif, alors que le croisement d'autres types de données fait état de la présence de matière ligneuse. Les conditions de l'environnement (pédologie, géologie, humidité) peuvent elles aussi influencer la valeur spectrale des pixels et par conséquent la valeur de l'indice de végétation (Brun, 2004).

L'utilisation du NDVI pour des estimations quantitatives de biomasse doit ainsi être effectuée de manière précautionneuse, car le comportement de l'indice de végétation est relativement mal connu (Soudani, 2009) et « le seuil de saturation reste encore mal défini », ce qui a constitué un écueil supplémentaire lors du calibrage du modèle.

Ainsi, bien que notre modèle apporte des éléments de réponse « au besoin de planification et de supervision [...] imparfaitement rempli par les méthodes traditionnelles d'inventaires forestier, en particulier dans le domaine du volume ligneux⁹² » (Renaud, 2000), les biais inhérents à l'imagerie satellitaire et aux méthodes que nous avons dû utiliser pour le calibrage du modèle, ont pour conséquence des résultats parfois approximatifs assortis de risques de sur/sous-estimation pour certaines formations boisées. Le taillis, qui est "une forêt issue de rejets de souche ou de drageons exploitée à courte rotation (10-30 ans)⁹³" peut ainsi présenter des valeurs surestimées. Du fait de ses modalités d'exploitation (découverte périodique du sol, recepage), la maturité est atteinte plus rapidement que dans les formations de futaie. Les diamètres moindres des tiges ont pour corollaire une moindre densité des peuplements. De fait, leur inclusion dans le modèle général de biomasse feuillue peut présenter un risque de surestimation de leur biomasse aérienne. Bien entendu, nous sommes conscients de la très forte hétérogénéité de la ressource forestière (notamment au niveau des espèces, de l'âge des peuplements, ...) et des approximations véhiculées par notre modèle de régression.

⁹² Constat valable non seulement pour le volume, mais également pour la masse ligneuse.

⁹³ Source : glossaire de l'IFN

Chapitre 10

Détermination de la quantité énergisable sur la biomasse ligneuse

La biomasse ligneuse aérienne étant modélisée pour les espaces boisés forestiers et non forestiers, il faut ensuite définir la fraction énergisable de cette biomasse, dont une partie pourra être utilisée en plaquettes forestières pour l'approvisionnement des chaufferies localisées sur nos terrains d'étude. Cette exploitation ne doit pas réduire la ressource : il s'agit donc de calculer une quantité de biomasse énergisable durable, renouvelable au fil des années, afin de ne pas réduire le potentiel d'ensemble de la biomasse forestière.

Les espaces boisés étant hétérogènes et leur gestion complexe, la définition de leur potentiel dendroénergétique implique en principe de :

- connaître la biomasse aérienne ligneuse de manière exhaustive (en forêt et hors forêt) ;
- prendre en compte les contraintes technico-économiques de mobilisation de la ressource ligneuse (pente, accessibilité, méthodes de bucheronnage / débardage) ;
- connaître les caractéristiques des peuplements (âge, diamètre des tiges, essences, croissance, etc.) ;
- considérer les aspects gestionnaires et la fragmentation spatiale des espaces forestiers (qui constitue l'un des principaux obstacles à leur exploitation).
- Par ailleurs, il est impératif de prendre en compte la dimension temporelle, pour intégrer l'accroissement de la biomasse au fil des années, et les possibilités de prélèvement (éclaircies, coupes).

Cependant, dans une optique de modélisation où la composante spatiale tient une place prépondérante, il n'apparaît, ni possible, ni même pertinent (pour la reproductibilité de la méthode), de prendre en compte l'ensemble de ces paramètres (cf. 3.2 chapitre 5). Cela suppose donc d'opérer des choix et de poser un certain nombre de postulats par rapport à nos objectifs et aux résultats attendus. Le référentiel spatial utilisé est celui de la cartographie de la biomasse ligneuse aérienne totale précédemment réalisée, auxquels nous appliquons des paramètres de production/prélèvement en fonction des types d'essences, des vitesses d'accroissement (âge d'exploitabilité), et des méthodes d'aménagement (futaie, taillis, taillis sous-futaie).

L'enjeu de ce travail est d'intégrer des aspects biologiques et gestionnaires (abordés dans certains modèles développés par les forestiers⁹⁴), sans pour autant négliger la dimension spatiale et locale du phénomène. En effet, si les méthodes développées par les experts en foresterie sont très intéressantes dans la mesure où elles considèrent des aspects gestionnaires et biologiques (production courante, scénarii de gestion, disponibilité, taux de prélèvements, taux de branches, volume théorique idéal etc.), les résultats sont rarement disponibles à une échelle infra-régionale. Notre objectif est de nous inspirer de ces modèles et d'intégrer, dans la mesure du possible un certain nombre de ces contraintes. Cependant, pour les raisons développées dans le chapitre 5, nous ne considérons que l'aspect durabilité des prélèvements et pérennité de la ressource ligneuse, et non les contraintes technico-économiques.

1. Objectif et démarche globale : évaluation des prélèvements durables de biomasse ligneuse aérienne, sur un secteur donné et par type de peuplement

La figure 116 présente de façon résumée le type de table recherché et les entrées nécessaires à son élaboration. Pour un espace donné (zone d'observation), il s'agit de calculer une biomasse ligneuse aérienne énérgisable théorique et de suivre son évolution dans le temps. Ce suivi est effectué sur 200 ans (c'est-à-dire plus que la durée de vie d'une futaie de chênes conduite en production) et par pas de 5 ans (il n'est pas forcément utile de travailler avec un pas de temps annuel en raison de la lenteur des accroissements forestiers).

⁹⁴ cf. point 1 chapitre 6

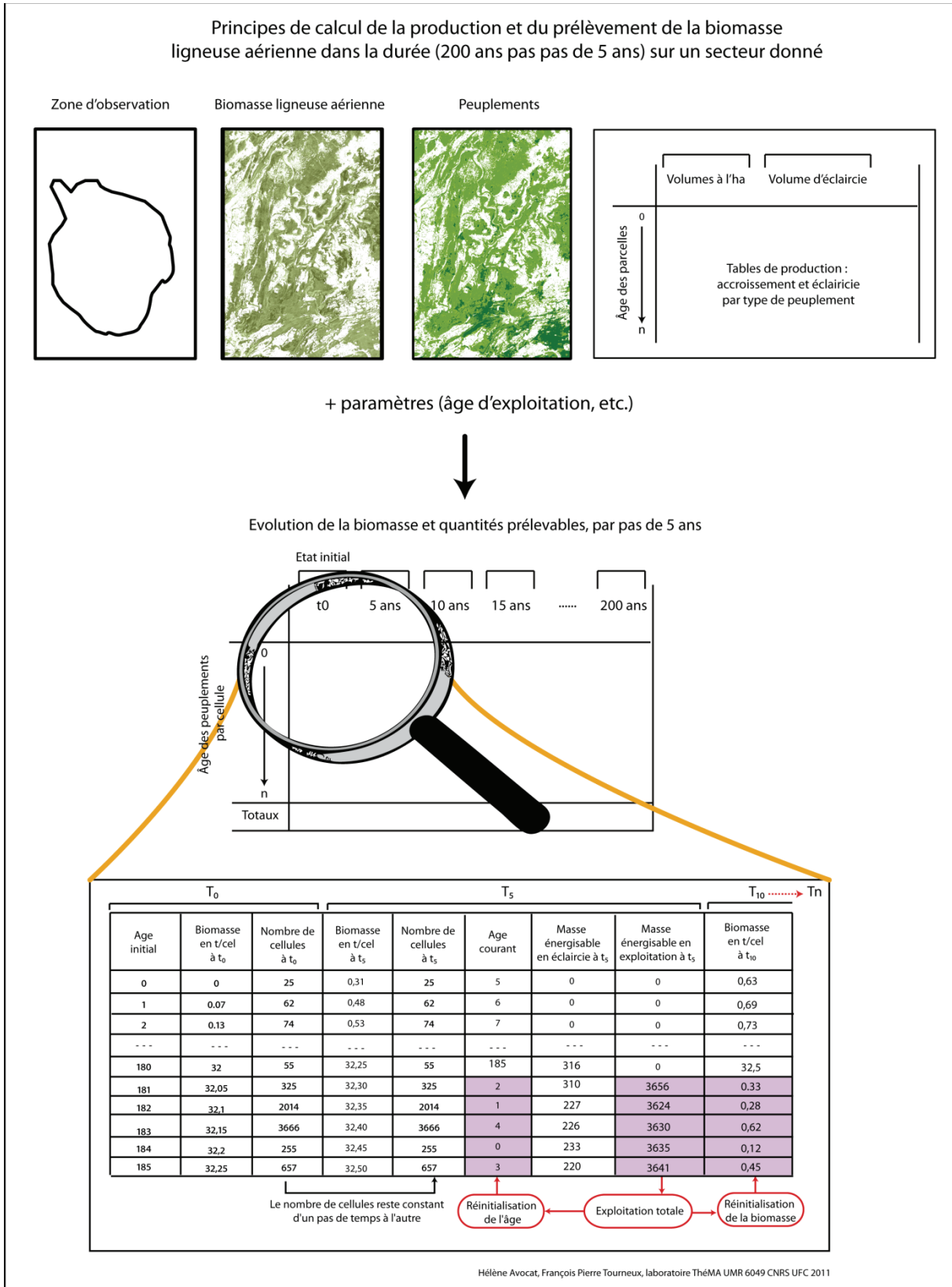


Figure 116 : démarche globale du modèle de production/prélèvement pour une zone d'observation

Le résultat final se présente sous la forme d'une table. Cette dernière sera analysée plus en détail dans une section suivante, mais nous en présentons ici les principales caractéristiques, qui permettront de comprendre pas à pas les étapes nécessaires à sa réalisation.

- Les colonnes sont organisées par pas de temps de 5 ans. Pour chacun de ces termes quinquennaux, on recherche la valeur de biomasse des différents secteurs forestiers (cellules) et leur superficie (nombre de cellules). Cette biomasse évolue dans le temps : elle augmente par accroissement biologique, mais cet accroissement est modéré par la pratique d'éclaircies (qui produisent du bois d'œuvre ou du bois-énergie) ou par des coupes terminales (qui offrent les mêmes produits). La part énergisable de ces productions est calculée à chaque étape.
- Les lignes représentent l'âge initial des arbres peuplant les « cellules forestières », par exemple de 0 à 185 ans dans le cas présenté en exemple, celui des futaies de feuillus comportant quelques vieux sujets. Pour chaque étape quinquennale, l'âge des « cellules forestières » est incrémenté de 5 ans, sauf lors des coupes terminales (où l'âge revient à 0). Nous verrons que l'âge initial est, en fait, déduit de la biomasse, et réparti de façon continue par désagrégation.

Ce tableau a donc comme originalité de présenter du temps en ligne (âge des peuplements au temps initial) et en colonne (étape d'évolution et de production par pas de 5 ans). La marge inférieure du tableau (« Totaux » dans la partie centrale de la figure 116) permet de suivre, par pas quinquennal, l'évolution de la biomasse ligneuse aérienne énergisable théorique, au-delà de laquelle l'espace considéré ne pourrait plus pourvoir de façon endogène à ses approvisionnements.

Notons que l'évaluation de cette masse énergisable est calculée par un modèle.

- Elle résulte donc d'une abstraction et d'une simplification.
- Elle dépend d'un ensemble de règles définies ad hoc (par exemple la masse ligneuse totale prélevée chaque année est calculée de telle façon que la masse ligneuse totale ne diminue pas, en gage de durabilité) et de paramètres (facteurs d'expansion, âge minimal d'exploitation etc.).
- Enfin elle fournit des résultats maximaux : tous les espaces boisés et arborés sont considérés comme exploitables sans distinction foncière, restriction environnementale ou autre facteur limitant.

Elle repose sur les quatre sources suivantes.

- La couverture matricielle représentant la biomasse aérienne ligneuse actuelle à t_0 .
- Les grands types de peuplement, qui sont supposés perdurer sans changement, ce qui est une pure hypothèse : pas de défrichement, pas de changement de taillis à futaie ou d'enrésinement, ...
- Les valeurs d'accroissement, par âge et par peuplement, assorties de valeurs d'éclaircies et de coupes finales, dérivées des tables de production publiées en 1984 par Noël Decourt (Decourt, 1984).
- La définition de la zone d'étude, suffisamment vaste, sur laquelle il sera possible d'estimer une quantité de bois prélevable de façon durable, c'est-à-dire sans diminution de la biomasse globale (donc avec un accroissement de la biomasse supérieur ou égal aux prélèvements). Cette zone doit être suffisamment vaste pour gommer les aspects particuliers dus aux caractéristiques très locales du couvert boisé (jeunes parcelles).

Les parties suivantes présentent la mise en œuvre de ce modèle, en abordant successivement pour les différents peuplements :

- l'accroissement du stock ligneux par production biologique, les rythmes d'éclaircie et l'âge d'exploitabilité ;
- les règles allométriques utilisées (facteurs d'expansion) ;
- les modalités de calcul de la masse énergisable sur la masse prélevée.

Enfin, les deux dernières rubriques abordent successivement :

- 1) la mise en œuvre de l'ensemble par une application programmée ad hoc ;
- 2) les résultats de ce modèle pour le Pays Loue-Lison et la CAGB.

2. Masse énergisable durablement prélevée en futaie

Chaque pixel boisé peut être caractérisé par un âge moyen (déduit de la biomasse), une essence majoritaire (que l'on connaît par croisement avec la cartographie des peuplements forestiers de l'IFN), et un régime forestier (taillis ou futaie). L'ensemble de ces caractéristiques influe sur l'accroissement (productivité ligneuse) et détermine l'âge d'exploitabilité théorique des cellules (c'est-à-dire leur maturité pour l'exploitation).

2.1. Accroissement du stock ligneux par production biologique, les rythmes d'éclaircies et l'âge d'exploitabilité

La productivité est un paramètre de croissance ligneuse indispensable pour estimer la durabilité des prélèvements. La productivité biologique désigne la vitesse de production, c'est-à-dire la quantité de matière végétale produite, qu'il s'agisse d'organes souterrains, de feuilles, de fruits ou de bois et comprend ainsi, pour une année : les rameaux nouveaux et le bois formé sur le cerne extérieur de la tige et des branches anciennes. Elle s'exprime en tonnes (ou en m³) de matière sèche par unité de surface et par unité de temps (généralement en tonne par hectare et par an).

2.1.1. Des rythmes d'accroissement différents selon les essences

Tout comme pour les données de biomasse, nous avons effectué une revue bibliographique des différentes données de production ligneuse publiées dans la littérature scientifique en foresterie et biologie végétale. Ces valeurs sont répertoriées de façon détaillée, par essence et par âge dans l'annexe 7.

De manière générale, le chêne est moins productif que le hêtre, avec une productivité moyenne de 8,8 t/ha/an contre 12,2 t/ha/an. Les références de productivité en forêt mixte sont en revanche extrêmement difficiles à trouver, et la seule que nous ayons (Liu, 1993), apparaît un peu faible par rapport aux différentes valeurs de feuillus et de résineux issues de la revue bibliographique (effet des conditions stationnelles). La productivité des pins et sapins est globalement plus faible (moins de 8 t/ha/an) que pour les épicéas et douglas (pour lesquels nous disposons de plus de données) et qui sont souvent supérieurs à 10 t/ha/an. Ces données ont généralement pour défaut de chiffrer des productions moyennes annuelles, alors que l'accroissement a pour forte caractéristique de varier considérablement selon l'âge des sujets (souvent lent au départ, plus rapide ensuite avant de ralentir considérablement avec la vieillesse ; cf. figures 117 et 118). Nous nous référons par conséquent aux tables de production de N. Decourt (figure 119), plus détaillées.

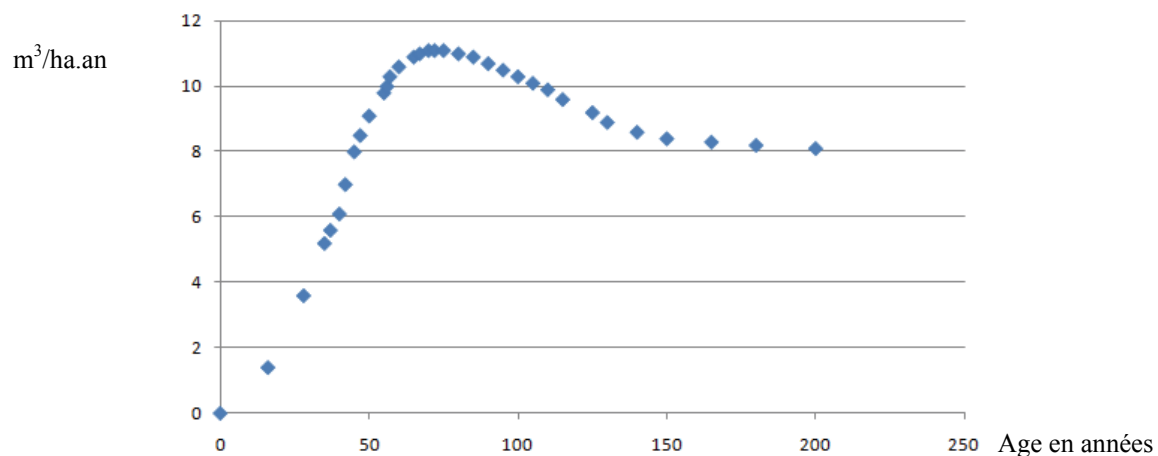


Figure 117 : accroissement ligneux selon l'âge des peuplements (hêtre)

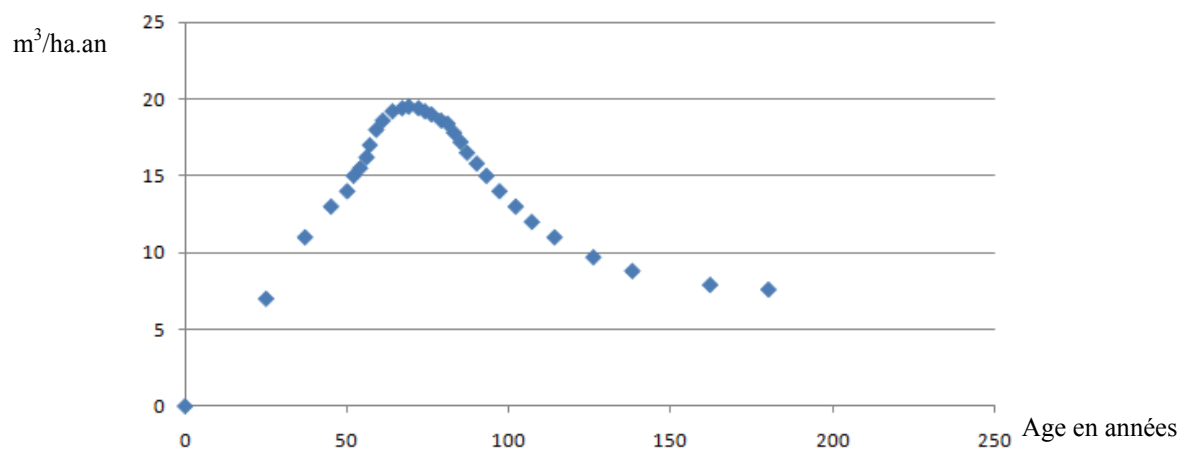


Figure 118 : accroissement ligneux selon l'âge des peuplements (sapin)

Source : d'après Decourt (1984), données d'accroissement exprimées en m³/ha/an

HÊTRE (d'après SCHOBBER-1972)

Age ans	PEUPLIEMENT APRÈS ÉCLAIRCE					
	Hauteur dominante (m)	Hauteur moyenne (m)	Nombre de tiges	Diamètre moyen (cm)	Volume affiné moyen (m³)	Surface terrestre (m²)
30	8,5	7,9	7326	4,5	-	13,6
35	10,5	9,9	4310	6,8	0,03	15,7
40	12,5	12,1	2819	8,9	0,03	17,5
45	15,0	14,3	2002	11,0	0,05	18,9
50	17,3	16,3	1491	13,1	0,08	20,1
55	18,9	18,2	1153	15,2	0,15	21,0
60	20,6	19,9	927	17,3	0,21	21,8
65	22,1	21,4	768	19,3	0,29	22,5
70	23,4	22,7	643	21,4	0,39	23,1
75	24,8	24,1	545	23,4	0,50	23,5
80	26,1	25,4	468	25,5	0,63	23,9
85	27,2	26,5	406	27,5	0,77	24,2
90	28,4	27,7	355	29,6	0,93	24,4
95	29,4	28,7	313	31,6	1,10	24,6
100	30,4	29,7	278	33,7	1,30	24,8
105	31,3	30,6	248	35,8	1,52	25,0
110	32,2	31,5	222	38,0	1,76	25,1
115	33,0	32,3	200	40,1	2,01	25,2
120	33,7	33,0	181	42,2	2,29	25,3
125	34,4	33,7	164	44,4	2,59	25,4
130	35,0	34,3	149	46,7	2,92	25,5
135	35,6	34,8	136	48,9	3,26	25,6
140	36,0	35,3	124	51,3	3,65	25,6
145	36,5	35,8	113	53,8	4,08	25,7
150	37,0	36,3	103	56,4	4,55	25,7

Classe 7 - Accroissement moyen à 100 ans : 7 m³/ha/an

NORD-EST (suite)

Nombre de tiges	Diamètre moyen équaire (cm)	Volume affiné moyen (m³)	Volume (m³)	Volumen totaux (m³)	% entravé et défectueux	Production totale (m³)	Accroissement courant (m³/an)	Accroissement moyen (m³/an)	Age ans
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3016	3,5	-	-	-	-	44	-	-	30
1491	5,0	-	-	-	-	74	6,1	1,3	35
817	6,9	0,01	7	7	6,1	114	8,0	1,9	40
511	8,9	0,03	14	21	13,1	130	9,1	2,5	45
338	11,1	0,06	20	41	19,5	210	10,0	3,2	50
226	13,4	0,11	24	65	24,7	253	10,6	3,8	55
159	15,8	0,18	28	93	29,2	318	10,9	4,4	60
125	17,8	0,29	31	124	33,2	373	11,1	5,3	65
98	19,9	0,34	33	157	36,6	429	11,1	5,7	70
77	22,3	0,46	35	192	39,6	485	11,0	6,1	75
62	24,5	0,56	36	228	42,3	539	10,9	6,3	80
51	26,4	0,71	36	264	44,5	593	10,7	6,6	85
42	28,4	0,86	36	300	46,4	646	10,5	6,8	90
35	30,4	1,03	35	336	48,1	698	10,3	7,0	95
30	32,3	1,20	36	372	49,7	748	10,1	7,1	100
26	34,1	1,36	36	408	51,1	798	9,9	7,3	105
22	36,4	1,64	36	444	52,5	846	9,6	7,4	110
19	38,6	1,89	36	480	53,7	894	9,4	7,5	115
17	40,1	2,06	35	515	54,8	940	9,2	7,5	120
15	41,6	2,17	34	549	55,8	984	8,9	7,6	125
13	44,5	2,62	34	583	56,8	1027	8,7	7,6	130
12	45,9	2,63	34	617	57,7	1070	8,6	7,6	135
11	47,6	2,69	34	651	58,5	1112	8,5	7,7	140
10	49,2	3,40	34	685	59,4	1154	8,4	7,7	145
									150

Figure 119 : exemple de table de production (hêtre). Extrait de N. Decourt (1984)

Les tables de production décrivent la croissance des peuplements forestiers d'une essence donnée, dans une région donnée, par classes de productivité. Les données indiquent les volumes du peuplement principal (peuplement restant sur pied après éclaircie), des produits enlevés en éclaircie, d'accroissement et de production. Les lignes de la table correspondent à l'âge des sujets et donc aux années de passage en éclaircie (cf. **figure** 119). Les tables indiquent par ailleurs les données morphologiques (hauteur, volume etc.) (Decourt, 1984). Les classes de productivité correspondent à la mesure de la performance d'un peuplement forestier (conditions édaphiques). Nous avons choisi de travailler à partir de classes de productivité moyennes.

2.1.2. Coupes et accroissement

D'après les figures 117 et 118, la productivité croît en général assez vite lorsque les peuplements sont jeunes, pour atteindre un palier maximum (variable selon les essences, ici aux alentours de 70 ans pour le hêtre et le sapin), et ensuite décroît de manière plus ou moins rapide. La rotation des coupes doit être cohérente avec la vitesse d'accroissement des arbres (FOGEFOR Ardennes, 2009). Les peuplements anciens ont une croissance faible et *a fortiori* une moindre productivité (Ranger et al., 1996 ; Decourt, 1967, 1971 et 1984). Dans notre modèle, nous exploitons prioritairement les peuplements âgés, ayant le plus fort capital de bois sur pied et le plus faible accroissement (cf. ci-après les règles de prélèvement pour les différents types de peuplements).

2.1.3. Âge d'exploitabilité

L'exploitabilité correspond à l'état d'un peuplement dont une partie des arbres a atteint une valeur (liée aux dimensions) permettant leur récolte. L'âge d'exploitabilité correspond donc à un arbre dont l'âge et le diamètre présentent une valorisation optimale, et est lié au rythme d'accroissement de l'arbre. Ce concept d'âge d'exploitabilité est étroitement lié à celui de révolution, qui se définit comme "le nombre planifié d'années séparant la formation ou la régénération d'un peuplement forestier et le moment où ce même peuplement est abattu aux fins de récolte finale" (glossaire FAO). Le tableau 19 synthétise les âges d'exploitabilité des principales essences. Un tableau détaillé figure dans l'annexe 6.

Type de peuplement /essence	Âge d'exploitabilité en années	Source
Taillis de chêne	25 à 30	CRPF Poitou-Charentes
Chêne sessile, chêne pédonculé	100 à 150	CRPF Poitou-Charentes FOGEFOR Ardennes 2009
Frêne	60 à 75	CRPF Poitou-Charentes FOGEFOR Ardennes 2009
Feuillus précieux	60	FOGEFOR Ardennes 2009
Chêne rouge d'Amérique, frêne, grands érables, merisier, noyer	50 à 70	CRPF Poitou-Charentes
Peuplier	12 à 25	CRPF Poitou-Charentes
Hêtre	80 à 120 (max)	CRPF/Document de gestion de la forêt communale de Fontain/ONF/Ballu J.- M., 2004
Douglas, autres pins (futaie régulière bois d'oeuvre)	50 à 70	CRPF Poitou-Charentes
Douglas (futaie régulière petit bois d'oeuvre et bois d'industrie)	40 à 45	CRPF Poitou-Charentes

Tableau 19 : âge d'exploitabilité de différentes essences feuillues et résineuses

Selon les essences, le régime (taillis ou futaie) et les objectifs de production (bois d'œuvre, bois de trituration ou bois-énergie), les âges d'exploitabilité diffèrent sensiblement. Ainsi, une futaie de chêne à finalité de bois d'œuvre aura un âge d'exploitabilité beaucoup plus élevé qu'un taillis exploité à des fins énergétiques.

2.2. Des prélèvements par éclaircie et par exploitation

Très rares sont les futaies régulières et homogènes, avec une classe d'âge et une essence par peuplement, et des productivités stables dans le temps. Les futaies sont souvent irrégulières et hétérogènes, caractérisées par plusieurs strates d'âge au sein desquelles les arbres croissent de manière différente. Ce qui est vrai pour une futaie particulière l'est encore bien davantage pour l'ensemble des futaies d'une région : nous nous trouvons donc devant une forte hétérogénéité d'âges, d'essences, de densités, de conduites (taillis sous futaie, futaie...). Nous acceptons de simplifier cette hétérogénéité en ne retenant que deux facteurs de différenciation : l'âge et le type de peuplement (feuillu, résineux, mixte). Nous considérons que ces futaies sont toutes gérées en éclaircies régulières et coupes finales.

2.2.1. Accroissement et prélèvements en éclaircie

En futaie et en taillis sous futaie, les éclaircies sont des coupes visant à favoriser le développement d'arbres présentant un intérêt (le plus souvent économique) par élimination d'arbres jugés moins intéressants. Les éclaircies commencent dès que les arbres atteignent un diamètre intéressant (rarement avant 40 ans pour les essences feuillues), et se poursuivent tout au long de la vie du peuplement. Nous avons synthétisé, à partir des tables de production de N. Decourt et par type de peuplement, des valeurs d'accroissement et d'éclaircie, suivant l'âge des sujets (cf. table d'accroissement/éclaircie du hêtre, utilisée pour les futaies de feuillus, présentée par la figure 119). Les tables d'accroissement sont généralement organisées par l'entrée âge, ce qui demande une adaptation de notre part (en effet, nous connaissons la biomasse par cellule sur nos espaces forestiers, non l'âge). Nous avons choisi d'utiliser la correspondance entre âge et biomasse (telle qu'elle est établie dans les tables d'accroissement (cf. figure 119, exemple de table de Decourt), afin d'estimer, pour chaque valeur de biomasse aérienne ligneuse en t/cellule, un âge correspondant, ainsi que les valeurs d'accroissement et d'éclaircies correspondantes. Ce va et vient entre âge et biomasse sera d'autant plus utile qu'il nous faudra par la suite estimer des valeurs de biomasse en fonction du vieillissement de nos « cellules forestières » (cf. partie basse de la figure 116).

Colonne A	Colonne B	Colonne C	Colonne D	Colonne E	Colonne F	Colonne G	Colonne H
Biomasse en t/cel	Biomasse en m3/ha	Age suivant biomasse	Acc courant selon âge en m3/ha/an	Acc courant en t/cel/an	Eclaircie à 5 ans en m3/ha	Eclaircie à un an en m3/ha	Eclaircie à un an en t/cell.an
0	0	0	0	0	0	0	0
1	16	16	1.4	0.089468947	0	0	0
2	31	28	3.6	0.230063006	0	0	0
3	47	35	5.2	0.332313231	0	0	0
4	63	37	5.6	0.357875788	0	0	0
5	78	40	6.1	0.389828983	0	0	0
6	94	42	7	0.447344734	0	0	0
7	110	45	8	0.511251125	7	1.4	0.09
8	125	47	8.5	0.54320432		1.4	0.09
9	141	50	9.1	0.581548155	14	2.8	0.18
10	156	55	9.5	0.607110711		2.8	0.18
11	172	56	10	0.639063906	20	4	0.26
12	188	57	10.3	0.658235824		4	0.26
13	203	60	10.6	0.677407741	24	4.8	0.31
14	219	65	10.9	0.696579658	28	5.6	0.36
15	235	67	11	0.702970297		5.6	0.36
16	250	70	11.1	0.709360936	31	6.2	0.4

Tableau 20 : extrait de table d'accroissement/éclaircie (hêtre)

La colonne A représente des valeurs de biomasse aérienne, données dans la carte de biomasse aérienne ligneuse (en t/cellule). Les données issues des tables de production de N. Decourt étant exprimées en m³/ha, nous effectuons une conversion afin de pouvoir les exploiter (colonne B), en utilisant une densité moyenne (ex : 0,71 pour le hêtre).

La même conversion est appliquée aux valeurs d'accroissement courant et d'éclaircie, converties en t/cellule.an pour correspondre aux unités de biomasse du référentiel initial. Les valeurs d'accroissement et d'éclaircie présentées dans cette table sont données par unité de biomasse (t/cellule, colonne A), et non par classe d'âge comme le font les tables de production. Ces valeurs d'accroissement et d'éclaircie sont donc estimées par interpolation à partir des valeurs publiées par classe d'âge.

2.2.2. Prélèvements en exploitation

La différence entre la production totale et le volume du peuplement après éclaircie donne le volume de bois récoltable *in fine*. L'exploitation finale est supposée avoir lieu à un moment optimal (âge d'exploitabilité théorique, coïncidant avec une baisse de la productivité).

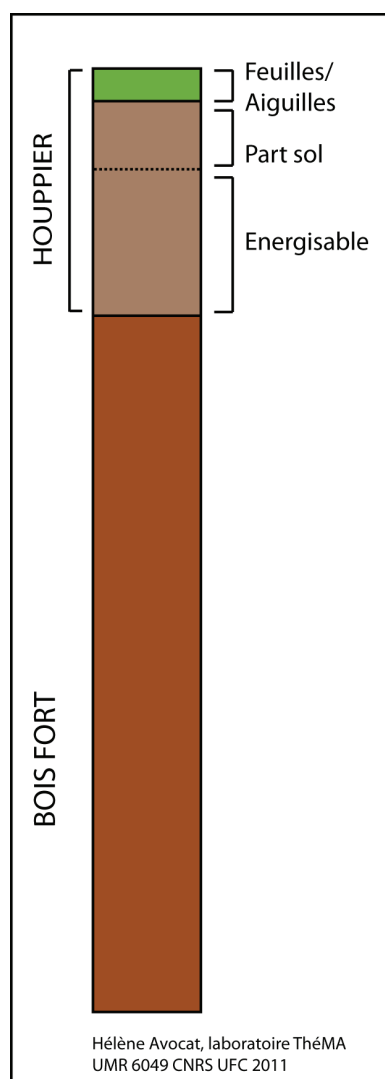
Dans notre modèle, les sujets les plus âgés sont exploités en priorité. La règle de base est que l'on n'exploite pas plus que la biomasse accrue, de manière à ce que le stock de bois initial ne diminue pas. Par simplification, chaque classe d'âge, lorsqu'elle est exploitable, est exploitée en totalité, sur une période quinquennale. Les surfaces exploitées sont toujours dévolues à la production forestière, leur « âge » est simplement ramené à une valeur comprise entre 0 et 4 ans (tirée au hasard), pour simuler le déroulement des exploitations sur l'intervalle quinquennal. Par ailleurs, nous avons choisi de fixer un âge maximal au delà duquel les coupes sont systématiquement pratiquées (exemple : 180 ans en futaie de feuillus). Cette adaptation a pour but de contraindre l'outil de calcul à simuler la coupe de parcelles trop vieilles (donc à accroissement réduit), la cartographie de la biomasse ligneuse aérienne en ayant fait apparaître un petit nombre de parcelles (comportement du NDVI ?).

2.3. Déterminer la fraction énergisable sur les prélèvements en futaie

Une fois les valeurs de prélèvement déterminées pour chaque âge de peuplement, il faut estimer la fraction énergisable de cette biomasse. Au vu des diamètres des arbres prélevés en éclaircie, nous supposons que le bois fort tige est valorisable en bois d'œuvre ou en bois d'industrie comme lors des exploitations finales. Par conséquent la fraction énergisable correspond à la biomasse brune du houppier, dont on soustrait la part de rémanents allouée au sol, pour l'ensemble des prélèvements.

Par la régression NDVI/biomasse, nous avons déterminé une biomasse de bois fort. En la multipliant par le facteur d'expansion, nous obtenons la biomasse aérienne totale. La biomasse aérienne totale est donc égale à la somme de la biomasse bois fort, de la biomasse du houppier et de la biomasse foliaire. La part foliaire est estimée à 3% du total pour les feuillus (d'après le modèle de compartimentation de biomasse du service canadien des forêts⁹⁵). Par ailleurs, la fraction énergisable est issue des houppiers. En somme, pour une biomasse de bois fort = 100, et avec un facteur d'expansion de 1,3 on a :

- Une biomasse aérienne de 130 (biomasse bois fort * facteur d'expansion)
- Une biomasse houppier et feuilles = 30 (biomasse totale – biomasse bois fort)
- Une biomasse de feuille de 3,9 (3% de la biomasse totale)
- Une biomasse de houppier (branches) de 26.1 (biomasse houppier totale – biomasse de feuilles)



Ce qui donne un ratio de houppier sur biomasse aérienne totale de 0.20 (20%), et un ratio de houppier sur feuilles de 6,7 (cf. figure 120). Ce dernier ratio est invariable, puisque l'on accepte une relation fixe entre la masse du houppier et celle des feuilles). On a donc :

$$ME = ((\text{Mass_pre} * (\text{BEF} - 1) - (\text{Mass_pre} * \text{BEF} * \text{Pfeuille})) * \text{PSol}, \text{ avec}$$

- ME = Masse énergisable,
- Mass_pre = masse de bois fort prélevé en éclaircie ou en exploitation,
- BEF = facteur d'expansion de biomasse du tronc au volume de biomasse aérienne totale
- Pfeuille = part de feuille en % de la biomasse aérienne
- et PSol = part de rémanent à laisser au sol.

Figure 120 : compartimentation de l'arbre, et part ligneuse énergisable (proportions de biomasse aérienne)

⁹⁵ Outil de calcul disponible à l'url : <http://www.cfl.scf.mcan.gc.ca/calculateurs-calculators/biomasse-fra.asp>, consulté le 19 août 2011.

Mass_pre*BEF représente la biomasse aérienne totale, masse foliaire comprise. Le premier terme de l'équation donne la masse totale du houppier et le deuxième terme la masse foliaire.

Ce calcul est effectué pour chaque tranche d'âge (ou valeur de biomasse). En multipliant le résultat de cette équation par le nombre de cellules concernées, on obtient ainsi la masse énérgisable en éclaircie pour chaque valeur de biomasse à l'instant t_n .

La restitution finale se fait ensuite par pas de 5 ans, c'est-à-dire que, pour chaque cellule d'âge ou de valeur de biomasse initiale, on donne l'âge courant à t_{+5} , t_{+10} , t_{+15} etc., le nombre de cellules (count), la masse énérgisable en éclaircie et la masse énérgisable en exploitation.

3. Les formations de taillis : des coupes rases, une forte proportion de biomasse énérgisable

Les taillis sont des formations boisées "destinées à produire des arbres de faibles dimensions, à être exploitées par conséquent à de courts intervalles, et dont la régénération est surtout basée sur la production des rejets de souches et des racines" (Mouillefer, 1904). Ce sont des peuplements essentiellement feuillus (Bastien, 2002), composés de souches et de drageons, ayant tous le même âge (CRPF, 2007). Les produits sont toujours de petite dimension, et ne sont par conséquent pas exploitables à des finalités de bois d'œuvre. Ils constituent de fait une ressource préférentielle pour les plaquettes forestières, le bois-bûche, et dans une moindre mesure le bois de trituration (pâte à papier, panneau de particules, ...).

Concernant la gestion et les règles de culture du taillis, il s'agit de coupes à blanc à intervalles réguliers (figure 121) appelés révolution, compris entre 20 et 50 ans selon les essences (CRPF, 2007).

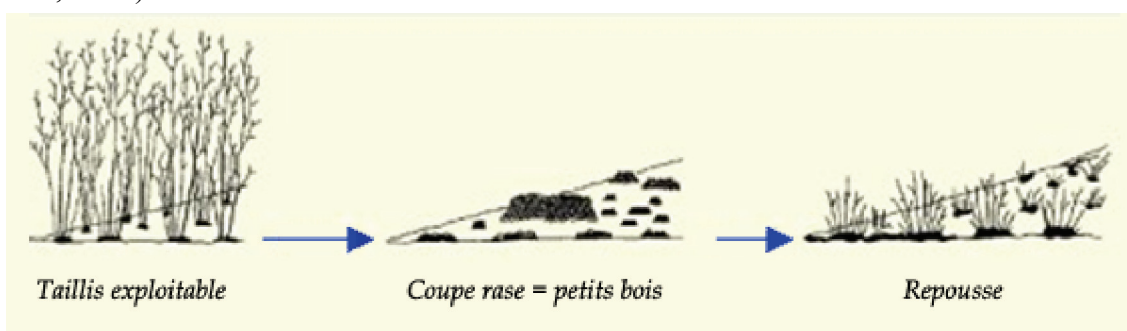


Figure 121 : cycle du taillis

Source : CRPF (2007)

La biomasse ligneuse est nettement moindre qu'en futaie et la croissance des peuplements est beaucoup plus rapide, avec un accroissement maximum à 5 ans (cf. figure 122).

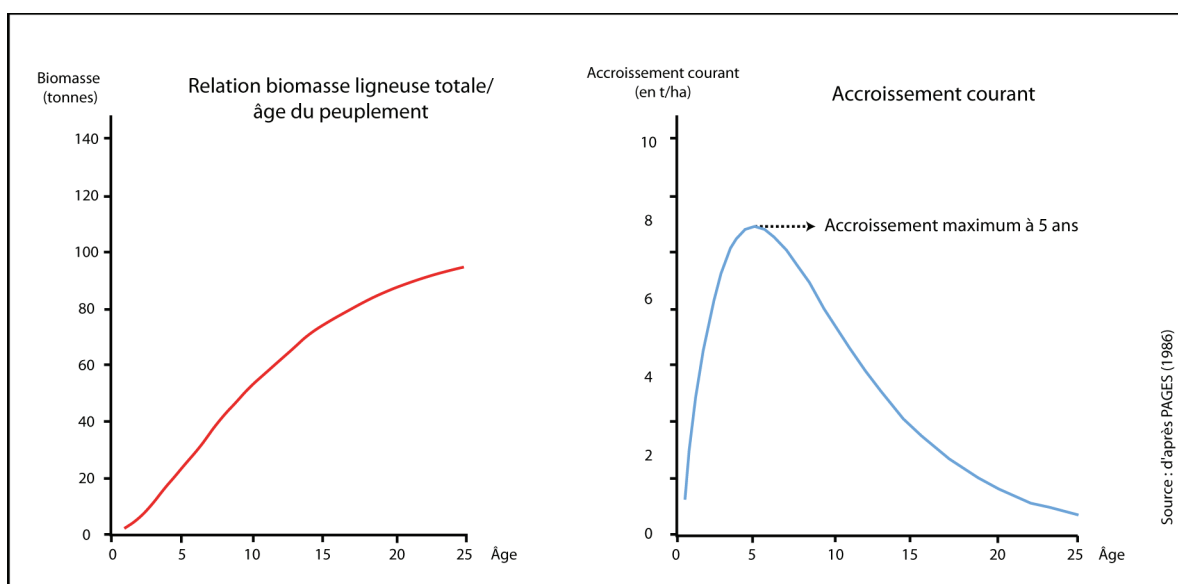


Figure 122 : accroissement courant et biomasse selon l'âge du peuplement

Exemple du taillis de robinier

Le tableau de l'annexe 6 renseigne sur l'âge d'exploitabilité et les intervalles entre coupes rases en fonction de l'essence dominante. En raison de leur forte croissance et des faibles diamètres des tiges exploitées, l'âge d'exploitabilité est nettement moindre qu'en futaie. Le respect de l'intervalle entre les coupes est très important, car des coupes trop rapprochées épuisent les sols et des coupes trop espacées fatiguent les souches (CRPF, 2007).

Bien que d'autres traitements que les coupes à blanc soient possibles, nous avons posé l'hypothèse que les taillis étaient exploités de cette manière selon des révolutions d'une trentaine d'années. Considérant les différentes données d'exploitabilité (annexe 6), nous considérons qu'une révolution de 20 ans est à même de répondre à des taillis de feuillus indifférenciés ainsi qu'aux espaces boisés hors cartographie IFN. Il n'y a pas d'éclaircies, et la totalité du bois exploité est considéré comme énergisable, du fait du faible diamètre des tiges. Les biomasses de taillis ayant été calibrées avec les feuillus, nous appliquons les mêmes paramètres que pour la futaie de feuillus en ce qui concerne les facteurs d'expansion de biomasse et la proportion de biomasse foliaire.

Nota bene : Les valeurs initiales de biomasse sont surestimées du fait du calibrage avec les feuillus. Afin de corriger ces surestimations, les valeurs de biomasse ont été recalculées avec un ratio de correction, correspondant au maximum de biomasse feuillue à 30 ans (correspondant à l'âge d'exploitabilité du taillis) sur la valeur maximum estimée par le modèle de régression de biomasse feuillue. Ce ratio de correction est de 0,17 (ce qui signifie que la biomasse des taillis équivaut à 17 % de la biomasse estimée par le modèle). Cette procédure permet de ramener les résultats de biomasse des taillis à des valeurs cohérentes pour ce type de formation boisée.

4. Les arbres hors forêt : un potentiel énergisable intéressant, mais de fortes incertitudes

4.1. Incertitudes sur la biomasse

Lors du calibrage du modèle de biomasse, nous n'avons pas isolé les arbres hors forêt ou situés en lisière de forêt. Or, nous avons vu que ces derniers sont très souvent caractérisés par des pixels mixtes. Il y a donc une forte proportion de pixels présentant de faibles valeurs de biomasse lors de la régression NDVI/ biomasse. Ces valeurs de biomasse ayant été réévaluées par défaut à 22 t/ha (comme pour les feuillus précédemment), cela signifie qu'il persiste une incertitude sur ces valeurs. Notre réponse a été de répartir ces valeurs de manière homogène dans l'histogramme de fréquence de distribution de la biomasse ligneuse aérienne.

4.2. Une morphologie particulière

A cela s'ajoute une morphologie (compartimentation) sensiblement différente des arbres de futaie, avec une moindre masse de bois fort, et davantage de houppier, et donc une forte part foliaire. Pour un même niveau de signal, la part de bois est plus faible. Afin d'estimer cette compartimentation, nous avons raisonné de la manière suivante.

- a) L'indice de végétation (IV) reflète l'activité chlorophyllienne. C'est donc la masse foliaire qui influe le plus sur valeurs d'IV. Ceci est vrai autant pour les arbres isolés que pour les futaies.
- b) La masse foliaire est liée à celle du houppier. Cette relation n'est pas forcément linéaire, et c'est une hypothèse, mais l'observation visuelle corrobore cette hypothèse.
- c) Les arbres forestiers ont des houppiers (et donc une masse foliaire) peu développés par rapport à leur masse totale : en futaie, le houppier existe surtout dans la partie supérieure de l'arbre (là où les feuilles peuvent recueillir le plus de lumière). Dans les futaies, la biomasse aérienne est donc largement dans les troncs. Les arbres isolés, par contre, peuvent avoir un houppier plus développé, avec une importante masse foliaire au bout de ces branches, la lumière étant accessible sur une grande partie du pourtour de l'arbre. La biomasse sera donc beaucoup moins concentrée dans les bois forts, et nettement plus dans les branches et les feuilles.

Partant de ces constats et de ces hypothèses, nous avons tenu le raisonnement suivant. Considérons que le rapport entre bois fort et houppier s'inverse entre arbres de futaies et arbres isolés, ces derniers ayant davantage d'espace que les arbres en futaie. Les houppiers

représenteraient donc 80% de la biomasse aérienne ligneuse (dont 3% de feuilles), et le bois fort 20%. Pour une biomasse de bois fort égale à 100, le rapport houppier sur bois fort est donc de 3,8. On accepte par ailleurs que la masse du houppier et la masse de feuille aient une relation linéaire. Pour une biomasse foliaire de 3,9 (équivalant à 3% de la biomasse aérienne totale), on obtient :

- une biomasse de houppier de 26,1 (la part de houppier étant 6,7 fois plus importante que celle des feuilles, selon les estimations effectuées précédemment pour les arbres en futaie) ;
- Une biomasse de bois fort de 6,8 (biomasse de houppier divisée par le rapport houppier sur bois fort) ;
- Une biomasse ligneuse totale de 32,9, soit 33 en arrondissant (correspondant à la somme du bois fort et du houppier).

Autrement dit, comme nous raisonnons à partir d'une base 100, la valeur de biomasse ligneuse des arbres isolés équivaut à 33% de la biomasse ligneuse des arbres en futaie.

Etant donné leur faible accessibilité, ces zones boisées sont considérées comme peu propices à l'exploitation pour le bois d'œuvre. Par conséquent, nous considérons que les masses prélevées sont énergisables, exception faite des 30 % de rémanents à laisser au sol. Notre estimation de l'apport potentiel au bois-énergie par les arbres isolés est donc marquée par plusieurs hypothèses :

- l'ensemble de leur masse ligneuse est considérée comme énergisable ;
- cette masse ligneuse est minorée, par rapport à celle des arbres de futaie, en raison de leur différence de port, et donc de leur masse foliaire qui nous incite à considérer différemment la relation entre biomasse ligneuse et NDVI.

5. Mise en œuvre par une application ad hoc

Une fois établies les quantités de biomasse et leur part énergisable selon les types de peuplement et les rythmes d'accroissement, les données sont réunies pour estimer les montants énergisables dans le temps. Ce calcul a demandé le développement d'une application particulière (écrite en Delphi-Pascal), dans la mesure où plusieurs problèmes devaient être résolus simultanément :

- prise en compte de l'ensemble des paramètres propres à chaque peuplement (âge d'exploitabilité, âge des premières éclaircies, facteur d'expansion, essence) ;

- mise en adéquation des différentes temporalités : en effet, les tables d'accroissement/éclaircie (ou la carte des biomasses) fournissent des correspondances de biomasses en âges, mais ces « âges » ne couvrent que quelques valeurs particulières (ex : 1tonne/cellule = 16 ans, 2 tonnes/cellule = 27 ans), alors que nous envisageons de travailler sur la durée des prélèvements par pas de cinq ans.

Le calcul doit permettre de calculer pour 40 étapes quinquennales ($40 \times 5 = 200$ ans) les valeurs suivantes : biomasse après accroissement, prélèvements en éclaircie et en exploitations terminales, et part énergisable de ces prélèvements. A la fin des calculs, l'ensemble des résultats sont archivés dans une table de données.

Pratiquement, les étapes de mise en œuvre sont les suivantes.

1) Préparation des données.

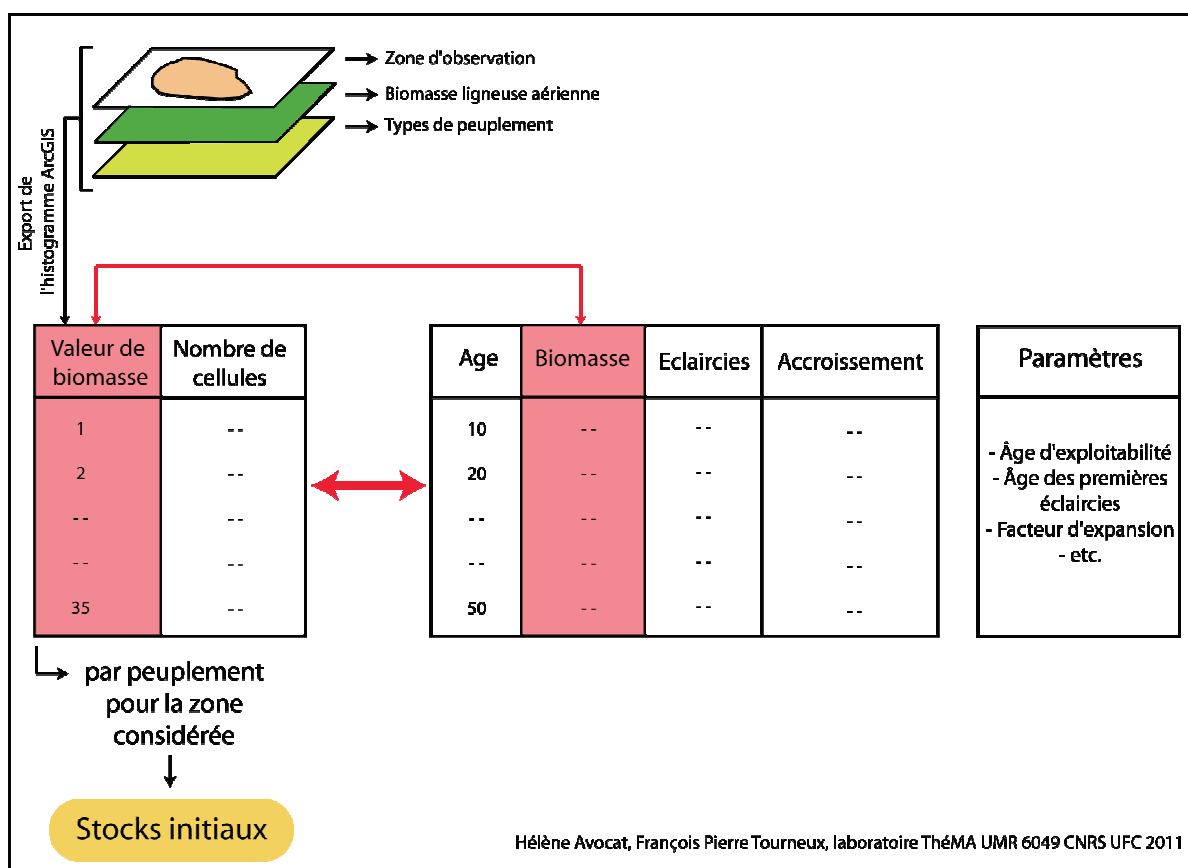


Figure 123 : entrée de l'application de calcul

- Réalisation des tables de fréquence des valeurs de biomasse sur la région observée et par type de peuplement. Cette étape préalable, relativement simple, consiste à réaliser une table à deux colonnes indiquant, pour chaque valeur de biomasse le nombre de cellules correspondantes dans la zone d'étude, et pour chaque peuplement. Pratiquement, la première phase consiste à réaliser, sur SIG, une intersection (ou une superposition conditionnelle) entre biomasse ligneuse aérienne, peuplement et zone

d'étude. La seconde étape fait simplement appel au calcul d'une table de fréquence de valeurs sur une couverture cellulaire (exemple : export de la table attributaire d'une couverture GRID dans ArcGIS).

- Ensuite la table accroissement/éclaircie correspondante, comme nous l'avons vu ci-dessus, est préparée à partir des ressources bibliographiques, avec une simple adaptation consistant à calculer par interpolation des valeurs d'accroissement ou d'éclaircie pour les âges (années) correspondant aux valeurs de biomasse présentes dans la cartographie de la biomasse ligneuse aérienne (cf. figure 124).

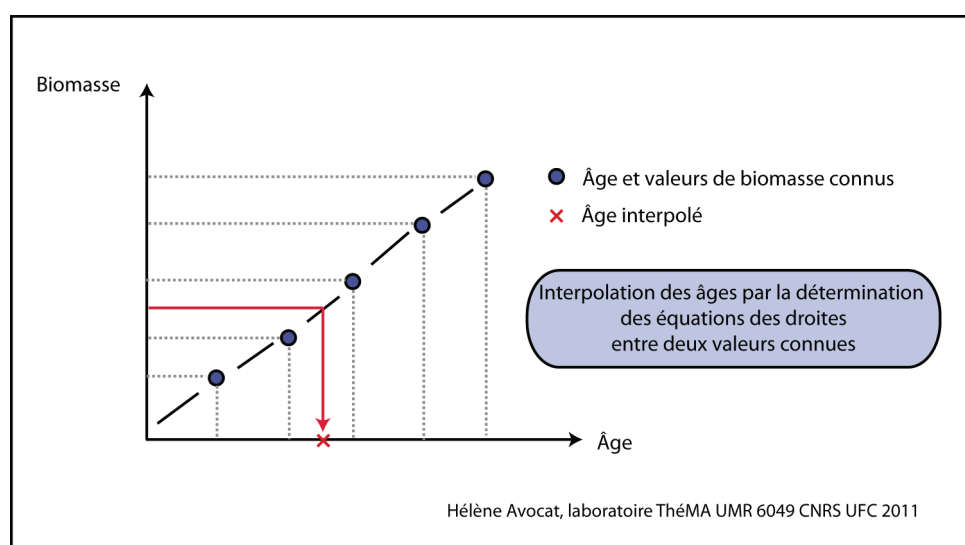


Figure 124 : Interpolation des âges des peuplements à partir des valeurs de biomasse connues

2) Mise en adaptation des temporalités entre âge de biomasse et étapes de simulation.

Nous avons choisi d'établir une correspondance entre les volumes de biomasse et les âges des peuplements, ce qui permet d'assurer une simple relation par jointure entre la table des fréquences de biomasse ligneuse aérienne et la table éclaircie/accroissement. Mais, nous l'avons vu, ces âges ne couvrent pas toute l'échelle chronologique (exemple : 1 tonne/cellule = 16 ans, 2 tonnes/cellule = 27 ans), ce qui pose un problème pour évaluer les nouvelles biomasses à l'issue d'une étape de 5 ans. Il faudrait, pour simuler l'ensemble de la séquence temporelle, pouvoir calculer des biomasses et des prélèvements pour tous les âges de peuplement possibles, de 0 année à l'âge maximal considéré. Mais cela n'est pas envisageable, faute de données.

La solution utilisée consiste simplement à désagréger les effectifs de population de chaque couple âge-biomasse, pour les répartir sur une échelle de pas annuel, ainsi que le présente la figure 125.

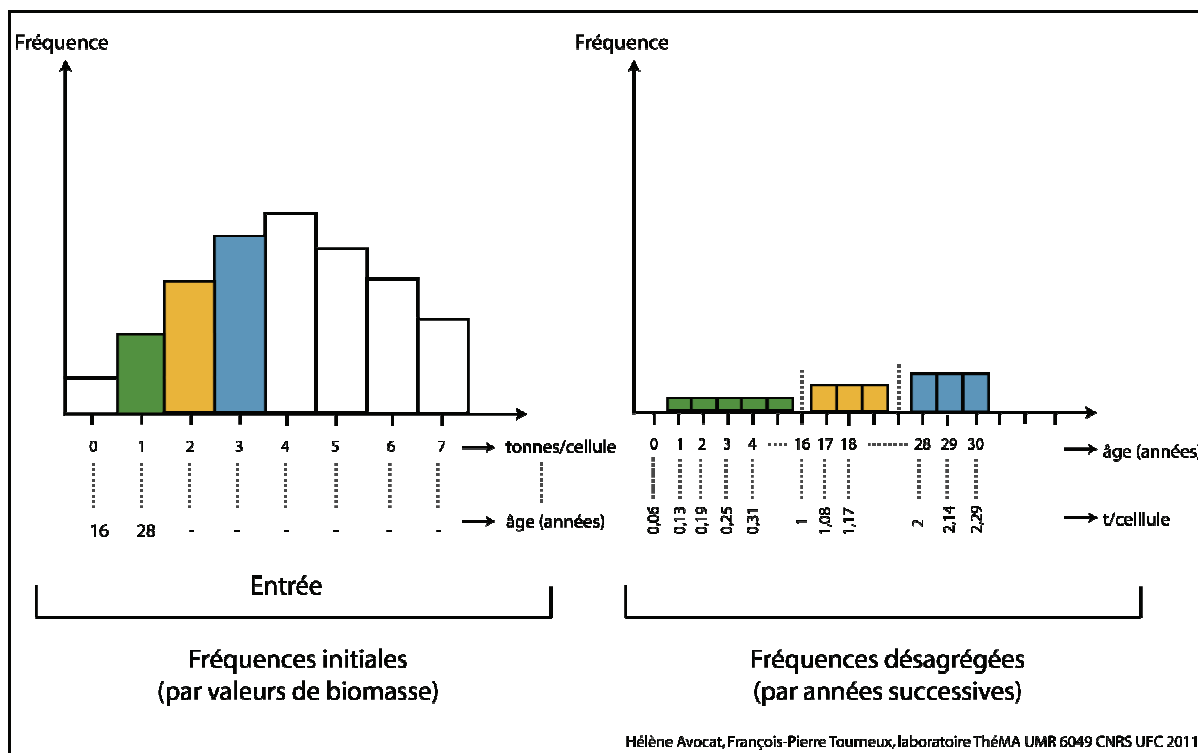


Figure 125 : désagrégation des effectifs par année

Nous sommes conscients que ces valeurs « annuelles » ont peu de sens pour l'exploitation forestière : on ne réalise pas un chantier d'éclaircie chaque année sur la même place ! Mais nous assumons ce biais de calcul, ce qui a l'avantage de nous permettre de simuler l'accroissement, l'éclaircie et l'exploitation suivant le pas de temps recherché. Au delà, les résultats d'un tel modèle ne doivent pas être interprétés à l'échelle de la parcelle, mais prennent sens pour l'ensemble du territoire observé.

3) Rectification des biais dans les valeurs de biomasse ligneuse aérienne.

Les valeurs de biomasse aérienne ligneuse dérivées du NDVI, nous l'avons vu, présentent divers biais. Deux d'entre eux doivent être corrigés avant traitement.

→ La valeur par défaut assignée aux cellules portant une valeur négative (2 t/cellule). Cette valeur est la marque d'une incertitude, et forme un pic local dans la distribution des fréquences, susceptible d'entacher de façon cyclique les résultats de la simulation (cycles dus aux accroissements calculés à partir de cette valeur). Nous avons résolu de répartir l'effectif portant cette valeur sur l'étendue des valeurs significatives de biomasse.

→ L'étendue des valeurs significatives de biomasse. Définir une valeur maximale significative permet de seuiliser si nécessaire des valeurs de biomasse en regard de l'âge élevé des peuplements correspondants et de supprimer une queue de distribution à faible effectif qui concerne les valeurs les plus élevées. Le NDVI présente un effet de saturation, bien connu,

mais peu mesuré, pour les espaces boisés les plus denses. Cet effet de saturation, , indique que l'indice de végétation devient peu significatif au delà d'une certaine quantité de biomasse. Par conséquent, il est hasardeux de prendre en compte des âges allant trop au delà de ceux donnés dans les tables de production (et ce, d'autant plus que ces valeurs sont susceptibles de présenter des biais pour les raisons précédemment évoquées). Cela ne concerne néanmoins qu'un nombre limité de pixels (queue de distribution), que nous avons choisi de répartir de façon régulière sur l'intervalle de valeurs jugées significatives. Nous avons également prévu une option permettant de réaliser la même opération en prenant en compte une valeur significative minimale.

4) Définition des paramètres

Le tableau 21 présente les paramètres utilisés pour les futaies de feuillus et les futaies de résineux. Les futaies mixtes, nous l'avons vu, sont traitées avec la proportion par défaut de 50% de feuillus et 50% de résineux.

	Feuillus	Résineux
Âge des premières éclaircies	40 ans	48 ans
Âge d'exploitabilité	100 ans	100 ans
Facteur d'expansion de biomasse	1,30	1,23
Proportion de feuilles/d'aiguilles	3%	5%
Valeur aberrante à répartir	2 t/cellule	Aucune
Valeur minimum significative	0	0
Valeur maximum significative	33	32

Tableau 21 : paramètres d'exploitation pour les futaies

Pratiquement, nous avons utilisé les paramètres du hêtre pour les feuillus et ceux du sapin pour les résineux, ces essences étant les plus représentées et nous paraissant présenter les valeurs les plus centrales pour notre terrain d'étude, faute d'une meilleure connaissance des peuplements réels.

Pour les taillis, l'âge d'exploitation est de 20 ans, et les facteurs d'expansion et masse foliaire sont ceux des feuillus. Pour les arbres isolés, l'âge d'exploitabilité est de 60 ans.

5) Calcul des prélèvements pour chaque étape de la simulation

A ce stade, tous les éléments sont réunis pour effectuer le calcul des prélèvements possibles à chaque étape quinquennale. Comme le présente la figure 126, l'éclaircie et l'exploitation sont comptabilisées selon les règles exposées précédemment, et cette part de biomasse est retirée du stock restant.

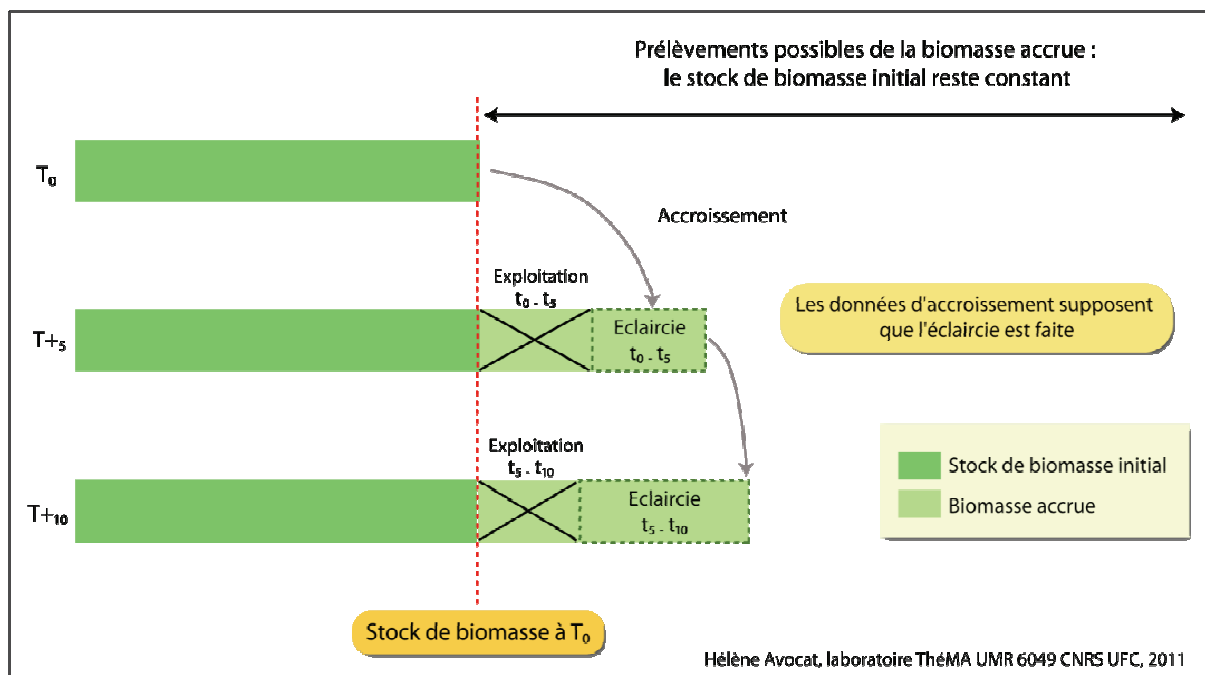


Figure 126 : accroissement du stock de biomasse et prélèvements possibles

Ceci est réalisé pour chaque classe d'âge annuel, incrémentée de 5 ans. La multiplication des valeurs unitaires d'une cellule par l'effectif de chaque classe permet alors de connaître la masse totale prélevée pour la zone étudiée et le peuplement considéré. Enfin, la part énergisable est calculée suivant les paramètres relatifs à chaque type de peuplement. Bien entendu, le fait de prendre l'état de la ressource à t_0 peut être discuté. Cela pose la question des conditions initiales à partir desquelles le modèle est ensuite incrémenté. Selon Boittin et al. (2010), les dernières études ADEME (IFN/SOLAGRO/FCBA 2009) et MAAP (CEMAGREF/IFN 2009) font l'hypothèse de « prélèvements forestiers ramenant les peuplements à des normes sylvicoles (sans donner plus de précisions), et ce sur une durée de 15 ans, ce qui implique une diminution du volume sur pied ».

Les résultats sont archivés, pour chaque étape et chaque « année » d'âge initial, dans une table particulière à chaque type de peuplement (cf. figure 116)

6. Résultats pour le Pays Loue-Lison et la CAGB

6.1. La biomasse énergisable à court terme

Les estimations de biomasse énergisable pour les différentes formations forestières sont présentés dans le tableau 22. Ils représentent la masse ligneuse énergisable annuellement (en tonnes de matière sèche) pour les cinq prochaines années, compte tenu des contraintes de renouvelabilité de la ressource. Les contraintes d'ordre technico-économiques ne sont pas

considérées. Les résultats englobent l'ensemble de la masse énergisable, qu'elle soit par la suite coupée en bûches ou broyée en plaquettes.

	Pays Loue Lison		CAGB	
	Tonnes de matière sèche	%	Tonnes de matière sèche	%
Futaie de feuillus	29511	50,2	16565	62,4
- dont éclaircies	18462	31,4	10311	38,8
- dont exploitation	11049	18,8	6254	23,5
Futaie de résineux	3898	6,6	1355	5,1
- dont éclaircies	1601	2,7	571	2,1
- dont exploitation	2297	3,9	784	3
Futaie mixte	7074	12	2641	9,9
- dont éclaircies	2680	4,6	1479	5,6
- dont exploitation	4394	7,5	1162	4,4
Arbres isolés	13957	23,7	4836	18,2
Taillis	5887	10	2320	8,7
Total énergisable annuel	60327	100	27718	100

Tableau 22 : biomasse énergisable annuellement pour le Pays Loue Lison et la CAGB selon différents types de peuplement (en tonnes de matière sèche), première étape quinquennale

La différence est de taille entre les deux terrains d'étude : la masse énergisable annuellement est deux fois plus importante dans le Pays Loue Lison que dans la CAGB (60000 tonnes contre moins de 30000 tonnes), mais cette différence doit bien entendu être relativisée par les superficies boisées. La production énergisable en Pays Loue Lison est alors de 1,48 t/ha, et de 1,24 t/ha dans la CAGB. Les différences de productivité dans différents peuplements (exemple : plus d'arbres isolés dans le Pays Loue Lison) et l'âge de ces peuplements sont à l'origine de ces différences.

Les futaies de feuillus constituent la principale source de bois-énergie pour les deux terrains d'étude, avec une part néanmoins plus importante pour la CAGB que pour le Pays Loue-Lison (plus de 60% contre 50%). Les prélèvements en éclaircie fournissent proportionnellement plus de bois énergisable que les exploitations finales. Les futaies de résineux ne fournissent que peu de bois-énergie, aux alentours de 5 %. Par contre les exploitations finales fournissent plus de bois que les éclaircies (à l'inverse des futaies de feuillus). Les futaies mixtes et les taillis fournissent à peu de choses près, les mêmes proportions de bois-énergie : environ 9 % dans la CAGB et 11% dans le Pays Loue Lison. Mais le fait le plus intéressant est la contribution des arbres isolés : ces derniers représentent presque un quart des ressources

dendroénergétiques du Pays Loue Lison et un peu moins de 20 % de celles de la CAGB, ce qui en fait le deuxième gisement.

6.2. Mobilisation des ressources ligneuses sur le long terme, et par type de peuplement

Le modèle calcule des quantités de biomasse énergisable par pas de cinq ans sur 200 ans. Considérant à la fois la distribution initiale des biomasses et leurs cycles de production (dépendant de l'âge et du type de peuplement), il n'est dès lors pas surprenant d'observer une variabilité des prélèvements (cf. figures 127 et 128 représentant les quantités de bois énergisables en ordonnée par pas de temps, représentés en abscisse). Pour la CAGB, la moyenne sur 20 ans est de 28600 tonnes/an, avec un écart moyen de 3400 tonnes/an ($\pm 1\%$ autour de la moyenne). Les valeurs extrêmes sont assez écartées, avec un maximum de 38200 tonnes à 30 ans, et un minimum de 18700 tonnes à 45 ans. 6 étapes sur 40 dépassent la moyenne plus un écart-type, et 7 étapes ont un résultat inférieur à la moyenne moins un écart-type, soit une variabilité importante (le tiers des étapes étant au-delà de \pm un écart-type), ce qui pose problème pour un approvisionnement régulier.

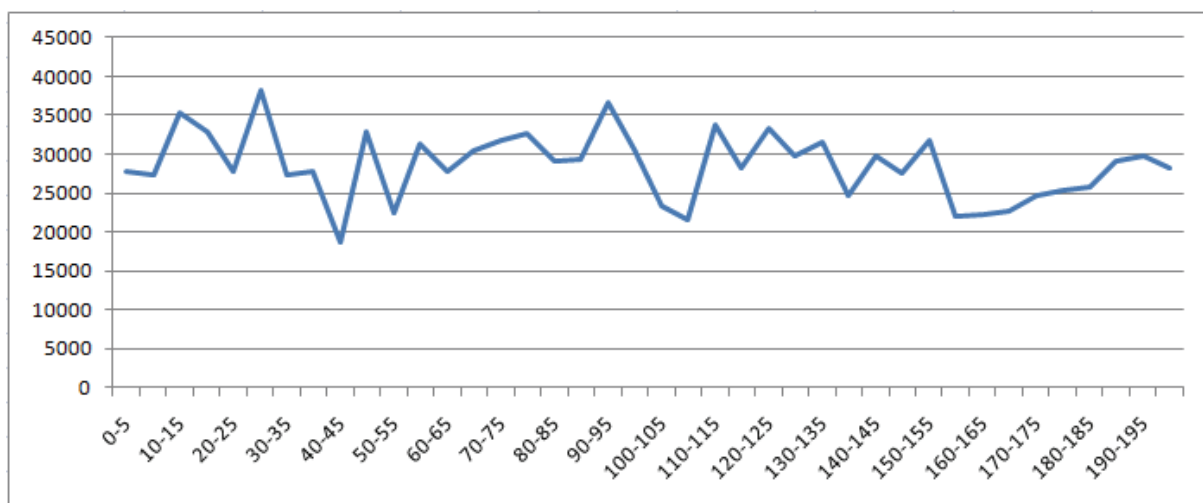


Figure 127 : biomasse énergisable annuellement sur le long terme dans la CAGB

Dans le Pays Loue-Lison (figure 128), la situation est sensiblement différente : l'exploitation est très importante sur les quinze premières années, puis diminue de façon sensible. Les quantités de bois exploitées n'atteignent plus les valeurs des quinze premières années, même dans les périodes où la disponibilité de bois augmente. Dans le Pays Loue-Lison, la moyenne annuelle sur 200 ans est de 45800 tonnes, avec un écart moyen de 5400 tonnes ($\pm 12\%$ autour de la moyenne). Les valeurs extrêmes sont de 60000 tonnes pour le maximum et de 34000 tonnes pour le minimum, avec 8 étapes sur 40 dépassant la moyenne + un écart-type, et 7 étapes se

situant en dessous de la moyenne – un écart-type : 37 % des étapes sont ou delà de la moyenne \pm un écart-type), la variabilité est donc à nouveau élevée.

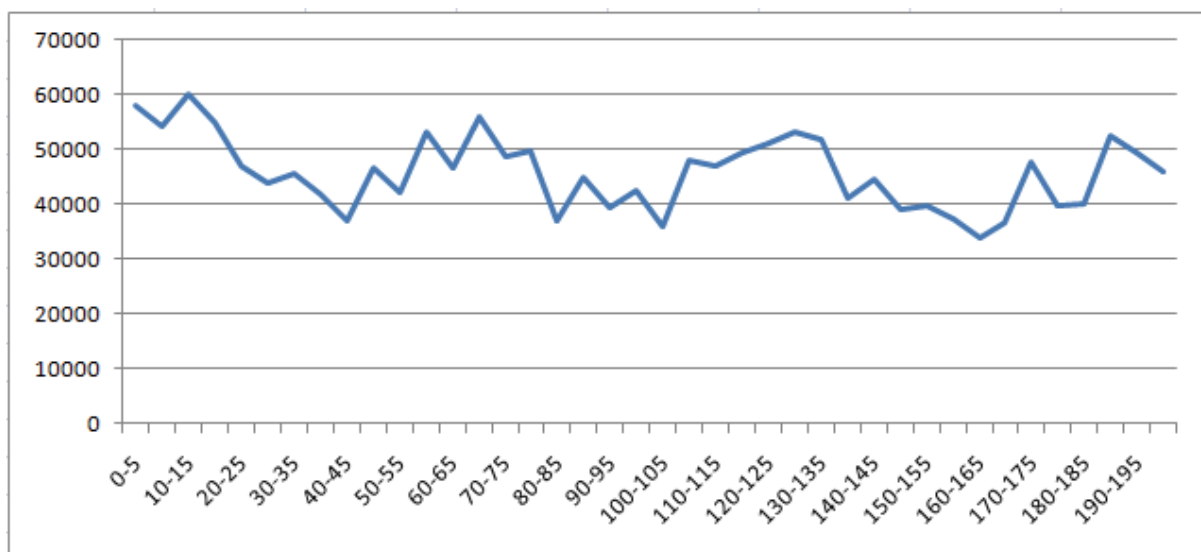


Figure 128 : biomasse énergisable annuellement sur le long terme dans le Pays Loue Lison

Les figures 129 et 130 montrent la contribution de chaque type de peuplement au fil du temps pour les deux terrains d'étude.

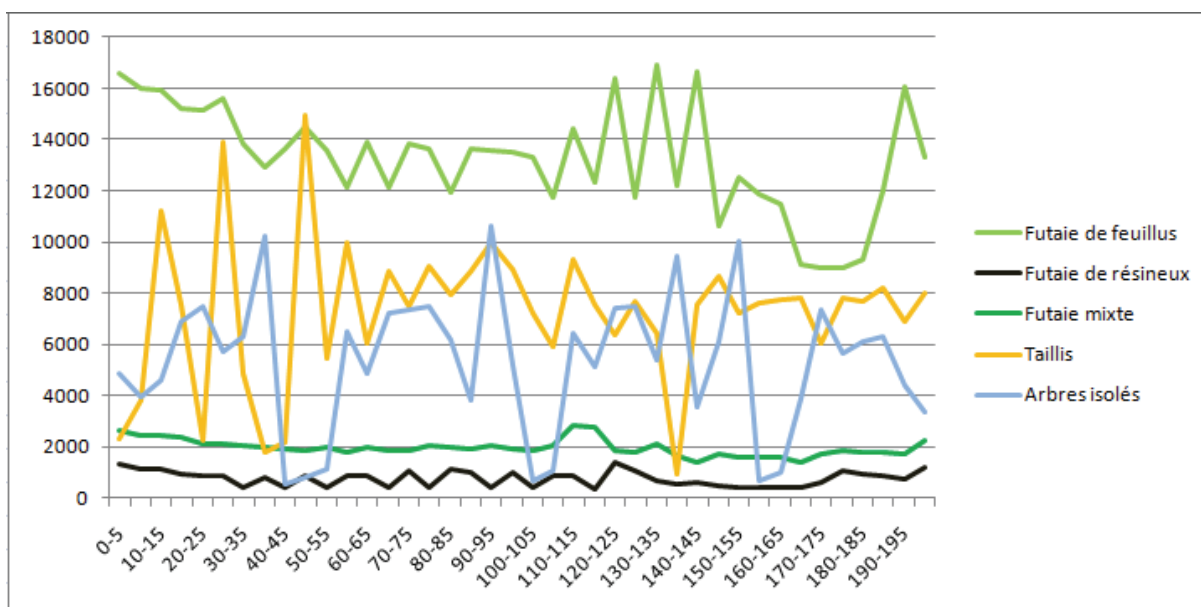


Figure 129 : biomasse énergisable annuellement sur le long terme dans la CAGB par type de peuplement

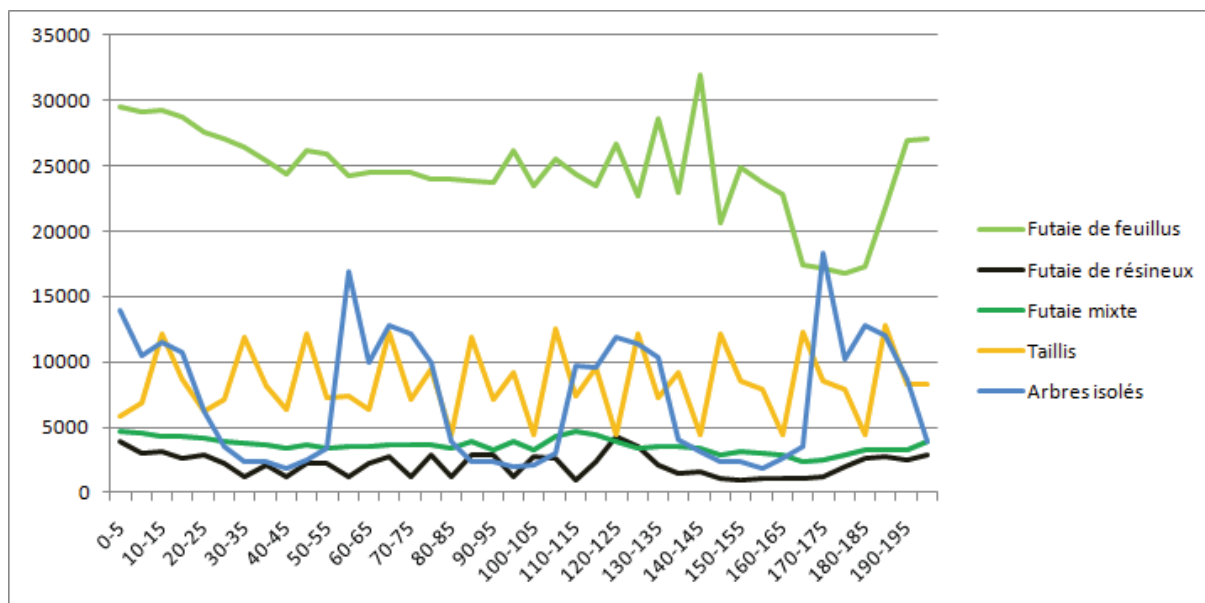


Figure 130 : biomasse énergisable annuellement sur le long terme dans le Pays Loue Lison par type de peuplement

Dans le Pays Loue-Lison comme dans la CAGB, la futaie de feuillus est de façon presque constante le principal pourvoyeur de bois-énergie (avec respectivement 53% et 45% des apports possibles, cf. figure 132). La forte variabilité des quantités de biomasse énergisable en futaie s'explique par les cycles d'exploitation finale, plus que par les quantités de biomasse prélevées en éclaircies, qui sont plus régulières. En effet, chaque strate d'âge atteignant l'âge d'exploitabilité par pas de temps de 5 ans, est supposée prélevée en totalité. Selon la configuration initiale de la biomasse, les quantités prélevables sont plus ou moins importantes. Les taillis, dont l'exploitation est totale tous les 25-30 ans, présentent de fait des cycles de production relativement réguliers (notamment dans le Pays Loue-Lison). En dépit d'une emprise spatiale assez faible (5 % dans le Pays Loue-Lison et 7 % dans la CAGB, pour 18% et 26% respectivement des prélèvements moyens énergisables, cf. figures 131 et 132), la contribution des formations de taillis à la production de biomasse énergisable est très importante puisque la totalité de la biomasse aérienne (moins la part de rémanents à laisser au sol) est énergisable. Mais cette production est très inégale, notamment dans la CAGB : notre modèle pose ici problème. En revanche, les futaies de résineux et les futaies mixtes fournissent assez peu de matière ligneuse énergisable, et les prélèvements sont variés beaucoup moins qu'en futaie de feuillus, en taillis ou pour les arbres hors forêt (cf. figures 131 et 132). Les arbres hors forêt représentent 16 % des apports potentiels moyens pour le Pays Loue-Lison, et 19% pour la CAGB, soit l'équivalent de 3 ou 4 dixièmes des apports moyens des futaies de feuillus. Il s'agit donc bien d'un élément important du potentiel énergisable. Toutefois, on note des productions très irrégulières selon les années (dans un rapport de 1 à 15) avec des cycles apparents de 60 ans (effet du paramétrage de l'âge d'exploitabilité). A nouveau, notre modèle pose problème, mais a pour mérite de relever l'intérêt de ce gisement mal connu.

Figure 131 : contribution des types de peuplements à la production de biomasse énergisable dans la CAGB

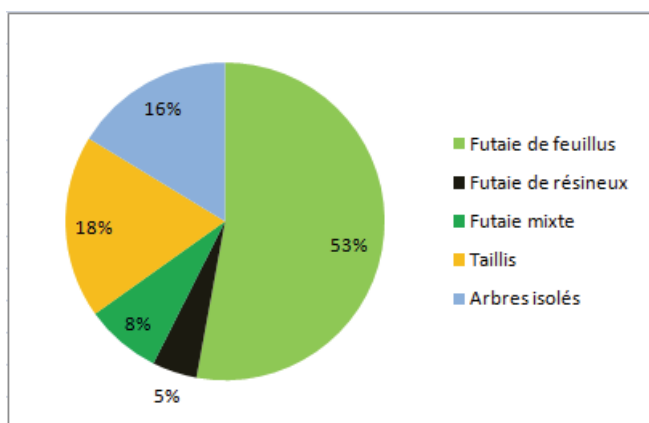
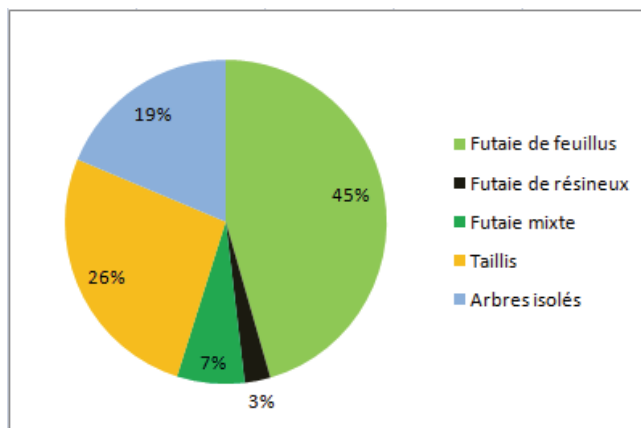


Figure 132 : contribution des différents types de peuplement à la production de biomasse énergisable dans le Pays Loue-Lison

6.3. L'adéquation offre/demande

Bien que ces résultats témoignent d'une disponibilité théorique importante, le potentiel énergisable sous forme de plaquettes forestières est en réalité minoré par les contraintes technico-économiques de mobilisation des ressources ligneuses (zones pentues, inaccessibles), ainsi que par les besoins en bois-bûche, constituant 80 % de la consommation de bois-énergie franc-comtoise.

Pays Loue-Lison : une offre supérieure à la demande

Selon les Communes forestières, la consommation annuelle de bois-bûche (affouage compris) s'élève à 32100 tonnes de bois. Le taux d'humidité n'est pas précisé. Or, dans le cadre de ces travaux nous raisonnons en tonnes de matière sèche (t/MS), que ce soit pour quantifier la biomasse ou la consommation des chaufferies collectives. Cependant, dans la mesure où nous ne connaissons pas le taux d'humidité il nous est difficile de le convertir précisément en tonnes de matière sèche. Si nous appliquons le facteur de proportionnalité donné par ONF Energie pour la conversion en matière sèche de bois comprenant entre 30 et 50 % d'humidité, la consommation de bois-bûche pour l'ensemble du Pays Loue-Lison s'élève à 19600

t/matière sèche. La consommation des 18 chaufferies du secteur collectif est estimée à 1370 t/matière sèche. La consommation énergétique se répartit alors de la manière suivante : 93,5% pour le bois-bûche, contre 6,5% pour la plaquette forestière en chaufferie collective, pour un total atteignant presque 21000 t/matière sèche/an. Les ressources du Pays Loue-Lison sont aujourd'hui largement capables de satisfaire les besoins énergétiques du territoire, à la fois des secteurs domestique et collectif. Selon l'ADEME, les 8 chaufferies en projet totaliseront environ 2,7 MW, ce qui représente une consommation approximative de 1100 t/matière sèche/an, que les ressources du territoire pourront satisfaire. On arriverait ainsi à un total de 22100 tonnes de bois-énergie, ce qui reste largement inférieur à la production moyenne annuelle modélisée de 45800 tonnes... Il paraît donc possible d'étendre le programme bois-énergie du Pays Loue-Lison au-delà des projets actuels, car la marge reste assez vaste même si les valeurs prédites par notre modèle maximisent les prélèvements (tous les espaces boisés seraient exploités) et ne tiennent pas compte des divers aléas plus ou moins sévères qui atteignent nos forêts (tempêtes de vent, bris par la neige, maladies, artificialisation).

Nos résultats sont très largement inférieurs à ceux du PAT (100000 tonnes de bois mobilisables annuellement). Toutefois, ces résultats sont difficilement comparables. D'une part, car les unités utilisées ne sont pas les mêmes : tonnes de matière sèche pour nous, tonnes de bois pour le PAT (n'ayant pas d'information sur le taux d'humidité, il est difficile d'effectuer une comparaison). D'autre part, le PAT n'intègre par de dimension temporelle dans son modèle. Il serait effectivement possible de prélever annuellement 100000 tonnes de bois sur quelques années pour assurer un retour aux « normes sylvicoles » évoqué par Boittin et al. (2010), mais il nous semble difficile de maintenir de telles quantités de prélèvement sur le long terme.

Communauté d'Agglomération du Grand Besançon : un dimensionnement des chaufferies au-delà de la ressource ?

La biomasse énergisable annuelle de la CAGB est deux fois moindre que celle du Pays Loue-Lison. Si les 28000 tonnes mobilisables annuellement suffiraient à satisfaire les besoins des chaufferies de la Communauté d'Agglomération, estimés aujourd'hui à 15400 tonnes (dont plus de 90 % pour les chaufferies bisontines), il est en revanche légitime de s'interroger sur les capacités du territoire à pouvoir fournir les chaufferies en projet dans un futur proche, compte tenu de leur envergure (20 MW). La puissance actuelle étant de 16 MW, cela reviendrait à multiplier par 2,25 la consommation annuelle de bois-énergie (l'amenant à près de 35000 tonnes pour les seules chaufferies collectives). Le territoire de la CAGB ne pourrait pourvoir à ses besoins, si l'ensemble de ces projets venait à se réaliser. D'autre part, nous pouvons également nous interroger sur les capacités à pouvoir assurer dès à présent les besoins en bois-bûche. Cependant, à la différence du Pays Loue-Lison, nous ne disposons d'aucune donnée sur la consommation de bois-bûche dans la Communauté d'agglomération.

Notre expérience personnelle nous permet d'indiquer que ce mode de chauffage n'est pas absent, ni en ville proprement dite, ni surtout dans les villages de la communauté. Tout cela est d'autant plus inquiétant que les prélèvements possibles présentent une assez forte variabilité au fil du temps.

6.4. Intérêts et limites du modèle de production/prélèvement

La définition de la quantité de biomasse ligneuse énergisable implique de prendre en compte un grand nombre de paramètres : âge des peuplements, essences, conflits d'usage, renouvelabilité, fragmentation de la propriété forestière, contraintes technico-économiques etc. Les modèles issus de la foresterie présentent très rarement des résultats à l'échelle infra-régionale voire infra-départementale, et ne prennent pas toujours en compte la contrainte de renouvelabilité sur le long terme, préférant considérer les contraintes technico-économiques de mobilisation de la ressource ligneuse à court ou moyen terme. Ces modèles s'appuient sur les données d'inventaire ou la cartographie forestière de l'IFN. Les espaces de pré-bois, haies, et autres formations boisées isolées ne sont donc pas considérées dans le calcul de la disponibilité énergétique de la biomasse ligneuse. Or, selon les Communes forestières, elles constituent un potentiel énergisable intéressant, que ces résultats ont confirmé.

Nous avons développé ici une méthode originale de modélisation de la biomasse ligneuse forestière et hors forêt, basée sur l'usage de tables de production de biomasse (Decourt, 1984), pour différentes essences et des classes de productivité moyenne, et sur un état initial détaillé et localisé de la biomasse. Cet état initial de la biomasse, et les âges qui en sont dérivés, sont biaisés, tant par les problèmes relatifs à l'interprétation du NDVI que par l'utilisation de valeurs moyennes pour des classes de productivité moyenne. Cela peut induire localement des risques de surestimation ou sous-estimation, les paramètres de productivité et d'exploitabilité dépendant des conditions locales. Bien que nous ayons pris soin de sélectionner des données sur des peuplements de forêts tempérées (âge d'exploitabilité, valeurs de biomasse) et du nord-est de la France (tables de production), leur utilisation comme valeur de référence peut être une source d'erreur dans le modèle, que seuls des levés de terrain auraient pu confirmer ou infirmer.

Conclusion du chapitre 10

Afin de déterminer la fraction de biomasse énergisable sur un espace donné, nous nous sommes appuyés sur des tables de production, et avons déterminé une masse ligneuse durablement prélevable par année et par type de peuplement, sur une vaste plage temporelle. La méthodologie présentée ici est transposable à d'autres types d'espaces : communes, départements, massifs, parcs naturels, etc. Si les résultats montrent des disponibilités forestières assez importantes pour les deux terrains d'étude, ils ne doivent pas occulter une moindre disponibilité réelle (contraintes de mobilisation, besoins en bois-bûche, aléas). Si les ressources du Pays Loue Lison sont en mesure de satisfaire la demande en plaquettes forestières et en bois-bûche à ce jour et pour les projets en cours, la situation est plus préoccupante pour la CAGB. Malgré la présence d'importants massifs boisés (Forêt de Chailluz), les ressources du territoire ne suffiraient pas à pourvoir les besoins énergétiques si tous les projets prévus venaient à se réaliser, et ce pour les besoins des seules chaufferies, sans tenir compte de la demande en bois-bûche. Le recours à d'autres ressources, plus éloignées serait alors indispensable, à moins de reconsidérer le dimensionnement des projets actuels.

Chapitre 11

Évaluation de la demande et modélisation exploratoire d'aires d'approvisionnement

La définition des bassins d'approvisionnement pour un site de consommation présente une forte similitude avec la définition d'une aire de chalandise autour d'un point d'approvisionnement ou de service. La relation est simplement inversée : dans le cas des bassins d'approvisionnement, il s'agit de déterminer la zone dans laquelle peut être fournie la quantité de bien nécessaire à la satisfaction du site consommateur. Donc pour une aire de chalandise, l'offre est centrale et la demande en aire plus ou moins périphérique, tandis que pour le bassin d'approvisionnement, la demande est centrale et l'offre plus ou moins périphérique. Il n'est donc pas illégitime de faire référence aux aires de chalandise pour estimer des bassins d'approvisionnement. Trois types d'approches peuvent être utilisées pour l'étude des zones de chalandise.

- 1) Une approche gravitaire, où la zone de chalandise s'apparente à une forme déterminée par l'éloignement et la position relative des entités émettrices et réceptrices en présence (Pumain et al., 2001), mais dont nous n'avons pu vérifier la validité ici, faute de données suffisantes (chapitre 8), et aussi en raison du système de tarification de certains transporteurs, qui n'incite pas forcément à la minimisation des distances de transport (l'objectif recherché étant avant tout une diminution des coûts globaux du combustible bois).
- 2) Une approche comportementale, marquée par l'analyse des choix individuels s'inscrit dans une demande différente, prenant en compte les stratégies des différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement, depuis le maître d'ouvrage jusqu'à l'exploitant forestier. Ce type de démarche est développé par les chercheurs du Cemagref de Grenoble (Projet BENEFITS coordonné par C. Chauvin).
- 3) Une approche exploratoire. Faute de données suffisantes nous permettant de modéliser les aires d'approvisionnement en recourant à l'une des deux méthodes précédentes, nous tentons donc de délimiter de manière exploratoire et itérative des aires de chalandise visant

à satisfaire durablement la consommation des chaufferies, selon un comportement rationnel de minimisation des distances et de la valorisation des ressources locales, forestières et non forestières.

Le problème qui se pose est relativement simple : il s'agit d'alimenter une chaufferie, localisée en un lieu donné, qui consomme annuellement une certaine quantité de combustible. La zone permettant de fournir les quantités de combustibles nécessaires à la chaufferie est le bassin d'approvisionnement. Notre objectif est de définir des bassins d'approvisionnement locaux et d'analyser les phénomènes de concurrence spatiale entre ces bassins d'approvisionnement (par concurrence spatiale nous entendons le recouvrement, total ou partiel de certains bassins par d'autres zones d'approvisionnement).

1. Les hypothèses de base et les conditions à satisfaire

Le bois-énergie étant présenté comme une source d'énergie renouvelable et locale, les bassins d'approvisionnement doivent satisfaire trois conditions.

- 1) La satisfaction de la demande sur le long terme, et pas seulement pour la durée de vie de l'installation actuelle : la fourniture en combustible doit être envisagée dans la longue durée.
- 2) La valorisation des ressources de proximité, forestières et non forestières. Cela répond à des enjeux environnementaux liés à la minimisation des distances de transport (réduction des émissions polluantes et des gaz à effet de serre). Une telle approche permet en outre de lutter contre la surexploitation des zones forestières les plus accessibles (enjeu mis en évidence par Boittin et al. 2011), en « valorisant le maximum de surfaces forestières possible, y compris celles situées dans des zones où les coûts d'exploitation sont élevés ». Cela contribue également à limiter le vieillissement de la forêt tout en contribuant à une meilleure gestion de cette dernière.
- 3) Mobiliser durablement les ressources ligneuses, en tenant compte de leurs rythmes d'accroissement différenciés et des possibilités de prélèvements, mais également des autres usages potentiels (bois d'œuvre et bois d'industrie, bois bûche), et du maintien de la qualité des sols.

2. La démarche

La figure 133 présente l'organisation générale de la démarche.

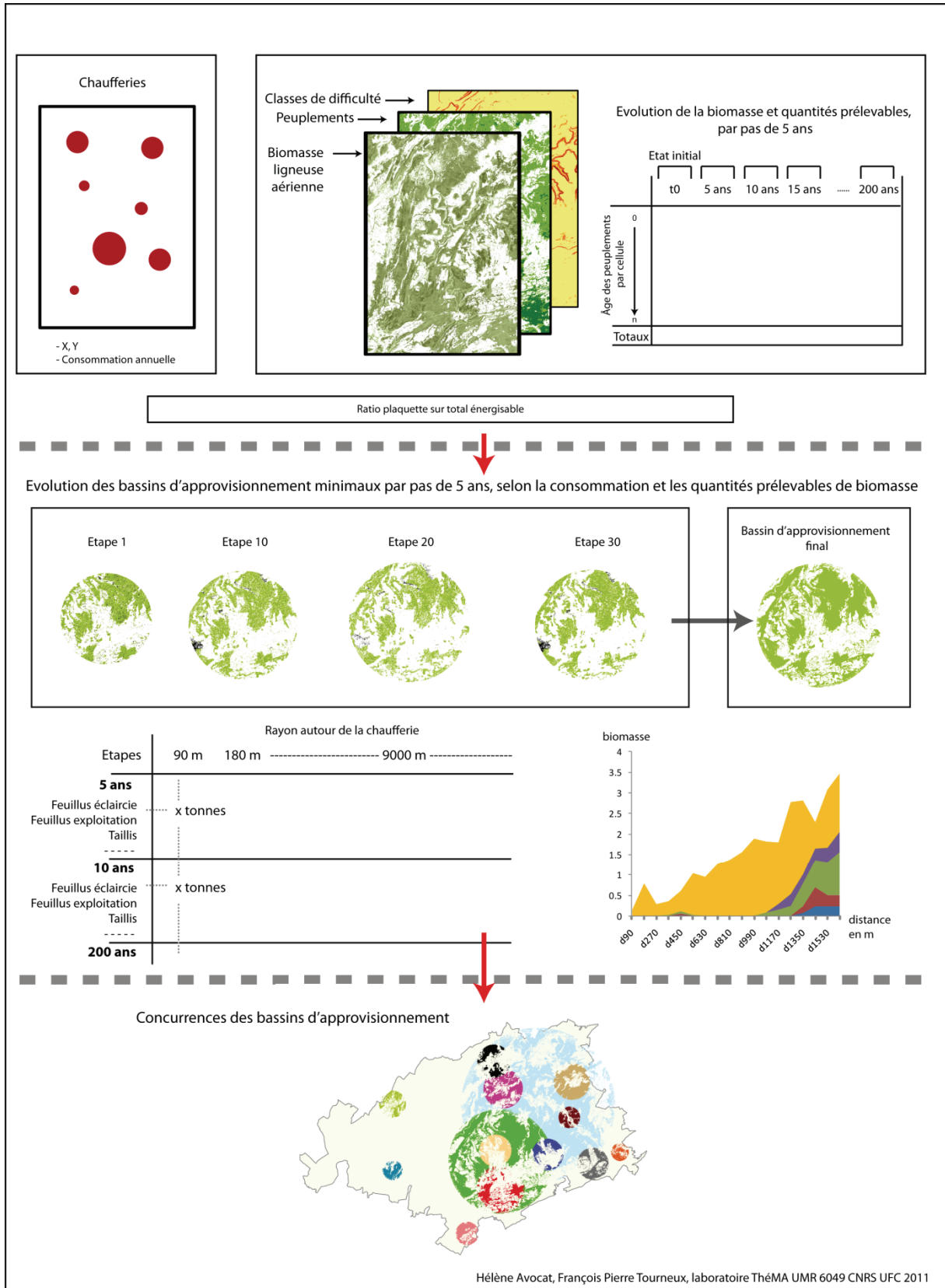


Figure 133: démarche globale du modèle de définition des bassins d'approvisionnement locaux

- Le but final (partie basse de la figure) est de cartographier l'ensemble des aires d'approvisionnement des chaufferies d'un territoire, et leurs recouvrements possibles (concurrences)
- L'objectif intermédiaire est de cartographier le bassin d'approvisionnement de chaque chaufferie dans la longue durée (partie centrale de la figure 133). Ce bassin est lui-même défini par l'union de l'ensemble des bassins d'approvisionnement de la dite chaufferie dans le temps, dont le rayon varie en fonction des ressources du moment considéré.

Pour chaque chaufferie, le modèle calcule des bassins d'approvisionnement pour chaque étape quinquennale, assortis d'une table dans laquelle sont présentées les quantités de bois énergisables par type de peuplement et par gradient d'éloignement à la chaufferie. Le résultat final représente l'emprise spatiale de l'ensemble des pixels boisés exploités pour l'approvisionnement de la chaufferie sur le long terme (ce que nous appelons les bassins d'approvisionnement finaux, ou BAF).

Cette démarche repose sur l'intégration de trois éléments.

- 1) Les caractéristiques des chaufferies, leur localisation, et la quantité de bois-énergie consommée annuellement, en tonnes de matière sèche.
- 2) Un paramètre exprimant la part de bois-énergie qui peut être consacrée aux chaufferies. Pratiquement, il s'agit du ratio entre la masse de plaquettes forestières et la masse énergisable produite par les espaces boisés de la région. L'estimation de ce ratio est effectuée si possible à l'aide de connaissances sur la consommation en bois bûche. Ce paramètre a une incidence majeure sur l'étude des bassins d'approvisionnement.
- 3) L'ensemble des informations concernant l'offre ligneuse (biomasse aérienne et types de peuplement) et les modalités de son application. Il s'agit pour ces dernières :
 - des tables d'évolution de la biomasse énergisable prélevable par pas de 5 ans (cf. chapitre précédent ;
 - de contraintes spatialisées relatives à l'exploitation, exprimées au moyen de classes de difficultés (cf. chapitre 5 de la partie 2). Les classes de l'IFN ont été simplifiées, pour ne retenir comme indicateurs d'accessibilité que l'accès aux infrastructures de communication et la pente (figure 134). L'accès aux infrastructures est mesuré d'après le réseau de routes et de chemin de la BD Topo, et les pentes sont calculées d'après un modèle numérique de terrain. Les proportions de biomasse exploitée sont celles

définies par le Cémagref et l'IFN. Nous obtenons ainsi les classes d'exploitabilité suivantes :

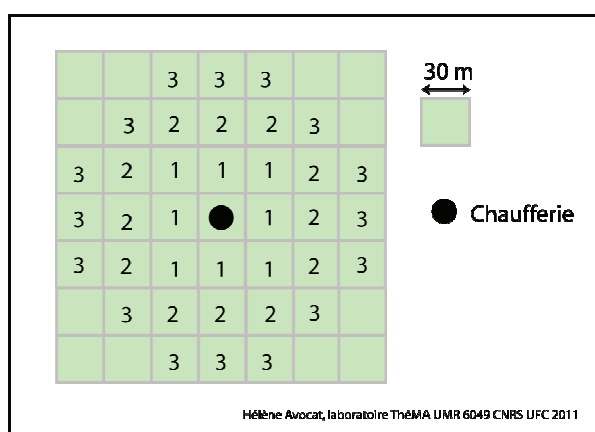
Distance aux infrastructures de communication	Pente			
	< 15 %	15 – 30 %	30 – 70 %	> 70 %
< 200 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
200 – 500 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile
> 500 m	Facile	Moyenne	Difficile	Très difficile

- Facile, exploitable à 100 %
- Moyenne, exploitable à 80 %
- Difficile, exploitable à 30 %
- Très difficile, inexploitable

Figure 134 : classes d'exploitabilité simplifiée

3. La définition des bassins d'approvisionnement : une double itération spatiale et temporelle

Pour chaque chaufferie, le modèle calcule plusieurs bassins d'approvisionnement : 40 bassins "temporaires" (ou bassins d'approvisionnement à court terme), correspondant aux ressources mobilisables pour l'approvisionnement des chaufferies pour chaque étape de 5 ans, et un bassin d'approvisionnement final, correspondant à l'ensemble des cellules boisées exploitées sur le long terme. La définition des bassins d'approvisionnement doit maximiser le recours aux ressources de proximité. Le processus itératif est donc double : spatial et temporel.



Pour chaque étape quinquennale, on effectue une suite d'itérations en s'éloignant progressivement de la chaufferie par pas de 30 mètres (résolution des données). Partant de la chaufferie, on examine les cellules se trouvant à la distance 1 soit 30 mètres (1^{ère} itération).

Figure 135 : itérations par pas de distance

Les cellules rencontrées peuvent être boisées ou non boisées. Chaque cellule boisée est caractérisée par une biomasse, un type de peuplement, et une classe de difficulté (cf. figure 134). Comme pour le modèle précédent, chaque valeur de biomasse correspond à un âge. De ces paramètres vont dépendre des vitesses d'accroissement et des possibilités de prélèvement, en éclaircie ou en exploitation (données par la table des quantités prélevables par pas de 5 ans). Si une cellule boisée n'est pas exploitable dans l'intervalle de distance à l'étape E, elle n'est pas prélevée, et elle continue de croître. En revanche, si cette cellule boisée répond aux critères d'exploitabilité, alors on prélève ce qui est exploitable en éclaircie ou en exploitation finale. Les cellules qui ont été exploitées en exploitation définitive ne rentreront dans les cycles d'exploitation que lorsque l'accroissement de leur biomasse le permettra. Il faut que la ressource se régénère, pour atteindre à nouveau l'âge des premières éclaircies, puis l'âge d'exploitabilité.

On totalise les quantités de biomasse récoltées pour les cellules situées à la distance 1. Si le total de la biomasse récoltée est inférieur aux besoins de la chaufferie, alors on entame une nouvelle itération à $d + 1$, en suivant le même raisonnement, et ainsi de suite jusqu'à ce que les besoins de la chaufferie soient satisfaits. Le bassin d'approvisionnement à court terme est défini pour la première étape quinquennale. On réitère ensuite la démarche pour la deuxième étape quinquennale, selon la même démarche, jusqu'à la 40^{ème} étape. L'ensemble des cellules exploitées dans les différents bassins d'approvisionnement à court terme constitue le bassin d'approvisionnement final, à même de satisfaire les besoins de la chaufferie sur le long terme. Chaque bassin d'approvisionnement est accompagné d'une table dans laquelle sont répertoriées les quantités de biomasse énergisable, par type de peuplement (futaie de feuillus, éclaircies et exploitation, taillis, arbres isolés, ...), et selon l'éloignement à la chaufferie. Il est ainsi possible d'étudier la contribution des différents types de peuplements au fil du temps, et en fonction de l'éloignement à la chaufferie.

Ces calculs sont réalisés par un outil développé ad hoc en Delphi-Pascal. Nous avons choisi de délimiter le rayon des bassins à 500 cellules, pour des raisons pratiques de calcul d'une part, mais surtout parce que ce rayon correspond à 15 km (30 km de diamètre) au-delà desquels il paraît difficile de parler encore d'approvisionnement local.

4. Application du modèle : résultats et discussion

Le modèle produit plusieurs résultats.

- a) Les bassins d'approvisionnement à court terme (avec des cellules exploitées en éclaircie et en exploitation étape par étape).
- b) Les types de peuplements exploités, à la fois par gradient d'éloignement, et au fil du temps.
- c) L'influence des contraintes d'accessibilité sur la taille des bassins d'approvisionnement.

d) L'emprise spatiale des bassins d'approvisionnement finaux des chaufferies (c'est-à-dire l'ensemble des cellules boisées exploitées sur le long terme pour satisfaire la demande des chaufferies).

4.1. Les bassins d'approvisionnement à court terme et finaux

Si les prélèvements en éclaircie fournissent une grande part de la biomasse énergisable de façon régulière, nous observons des cycles pour l'exploitation à court terme des taillis (cf. étapes 10 et 30 de la figure 136). La présence de taillis (exploités sans éclaircie et avec un produit totalement énergisable selon des cycles courts), et d'arbres isolés (forte dispersion des ressources), a pour corollaire une assez forte variabilité de l'emprise spatiale des bassins d'approvisionnement au fil du temps. Ce qui se manifeste par de légères rétractions pour certaines étapes, la demande étant satisfaite dans un moindre intervalle de distance. Des analyses complémentaires peuvent aussi être menées pour analyser la contribution de chaque type de peuplement en fonction de l'éloignement au site (cf. 4.2).

Le bassin d'approvisionnement final est formé par l'union de l'ensemble des bassins à court terme; il présente un grain beaucoup plus régulier que ces derniers : en pratique, chaque cellule boisée est éclaircie ou exploitée au moins une fois en 200 ans ! Nous avons choisi de ne pas faire figurer, sur le bassin final, de différence entre éclaircie et exploitation. D'abord parce que chaque cellule est exploitée au moins une fois en 200 ans (durée supérieure à l'âge d'exploitation le plus élevé, celui des futaies de feuillus). Ensuite parce que les cellules de futaies font toujours l'objet de plusieurs éclaircies (du moins selon le modèle que nous utilisons).

Enfin, nous ne relevons pas le nombre d'étapes pour lesquelles chaque cellule a été exploitée ou éclaircie. Non pour un problème technique (une simple addition suffirait), mais pour un problème de sens : le nombre d'exploitations dépend du type de peuplement, et le nombre d'éclaircies est surestimé par les tables d'accroissement et d'éclaircie utilisées (cf. chapitre précédent, cette surestimation ne mettant pas en cause la quantité prélevée).

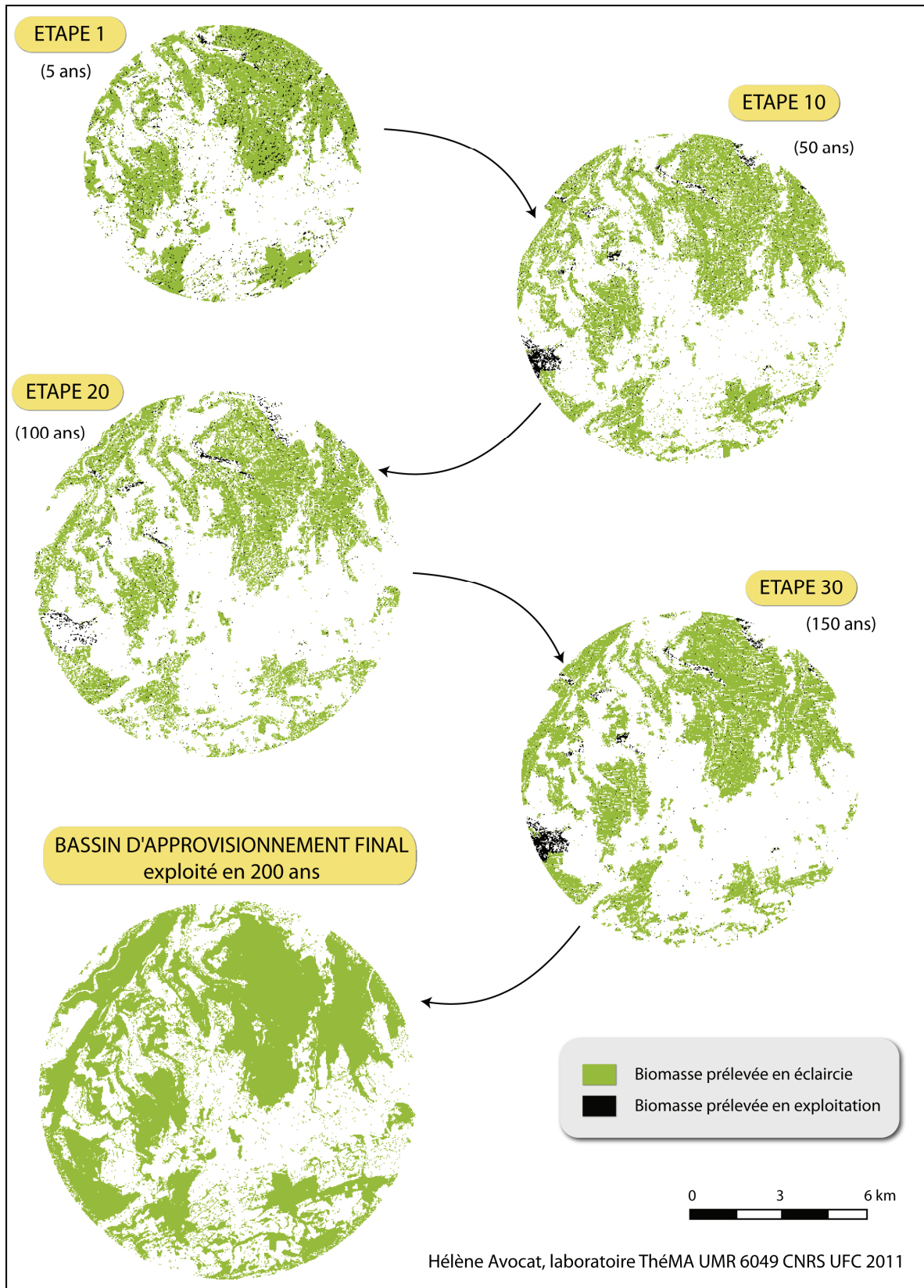


Figure 136 : bassins d'approvisionnement à court terme et bassin exploité dans la durée. Exemple d'Amancey.

4.2. Contribution des différents types de peuplement

L'analyse des quantités de biomasse prélevables, par gradient d'éloignement et par type de peuplement, met en évidence des phénomènes intéressants, notamment l'importance du gisement énergisable des arbres hors forêt. Selon la configuration du couvert boisé, ce potentiel varie, mais il contribue à la satisfaction des besoins énergétiques, spécialement en milieu rural où les abords des villages sont souvent marqués par la présence d'arbres non forestiers (anciens vergers, parcelles agricoles peu remembrées ayant conservé leurs anciens îlots et bordures arborés). On peut par exemple le lire pour le cas de la chaufferie de Déservillers (cf. figure 137, représentant les quantités de biomasse exploitables à des fins énergétiques par type de peuplement et par distance).

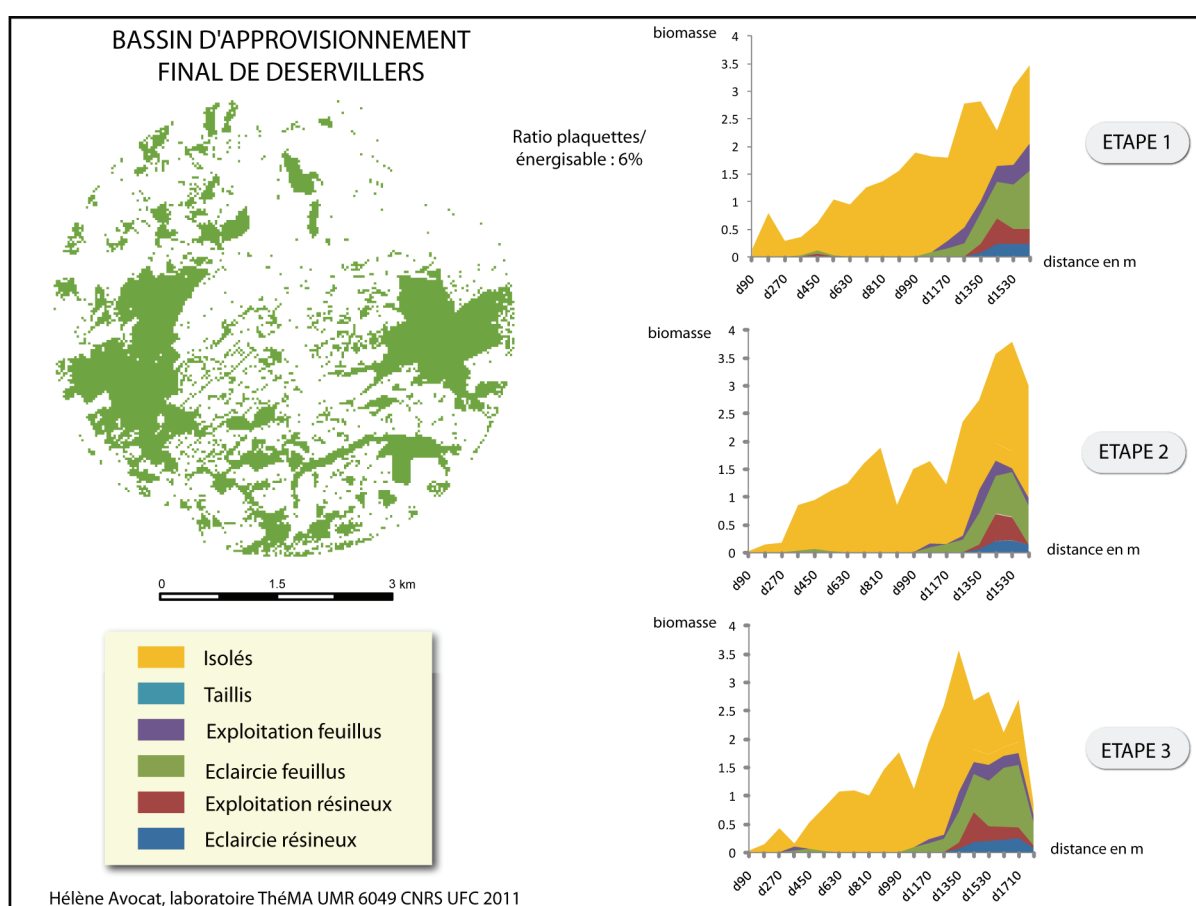


Figure 137 : bassin d'approvisionnement et types de peuplement exploités.

Exemple de Déservillers

Cet exemple montre non seulement que les arbres isolés constituent l'essentiel du gisement de plaquettes forestières valorisable par la chaufferie, mais qu'il s'agit aussi du principal gisement mobilisable à proximité immédiate de la chaufferie. L'autre source importante de plaquettes forestières provient des futaies de feuillus (éclaircies essentiellement), et dans une moindre mesure des exploitations. La distance à partir de laquelle commencent les prélèvements en

futaie correspond simplement à la distance entre le village et les forêts situées à l'est et à l'ouest. La situation est radicalement différente pour la chaufferie de Novillars (figure 138).

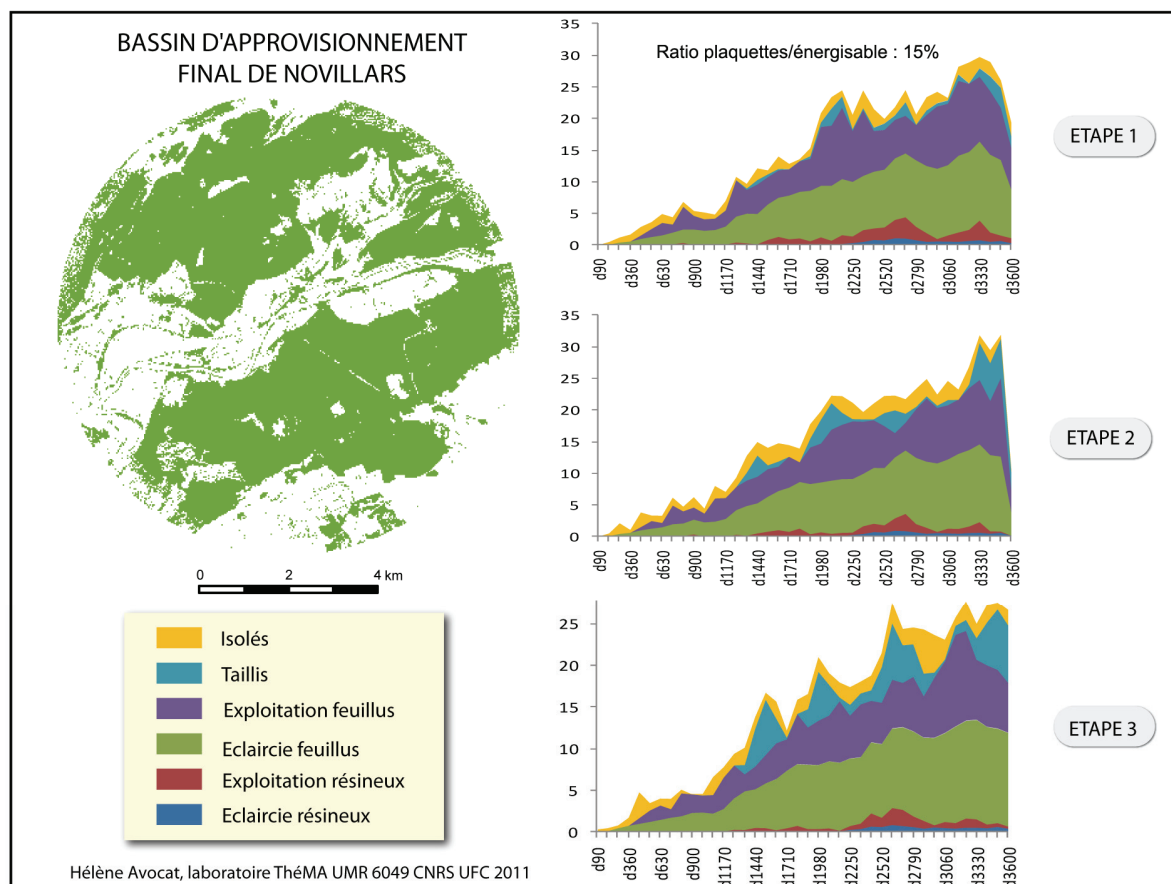


Figure 138: bassin d'approvisionnement et types de peuplement exploités.

Exemple de Novillars.

Si les arbres isolés sont davantage exploités que les autres types de peuplements à proximité immédiate de la chaufferie, ils ne constituent pas en revanche le gisement majoritaire de bois-énergie. Les futaies de feuillus pourvoient la plus grande quantité de plaquettes forestières, avec une différence moindre entre volumes prélevés en éclaircies et en exploitation que dans l'exemple précédent. Ici les taillis constituent eux aussi une ressource significative.

4.3. Des contraintes d'accessibilité n'influençant que modérément les distances d'approvisionnement

Nous avons tenté de comparer l'emprise spatiale de bassins d'approvisionnement en fonction de la prise en compte ou non de contraintes d'accessibilité (pente et distance au réseau viaire). Le résultat ne témoigne pas de différences très importantes (cf. figure 139). Il y a en effet peu de zones d'exploitabilité « très difficile ». Si les vallées présentent des dénivelés importants (pensons notamment aux vallées de la Loue et du Lison), la zone d'étude est en revanche très

bien maillée par le réseau routier, et il n'y a pas de zones situées à plus de 1000 mètres d'une route ou d'un chemin. Si les coûts de d'exploitation sont plus élevés dans les zones les moins accessibles, les ressources sont néanmoins exploitables, et les contraintes liées à l'accessibilité ne sont pas si importantes qu'on aurait pu le penser à première vue.

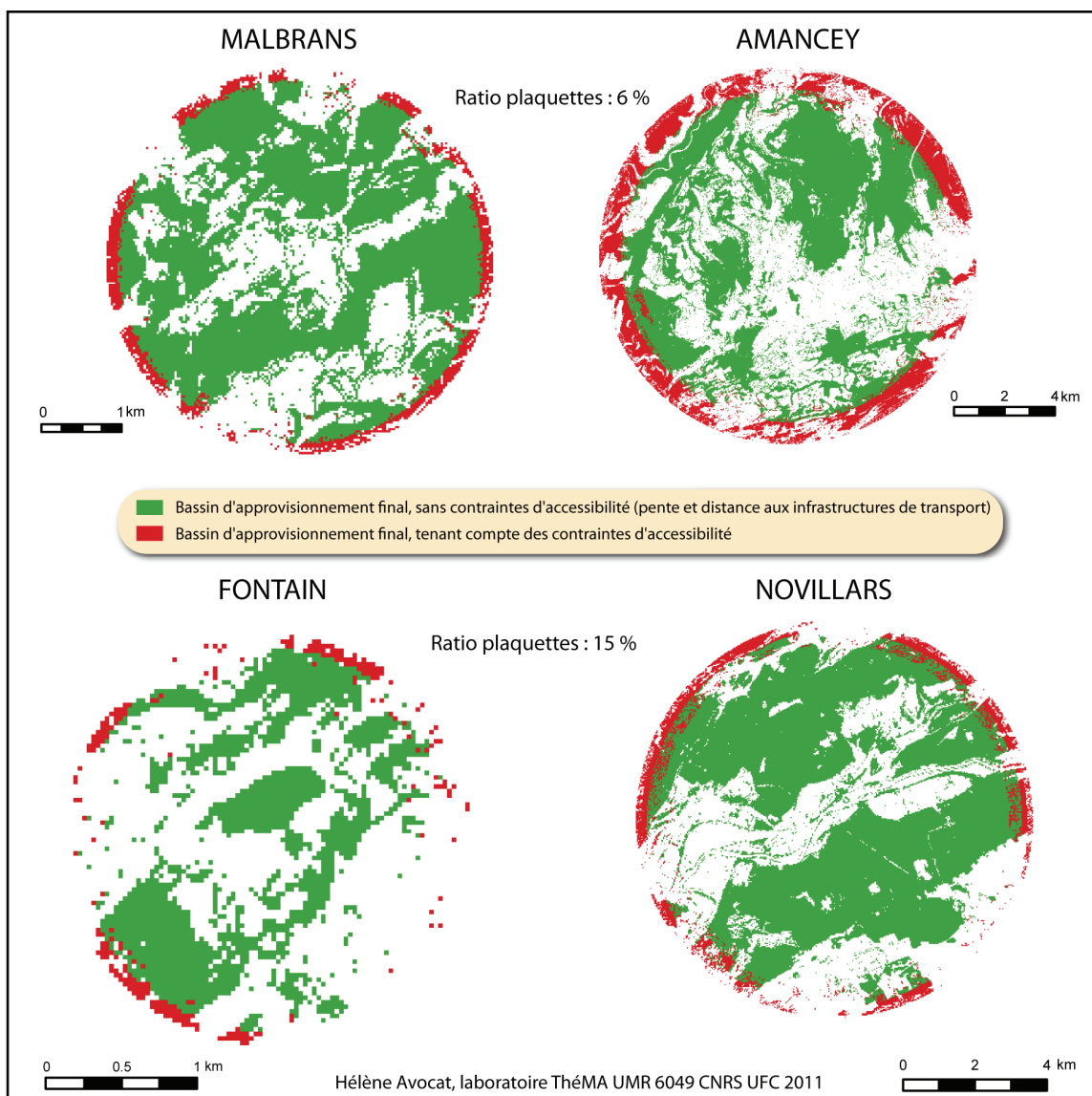


Figure 139 : comparaison des emprises spatiales des bassins d'approvisionnement finaux considérant ou non les contraintes d'exploitabilité liées à la pente et au réseau viaire

Les contraintes d'exploitation liées à la desserte routière n'entrant pas en jeu ici, seul le facteur pente a une incidence. Ce qui se note par un léger accroissement du rayon d'approvisionnement (cf. tableau 24).

	Rayon d'approvisionnement en mètres sans prise en compte des contraintes d'exploitation	Rayon d'approvisionnement en mètres avec prise en compte des contraintes d'exploitation	Pénalisation en % sur le rayon des bassins	Surface du bassin d'approvisionnement en ha sans prise en compte des contraintes d'exploitation	Surface du bassin d'approvisionnement en ha avec prise en compte des contraintes d'exploitation	Pénalisation en % sur la superficie exploitée
Malbrans	2430	2700	+ 11 %	1183	1332	+ 12 %
Amancey	6660	7470	+ 12 %	6852	9083	+ 32 %
Fontain	1260	1350	+ 7 %	181	204	+ 12 %
Novillars	5220	5490	+ 5 %	5006	5630	+ 12 %

Tableau 23 : rayons et superficie des bassins d'approvisionnement en fonction des contraintes d'exploitation

L'accroissement du rayon et de la surface des bassins d'approvisionnement reste modeste, en dépit de la prise en compte des contraintes liées à l'accessibilité. Le rayon d'approvisionnement s'accroît entre 5 et 12 %, passant ainsi de 5220 mètres à 5490 mètres pour Novillars, dont l'accroissement est minimal, alors que Malbrans voit son rayon d'approvisionnement accru de 810 mètres, ce qui reste dans des proportions modestes. Les superficies des bassins d'approvisionnement s'accroissent elles aussi d'un peu plus de 10 %, sauf pour Amancey, qui s'accroît de plus de 30 %. Dans le cas d'Amancey, le bassin d'approvisionnement (hors contrainte), recouvre dans sa périphérie les forêts installées sur les pentes de la Vallée de la Loue (au nord et au nord-est), du Lison (à l'ouest), ainsi que les pentes du faisceau qui séparent le 1^{er} du 2^{ème} plateau jurassien (au sud). La pénalisation par le relief est donc exacerbée par cette conjonction topographique, et d'autant plus exacerbée que l'extension du bassin (avec contraintes d'exploitation) se fait sur les pentes plus lointaines des vallées et de la démarcation des plateaux : les contraintes y pèsent donc, demandant d'agrandir encore plus la surface d'approvisionnement. Ce qui est contrebalancé par l'importance du couvert forestier sur ces pentes. Le tout expliquant la forte augmentation de la superficie forestière du bassin, pour une augmentation modeste du rayon.

Au final, il y a peu de différence entre les bassins d'approvisionnement, prenant en compte ou non les contraintes d'accessibilité, alors que la bibliographie et les PAT insistent beaucoup sur ce point... En revanche, on ne prend pas en compte le foncier, ce qui est une vraie limite au modèle.

4.4. Emprises et concurrence des bassins d'approvisionnement finaux

Le bassin d'approvisionnement final est formé de l'espace capable de fournir les quantités de biomasse nécessaires au fonctionnement d'une chaufferie sur le long terme et en valorisant les ressources de proximité. L'ensemble des bassins finaux met en évidence des phénomènes de concurrence spatiale (cf. figures 141 et 142), avec des phénomènes de recouvrement partiel ou total.

Les superficies des bassins finaux, nous l'avons vu, varient fortement selon le ratio "plaquette/bois énergisable". Ils sont ici de 6% pour le Pays Loue-Lison (conformément aux données de consommation de bois-énergie des Communes Forestières). En première approche, nous avons appliqué un taux de 15 % pour la CAGB (en l'absence de données précises, nous avons considéré que la proportion de plaquettes forestières consommées était la même qu'en Franche-Comté). Appliquer ce ratio pour la CAGB a posé des problèmes pour "assurer" l'approvisionnement des chaufferies bisontines dans le rayon maximal imposé (15 km). Nous avons donc résolu d'allouer 50 % de la biomasse mobilisable aux plaquettes forestières pour pouvoir "satisfaire" la demande de ces chaufferies. Même en faisant cela, la taille du bassin d'approvisionnement de la commune de Besançon est sans commune mesure avec celle des autres chaufferies. Il recouvre tous les autres bassins d'approvisionnement du territoire, et même déborde au-delà, au nord, et au sud dans le Pays Loue-Lison, où il empiète sur les bassins d'approvisionnement des chaufferies locales (cf. figure 141). Ce taux de 50 % alloué à la CAGB a comme mérite de faire fonctionner notre modèle, mais il paraît fort élevé (cf. les 15 % initiaux), il réduit à peu le potentiel en bois bûche... La carte 141 présente les bassins finaux calculés d'après ce taux "adapté". Ces derniers ne doivent pas être considérés comme une image très fiable des approvisionnements de la CAGB. . La figure 140, permet de mesurer l'importance de la concurrence (taux de superposition).

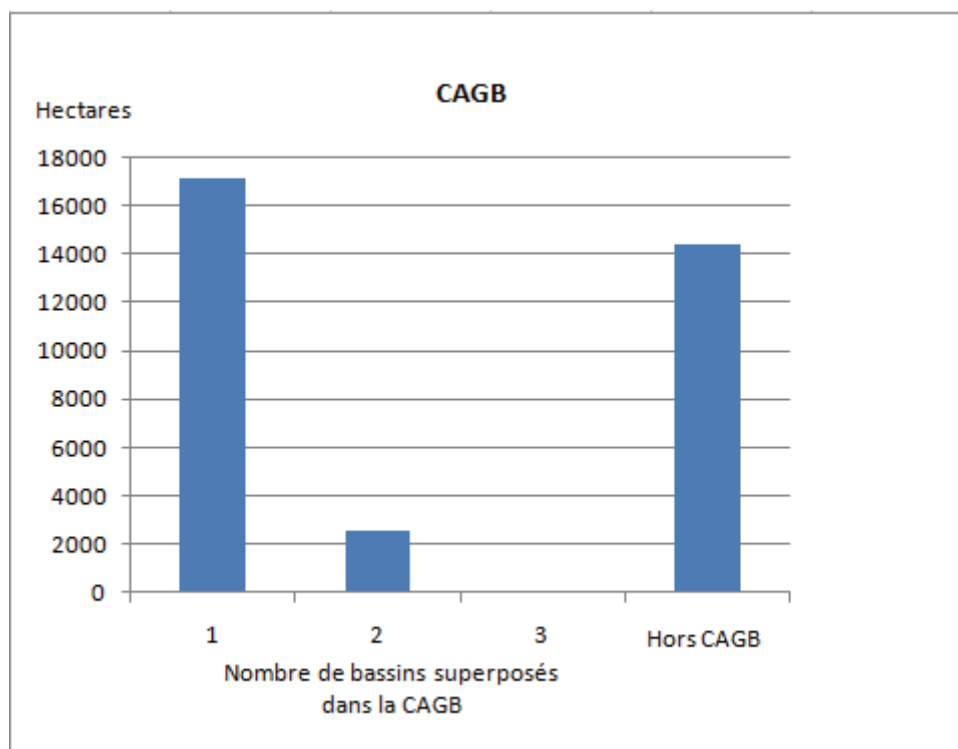


Figure 140 : taux de superposition des bassins d’approvisionnement de la CAGB

D’après le modèle, la grande majorité des cellules boisées de la CAGB (88 %) sont exploitées ou éclaircies au moins une fois pour l’approvisionnement des chaufferies bisontines. Plus de 14000 ha de forêts ou d’espaces boisés non forestiers sont exploités ou éclaircis en dehors de la CAGB au moins une fois pour l’approvisionnement des chaufferies bisontines, ce qui représente presque autant que la totalité des espaces exploités au sein de la CAGB... 11 % des cellules boisées du territoire sont exploitées pour deux chaufferies, et à peine 0,4% des cellules boisées (soit 92 hectares) intersectent les trois bassins d’approvisionnement de Besançon, Novillars et Gennes.

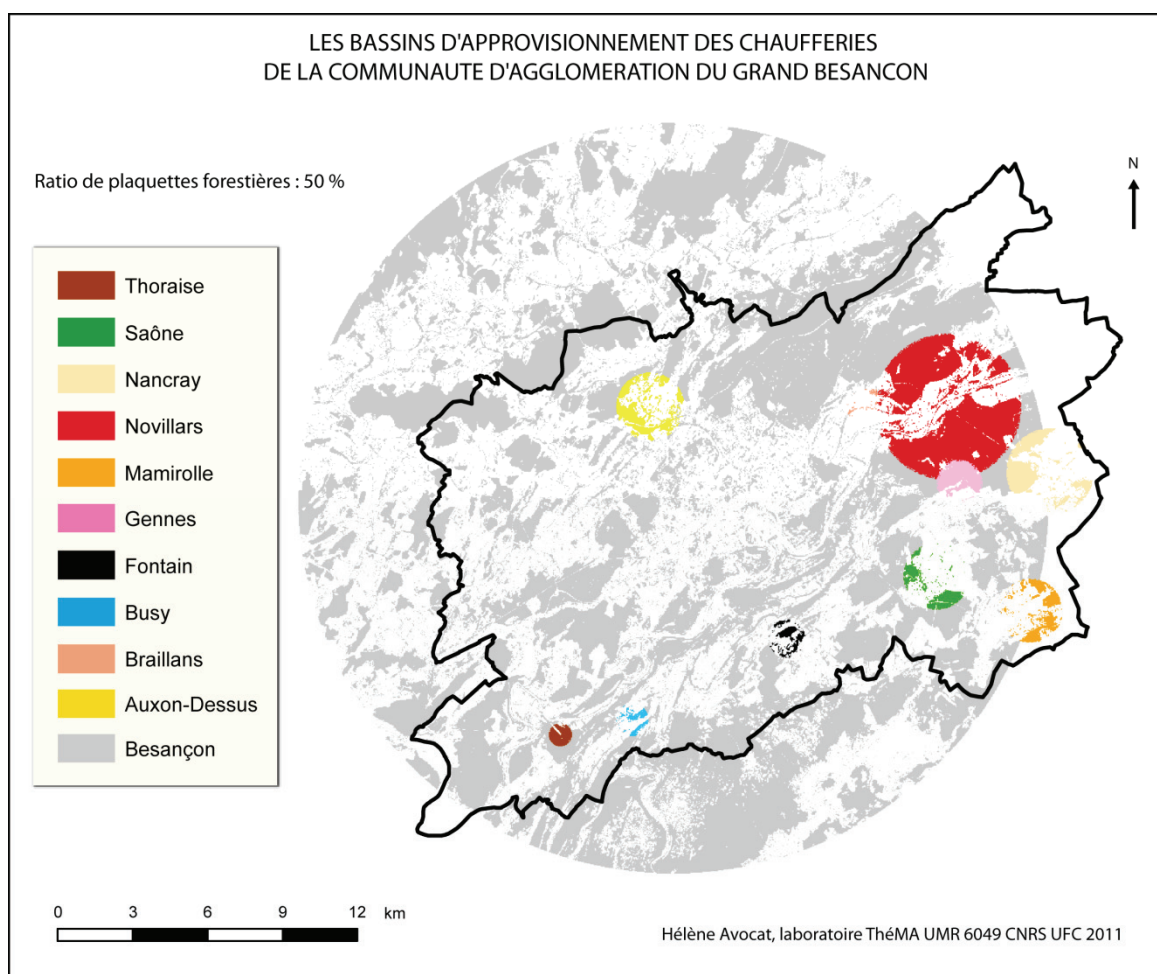


Figure 141: emprises spatiales des bassins d'approvisionnement des chaufferies de la CAGB (chaufferies en fonctionnement en 2010)

Le Pays Loue-Lison est marqué par la suprématie du bassin d'approvisionnement d'Ornans, et dans une moindre mesure de celui d'Amancey (figure 142). Ces deux installations mobilisent à elles deux d'importantes ressources sur moitié est du territoire. Le reste des installations possède des bassins d'approvisionnement plus restreints. L'approvisionnement local des petites chaufferies est assuré dans un rayon de 3 à 5 km, il paraît donc "tenable" localement, du moins tant que la distance entre les chaufferies ne s'amenuise pas...

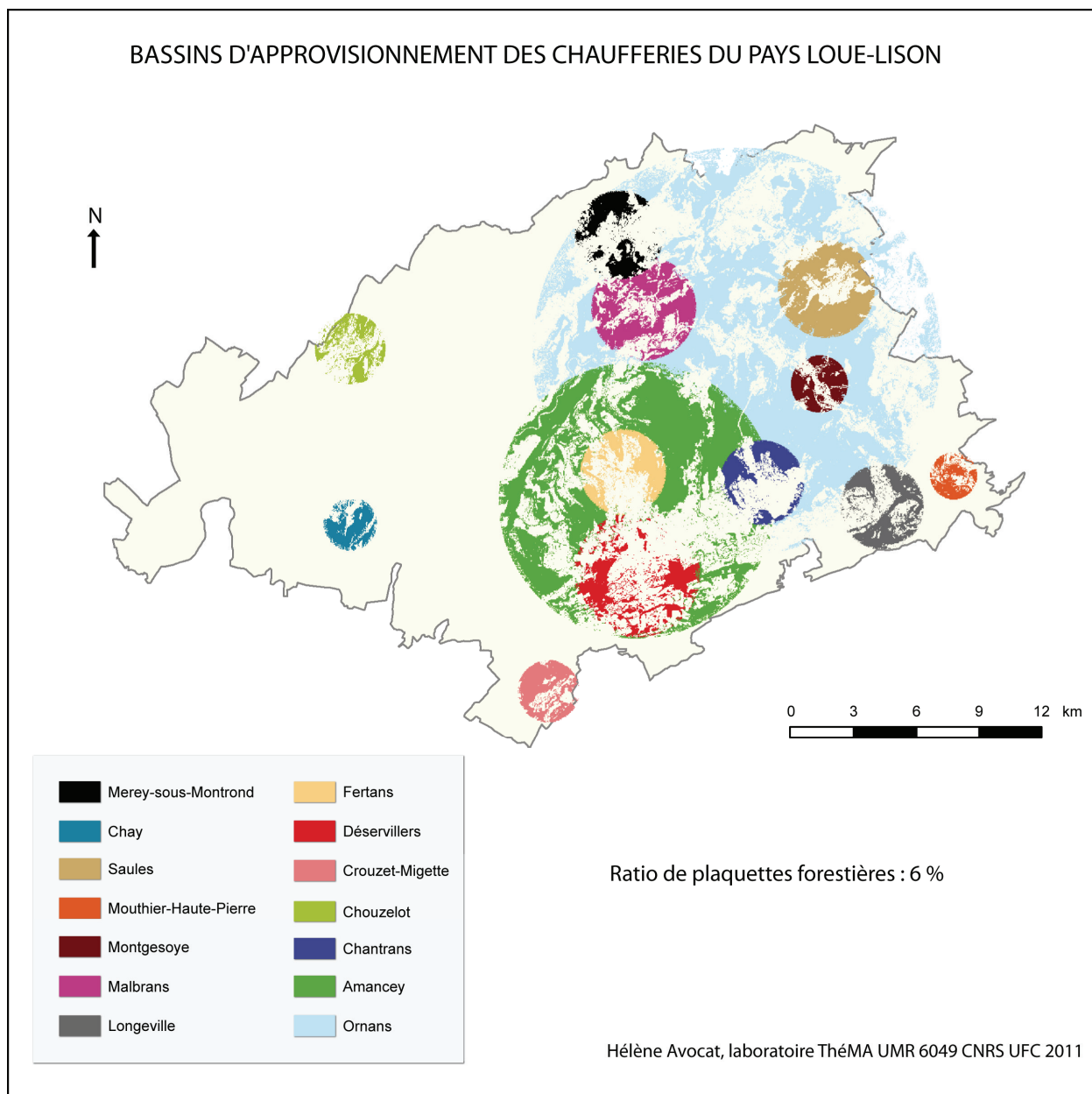


Figure 142 : emprises spatiales des bassins d'approvisionnement des chaufferies du Pays Loue Lison (chaufferies en fonctionnement en 2010)

Presque un tiers des cellules exploitées recouvre un bassin d'approvisionnement, 17 % concernent deux bassins d'approvisionnement, et 2,5 % intersectent trois bassins d'approvisionnement. 1 hectare est exploité à la fois par les chaufferies d'Ornans, Amancey, Fertans, et Déservillers (cf. figure 143). 600 hectares sont exploités en dehors du Pays Loue-Lison. Au total, le nombre de cellules exploitées une ou plusieurs fois dans le Pays Loue Lison s'élève à 21000 hectares, soit environ la moitié de la superficie boisée du territoire (40000 hectares).

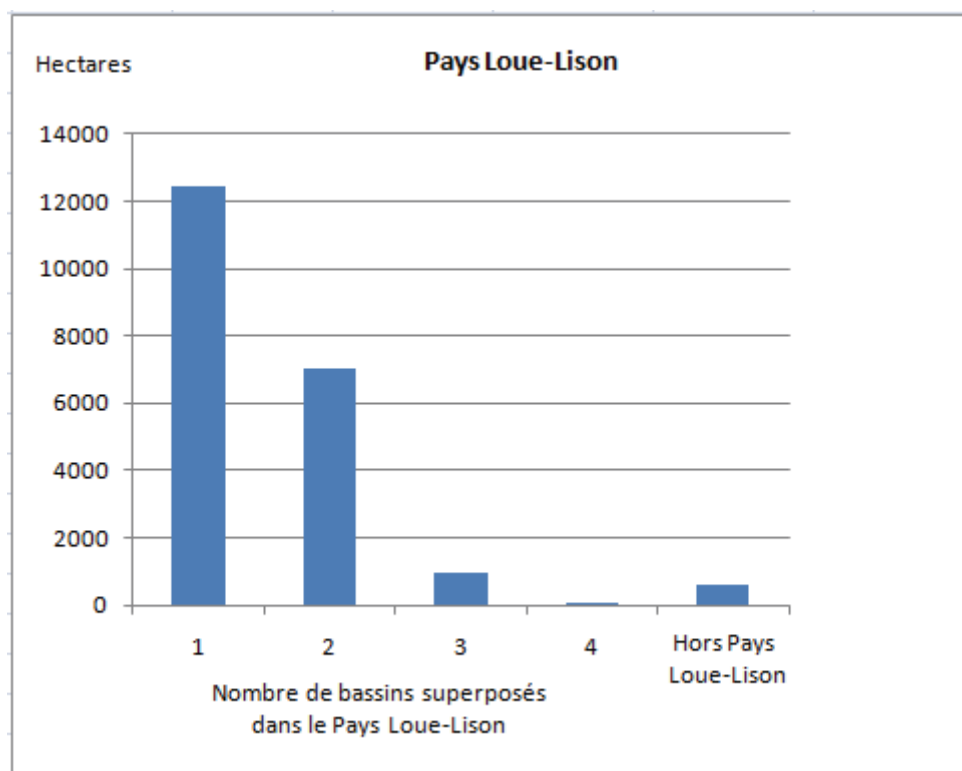


Figure 143 : taux de superposition des bassins d’approvisionnement du Pays Loue Lison

Conclusion du chapitre 11

La démarche développée ici donne une vision globale et théorique des emprises d'approvisionnement pour les demandes en plaquettes forestières à l'échelle locale. L'objectif était de définir des bassins d'approvisionnement locaux, tenant compte des contraintes de renouvelabilité des ressources ligneuses. Si pour l'heure la minimisation des distances de transport n'est pas une priorité pour l'ensemble des acteurs de la filière, elle pourrait le devenir si les coûts des carburants venaient à augmenter de façon importante. D'autre part, la réduction des émissions de polluants et gaz à effet de serre liés au transport apparaît comme une nécessité d'un point de vue environnemental.

L'analyse des bassins d'approvisionnement met en évidence les quantités de biomasse ligneuse durablement prélevables et broyables en plaquettes forestières aux abords de chaque chaufferie, en tenant compte de la demande en bois-bûche et autres usages du bois. L'étude des bassins d'approvisionnement à court terme permet d'identifier la contribution de chaque type de peuplement forestier (en exploitation et en éclaircie), et confirme le rôle des arbres hors forêt, qui s'est dessiné de façon accentuée en milieu rural, même si les futaies de feuillus demeurent un approvisionnement essentiel par éclaircie. Dans les cas observés, les taillis ont un rôle faible, alors qu'ils sont réputés être le mode de conduite forestier le plus propice à la production de bois-énergie.

Deuxième phénomène intéressant mis en lumière par le modèle : le rôle des contraintes de mobilisation. Les contraintes considérées ici (distance au réseau routier et pente), ne se révèlent que peu importantes en regard de l'emprise spatiale des bassins d'approvisionnement. D'autres contraintes seraient à prendre en compte, notamment les contraintes d'ordre foncier.

Enfin, les emprises des bassins mettent en évidence des phénomènes de concurrence spatiale pour l'accès aux ressources locales, exacerbées par la proximité des lieux de consommation, les conflits d'usage et l'importance des sites (polarisation de la demande).

- La **proximité des sites** peut ainsi engendrer des phénomènes de recouvrement des bassins d'approvisionnement, même en présence de « petites chaufferies ». Ainsi, dans le Pays Loue-Lison, les structures actuelles, même modestes, sont parfois potentiellement en concurrence entre elles (exemple d'Amancey, de Déservillers et de Chantrans, par ailleurs situées sur le bassin d'Ornans).

- La masse prélevable en bois-énergie n'est pas destinée au seul **usage** des chaufferies : la ressource est en effet largement utilisée sous forme de bois bûche. Bien que d'usage traditionnel, le bois bûche a le vent en poupe. Le ratio attribué aux plaquettes forestières dans le Pays Loue-Lison (6%) est largement inférieur au ratio de plaquettes forestières à l'échelle de la Franche-Comté (15%). Dans la CAGB, l'application d'un tel ratio (15%) ne permet pas de satisfaire les demandes des seules chaufferies bisontines : dans un rayon de 15 km, c'est environ 45% de la fourniture qui peut être assurée (68% pour la meilleure étape quinquennale, 27% pour la pire). Agrandir le rayon d'approvisionnement ne semble pas une solution, quand on relève que le pays limitrophe consommera d'ici peu (projets en cours) davantage de ressources. Nous avons pris le parti d'augmenter la ratio plaquette de la CAGB à 50%, pour parvenir à délimiter des bassins d'approvisionnement locaux, mais ce taux paraît fort peu réaliste, et les bassins modélisés ne le sont pas non plus... leur extension "théorique" devrait être beaucoup plus grande, et beaucoup plus concurrentielle des autres approvisionnements.
- Au-delà des concurrences par proximité et par usage, le problème est donc bien celui de la puissance d'une partie des installations du dispositif actuel, qui ne peuvent pas être durablement approvisionnées par les forêts locales, pas plus qu'elles ne trouveront d'approvisionnement non concurrentiel sur le pays voisin. Le développement de l'énergie bois, et plus particulièrement des chaufferies bois, s'est affirmé aussi dans le monde rural, qui, pour s'approvisionner sur sa ressource propre, ne pourra vraisemblablement approvisionner les grandes chaufferies urbaines actuelles... que dire des nouveaux projets développés en milieu urbain, ou des projets de grandes centrales de cogénération ? Les espaces boisés pourraient peut-être fournir plus de bois-énergie, avec d'autres modes de gestion, avec des superficies accrues, mais aux dépens des usages concurrents de la forêt et de l'espace. Le modèle que nous proposons maximise l'utilisation de la ressource (peu de contraintes) et minimise les distances d'approvisionnement. Les résultats sont inquiétants. Aller chercher des ressources beaucoup plus loin sera-t-il suffisant, économiquement pertinent et durable ? Exploiter les forêts locales à court terme (quelques décennies) sans tenir compte de leurs caractéristiques de renouvellement peut être provisoirement tentant, mais serait très peu durable...

Conclusion de la partie 3

Les approvisionnements en plaquettes forestières dépendent de nombreux facteurs, spatiaux et aspatiaux. Nous avons choisi ici de nous intéresser à la composante spatiale de ces approvisionnements, par l'analyse des données de traçabilité d'une part, et par la modélisation de bassins théoriques d'autre part.

Les processus d'approvisionnement peuvent être considérés comme des interactions spatiales (flux) entre les espaces boisés et les chaufferies. Ces interactions sont appréhendées au moyen de données de traçabilité répertoriant l'origine des combustibles (commune ou massif forestier), les quantités de flux (en tonnes), et la destination. Grâce à la coopération d'ONF Énergie et de la société Girard, nous avons obtenu deux jeux de données de traçabilité, concernant respectivement la chaufferie bois de Planoise à Besançon (qui est à l'heure actuelle la plus importante chaufferie collective franc-comtoise), et trois chaufferies de taille plus modeste situées dans le Pays Loue Lison. L'objectif était dans un premier temps d'étudier la distribution spatiale et statistique des flux, ainsi que le rôle joué par la distance, et par la configuration des espaces boisés (rôle des importants massifs forestiers et *a contrario* de la fragmentation). Nous avons notamment voulu tester la validité d'une analogie avec le modèle gravitaire, stipulant une décroissance de l'intensité des flux avec l'éloignement. Les modèles gravitaires restent largement utilisés pour les études de flux, les géographes ayant mis en évidence des phénomènes de régularité dans les échanges entre les unités spatiales. Nos hypothèses de base étaient les suivantes :

- a) la taille des bassins d'approvisionnement est, dans une certaine mesure, liée à la puissance de la chaufferie ;
- b) l'importance et la configuration des espaces forestiers jouent un rôle dans les approvisionnements ;
- c) les zones proches entretiennent davantage de relations avec les chaufferies que les zones éloignées, et sont exploitées de manière préférentielle afin de minimiser les distances et les coûts de transport.

Nos résultats ne sont cependant pas très concluants : les facteurs spatiaux n'expliquent ainsi qu'une partie des approvisionnements. D'autres facteurs doivent être considérés : stratégies commerciales, jeux d'acteurs, ..., ainsi qu'un effet lié aux opportunités de déboisement ponctuelles, qui représentent un gisement important, mais opportuniste et variable (Boittin et al., 2010).

N'ayant pu mettre en évidence le rôle de la configuration spatiale et de la proximité du couvert forestier pour modéliser les bassins d'approvisionnement (même si la forme générale des aires

d'approvisionnement (cf. figure 85) laissait transparaître à première vue une relation entre la taille du bassin d'approvisionnement et la taille de la chaufferie), nous avons choisi de modéliser des bassins d'approvisionnement théoriques, visant à maximiser la valorisation durable des ressources locales.

Une telle démarche impliquait au préalable une quantification de la biomasse ligneuse énergisable. Un premier travail de classification d'une image Landsat TM à 30 mètres de résolution, nous a permis de cartographier finement les principaux types de peuplement en forêt et hors forêt (et de compléter ainsi la cartographie des types de peuplement de l'IFN). Pour cartographier la biomasse, nous avons ensuite couplé des valeurs d'un indice de végétation dérivé de l'imagerie satellitaire (révélateur de l'activité chlorophyllienne et indirectement de la biomasse) à des données dendrométriques. L'imprécision des coordonnées géographiques, et les biais inhérents aux méthodes d'échantillonnage, ont cependant rendu impossible l'établissement d'une relation entre les données d'inventaire forestier et des valeurs d'indices de végétation. Pour pallier ce problème, nous avons calibré un modèle de biomasse à partir des valeurs d'indice de végétation de chaque type de peuplement, et des valeurs moyennes de biomasse issues de la littérature. Le résultat se présente sous la forme d'une couverture cellulaire, où chaque "cellule boisée" est caractérisée par une valeur de biomasse, exprimée en tonnes. Même si des biais persistent dans le résultat, les valeurs calculées par le modèle correspondent aux ordres de grandeur des valeurs de biomasse relevées par le laboratoire de Chrono-Environnement en Forêt de Chaux. Ces biais sont imputables entre autres à l'imagerie satellitaire, notamment pour les arbres hors forêt (pixels mixtes), ainsi que dans les zones pentues et sous exposées (valeurs sous-estimées par le modèle), et *a contrario* dans les zones surexposées (valeurs surestimées par le modèle). En dépit de ces biais, ce modèle présente un complément intéressant aux données d'inventaire des forestiers pour l'établissement de modèles de biomasse énergisable (notons par ailleurs que l'échelon minimal de restitution de résultats de ces modèles est très rarement infra-régional).

Une fois la biomasse aérienne modélisée pour les espaces boisés forestiers et les arbres hors forêt, l'étape suivante a été de déduire la quantité de biomasse énergisable durable théorique pour une zone d'observation. L'objectif était de voir si les ressources ligneuses de cette zone pouvaient durablement approvisionner les chaufferies de ce même secteur. Nous avons simulé la croissance (production) de chaque "cellule boisée", et les prélèvements possibles en éclaircie ou en exploitation finale pour 40 étapes quinquennales (soit 200 ans), en utilisant les données des tables de production de N. Decourt. Dans cette démarche, tous les espaces boisés et arborés sont supposés exploitables, sans facteurs limitants (distinction foncière, restrictions environnementales, etc.), et la masse ligneuse totale ne doit pas diminuer par rapport à sa masse initiale. Un ensemble de règles permettent de prendre en considération les différents usages de la matière ligneuse (bois d'œuvre et bois bûche). Les résultats obtenus se présentent sous la forme de tables, desquelles il est possible d'identifier pour chaque étape quinquennale,

la contribution de chaque type de peuplement. Si le Pays Loue-Lison est aujourd'hui en mesure d'approvisionner les chaufferies de son territoire sans porter préjudice à la satisfaction de la demande en bois-bûche (qui constitue plus de 90% de la demande totale en bois-énergie du territoire), la situation est plus préoccupante dans la CAGB, compte tenu des importants projets de chaufferies à Besançon. Malgré d'importantes ressources, le territoire ne serait plus capable d'assurer la fourniture en plaquettes forestières des chaufferies collectives, et d'approvisionner les particuliers en bois-bûche, si la demande venait encore à augmenter. Bien que les choix opérés dans cette modélisation puissent être critiqués et que certains biais persistent, il s'agit néanmoins d'une démarche originale, donnant des résultats à l'échelle locale et estimant le potentiel dendroénergétique des arbres hors forêt, ce qui constitue une alternative intéressante aux modèles issus de la foresterie.

Après avoir déterminé la biomasse énergisable à l'échelle de chaque secteur et mis en parallèle la ressource disponible et la demande, nous avons modélisé les bassins d'approvisionnement théoriques de chaque chaufferie. L'objectif était de définir des bassins d'approvisionnement durables (tenant compte des contraintes de renouvelabilité de la ressource), et maximisant le recours aux ressources de proximité, et tenant compte des contraintes d'accessibilité à la ressource. Pour chaque chaufferie, nous avons identifié des bassins d'approvisionnement temporaires, correspondant aux cellules exploitées pour satisfaire les besoins de la chaufferie pour chaque étape quinquennale. L'ensemble des cellules exploitées lors de chaque étape constitue le bassin d'approvisionnement final de la chaufferie. L'étude des bassins d'approvisionnement à court terme nous a permis d'identifier la contribution de chaque type de peuplement en fonction de l'éloignement à la chaufferie. Cette analyse a confirmé par ailleurs le rôle important des arbres hors forêt, et *a contrario* le faible impact des contraintes de mobilisation en regard de l'emprise spatiale des bassins d'approvisionnement. Enfin, la représentation cartographique des bassins d'approvisionnement a permis de mettre en évidence des concurrences spatiales, illustrés par des phénomènes de recouvrement total ou partiel. Ces concurrences sont exacerbées par la proximité et par l'importance des sites, ainsi que par les conflits d'usage...

Le Pays Loue-Lison paraît pouvoir assurer localement et durablement l'approvisionnement de ses chaufferies actuelles (au prix d'un déséquilibre d'équipement entre ses moitiés est et ouest, sans concurrence sur l'usage du bois bûche. La CAGB, par contre, n'est pas autosuffisante dans la configuration actuelle de son parc de chaufferies bois : même en supposant une faible concurrence du bois bûche, les bassins d'approvisionnement dépassent largement le territoire de l'agglomération. Qu'en sera-t-il lorsque les nouvelles installations de chauffage « vert » seront mises en service ?

Augmenter les capacités d'approvisionnement peut passer par une adaptation des pratiques sylvicoles (taillis à courte rotation, ce qui pose un problème pour les sols, pour les services écologiques. Approvisionner plus demande alors d'aller chercher le bois plus loin. Ce qui

pose le problème du transport, de ses émanations, de son coût. Ce qui pose aussi un problème de concurrence, les secteurs éloignés étant aussi susceptibles, comme le Pays Loue-Lison, de consommer leur propre dendroénergie. Approvisionner plus pourrait être réalisé, pour quelques décennies, en prélevant plus vite, mais avec quelle durabilité et quelles conséquences pour nos arbres et nos forêts ?

Conclusion générale

Énergie ancestrale, le bois fait aujourd'hui partie des "énergies nouvelles" qui ont le vent en poupe. Si le secteur domestique reste le principal consommateur de bois-énergie (sous forme de bois bûche), le secteur collectif se développe fortement depuis deux décennies : alors qu'hier les chaufferies du secteur collectif se comptaient sur les doigts de la main en Franche-Comté, on en recense aujourd'hui plus de 350⁹⁶ ! Face à cette augmentation, la question de l'approvisionnement devient centrale. Quelle quantité de biomasse peut-on prélever pour alimenter ces chaufferies collectives sans porter préjudice à la renouvelabilité des ressources forestières et sans nuire aux autres usages du bois ? Où s'approvisionne-t-on aujourd'hui ? Cherche-t-on véritablement à valoriser des ressources de proximité ? Existe-t-il déjà des concurrences entre les différents bassins d'approvisionnement ? Au-delà, est-il raisonnable que la demande continue d'augmenter ? Est-il pertinent de vouloir créer des chaufferies toujours plus puissantes ? Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, nous avons choisi de nous intéresser à deux territoires contigus, mais dont les profils diffèrent radicalement en matière de consommation dendroénergétique. Alors que le Pays Loue-Lison est un territoire rural, avec des chaufferies collectives de taille modeste et une forte consommation de bois bûche, la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon est marquée par la présence de chaufferies de forte puissance, polarisant la consommation, et drainant d'importantes quantités de ressources ligneuses. Les résultats obtenus donnent matière à réflexion.

Une approche originale

Le travail entrepris ici peut se prévaloir d'une certaine originalité. Si les processus d'approvisionnement dépendent pour partie de facteurs aspatiaux (stratégies économiques et commerciales, jeux d'acteurs), ils comportent également une importante dimension spatiale. Le manque de travaux portant sur la spatialisation des processus d'approvisionnement nous a permis de mettre en place une véritable démarche d'investigation, à la croisée des chemins de la géographie, de l'énergie, de la foresterie... Démarche dont la mise en œuvre s'est cependant heurtée à de nombreuses embûches. L'absence de coopération d'une grande part des acteurs de la filière a été un frein majeur pour la compréhension des processus d'approvisionnement, et l'acquisition de données. Trois années ont été nécessaires pour acquérir seulement deux jeux de données de traçabilité, sous couvert d'importantes clauses de confidentialité.

Ces données étaient pourtant nécessaires pour comprendre l'organisation spatiale actuelle des approvisionnements. En répertoriant les lieux d'origine et de destination, ainsi que les quantités de bois acheminées, les données de traçabilité permettaient d'éprouver le rôle joué

⁹⁶ Nombre de chaufferies au 1er janvier 2011 : Pro Forêt, ADEME et Conseil Régional de Franche-Comté

par la distance et par la configuration du couvert boisé, autrement dit les facteurs spatiaux. Nous partions de l'hypothèse que la taille du bassin d'approvisionnement était proportionnelle à la puissance de la chaufferie, et que l'intensité des interactions diminuait avec l'éloignement à la chaufferie (ce qui était en accord avec le principe de valorisation des ressources locales). Cela sous-entendait qu'une logique gravitaire pouvait expliquer partiellement l'organisation spatiale des approvisionnements. Maintes fois éprouvé pour d'autres problématiques relatives aux interactions spatiales, l'application d'un modèle gravitaire s'est révélée ici mitigée. Si les résultats obtenus n'étaient que peu concluants, puisque le modèle expliquait moins de 20 % des flux, cela nous a tout de même permis de mettre en évidence un certain nombre de phénomènes intéressants : tout d'abord le rôle structurant de certains massifs forestiers (Forêt de Chaux, Forêt de Chailluz), ainsi que l'influence de la configuration des espaces boisés (fragmentation), mais également un rôle faible de la distance, que l'on ne cherche pas forcément à minimiser à l'heure actuelle. Or, dans une optique de développement local de minimisation des impacts environnementaux liés aux transports, et de non concurrence entre les territoires, il apparaît indispensable de valoriser les ressources de proximité.

C'est pourquoi nous avons mis en place une méthodologie visant à déterminer des potentiels durablement énergisables. L'objectif final était double : 1) déterminer si les ressources ligneuses de nos terrains d'étude étaient à même de satisfaire durablement la demande des chaufferies collectives sans porter préjudice à la demande en bois bûche et aux autres usages de la matière ligneuse ; 2) modéliser des bassins d'approvisionnement théoriques et visualiser les phénomènes de concurrence spatiale entre les bassins d'approvisionnement des différentes chaufferies. Nous avons également à cœur de déterminer la biomasse ligneuse des arbres hors forêts, réputés être un gisement énergisable important, mais à notre connaissance non quantifié. D'autre part, nous étions soucieux de diversifier les sources d'informations concernant les ressources ligneuses. Nous avons donc choisi de coupler des données d'imagerie satellitaire à des données dendrométriques. La classification de l'image nous a permis dans un premier temps de cartographier les peuplements forestiers et les arbres hors forêts. Puis, partant du principe que l'indice de végétation (révélateur de l'activité chlorophyllienne) était lié dans une certaine mesure à la biomasse aérienne, nous avons établi une relation entre les valeurs d'indice de végétation des différents peuplements et les valeurs de biomasse afférentes issues de la littérature. Même s'il persiste un certain nombre de biais, imputables à des problèmes d'exposition et de pente, ainsi qu'aux limites de l'indice de végétation (qui présente un effet de saturation dans les couverts boisés denses), cette démarche nous a permis de donner une estimation de la biomasse ligneuse aérienne en forêt et hors forêt, à une échelle assez fine. Seules des mesures de terrain auraient pu permettre d'améliorer les résultats et de lever les doutes dans les secteurs problématiques.

Une fois la biomasse aérienne estimée, nous avons entrepris d'en définir les quantités prélevables à des fins énergétiques pour chaque type de peuplement sur un secteur donné. Le principal objectif était de tenir compte des contraintes de renouvelabilité de la ressource. Or,

la vitesse d'accroissement dépend d'un très grand nombre de paramètres : essence, âge des peuplements, pédologie, climat etc. Il a fallu opérer une simplification de la réalité, ce qui nous a obligés à faire des choix, à poser des hypothèses, à définir des règles : pas de changement dans les types de peuplements (pas de conversion du taillis à la futaie), pas de reboisement (les cellules non boisées le restent), définition des règles d'accroissement/prélèvements en fonction de classes de productivité moyennes etc. Les résultats obtenus doivent donc être interprétés en connaissance de cause. Il n'en reste pas moins que ces résultats sont intéressants à plusieurs égards : si le Pays Loue Lison est pour l'heure capable de pourvoir aux besoins des chaufferies de son territoire et aux besoins en bois bûche des ménages, la situation de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon est préoccupante, en dépit de la présence d'importants massifs forestiers. Cette situation est d'autant plus préoccupante que les projets de nouvelles chaufferies sont importants, et que les territoires environnants ont eux aussi des besoins à satisfaire...

Nous avons ensuite approfondi notre démarche en modélisant l'emprise des bassins d'approvisionnement de chaque chaufferie. L'objectif était de mettre en évidence des phénomènes de concurrence spatiale se manifestant par le recouvrement total ou partiel d'un bassin par un ou plusieurs autres. Les bassins d'approvisionnement modélisés tiennent compte d'un certain nombre de contraintes : renouvelabilité des ressources ligneuses, satisfaction de la demande sur le long terme, exploitation des ressources de proximité etc. Là encore les résultats sont intéressants, notamment en ce qui concerne la contribution des différents types de peuplements (confirmation du rôle des arbres hors forêts), et pour ce qui est du recouvrement des bassins d'approvisionnement. La concurrence spatiale est forte, spécialement dans la CAGB où les bassins d'approvisionnement des chaufferies bisontines concurrencent les chaufferies des territoires environnants.

Des résultats donnant matière à réflexion

Au vu des résultats obtenus, nous nous interrogeons sur les capacités des très grosses installations à s'approvisionner localement sans porter préjudice aux installations de taille plus modeste. Cela pose également la question de la proximité des approvisionnements. Peut-on dire que l'on valorise des ressources « locales », si ces dernières parcourent plus de 20, 40, voire 100 km comme on le constate à l'heure actuelle ? Si les gros projets sont dits « structurants » pour la filière dans la mesure où ils permettent la mobilisation d'importantes quantités de biomasse dont peuvent potentiellement profiter d'autres chaufferies, on peut néanmoins s'interroger sur l'aspect « valorisation des ressources de proximité » et « développement local » des grosses structures fonctionnant de manière isolée. En effet, selon les chercheurs du projet BENEFITS, « le développement de la filière est une problématique portée par des acteurs qui n'ont pas les mêmes enjeux, ni les mêmes approches du développement de la filière. Les acteurs locaux, attachés à la maîtrise de leur ressource,

sont favorables au développement de petites chaufferies, typiquement collectives communales. Alors que les acteurs départementaux et régionaux, soucieux de la rapidité du développement de la filière, souhaitent s'appuyer sur de grosses unités urbaines ou industrielles, dont ils attendent un effet d'entraînement et une meilleure rentabilité par économie d'échelle ». Cependant, vu le nombre de camions et de trajets nécessaires pour approvisionner les structures importantes, la forte pondérosité du bois et sa faible intensité énergétique, on peut s'interroger sur la pertinence des très grosses installations, qui demandent des bassins d'approvisionnement plus étendus (ce qui implique de parcourir des distances de transport plus importantes). Dans le cas d'une forte polarisation de la demande par une structure très importante, le meilleur moyen d'éviter les effets de concurrence spatiale est de fonctionner en réseau en mutualisant les moyens et des équipements pour l'approvisionnement, comme c'est le cas pour la chaufferie de Planoise qui génère une forte attractivité, dont profitent les petites chaufferies communales bisontines approvisionnées par la même société. Face à cette diversité des approches et des attentes, il est nécessaire d'avoir une vision d'ensemble de l'offre, de la demande, et de l'emprise spatiale des bassins d'approvisionnement. L'appropriation de ces résultats par les décideurs et acteurs de la filière pourrait en permettre un développement plus harmonieux, en évitant par exemple d'implanter de nouvelles installations là où la demande est déjà très importante, et en équipant au contraire les lieux dépourvus d'installations.

De la nécessité d'autres apports

Si l'approche choisie a permis de mieux appréhender la spatialisation des processus d'approvisionnement, il faut néanmoins conserver à l'esprit ses lacunes.

Certaines analyses se sont révélées problématiques. Pensons notamment aux résultats présentés dans le chapitre 8, qui ont pâti de la pauvreté des données de traçabilité des combustibles. Cette traçabilité est devenue l'un des critères de l'ADEME pour l'éligibilité des projets de chaufferies au subventionnement. En effet, l'enjeu est de valoriser les ressources locales, et, malgré son statut de financeur et d'instance compétente en matière d'énergie, l'ADEME se heurte aussi à l'opacité des filières d'approvisionnement.

Par ailleurs ce travail gagnerait à être enrichi par l'apport de données qualitatives, plus proches de la réalité de terrain. Des enquêtes pourraient ainsi révéler la structuration des chaînes d'approvisionnement par les jeux d'acteurs, en fonction des motivations des uns et des autres. Ce type de démarche, mise en place dans le cadre du projet BENEFITS mené par C. Chauvin, gagnerait à être reproduite en Franche-Comté pour donner une vision complémentaire des approvisionnements en bois-énergie. Cependant, une telle approche est très difficile et très longue à mettre en œuvre dans un contexte fortement concurrentiel et évolutif.

Perspectives de recherches

Il est possible de proposer quelques pistes de recherche pour poursuivre ces travaux. Si la prise en compte de facteurs économiques et de jeux d'acteurs apparaît importante (bien que difficile à mettre en œuvre) le modèle gagnerait à être enrichi dans un premier temps par l'intégration de contraintes foncières et environnementales (nature et fragmentation de la propriété forestière, vulnérabilité des sols, zonages de protection, etc.). Enfin, connaissant l'offre et la demande, ainsi que l'emprise des bassins d'approvisionnement théoriques, nous pourrions envisager de développer un modèle de localisation optimale des plateformes de stockage. L'objectif serait de mettre en place un modèle de localisation multicritères pour définir le nombre et la taille de plateformes nécessaires pour la sécurisation des approvisionnements des chaufferies, les meilleures localisations, compte tenu de la configuration spatiale de l'offre et de la demande, et des contraintes d'implantation. Les méthodes développées pourraient ainsi fournir un protocole d'aide à la décision pour les organismes financeurs ou les futurs maîtres d'ouvrage des chaufferies.

Par ce travail nous souhaitons effectuer une prise de recul sur le développement de l'utilisation du bois-énergie, et montrer qu'au-delà des grandes déclarations sur ses avantages, se posent de nombreux problèmes. Nous ne les avons pas tous abordés pour mieux nous focaliser sur la question des approvisionnements, traités dans l'espace et dans le temps. Nous avons dû opérer de nombreuses simplifications, accepter plus d'un postulat, et les méthodes que nous avons choisies, comme les résultats auxquels nous parvenons, peuvent être discutés ou remis en cause. Pourtant, par cette méthode et avec ces résultats, nous montrons à travers les exemples du Pays Loue-Lison et de la CAGB que les ressources durables et locales sont déjà amplement mobilisées, peut-être trop. Accroître le parc de chaufferies augmentera la demande. Le prix du bois-énergie pourrait en être revalorisé, ce qui peut constituer un avantage pour le secteur forestier. Mais pour satisfaire cette demande accrue, il faudrait réduire les usages concurrents, ou aller s'approvisionner plus loin (donc entrer en concurrence avec d'autres territoires), ou encore exploiter plus vite, aux dépens de la durabilité, aux dépens de la forêt.

On trouve souvent le terme de « gisement » pour désigner la ressource en bois-énergie. Analogie sans doute avec les accumulations de matières minérales exploitées par d'autres filières énergétiques. Pourtant, les arbres et les forêts ne gisent pas, au contraire d'être inertes, ils sont vivants, se renouvellent, et s'il est possible de les exploiter, ce doit être à leur rythme.

Bibliographie

- ACADEMIE DES TECHNOLOGIES, 2004. *Prospectives sur l'énergie au XXI^{ème} siècle*. Consulté le 10/04/2010. Disponible sur: http://www.academie-technologies.fr/publication/rapports/energieEnvironnement/Synthese_EE2004%5b1%5d.pdf. 77 p.
- ADEME, 1993. *Énergies renouvelables, état de l'art*. ADEME. 52 p.
- ADEME, 1998. *Bois-énergie, le déchetage en forêt*. Direction de l'agriculture et des bio-énergies. ADEME. 111 p.
- ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie, 2006. *Programme national bois-énergie 2000-2006. Rapport d'activités 2000-2005*. ADEME éditions, 114 p.
- ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie, 2008. *Programme national bois-énergie 2000-2006. Rapport d'activités 2000-2006. Partie 2. Bilans régionaux*. Annexes. 21 p.
- ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie, 2008. *Programme national bois-énergie 2000-2006. Rapport d'activités 2000-2006. Partie 3. Bilans régionaux*. Annexes. 24 p.
- ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie, 2006. *La récolte raisonnée des rémanents en forêt*. ADEME. 37 p.
- ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie, 2007. *Bois, paille, cultures énergétiques... biomasse énergie, une alternative durable pour vos projets*. ADEME éditions. 6 p.
- ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie, 2009. *Appel à projets Biomasse Chaleur Industrie et Agriculture. Cahier des charges de l'appel à projets portant sur des installations industrielles de production de chaleur à partir de biomasse*. 20 p.
- ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie, 2008. *Étude de faisabilité d'une chaufferie bois. Schéma guide pour établir un cahier des charges d'études*. ADEME PBEDL. 10 p.
- ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie, 2009. *Programme bois-énergie collectif/tertiaire/entreprises, Franche-Comté 2009*. 14p.
- ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie, 2009. *Appel à projets biomasse Chaleur Industrie, Agriculture et Tertiaire (BCIAT)*. 26 p.
- ANDRIEU J., MERING C., 2008. *Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale oust-africaine : exemple des rivières du sud du delta du Saloum (Sénégal) au rio Geba (Guinée-Bissau)*. Revue de Télédétection. 8(2). pp. 93-118.
- ASSOCIATION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE LA FILIÈRE BOIS EN FRANCHE-COMTÉ, 2008. *Contrat d'aide à la compétitivité de la forêt-bois*. 12 p.
- AFOCEL, 2005. *Biocarburants : enjeux et perspectives pour la filière bois*. Informations forêt n°4-2005. Fiche n° 721. 6 p.
- AFOCEL, 2006. *Quel approvisionnement pour les industries du bois-énergie ?* Informations forêt n°3-2006. Fiche n° 734. 6p.
- ASSOCIATION D'INITIATIVES LOCALES POUR L'ÉNERGIE ET L'ENVIRONNEMENT, 2008. *Pré-diagnostic énergétique et étude de faisabilité d'une chaufferie bois*. Cahier des charges Pré-diagnostic énergétique et étude de faisabilité chaufferie bois. Mai 2008. 10 p.
- ALEXANDRE D.Y., LESCURE, J.P., BIED-CHARRETON, M. et FOTSING, J.M., 1999. *Contribution à l'état des connaissances sur les arbres hors forêt (TOF)*, IRD-FAO, Orléans, France. 185 p.

- AMIOT P., 2008. *L'agroforesterie, une diversification d'avenir*. Bois international n°12. 29 mars 2008. pp. 9-10.
- ANDRÉ P.C., 2006. *Bio-energy in Europe : changing technology choices*. Energy policy 34(3). pp. 322-342.
- ARNOLD M., KÖHLIN G., PERSSON R., SHEPHERD G., 2003. *Fuelwood revisited : what has changed in the last decade ?* CIFOR Occasional Paper n° 39. 47 p.
- ARNOLD P., BEGUIN H., PEETERS D., THOMAS I., 1997. *Structure géographique du réseau de transport et localisations optimales*. Flux n°27-28. pp. 9-16.
- ARNOULD P., 1996. *Les nouvelles forêts françaises*. L'information géographique. pp. 141-156.
- ARNOULD P., 2001. *La France des forêts*. Paris, Gallimard. 192 p.
- ARNOULD P., HOTYAT M., SIMON L., 1997. *Les forêts d'Europe*. Nathan. 413 p.
- ARNOULD P., SIMON L., 2007. *Géographie de l'environnement*. Paris, Belin. 304 p.
- ARTER A. 2007. *Le bois-énergie : menace ou opportunité pour la filière ?* Bois international n°13. pp.33-35.
- ASPA ASSOCIATION POUR LA SURVEILLANCE ET L'ETUDE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE, 2002. *Annexes au rapport final sur la répartition spatiale de la pollution atmosphérique. Méthodes d'interpolation spatiale*. ASPA 02031901-I-D. 15 p.
- ASPLUND D., 2002. *Plan d'action pour les énergies renouvelables en Finlande*. Bois-énergie n° 5. 3 p.
- AVOCAT H., GOUTALAND S., 2010. *Le bois-énergie en Franche-Comté : état des lieux et mutations*. Images de Franche-Comté n° 41. pp. 6-9.
- AVOCAT H., TABOURDEAU A., CHAUVIN C., DE SEDE-MARCEAU M.-H., 2011. *Energie et bois dans le territoire alpin : stratégies autour d'une ressource incertaine*. Revue de Géographie Alpine. 14 p. Accepté.
- BACCINI A., FRIEDL M.-A., WOODCOCK C.-E., WARBINGTON R., 2004. *Forest biomass estimation over regional scales using multisources data*. Geophysical Research Letters. 31. L10501. 4 p.
- BAILLY A. et al., 1998. *Les concepts de la géographie humaine*. Paris, A. Colin. 333 p.
- BALIAN R., 2001. *Physique fondamentale et énergétique. Les multiples visages de l'énergie*. Conférence introductive de l'Ecole d'Eté de Physique sur l'énergie. 32p. [consulté le 10/08/2009. Disponible sur: <http://e2phy.in2p3.fr/2001/balian.doc>
- BALLU J.-M., 2007. *Pour mobiliser la ressource de la forêt française*. Rapport du groupe de travail sur l'insuffisante exploitation de la forêt française. Ministère de l'agriculture et de la pêche. 30 p.
- BARET F., OLIOSO A., LUCIANI J.-L., HANOCQ J.-F., 1989. *Estimation de l'énergie photosynthétiquement active absorbée par une culture de blé à partir de données radiométriques*. Agronomie. Vol. 9. pp. 885-895.
- BARIOU R., LECAMIS D., LE HENAFF F., 1985. *Indices de végétation*. Centre régional de télédétection. Université de Rennes. 150 p.
- BARRE B., 2007. Atlas des énergies. *Quels choix pour quel développement ?* Autrement. 79 p.
- BARTHELINK H.-H., 1997. *Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (Fagus sylvatica L)*. Annales des sciences forestières. 54(1). pp. 39-50.
- BARTHOD C., BARRILLON A., ARCANGELI F., HERMELINE M., 2001. *Loi d'orientation sur la forêt du 9 juillet 2001*. Revue forestière française. 20 p.
- BASKERVILLE G.-I., 1965. *Estimation of dry weight of tree component and total standing in forest stand*. Ecology. N°46. pp. 867-869.
- BASTIEN Y., 2002. *Taillis et taillis sous futaie*. ENGREF. 16 p.

- BAVOUX J.J., 2002. *La géographie, objet, méthodes, débats*. Armand Colin. 239 p.
- BEDARD M., 2006. *Méthodologie et méthodes de la recherche en géographie*. Coop UQAM. Université du Québec à Montréal. 256 p.
- BEGUIN H., HANSEN P., THISSE J.-F., 1982. *Où construire les équipements de collectifs ?* Recherches Economiques de Louvain. N°48. pp 211-215.
- BEGUIN H., 1992. *La localisation des activités banales*, in : BAILLY A., FERRAS R. et PUMAIN D., *Encyclopédie de la géographie*, Économica, Paris. pp. 497-513.
- BELLEFONTAINE R., PETIT S., PAIN-ORCET M., DELEPORTE P., BERTAULT J.-C., 2001. *Les arbres hors forêt, vers une meilleure prise en compte*. Cahier FAO : conservation 35. 231 p.
- BELOUARD T. et al., 2005. *Le nouvel inventaire forestier de l'IFN. Un sondage systématique et annuel*. De l'observation des écosystèmes forestiers à l'information sur la forêt. Consulté le 25/02/2010. Disponible sur : www.symposcience.org. 12 p.
- BELOUARD T. 2005. *Gisement national de bois-énergie en forêt. Première estimation nationale à partir des inventaires forestiers IFN : méthode, résultats et limites*. Paris, ADEME, IFN, SOLAGRO. 12 p.
- BENCHERIF K., 2009. *Intégration des données ETM+ de LANDSAT aux données de terrain pour l'estimation du volume bois d'une forêt de pin d'Alep*. Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF. Alger. Novembre 2009. 6 p.
- BENOIT B., 2006. *Quand les gestionnaires se mesurent : les indicateurs au centre de la gestion forestière*. Paris, l'Harmattan. 229 p.
- BERARD J., COTE M., 1996. *Manuel de foresterie*. Presses de l'Université Laval. 1428 p.
- BERNDES G., HOOGWIKJ M., BROEK (Van Den) R., 2002. *The contribution of biomass in the global energy supply : a review of 17 studies*. Biomass and bioenergy 25. pp. 1-28.
- BESSON J., 2003. *Une stratégie énergétique pour la France*. Rapport de Jean Besson, parlementaire en mission auprès de Nicole Fontaine ministre déléguée à l'industrie. Débat national sur les énergies. 62 p.
- BETTINGER P., HAYASHI R., 2006. Estimation of above-ground biomass with remotely sensed imagery : a brief literature review. University of Georgia, Center for Forest Business. Research note. 10 p.
- BIANCO J.-L. 1998. *La forêt, une chance pour la France, rapport de J.-L Bianco au Premier Ministre*. Revue forestière française, n°6. pp. 493-607.
- BIGGERC.-M, COLE D.-W., 1983. *Effects of harvesting intensity on nutrients losses and future productivity red alder and douglas fir stand*. In BALLARD R., GESSEL S., IUFRO Symposium on forest site and continuous productivity. USDA Forest service Gen. Tech. Rep. PNW-163. pp. 167-178.
- BOBIN J.-L., 1996. *L'énergie*. Flammarion. 127 p.
- BOITTIN E., GROVEL R., SEGOUIN O., 2010. *Étude pour la mise en œuvre d'un dispositif de suivi des plans d'approvisionnement en plaquettes forestières des centrales de cogénération et chaufferies biomasse en Franche-Comté*. Note de synthèse. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME (coordination LE BASTARD S. et GOUTALAND S.). 13 p.
- BONNEFOY JL., PUMAIN D., ROZENBLAT C., 1996, *Théorie des graphes et interactions non gravitaires, Analyse spatiale des données biodémographique*, INED. pp. 172-186.
- BÖRJESSON P., GUSTAVSSON L., 1996. *Regional production and utilization of biomass in Sweden*. Energy: the international journal. 21(9). pp. 747-764.
- BORLOO J.-L., 2008. *Grenelle Environnement : Jean-Louis Borloo présente le plan national de développement des énergies renouvelables de la France*. Communiqué de presse. Lundi 17 novembre 2008. 3 p.

- BOUCHON J., OTTORINI J.-M., PARDÉ J., 1981. *Contribution à une meilleure connaissance des potentialités ligneuses en France à partir des données de l'inventaire forestier national*. Rapport contrat CEE n° 470.78.7 ESF. INRA Nancy, France. 40 p.
- BOUDEVILLE J. R., 1972. *Aménagement du territoire et polarisation*, Editions M.T. Génin, Librairies Techniques. 279 p.
- BOURCET J., BOURGET C., DANGUY des DESERTS D., 2008. *Le transport du bois et sa logistique*. 84 p.
- BOURGEOIS C., 2004. *Le châtaigner, un arbre, un bois*. Forêt privée française. 347 p.
- BOUTEFEU B., 2005. *L'aménagement forestier en France : à la recherche d'une gestion durable à travers l'histoire*. Vertigo. 6(2). 8 p.
- BRÉDA N., 1999. *L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel*. Revue forestière française. pp. 135-150.
- BREDIF H., BOUDINOT P., 2001. *Quelles forêts pour demain ?* Paris, l'Harmattan. 249 p.
- BROKELAND R., 2002. *Trop grandes, trop chères, trop peu rentables ?* Bois-énergie n°5, mars 2002. 2p.
- BRUN J., 2003. *Suivi de l'évolution temporelle de la biomasse verte forestière à l'aide d'indices satellitaires de végétation*. Diplôme DESNE. Faculté des Sciences, Université de Genève. 120 p.
- BRUN J., 2004. *Étude du potentiel des indices de végétation de l'imagerie MODIS pour l'observation de l'évolution intra et inter-annuelle de la couverture du sol. Application à la région genevoise (zone urbaine et périurbaine)*. Mémoire de fin d'études. Direction S.-M. Jacquet. Université de Genève. 37 p.
- BRUNET R., FERRAS R., THÉRY H., 1993. *Les mots de la géographie. Dictionnaire critique*. Reclus, la documentation française. 470 p.
- BURKHART A., 2001. *Forest measurements*. Lavoisier. 48 p.
- BUTTOUD G., 1998. *Les politiques forestières*. P.U.F. Que sais-je ? 127 p.
- CALDAZA C., HAMMADOU H., JAYET H., KAZMIERCZAK S., 2004. *La localisation des entrepôts*. Notes de synthèse du SES n° 155. Septembre-Octobre 2004. 10 p.
- CALLOZ R., COLLET C., 2002. *Précis de télédétection : traitements numériques d'images de télédétection*. Presses de l'Université du Québec. 398 p.
- CEMAGREF, 2007. *Biomasse disponible pour de nouveaux débouchés énergétiques et industriels. Partie 1 : analyse et synthèse des études existantes recensées au niveau national*. Rapport final. Octobre 2007. 124 p.
- CEMAGREF, 2009. *Évaluation des volumes de bois mobilisables à partir des données de l'IFN "nouvelle méthode". Actualisation 2009 de l'étude "biomasse disponible" de 2007*. Rapport final. 62 p.
- CENTRE CANADIEN DE TÉLÉDÉTECTION, 2008. *Notions fondamentales de télédétection*. SpectroSciences. 266 p. Consulté le 17/03/2010. Disponible sur: <http://www.spectrosciences.com/spip.php?article96>.
- CEREN (Centre d'Études et de Recherches Économiques sur l'Énergie), 2003. *La régionalisation du bilan bois en 2001. Secteur résidentiel*. Étude réalisée pour l'ADEME. 36 p.
- CHAMBRES D'AGRICULTURES., 2008. *L'agroforesterie dans les réglementations agricoles. État des lieux en décembre 2008*. Ministère de l'agriculture et de la pêche. 17 p.
- CHARRON M., 2006. *La complexité des phénomènes spatiaux*. Cahiers de géographie du Québec. n° 141. pp. 327-335.
- CHAUVIN C., DEHEZ J., DEUFFIC P., 2005. *Le FEADER, nouvelle étape vers une politique forestière européenne ?* Ingénieries EAT Spécial. pp. 91-106.
- CHEVOU R.-B., 1988. *Inventaire forestier national : méthodes et procédures*. 105 p.

- CLAVAL P., 2001. *Épistémologie de la géographie*. Nathan, Paris. 265 p.
- CHASTAN J.-B., 2009. *Le granulé, espoir d'une filière bois aux perspectives sombres ?* Le Monde. 12 août 2009.
- CHOUVET N., 2006. *Etat du marché du bois-énergie en Livarodois-Forez et perspectives de développement pour la plaquette forestière*. Mémoire de fin d'études, ENGREF. 68 p.
- COFALP, ONF, FNCOFOR, 2006. *Redynamisation et relocalisation des territoires ruraux par le bois-énergie. Bilan des chantiers de production de plaquettes forestières*. Synthèse. Programme 2005-2006.
- COFOR (COMMUNES FORESTIERES), REGION RHONE-ALPES, ADEME, 2009. *Guide technique de mise en œuvre des plateformes et hangars de stockage de bois-énergie. A destination des collectivités*. Juillet 2009. 36 p.
- COLLIGNON B., 2007. *Quelques remarques à propos de la géographie culturelle*. Cybergeog, Politique, Culture, Représentations, article 55, mis en ligne le 07 avril 1998, modifié le 23 avril 2007. Consulté le 22/05/09]. Disponible sur: <http://www.cybergeog.eu/index5315.html>.
- COMIN M.-N., BOULIER J., 2007. *Une nouvelle approche de la proximité pour les études de localisation optimale*. Huitième rencontres de ThéoQuant. 10-12 janvier 2007. 7 p.
- COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES, 2002. *Forêts tropicales : une mesure de l'indice foliaire précise et mille fois moins chère !* CEA Techno(s) n° 62. 1 p.
- CORVOL A., ARNOULD P., HOTYAT M., 1997. *La forêt: perceptions et représentations*. Paris, l'Harmattan. 401p.
- COMMISSION RÉGIONALE DE LA FORÊT ET DES PRODUITS FORESTIERS DE RHÔNE-ALPES, 2009. *Les orientations régionales forestières. Rhône-Alpes*. 43 p. Disponible sur : http://draaf.rhone-alpes.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/ORF_cle8b25a7-1.pdf
- CRPF CENTRE REGIONAL DE LA PROPRIETE FORESTIERE DE FRANCHE-COMTE, 2006. *Schéma Régional de Gestion sylvicole. Forêt et sylviculture en Franche-Comté*. Avril 2006. 122 p.
- CRPF CENTRE REGIONAL DE LA PROPRIETE FORESTIERE DE POITOU-CHARENTES, 2007. *Taillis simple*. Fiche peuplement. 8 p.
- CENTRE TECHNIQUE DU BOIS ET DE L'AMEUBLEMENT, 1994. *La valorisation des produits connexes du bois*. CTBA. 104 p.
- CENTRE TECHNIQUE DU BOIS ET DE L'AMEUBLEMENT, 1998. *L'essentiel sur le bois*. Editions CTBA. 184 p.
- CSTB CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT, 2008. *La filière bois-énergie, état des lieux*. 33 p.
- CURANN D.W., 1981. *La nouvelle donne énergétique*. Masson. 204 p.
- CURIEL Y.-J., KONOPKA B., JANSSENS I.-A., COENEN K., XIAO C.-W., CEULEMANS R., 2005. *Contrasting net primary productivity and carbon distribution between neighbouring stands of Quercus Robur and Pinus Sylvestris*. Tree physiology. 25(6). pp. 701-712.
- DALKIA FRANCE, 2007. *Appel d'offre de la commission de régulation des énergies. Projet de cogénération biomasse de Solvay-Tavaux. Synthèse du plan d'approvisionnement biomasse*. 32 p. Document non diffusé.
- DAMIEN A., 2008. *La biomasse énergie. Définitions, ressources, usages*. Dunod. 250 p.
- D'AUBIGNY G., CALZADA C., GRASLAND C., ROBERT D., VIHO G. et VINCENT J.-M., 2000. *Approche poissonnienne des modèles d'interaction spatiale*. Cybergeog : European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, article 126, mis en ligne le 09 mars 2000, modifié le 07 juin 2007. Consulté le 02/09/10. Disponible sur: <http://cybergeog.revues.org/index4357.html>

- DAUPHINÉ A., 2003. *Les théories de la complexité chez les géographes*. Anthropos. 248 p.
- DAWKINS H., 1963. *Crown diameters : their relations to bole diameter in tropical forest trees*. Commonwealth forestry review. 42(4). pp. 318-333.
- DAY F.-P., MONK C.-D., 1977. *Net primary production and phenology on a southern appalachian watershed*. American Journal of Botanic. 64 (9). pp. 1117-1125.
- DECOURT N., 1967. *Table de production pour le douglas dans le nord-est du Massif Central*. Revue Forestière Française. n°8-9. pp. 547-557.
- DECOURT N., 1971. *Tables de production pour l'épicéa commun dans le Nord-Est de la France*. Revue Forestière Française. 4. pp. 411-418.
- DECOURT N., 1984. *Tables de production pour les forêts françaises, 1984*. ENGREF, Nancy. 160 p.
- DEFAYE S., 1997. *Cogénération à partir de biomasse. Quel stade de développement ?* Environnement et technique n°172, décembre 1997. 4 p.
- DEFAYE S., 2009. *Chaufferies collectives au bois : approches économiques et financières*. Cahier du bois-énergie n° 41.
- DESIDERI U., 2003. *L'utilisation du bois comme combustible pour la cogénération*. Bois-énergie n° 1, dossier cogénération. 5 p.
- DESSUS B., 1999. *Le bois-énergie en Europe. Une étude prospective à l'horizon 2020*. NSS 7(1). pp. 72-77.
- DEVINEAU J.-L., 1990. *Propriétés spectrales de la végétation*. Journées Télédétection, Bondy. Paris, ORSTOM. pp. 43-49.
- DGEMP DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ÉNERGIE ET DES MATIÈRES PREMIÈRES, OBSERVATOIRE DE L'ÉNERGIE, 2006. *Les énergies renouvelables en France 1970 – 2005*. 44p.
- [DGE] DGEMP DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ÉNERGIE ET DES MATIÈRES PREMIÈRES, 2003. *Conditions de l'appel d'offres portant sur les installations de production d'électricité à partir de biomasse et de biogaz*. Direction de la demande et des marchés énergétiques. Sous-direction de la demande et de la maîtrise de l'énergie. 3 p.
- DGEMP DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ÉNERGIE ET DES MATIÈRES PREMIÈRES, 2006. *Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur des installations de production d'électricité à partir de biomasse*. 22 p.
- DGEMP DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ÉNERGIE ET DES MATIÈRES PREMIÈRES. *Définitions, équivalences énergétiques, méthodologie pour l'utilisation du tableau de bord des statistiques du bois-énergie*. DGEMP/ADEME. 6 p. Disponible sur: http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/article.php?id_article=1072#sommaire_3
- DOBRUSKES F., MARISSAL P., 2002. *Réflexions sur l'usage des modèles dans les études de transport et les sciences sociales*. Recherche transports sécurité n° 74, Janvier-Mars 2002. 24 p.
- DOWNING M., GRAHAM R.-L., 1996. *The potential supply and cost of biomass from energy crop in the Tennessee Valley Authority region*. Biomass and Bioenergy 11(4). pp. 283-303.
- DREZNER Z., 1995. *Facility location, a survey of applications and methods*. New-York, Springer. 571p.
- DUBOIS J.-J., 1999. *Les milieux forestiers, aspects géographiques*. Sedes. 335 p.
- DUBOIS J.-J., 2000. *La nature en ville : les forêts urbaines et périurbaines : des modèles à réinventer ?* Bulletin de l'association des géographes français. pp. 175-188.
- DUMON R., 1982. *La valorisation du bois et de la biomasse : l'énergie verte*. Masson. 201 p.
- ENTREPRISES TERRITOIRES ET DEVELOPPEMENT, 2006. *Forêt et territoires*. Les notes d'EDT. 18 p.

- ENERGY INFORMATION AGENCY, 2008. *Renewable Energy Data Book*. US Department of energy efficiency and renewable energy. 129 p. Disponible sur: <http://www.eia.doe.gov/>
- ERASMI S., CYFFKA B., KAPPAS M., GOTTINGER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN, 2005. *Remote sensing and GIS for environmental studies: applications in géography*: première conférence Gottingen GIS et remote sensing days. 2010
- ERICSSON K., NILSSON L.-J., 2004. *International biofuel trade – a study of the swedish import*. Biomass and bioenergy 26. pp. 205-220.
- ERNST-DETLEF S., 2000. *Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems*. Springer. 500 p.
- EUROPEAN COMMISSION, 1996. *Energy for the future : renewable sources of energy*. Bruxelles. 55 p.
- FAIVRE-MALFROY F., 2010. *Analyse spatiale et modélisation géographique*. Disponible sur: univ-lyon3histgeo.sup.fr. 17 p.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2002. *Guide pour les enquêtes sur la demande, l'offre et l'approvisionnement en combustibles ligneux*. Programme de partenariat Commission Européenne/FAO (2000-2002). Disponible sur: <http://www.fao.org/docrep/007/y3779f/y3779f00.htm>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2004. *Terminologie unifiée de la bioénergie (TUB). Terminologie des biocombustibles solides*. Département des forêts de la FAO. Dendroénergie. 51 p.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2007. *Forest and energy in developing countries*. Forest and energy working paper. 42 p.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2010. *Evaluation des ressources forestières mondiales 2010*. Rapport principal. 380 p.
- FANG J.-Y., WANG G.-G., LIU G.-H., XU S.-L., 1998. *Forest biomass of China : an estimate based on the biomass-volume relationship*. Ecological applications n° 8. pp. 1084-1091.
- FAVENEZ J.-P., 2007. *Géopolitique de l'énergie. Besoins, ressources, échanges mondiaux*. Technip. 284 p.
- FCBA INSTITUT TECHNOLOGIQUE FORET CELLULOSE BOIS AMEUBLEMENT, 2008. *Référentiel combustible bois-énergie : les plaquettes forestières. Définition et exigences*. CFBA. 45 p.
- FCBA INSTITUT TECHNOLOGIQUE FORET CELLULOSE BOIS AMEUBLEMENT, 2009. *Mobilisation du bois-énergie sous forme de plaquettes forestières*. J.-P. LAURIER, FCBA. Regefor Champenoux, juin 2009. 13 p.
- FERNEZ T., 2007. *Typologie et cartographie des habitats du site Natura 2000 du Mont d'Or, du Noirmont et du Risol*. Mémoire de fin d'étude. Agroparistech. 80 p.
- FIGL F., 2009. *Technologies et atouts du bois-énergie en Europe*. Bioenergy 2020+. 9 p.
- FLETY Y., 2009. *Vers une geo-ontologie pour les systèmes énergétiques territoriaux*. Ontologies et dynamiques des systèmes complexes. XVIèmes rencontres de Rochebrune. Mégève. Janvier 2009. 12 p.
- FOODY G., BOYD D., CUTLER M., 2003. *Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions*. Remote Sensing of Environment 85. pp. 463-474.
- FORÊT PRIVÉE FRANÇAISE, 2003. *Produire des plaquettes forestières et mieux gérer nos forêts*. Forêt-entreprise n°152. La revue technique des forêts et des arbres. 32 p.
- FORÊT PRIVÉE FRANÇAISE, 2006. *Schéma Régional de Gestion Sylvicole. Forêt et sylviculture en Franche-Comté*. Avril 2006. 122 p.
- FRANKLIN J., 1986. *Thematic mapper analysis of coniferous forest structure and composition*. International Journal of Remote Sensing 7(10). pp. 1287-1301.
- FUSTIER B. 1977. *Les interactions spatiales en économie*. Sirey. 722 p.

- GABUS A., MARTIN B., 2008. *Les lignocarburants : une réponse aux défis de l'après-pétrole et du changement climatique*. Environnement, Nature, Ecologie. Liaison énergie francophonie, UICN, Barcelone. L'Harmattan. Disponible sur: http://harmatheque.com/auteurs/andre-gabus/files/2010/09/GabusMartin_Ligno-carburants-LEF.pdf
- GALLANDAT J.-D., GILLET F., 1999. *Le pâturage boisé jurassien*. Bulletin de la Société Neuchâteloise de Sciences Naturelles. n° 122. pp. 5-25.
- GALOCHET M., 2006. *La forêt, ressource et patrimoine*. Paris, Ellipses. 271 pages.
- GAZULL L., 2009. *Le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Bamako, une approche par un modèle d'interaction spatiale*. Thèse de Doctorat en Géographie. Sous la direction de Claude Grasland. Université Diderot Paris 7. 402 p.
- GERARDI V., 2003. Les problèmes liés à l'usage du bois pour la cogénération. Bois-énergie n° 1. pp. 22-23.
- GICQUEL R., 2001. *Systèmes énergétiques*. Tomes 1 et 2. Presses de l'école des Mines de Paris. 330 p.
- GILLON P., 1997. *Contribution à l'analyse des échanges interurbains : modélisation des flux téléphoniques entre les villes françaises*. Thèse de Doctorat en Géographie, Besançon. 362 p.
- GOLD R., 2009. *Wood Pellets Catch Fire as Renewable Energy source*. The Wall Street Journal, 7 juillet 2009. Consulté le 23/10/2009. Disponible sur : <http://online.wsj.com/article/SB124691728110402383.html>.
- GONZALES-ALONSO F., MERINO-DE-MIGUEL S., ROLDAN-ZAMARRON A., GARCIA-GIGORRO S., CUEVAS J.-M., 2008. *Forest biomass estimation using satellite data*. European Space Agency. Workshop. 6 p.
- GOUDET M., 2008. *Estimation par télédétection de la ressource forestière sur le département du Var*. Mémoire de fin d'études. Cemagref. 96 p.
- GOVERNE L., 2004. *Bois-énergie : les carburants de demain poussent en forêt*. Revue des communes forestières, dossier n°26. 3p.
- GRAHAM R.-L., LIU W., DOWNING M., NOON C.-E., DALY M., MOORE A., 1997. *The effect of location and facility demand on the marginal cost of delivered wood chips from energy crops : a case study for the state of Tennessee*. Biomass and bioenergy. 13(3). pp.117-123.
- GRASLAND C., 2004. *Interaction spatiale*. Hypergeo. 4 p. Disponible sur: http://www.hypergeo.eu/article.php3?id_article=2#
- GREFFE X., 2002. *Le développement local*. Éditions de l'Aube. 199 p.
- GRESSER P., ROBERT A., ROYER C. et al., 1990. *Les hommes et la forêt en Franche-Comté*. Bonneton. 320 p.
- GRIMMEAU J.-P., WAYENS B., 2003. *La modélisation gravitaire appliquée au géomarketing*. Université libre de Bruxelles, cellule Géographie Appliquée et Géomatique. Consulté le 12/05/2010. Disponible sur : www.iag.asso.fr
- GRISELIN M., CARPENTIER C., MAILLARDET J., ORMAUX S., 1999. *Guide de la communication écrite. Savoir rédiger, illustrer et présenter rapports, dossiers, articles, mémoires et thèses*. Paris, Dunod. 325 p.
- GUEDON J., 2005. *Approches de la notion de proximité en sciences sociales*. École de Management de Normandie. 18 p.
- HAGGETT P., 1965. *Locational analysis in modern geography*. Londres, E Arnold. 339p.
- HALL P., GIGLER J.-K., SIMS R., 2001. *Delivery systems of forest arisings for energy production in New Zealand*. Biomass and Bioenergy 21(6). pp. 391-399.
- HALL R.-J., SKAKUN R.-S., ARSENAULT E.-J., CASE B.-S., 2006. *Modeling forest stand structure using Landsat ETM+ data : application to mapping of aboveground biomass and stand volume*. Forest Ecology and Management 225. pp. 378-390.

- HAMMONG R., McCULLAGH P.-S., 1974. *Quantitative Techniques in Geography*. Oxford, Clarendon Press. 318 p.
- HANDLER G., MIRCHANDANI P., 1979. *Locations on networks*, MIT Press, Cambridge MA.
- HAYNES K.-E., FOTHERINGHAM A.-S., 1984. *Gravity and spatial interaction models*. Beverly Hills Sage. pp. 9-13.
- HEISKANEN J., 2006. *Estimating aboveground tree biomass and leaf area index in a mountain birch forest using ASTER satellite data*. International Journal of Remote Sensing. 27(5-6). pp. 1135-1158.
- HELDERLE C., 2006. *Le développement des circuits d'approvisionnement en plaquette forestière en Alsace : état des lieux et propositions*. Mémoire de fin d'études. ENGREF. 100 p.
- HESSE B., 1991. *Étude de la ressource et des disponibilités forestières en région Centre*. DRAF Centre, IRIBIOM, Orléans. 52 p.
- HILLRING B., 2006. *World trade in forest products and wood fuel*. Biomass and bioenergy 30(10). pp. 815-825.
- HILLRING B., (d'après), 2000. *The long journey of wood energy*. Bois-énergie special issue, mars 2000. 2 p.
- HOLBEN B.-N., 1986. *Characteristics of maximum-values composite images from temporal AVHRR data*. International Journal of Remote Sensing. 7(11). pp. 1417-1434.
- HOPKINS W.-G., RAMBOUR S., 2003. *Physiologie végétale*. De boeck. 514 p.
- HUFF D.-L., 1964. *Defining and estimating a trading area*. Journal of marketing. Vol. 28. p. 38.
- HUSCH B., MILLIER C.-I., BEERS T.-W., 1982. *Forest mensuration*. Wiley (3^{ème} édition). 402 p.
- HUSSON J.P., DEGRON R., 1999. *L'aménagement forestier entre conjoncture et temps long, rupture et continuité*. Annales de géographie. pp.595-602.
- IBRAHIM K., 2004. *Approche territoriale des systèmes énergétiques*. Mémoire de Master 2 de Géographie, Laboratoire ThéMA, sous la direction de M.-H. De Sède-Marceau. 24 p.
- IBRAHIM K., DE SÈDE M.-H., 2005. *Modèle d'analyse locorégional des systèmes énergétiques*, 7^{ème} rencontres ThéoQuant, 26-28 janvier 2005, Besançon-France. 16 p.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2002. *Renewable Energy*. 14 p. Consulté le 14/06/2011. Disponible sur : <http://www.iea.org/textbase/papers/2002/renewable.pdf>
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2007. *Worldwide trends in Energy Use and Efficiency. Key Insights from IEA Indicator Analysis*. 94 p.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2007. *Key words energy statistics*. Consulté le 14/06/2011. Disponible sur: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf. 80 p.
- IFEN INSTITUT FRANÇAIS DE L'ENVIRONNEMENT, 2006. *Corine Land Cover France - Fiches techniques*. 44 p.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, 2005. *Bois-énergie : les forêts ont de la ressource ! L'IF n°9*, septembre 2005. 8p.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, 2006. *Estimation des prélèvements passés*. 2 p.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, 2009. *La cartographie forestière version 2*. 2 p.
- INSEE, AGRESTE FRANCHE-COMTÉ, 2008. *La filière bois franc-comtoise*. INSEE. 48 p.

- ITEBE Institut Technique Européen du Bois-Énergie, 2001. *État des lieux des logistiques de fournitures de plaquettes forestières en Europe. Optimisation des techniques d'extraction des plaquettes forestières*. Programme Interreg II de promotion du bois-énergie. 40 p.
- JACQUES D., 2003. *Le défi de la professionnalisation de l'approvisionnement local*. Collection expérimenter pour agir. Parcs naturels régionaux de France. 28 p.
- JAEGER M.-C., 1987. *La télédétection satellitaire en géographie : son exploitation et ses limites actuelles*. Revue de Géographie Alpine. 75(3). pp. 263-284.
- JAKUBAUSKAS M., PRICE K., 1997. *Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone pin forests*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 63(12). pp. 1375-1381.
- JAUSCHNEGG H., STEIERMARK L., 2002. *Le développement des granulés en Europe*. Bois-énergie n° 5. 3 p.
- JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M. et WAVRESKY P., 2010. *Les types de climats en France, une construction spatiale*. Cybergeog : European Journal of Geography, Cartographie, Imagerie, SIG, article 501, mis en ligne le 18 juin 2010, modifié le 27 juillet 2010. Consulté le 05/12/10]. Disponible sur : <http://cybergeog.revues.org/index23155.html>.
- JOSELIN D., NICOT B., 2003. *Un modèle gravitaire géoéconomique des échanges commerciaux entre les pays de l'U.E., les PECO et les PTM*. Cybergeog, Systèmes, Modélisation, Geostatistiques, article 237. Consulté le 18/08/2009. Disponible sur: <http://cybergeog.revues.org/4219>
- KOZAK I., 2001. *Dependance of beech forest productivity on forest age, on North-Eastern slopes of the ukrainian carpathians*. 2^d annual meeting of the International Centre of Ecology. Polish academy of sciences.
- KRAJNC N., 2003. *Forêts et utilisation de la biomasse ligneuse en Slovénie*. Bois-énergie n° 2. Dossier politiques énergétiques. 4 p.
- LABOUZE E., LE GUERN Y., 2005. *Bilan environnemental du chauffage domestique au bois*. Note de synthèse. Décembre 2005. Bio Intelligence Service. 14 p.
- LABRECQUE S., FOURNIER R.-A., LUTHER J.-E., PIERCEY D., 2006. *A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland*. Forest Ecology and Management (226). pp. 129-144.
- LAURENT M.-A., 1997. *Externalités spatiales et modèles de localisation-simulation sur un réseau théorique*. Troisièmes rencontres Théoquant.
- LE GOASTER S., DAMBRINE E., RANGER J., 1991. *Biomasses et minéralo-biomasses de trois peuplements d'épicéa commun âgés de 10, 30 et 85 ans*. Acta Ecologica. 12(6). pp. 771-789.
- LEHTONEN A., MAÄNKIPAAÄNAÄN R., HEIKKINEN J., SIEVAÄNNEN R., LISKI J., 2004. *Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests*. Forest Ecology and Management 188. pp. 211-224.
- LEICA, 2002. *ERDAS field guide*. Sixth edition. 658 p.
- LEICA, 2002. *ERDAS IMAGINE Tour Guides*. ERDAS IMAGINE 8.6. 672 p.
- LE MOIGNE J.-L., 1990. *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod. 178 p.
- LHOMME J.-C., 2004. *Les énergies renouvelables*. Paris, systèmes solaires. 190 p.
- LIAGRE F., DUPRAZ C., 2008. *L'agroforesterie*. France agricole. 413 p.
- LILLESAND T.-M , KIEFER R.-W, 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*, Third Edition: John Wiley and Sons Inc.
- LIM M.-T., COUSENS J.-E., 1986. *The internal transfert of nutrients in scot pine stand. Biomass components, currents growth and their nutrient content*. Forestry. 59 (1). pp. 1-16.

- LIND C., 1994. *Wood fuel resources from Danish forest larger than 1/2 hectare, statement and prognosis*. Skovbrugsserien n°10. Lingby : Danish Forest and Landscape Research Institute. **Nbre p**
- LITOT J.-B., 2010. *Paysage et médiatisation dans les Alpes françaises. Approche géographique de la diffusion des cartes postales paysagère*. Thèse de doctorat. Sous la direction de J.-C. Foltête. Laboratoire ThéMA. 319 p.
- LIU Y., MULLER R.-N., 1993. *Aboveground net primary productivity and nitrogen mineralization in a mixed mesophytic forest of eastern Kentucky*. Forest Ecology and Management. 59(1-2). pp. 53-62.
- LOUSTAU D., 2004. *Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France*. Quantification, spatialisaton, vulnérabilité et impacts des différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport final projet GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique" et Convention GIP ECOFOR n°3/2001. Juin 2004. INRA, Bordeaux-Pierroton, France. 137 p.
- LU D., 2006. *The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation*. International Journal of Remote Sensing. 27. pp. 1297-1328.
- LUTHER J.-E., FOURNIER R.-A., PIERCEY D.-E., GUINDON L., HALL R.-J., 2006. *Biomass mapping using forest type and structure from Landsat TM imagery*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 8. pp. 173-187.
- MACÉ G., 1988. *Guide d'élaboration d'un projet de recherche*. PUL. 116p.
- MAHAPATRA A.K., MITCHELL C.P., 1999. *Biofuel consumption, deforestation and farm level tree growing*. Biomass and bioenergy 17. pp. 291-303.
- MÄKELA H., PEKKARINEN A., 2004. *Estimation of forest stand volumes by Landsat TM Imagery and stand-level field-inventory data*. Forest Ecology and management 196. pp. 245-255.
- MANDELBROT B., 2010. *The Fractal Geometry of Nature*. In Encyclopædia Britannica. Retrieved July 19, 2010, from Encyclopædia Britannica. 14 p. Consulté le 22/02/2011. Disponible sur: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1129019/The-Fractal-Geometry-of-Nature>
- MARCONIS R., 1996. *Introduction à la géographie*. Paris, A.Colin. 221 p.
- MAROIS C., GUMUCHIAN H., FÈVRE V., 2000. *Initiation à la recherche en géographie*. Anthropos. 434 p.
- MARTIN C., DIDON-LESCOT J.-F., LHUILLIER S., USSELMANN P., 2004. *Reforestation et stockage du carbone au XX^{ème} siècle sur les versants du Mont Lozère*. Bulletin du réseau érosion, n°23, 2004. Acte du colloque Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone. 12 p.
- MATHIS P., 2004. *Les énergies renouvelables ont-elles un avenir ?* Éditions du Pommier. 64 p.
- MERENNES-SCHOUMAKER B., 2007. *Géographie de l'énergie. Acteurs, lieux et enjeux*. Belin Sup. 271 p.
- MERENNES-SCHOUMAKER B., 2010. *Quels développements possibles pour la filière bois-énergie en Europe ?* Conférence donnée au Festival International de Géographie. 20 p.
- MEWTON S., 2007. *Etude opérationnelle de la mobilisation de plaquettes forestières pour l'approvisionnement de deux centrales de cogénération en Gironde*. Mémoire de fin d'études. ENGREF. 141 p.
- MIKKONEN K., LUOMA M., 1999. *The parameters of the gravity model are changing – how and why ?* Journal of transport geography. 7. pp. 277-283.
- MILLICH E., 2003. *Stratégie et instruments de l'Union Européenne pour promouvoir les énergies renouvelables*. Bois-énergie n° 2. Dossier politiques énergétiques. 5 p.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, 2008. *L'énergie en France*. Repères, édition 2008. 40 p.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, 2008. *Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur des installations de production d'électricité à partir de biomasse*. 29 p.

- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE, 2006. *Programme forestier national*. 14 p.
- MÖLLER B., NIELSEN P., 2007. *Analysing transports costs of Danish forest wood chip resources by means of continuous cost surfaces*. Biomass and bioenergy 31(5). pp. 291-298.
- MÖLLER B., NIELSEN P., 2004. *Geographical analyses of wood chips potentials, cost and supply for sustainable energy production in Denmark*. Proceedings of the 1st International Conference on Sustainability Engineering and Science, Auckland, NZ, July 6-9, 2004. 14 p.
- MONIN J.-C., 2003. *Décentralisation et politique forestière : propositions de mesures pour les communes forestières*. 92 p.
- DE MONTRICHER N., *L'aménagement du territoire*. 1995. La Découverte. 125p.
- MOUILLEFER P., 1904. *Exploitation et aménagement des bois, futaies, taillis, trufficulture, abattage et procédés de vidange*. Paris, Félix Alcan. 476 p.
- NEWMAN G.-S., ARTHUR M.-A., MULLER R.-N., 2006. *Aboveground and belowground net primary production in a temperate mixed deciduous forest*. Ecosystems. 9. pp. 317-329.
- NGÔ C., 2002. *L'énergie, ressources, technologies et environnement*. Dunod. 150 p.
- NORD-LARSEN T., HEDING N., 2002. *Wood fuel resources from Danish forest, prognosis 2002*. Dansk Skovbrugs Tidsskrift. 87. pp. 1.
- NORD-LARSEN T., TALBOT B., 2004. *Assessment of forest-fuel resources in Denmark : technical and economic availability*. Biomass and Bioenergy. 27. pp. 97-109.
- NZIENGUI M., 2008. *Estimation de l'indice foliaire des couverts forestiers du Gabon par télédétection optique*. Actes de Colloque. Les XI^è journées scientifiques du réseau de télédétection de l'AUF : télédétection et gestion de l'environnement. pp. 69-72.
- OFFICE NATIONAL DES FORETS, 2007. *Rendez-vous techniques n°15*. 44 p.
- OFFICE NATIONAL DES FORETS, 2006. *Directive régionale d'aménagement de Rhône-Alpes*. 47 p.
- ORGANISATION DES NATIONS UNIES, 2000. *Sustainable bioenergy : Framework for decision makers*. 64 p.
- OREMUS Y., 1997. *Cogénération à partir de biomasse. Quel stade de développement ?* Environnement et technique n°172, décembre 1997. 4 p.
- OTTO H.-J., 1998. *Ecologie forestière*. Institut pour le développement forestier. 397 p.
- OVINGTON J.-D., 1962. *Quantitative ecology and the woodland ecosystem concept*. Advanced Ecology Research. 1. pp. 92-103.
- PARDE J., 1977. *Biomasses forestières et utilisation complète des arbres*. Revue Forestière Française. 29. pp. 334-342.
- PARENT S., 1990. *Dictionnaire des sciences de l'environnement*. Laprairie : Broquet. 748 p.
- PARRESOL B.R., 1999. *Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons*. Forest Science. 45(4). pp. 573-593.
- PARROCHIA D., 2006. *Pour une théorie de la relativité géographique (vers une généralisation du modèle gravitaire)*. Cybergéo : revue européenne de géographie. n° 337, 23 mai 2006. 18 p.
- PEETERS D., THOMAS I., 2001. *La localisation des services publics: de la théorie aux applications*, in : SANDERS L. (dir.), *Modèles en analyse spatiale*. Hermès, Paris. pp. 105-127.

PERDIGAO M.-A., SUPIT I., 1999. *An early crop yield estimation method for Finnish conditions : the crop growth monitoring system of the joint research centre with and without remotely sensed and another additional input data*. European Commission, EUR 18975 EN. 144 p.

PETER D., 1995. *Naître, vivre et mourir dans l'Outre-Forêt (1648-1848)*. Thèse de Doctorat. Strasbourg. 312 p.

PIERMONT L., 1982. *L'énergie verte*. Paris, éditions du seuil. 233 p.

PINI G., MILHAUD O., 1995. *L'interaction spatiale*. Encyclopédie de la géographie, chapitre 28. pp. 539-558.

PHILIP M., 1994. *Measuring trees and forests*. Wallingford (2^{de} éd.). 310 p.

POINSOT D., 2004. *Statistiques pour statophobes*. 142 p. Consulté le 12/05/2009. Disponible sur : <http://perso.univ-rennes1.fr/denis.poinsot/Statistiques%20pour%20statophobes/>

POUËT J.-C., 2007. *Mise en place d'une chaufferie au bois. Étude et installation d'une unité à alimentation automatique*. EDP Sciences ADEME. 169 p.

POUPEAU F.-M, SCHLOSSER F., 2009. *La régulation de la filière bois-énergie dans les Ardennes françaises : jeux et enjeux autour de la question de l'information*. 31 p.

PRALY C. et al., 2009. *La notion de "proximité" pour analyser les circuits courts*. XLVI^{ème} colloque de l'ASRDLF, juillet 2009. Clermont-Ferrand. 17 p.

PREFECTURE DE LA REGION FRANCHE-COMTE, DIRECTION REGIONALE DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORET, 2008. *Conditions de financement des infrastructures forestières (desserte et équipement)*. Arrêté n°08/194. 6p. **JO?**

PUECH J., 2009. *Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois*. Mission confiée à Jean Puech, ancien ministre. Rapport remis à Monsieur Nicolas Sarkozy, Président de la république. 6 avril 2009. 74 p.

PUMAIN D., SAINT-JULIEN T., 2001. *Les interactions spatiales*. Paris, Armand Colin. 191 p.

PUYO J.-Y., 1999. *La science forestière vue par les géographes français, ou la confrontation de deux sciences "diagonales" (1870-1914)*. Annales de géographie 109(609-610). pp. 615-634

RAMACHANDRA T.V., JOSHI N.V., SUBRAMANIAN D.K., 2000. *Present and prospective role of bioenergy in regional energy system*. Renewable & sustainable energy review 4(4). pp. 375-430.

RANGER D., NYS C., RANGER J., 1981. *Étude comparative de deux écosystèmes forestiers feuillus et résineux des Ardennes primaires françaises. Biomasse aérienne d'une plantation équienne d'épicéa commun*. Annales des Sciences Forestières. 38(3). pp. 377-388.

RANGER J. et al., 1992. *Biomasse et minéralo-biomasse d'une plantation d'épicéa commun (picea abies karst) de forte production dans les Vosges (France)*. Annals of Forest Science. 19(6). pp. 651-668.

RANGER J., MARQUES R., COLIN-BELGRAND M., FLAMMANG N., GELHAYE D., 1996. *La dynamique d'incorporation d'éléments nutritifs dans un peuplement de Douglas (pseudotsuga menziesii)*. Conséquences pour la gestion sylvicole. Revue forestière française. 48(3). pp. 217-230.

REILLY W.-J., 1931. *The law of retail gravitation*. Journal of marketing 14. pp. 379-384.

RENAUD A., 2000. *Cartographie du volume ligneux des peuplements de la forêt boréale à l'aide de données d'altimétrie LASER*. Mémoire de Maitrise en Géographie. Université du Québec à Montréal. 113 p.

REVELLE C. S., 1997. *A Perspective on Location Science*, Location Science 5(1). pp. 3-13.

- RHÔNE-ALPES ÉNERGIE ENVIRONNEMENT, 2005. *L'analyse d'opportunité*. Fiche n°1. Classeur des Accompagnateurs de projets bois-énergie. 3 p.
- RHÔNE-ALPES ÉNERGIE ENVIRONNEMENT, 2005. L'approvisionnement. Fiche n°3. Classeur des Accompagnateurs de projets bois-énergie. 6 p.
- RODRIGUE J.-P., 2009. *The geography of transport system*. Routledge. 352 p.
- RONDEUX J., 1993. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Presses agronomiques de Gembloux. 521 p.
- RONDEUX J., LAURENT C., THIBAUT A., 2002. *Construction d'une table de production pour le Douglas [Pseudotsuga Menziesii France] en Belgique*. Les cahiers forestiers de Gembloux. n° 3. 21p.
- ROTILLON G., 2005. *Économie des ressources naturelles*. Paris, la Découverte. 123 p.
- ROUSE J.-W., HAAS R.-H., SCHNELL J.-A., DEERING D.-W., 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. Proceedings of the Third Earth resources technology Satellite-1 Symposium, NASA, Greenbelt. pp. 301-317.
- ROUSSEAU P., 2000. *Valeur environnementale de l'énergie*. Presses polytechniques et universitaires romandes. 186 p.
- ROUSSEL L., 1971. *Production potentielle de quelques types de futaies*. Revue forestière française n°2. pp. 273-280.
- ROY P., RAVAN S., 1996. *Biomass estimation using satellite remote sensing data : an investigation on possible approaches for natural forest*. Journal of biosciences 21(4). pp. 535-561.
- SAINT-JULIEN T., 1995. *Diffusion spatiale*, in: *Encyclopédie de Géographie*. Bailly A., Ferras R., Pumain D. Economica, Paris. p. 559-581.
- SANDERS L., 2001. *Modèles en analyse spatiale*. Hermès, Lavoisier. 333 p.
- SARLOS G., HALDI P.-A., VERSTRAETE P., 2003. *Systèmes énergétiques. Offre et demande d'énergie, méthodes d'analyse*. Presses universitaires et polytechniques romandes. 874 p.
- SCHENKEL Y., TEMMERMAN M., 2002. *Un aperçu du bois-énergie dans les pays en développement*. Bois-énergie n° 7. Novembre 2002. 4 p.
- SHEOU B., 1998. *Modélisation des déplacements domicile-travail en milieu périurbain : le cas de la région lyonnaise*. Cybergéo n° 60. 9 p.
- SHROEDER P., BROWN S., MO J., BIRDSEY R., CIESZEWSKI C., 1997. *Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data*. Forest Sciences. 43. pp. 424-434.
- SEGOVIA P., 2003. *Le bois-énergie en Espagne, politique énergétique et forestière*. Bois-énergie n° 2. Dossier politiques énergétiques. 4 p.
- SELLERS P.-J., 1985. *Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration*. International Journal of Remote Sensing. 6. pp. 1335-1372.
- SEN, A., SMITH, T.E. 1995. *Gravity Models of Spatial Interaction Behavior*. Springer, Berlin. 572 p.
- SÉNAT, 2006. *Énergies renouvelables et développement local : l'intelligence territoriale en action*. Rapport d'information n° 436, 2005-2006. Consulté le 13/05/2008. Disponible sur : http://www.senat.fr/rap/r05-436/r05-436_mono.html.
- SERGENT A., 2008. *La régulation politique du secteur forestier en France : du « modèle forestier » traditionnel aux nouvelles formes d'action publique*. Deuxièmes journées de recherches en sciences sociales. INRA, SFER, CIRAD. 11 et 12 décembre 2008. Lille. 18 p.

SFEN SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, 2006. *Le bois, énergie renouvelable*. Diffusion SFEN GR 21 indice D du 7/06/2005. 7 p.

SIMON L., 1999. *Potentialités forestières et production de bois: de l'approche naturaliste à l'approche géographique*. Annales de géographie 108(609-610). pp. 635-647

SIMON L., 2001. *Les forêts entre nature et société. Du côté de la société. Dynamiques forestières et gestion de la forêt*. Bulletin de l'association des géographes français. pp. 164-176.

SNOWDON P., EAMUS D., GIBBONS P., KHANNA P.-K., KEITH H., RAISON R.-J. & KIRSCHBAUM M.-U.-F., 2000. *Synthesis of allometrics, review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies*. National Carbon Accounting System Technical Report 17. Australian Greenhouse Office, Canberra. 114 p.

SOARES P., TOMÉ M., 2004. *Analysis of the effectiveness of biomass expansion factors to estimate stand biomass. Proceedings of the international conference on Modeling Forest Production*. Austria. 7 p.

SORIN F., 2004. *Géopolitique de l'énergie*. Revue française de géopolitique, n°2-2004. Ellipses Marketing. 336 p.

SOUDANI K., 2009. *L'hétérogénéité des écosystèmes forestiers et ses conséquences sur leur fonctionnement carboné : apports de la télédétection et la modélisation à base de processus*. Habilitation à diriger des recherches. Laboratoire Écologie, Systématique et Évolution. Faculté des Sciences d'Orsay. 46 p.

VAN D STEENE L., GIRARD P., 2003. *Le point sur la gazéification de la biomasse*. Bois-énergie n° 1, dossier cogénération. 4 p.

TABOURDEAU A., 2010. *Bois-énergie : le temps des pionniers ?* Poster présenté au Festival International de Géographie, Saint-Dié des Vosges. 2010.

TATENO R., HISHI T., TAKEDA H., 2004. *Aboveground and belowground biomass and net primary production in a cool temperate deciduous forest in relation to topographical changes in soil nitrogen*. Forest Ecology and Management. 193(3). pp. 297-306.

TÉTARD J., 2002. *Quel gisement de déchets bois en France ?* Bois-énergie n°6, juillet 2002. Dossier déchets.

TOMASSONE R., AUDRAIN S., LESQUOY de TURCKEIM E., MILLIER C., 1992. *La régression, nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique*. Masson. 185 p.

TORRE A., 2004. *Introduction : proximité et territoires*. Économie Rurale n°280. pp. 2-7.

TORRE A., ZUINDEAU B., 2006. *Éditorial Dossier 7 : Proximité et environnement*. Développement durable et territoires. Dossier 7 : Proximité et environnement, mis en ligne le 18 mai 2006. Consulté le 05/10/10]. Disponible sur : <http://developpementdurable.revues.org/2735>

TUOMINEN S., EERIKÄINEN K., SCHIBALSKI A., HAAKANA M., LETHONEN A., 2010. *Mapping biomass variables with a multi-source forest inventory technique*. Silva Fennica 44(1). pp. 109-119.

ULLMAN E.-L., 1980. *Geography as spatial interaction*. University of Washington Press. 231 p.

UMBERTO D., 2003. *L'utilisation du bois comme combustible pour la cogénération*. Dossier cogénération. Bois-énergie n°1. pp. 17-21.

URACOFOR UNION RÉGIONALE DES ASSOCIATIONS DE COMMUNES FORESTIÈRES, 2009. *Mobilisation du bois et structuration de la filière bois-énergie. Montage juridique pour l'approvisionnement en plaquettes forestières : fiches descriptives*. Contribution apportée par l'URACOFOR dans le cadre d'une mission conventionnée avec la Région de Franche-Comté et l'ADEME. 12 p.

VALBIOM, 2004. *La filière bois-énergie*. Région Wallonne. 58 p.

VALLET P., DHÔTE J.-F., LE MOGUÉDEC G., RAVARD M., PIGNARD G., 2006. *Development of total aboveground volume equations for seven important tree species in France*. Forest Ecology and Management 229. pp. 98-110.

- VIROL S., 2006. *Distance temps, discontinuité des interactions spatiales et concentration globale de l'espace européen*. Revue d'Économie Régionale & Urbaine 1/2006 (juin). pp. 7-26.
- WARREN B., COHEN W.-B., SPIES T.-A., 1992. *Estimating structural attributes of Douglas-Fir/Western Hemlock Forest stands from Landsat and Spot imagery*. Remote Sensing and Environment. 41. pp. 1-17.
- WEIER J., HERRING D., 2010. *Measuring vegetation (NDVI and EVI)*. NASA Earth Observatory. Consulté le 04/02/2011. Disponible sur : <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/printall.php> gratuit sinon réf papier
- WEST P.-W., 2003. *Tree and forest measurement*. Springer. 167 p.
- WULDER M., SEEMANN D., 2003. *Forest inventory height update through the integration of LIDAR data with segmented landsat imagery*. Canadian journal of remote sensing 29. pp. 536-543.
- YAMASHITA J., 1995. *Spatial Interaction and Spatial Structure. A Study of Public Facility Location*. Meddelanden fran Lunds Universitets Geografiska institutioner. Avhandlingar, 123.
- YAO J., 2005. *Méthode d'étude et de recherche en sciences économiques et sociales*. Paris, l'Harmattan. 286 p.
- ZAMBLERA C., GARNIER C., 2002. *Bois non traités : deux voies de valorisation par densification*. Bois-énergie n° 6, juillet 2002. 3 p.
- ZIANIS D., MENCUCINI M., 2004. *On simplifying allometric analyses of forest biomass*. Forest Ecology and Management. 187. pp. 311-332.
- ZIANIS D., MUUKKONEN P., MÄKIPÄÄ R., MENCUCINI M., 2005. *Biomass and Stem Volume Equations for tree Species in Europe*. Silva Fennica. Monographs n°4. 63 p.

Annexes

Annexe1

Secteur	Collectif/tertiaire	Industriel		
		<i>Hors industries du bois</i>	<i>Dont industries du bois</i>	<i>Total</i>
Nombre	319	14	92	106
Puissance cumulée (MW)	91,5	2,25	131,8	134
Puissance moyenne (MW)	0,29	0,16	1,3	1,26
Puissance minimum (MW)	0,02	0,06	0,01	0,01
Puissance maximum (MW)	6	0,4	11	11
Consommation cumulée (tep)	22335	276	55774	56050
Consommation moyenne (tep)	31	20	607	533

Les chaufferies franc-comtoises ventilées par secteurs types

Classes de puissance en MW	Sous-classes de puissance en kW	Nombre	Pourcentage du nombre total	Puissance cumulée en MW	Pourcentage de la puissance cumulée
[0-1[	0 à 99	193	61,1%	11,2	12,2%
	100 à 199	52	16,3%	6,4	7,0%
	200 à 299	14	4,4%	3,2	3,5%
	300 à 399	11	3,8%	3,6	4,3%
	400 à 499	5	1,6%	2,1	2,3%
	500 à 599	5	1,6%	2,6	2,9%
	600 à 699	6	1,9%	3,6	4,0%
	700 à 799	3	0,9%	2,2	2,3%
	800 à 899	1	0,3%	0,8	0,9%
	900 à 999	3	0,9%	2,7	3,0%
SOUS_TOTAL [0-1MW[	/////	293	92,8%	38,5	42,4 %
[1-2[	////////	10	3,1%	13,8	15,1%
[2-3[	////////	4	1,3%	9,2	10,1%
[3-4[	////////	3	0,9%	9,4	10,3%
[4-5[	////////	1	0,3%	4,0	4,4%
[5-6[	////////	2	0,6%	10,4	11,4%
> 6	////////	1	0,3%	6,0	6,6%
SOUS_TOTAL 1-6 MW	////////	21	7,2 %	52,7	57,6 %
TOTAL	////////	314	100%	91,2	100%

Structure détaillée de la consommation dans le secteur collectif tertiaire en 2009

Classes de puissance en MW	Sous-classes de puissance en kW	Nombre	Pourcentage du nombre total	Puissance cumulée en MW	Pourcentage de la puissance cumulée
[0-1[	0 à 99	16	14,8 %	0,9	0,7 %
	100 à 199	8	7,4 %	1,1	0,8 %
	200 à 299	8	7,4 %	2,1	1,6 %
	300 à 399	11	10,1 %	3,6	2,7 %
	400 à 499	9	8,3 %	3,7	2,8 %
	500 à 599	6	5,5 %	3,2	2,4 %
	600 à 699	0	0 %	0	0 %
	700 à 799	2	1,8 %	1,4	1 %
	800 à 899	4	3,7 %	3,2	2,4 %
	900 à 999	2	1,8 %	1,8	1,3 %
SOUS_TOTAL [0-1MW]	<i>/////</i>	67	62 %	21	15,8 %
[1-2[	<i>/////</i>	16	14,8 %	21,6	15,9 %
[2-3[	<i>/////</i>	12	11,1 %	26,3	19,8 %
[3-4[	<i>/////</i>	6	5,5 %	12,8	9,6 %
[4-5[	<i>/////</i>	1	0,9 %	4	3 %
[5-6[	<i>/////</i>	0	0 %	0	0 %
[6-7[	<i>/////</i>	0	0 %	0	0 %
[7-8[	<i>/////</i>	2	1,8 %	14	10,5 %
[8-9[	<i>/////</i>	1	0,9 %	8	6 %
[9-10[	<i>/////</i>	0	0 %	0	0 %
[10-11[	<i>/////</i>	1	0,9 %	10	7,5 %
> 11	<i>/////</i>	1	0,9 %	11	8,3 %
SOUS_TOTAL 1-6 MW	<i>/////</i>	41	38 %	111,5	84,2 %
TOTAL	<i>/////</i>	108	100 %	132,5	100 %

Structure détaillée de la consommation dans le secteur industriel en 2009

Annexe 2

5 - APPROVISIONNEMENT EN BOIS

5.1 - CARACTERISTIQUES ET QUANTITES NECESSAIRES

Pour le scénario 1, nous avons pris pour hypothèse que le combustible serait de la sciure, comme c'est le cas actuellement.

Pour les scénarii 2 et 3, le combustible serait vraisemblablement de la plaquette, éventuellement en mélange avec d'autres combustibles bois. Dans cette optique, le système de transfert et d'alimentation de la chaudière bois envisagé dans les solutions techniques est un système à poussoir et tapis d'alimentation. Les quantités de bois varient de 385 à 520 T/an.

Les contraintes sur la qualité du combustible sont les suivantes :

- une humidité moyenne entre 25 et 35 % sur masse brute et de 45 % au maximum,
- une granulométrie entre 3 et 5 cm, sans éléments de plus de 7 à 10 cm

Ces contraintes impliquent, au niveau de l'élaboration du combustible, des spécificités techniques telles que :

- un broyage de préférence par broyeur à couteaux (un criblage est nécessaire si ce n'est pas le cas),
- un broyat issu :
 - ⇒ soit de bois sec (sous-produits de seconde transformation, palettes, ...) et stocké sous abri (à l'abri de l'eau, sur zone bétonnée ou bitumée),
 - ⇒ soit de sous produits forestiers (plaquette forestière) ou de première transformation du bois (dosses, délignures) avec une période de stockage/séchage sous abri au minimum de 4 à 6 mois.

5.2 - ORIGINE DES COMBUSTIBLES ET GISEMENT

Le combustible peut avoir trois origines principales :

- **les bois forestiers**, avec broyage de produits forestiers secondaires (rondins résineux, bois d'éclaircies ou d'entretien...), de rémanents d'exploitation, de bois d'élagage (entretien de bord de routes, de rivières...),
- **les produits connexes d'industries de la première transformation** (scieries) **ou de la seconde transformation** (menuiseries, ameublement, parqueterie...),
- **les bois de rebut**, principalement les bois d'emballages broyés et ~~déferpillés~~.

Le gisement disponible localement est largement supérieur aux besoins du projet, notamment en terme de produits connexes. En effet, la production de plaquettes produites dans les scieries locales est de l'ordre de 150 000 à 200 000 m³/an, alors que les besoins du projet sont d'environ 1000 à 2000 m³/an.

La disponibilité d'un gisement important de combustible est un point fort en faveur du projet de réseau de chaleur alimenté par une chaufferie bois.

5.3 - LES STRUCTURES POUVANT ASSURER L'APPROVISIONNEMENT

Dans le cadre de cette étude, deux scieries ont été contactées.

- La scierie Dubot, à Saint Avis (63). Celle-ci comprend deux sites : un site à Saint Avis, qui traite essentiellement des résineux, et un site à Candat, qui traite essentiellement des feuillus. Sur Saint Avis, 70 000 m³ de bois scié sont produits chaque année, pour la construction (50% est exporté). **La production journalière de sous-produits s'élève à 1000 m³**, dont 40% de plaquettes blanches, 40% de sciure, et 20% d'écorce. Les plaquettes sont actuellement dirigées vers des papeteries, mais également pour l'alimentation de chaufferies bois (écoles). Les sciures sont dirigées vers l'industrie du panneau, ou sont mélangées en partie avec des plaquettes, comme combustible. Enfin une partie des écorces est également utilisée comme combustible.

La production de combustible pour le projet de Pontaumur représente, pour cette scierie, 2 à 3 jours de production par an. Le projet de réseau de chaleur ne manque donc pas de ressources en combustibles.

- La scierie Faucher, qui alimente actuellement le lycée agricole en sciure, dispose de quantités suffisantes pour le projet.

5.4 - CONDITIONS DE FOURNITURE

Il paraît important de prévoir des contrats d'approvisionnement fixant les quantités, qualités, les moyens de contrôle, les prix et leur mode de facturation (en volume, en poids, à l'énergie...) et d'indexation. Des contrats de cinq ans sont couramment mis en place.

Extrait d'étude de faisabilité, chapitre consacré à l'approvisionnement.

Source : ADEME. Octobre 2005.

Annexe 3

Données brutes fournies par ONF Énergie pour la saison de chauffe 2009 – 2010.

Les données concernent la chaufferie bois de Planoise, ainsi que les autres chaufferies de la CAGB, dont ONF Énergie assure l’approvisionnement.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3	RECAPITULATIF DES LIVRAISONS						
5	Destination :		PLANOISE				
6	Période :		Toutes les années				
9	<i>Destination</i>	<i>Date</i>	<i>N° Bon livraison</i>	<i>Tonnes</i>	<i>% H2O</i>	<i>Qté matière</i>	<i>Provenance</i>
10	PLANOISE	Octobre		25,14	44	14,08	
11	PLANOISE			24,80	46	13,39	
12	PLANOISE			26,06	45	14,33	
13	PLANOISE			29,22	45	16,07	
14	PLANOISE			27,94	45	15,37	
15	PLANOISE			26,86	43	15,31	
16	PLANOISE			25,70	43	14,65	
17	PLANOISE			25,34	43	14,44	
18	PLANOISE			29,08	45	15,99	
19	PLANOISE			25,24	46	13,63	
20	PLANOISE			24,90	44	13,94	
21	PLANOISE			27,06	44	15,15	
22	PLANOISE			28,46	39	17,36	
23	PLANOISE			25,80	45	14,19	
24	PLANOISE			27,78	44	15,56	
25	PLANOISE			20,12	42	11,67	
26	PLANOISE			4,00	42	2,32	
27	PLANOISE			24,30	42	14,09	
28	PLANOISE			18,04	31	12,45	
29	PLANOISE			21,16	32	14,39	
30	PLANOISE			19,48	31	13,44	
31	PLANOISE			20,26	31	13,98	
32	PLANOISE			19,88	32	13,52	
33	PLANOISE			19,42	32	13,21	
34	PLANOISE			18,30	32	12,44	
35	PLANOISE			18,12	34	11,96	
36	PLANOISE			19,30	33	12,93	
37	PLANOISE			27,50	34	18,15	
38	PLANOISE			26,32	35	17,11	
39	PLANOISE			23,00	38	14,26	
40	PLANOISE			27,66	37	17,43	
41	PLANOISE			24,56	33	16,46	
42	PLANOISE			26,34	37	16,59	
43	PLANOISE			26,28	38	16,29	
44	PLANOISE			24,50	34	16,17	
45	PLANOISE			25,58	35	16,63	
46	PLANOISE			26,96	37	16,98	
47	PLANOISE			22,42	35	14,57	
48	PLANOISE			24,72	36	15,82	
49	PLANOISE			21,96	36	14,05	
50	PLANOISE			24,32	37	15,32	
51	PLANOISE			23,08	42	13,39	
52	PLANOISE			24,68	41	14,56	
53	PLANOISE			22,94	47	12,16	
54	PLANOISE			23,58	40	14,15	
55	PLANOISE			22,66	46	12,24	
56	PLANOISE			24,08	41	14,21	
57	PLANOISE			22,32	46	12,05	
58	PLANOISE			21,62	50	10,81	
59	PLANOISE			25,14	45	13,83	
60	PLANOISE			24,04	45	13,22	
61	PLANOISE			22,42	49	11,43	
62	PLANOISE			23,10	42	13,40	
63	PLANOISE	Novembre		22,10	50	11,05	
64	PLANOISE			24,22	50	12,11	

Page 1

Annexe 4

Données dendrométriques brutes

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
1. Données ponctuelles et par arbre (vif) sur deux secteurs géographiques du DOUBS (d'après les données du 3ème inventaire départemental datant de 1994):																				
2. ALLISTE DES ARBRES (VIES):																				
3. (Identifiant de l'arbre)																				
DÉPARTEMENT	CYCLE	DOMAINE D'ÉTUDE	CPP (identifiant du point)	CPH	GR	ABSCISSE	ORDONNÉE	SOUS-UNITÉ ARBRE	NUMÉRO ARBRE	CODE ESSENCE	CODE TYPE-ARBRE	POIDS STATISTIQUE	VOLUME ARBRE REBUT EXCLU (m³)	TALQUE QUALITE 1 (T10)	TALQUE QUALITE 2 (T10)	TALQUE QUALITE 3 (T10)	TALX DE REBUT (T10)			
6	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1220-0	022-202	N	85000	2232875	0	0	2	02	3	39,23759979	0,407498999	0,0	0,1	0,9	0,0	
7	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1220-0	022-202	N	85000	2232875	0	0	1	12	3	0,918399994	0,0	0,8	0,2	0,0	0,0	
8	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1220-0	022-202	N	85000	2232875	0	0	3	12	3	0,382299999	0,0	0,3	0,7	0,0	0,0	
9	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1220-0	022-202	N	85000	2232875	0	0	4	02	3	0,407498999	0,0	0,1	0,9	0,0	0,0	
10	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1220-0	022-202	N	85000	2232875	0	0	5	12	3	0,761900008	0,0	0,8	0,2	0,0	0,0	
11	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1220-0	022-200	N	85000	2233500	2	0	1	52	3	14,14770045	1,210399995	0,0	0,9	0,1	0,0	
12	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1220-0	022-200	N	85000	2233500	2	0	2	17	3	88,41950226	0,116399998	0,0	0,0	1,0	0,0	
13	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N108-0	030-188	N	85000	2237250	0	0	1	04	3	14,14770045	1,286900043	0,3	0,7	0,0	0,0	
14	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N108-0	030-188	N	85000	2237250	0	0	2	02	3	14,14770045	1,847800016	0,2	0,8	0,0	0,0	
15	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N108-0	030-188	N	85000	2237250	0	0	3	02	3	14,14770045	1,760400057	0,0	1,0	0,0	0,0	
16	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N108-0	030-188	N	85000	2237250	0	0	4	09	3	14,14770045	2,407599994	0,0	1,0	0,0	0,0	
17	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N108-0	030-188	N	85000	2237250	0	0	5	24	3	14,14770045	1,946999995	0,0	1,0	0,0	0,0	
18	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N108-0	030-188	N	85000	2237250	0	0	6	11	2	83,23759979	0,306899999	0,0	0,0	1,0	0,0	
19	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N108-0	030-188	N	85000	2237250	0	0	7	04	2	83,23759979	0,306899999	0,0	0,0	1,0	0,0	
20	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N108-0	030-188	N	85000	2237250	0	0	8	24	3	83,23759979	0,306899999	0,0	0,0	1,0	0,0	
21	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N108-0	030-188	N	85000	2237250	0	0	9	13	2	88,41950226	0,116399999	0,0	0,0	1,0	0,0	
22	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	1	62	2	88,41950226	0,289999991	0,0	0,0	1,0	0,0	
23	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	2	62	3	88,41950226	0,142000006	0,0	0,0	1,0	0,0	
24	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	3	62	3	9,55E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	
25	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	4	62	3	88,41950226	0,138999999	0,0	0,0	1,0	0,0	
26	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	5	62	3	88,41950226	0,100699998	0,0	0,0	1,0	0,0	
27	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	6	62	3	88,41950226	0,155399993	0,0	0,0	1,0	0,0	
28	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	7	62	2	3,95E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	
29	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	8	62	2	88,41950226	2,25E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	
30	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	9	62	3	88,41950226	0,112499997	0,0	0,0	1,0	0,0	
31	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	10	62	2	88,41950226	2,72E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	
32	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	11	62	3	88,41950226	0,149500004	0,0	0,0	1,0	0,0	
33	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	12	62	3	88,41950226	8,91E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	
34	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25338N148-0	034-188	N	86157,5	2237251	0	0	13	62	2	2,22E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	
35	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1240-0	034-202	N	862000	2232875	0	0	1	09	3	14,14770045	3,891399999	0,0	0,3	0,1	0,0	
36	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1240-0	034-202	N	862000	2232875	0	0	2	02	3	14,14770045	2,449999999	0,0	0,5	0,2	0,0	
37	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1240-0	034-202	N	862000	2232875	0	0	3	11	3	39,23759979	0,624999999	0,0	0,6	0,0	0,0	
38	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1240-0	034-202	N	862000	2232875	0	0	4	11	3	39,23759979	0,306500007	0,0	0,0	1,0	0,0	
39	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1240-0	034-202	N	862000	2232875	0	0	5	09	3	39,23759979	0,996500015	0,0	0,7	0,3	0,0	
40	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1240-0	034-202	N	862000	2232875	0	0	6	11	3	88,41950226	0,165000016	0,0	0,0	1,0	0,0	
41	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	2532N1240-0	034-202	N	862000	2232875	0	0	7	11	3	88,41950226	0,220699996	0,0	0,0	1,0	0,0	
42	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25336N148-0	034-186	N	862000	2234750	0	0	1	09	3	1,88E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	
43	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25336N148-0	034-186	N	862000	2234750	0	0	2	09	3	88,41950226	1,78E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	
44	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25336N148-0	034-186	N	862000	2234750	0	0	3	09	3	88,41950226	4,15E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	
45	25	3	SECTEUR DE LA TOIE - USONF	25336N148-0	034-186	N	862000	2234750	0	0	4	09	3	88,41950226	4,27E-02	0,0	0,0	1,0	0,0	

Données brutes par point d'inventaire

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
1	Données ponctuelles et par arbre (vit) sur deux secteurs géographiques du DOUBS (d'après les données du 3ème inventaire départemental... datant de 1994).																		
2																			
3	3) LISTE ET (PRINCIPALES) CARACTÉRISTIQUES DES POINTS :																		
4																			
5	DEPARTEMENT	CYCLE	DOMAINE D'ÉTUDE	CPH	GR	IDENTIFIANT DU POINT (CPP)	ABSCISSE	ORDONNÉE	USAGE DU SOL	CODE RÉGION DÉPARTEMENTALE	CODE PROPRIÉTÉ	CODE TYPE PEUPLEMENT PUBLIE	CODE STRUCTURE FORESTIÈRE	CODE EXPLOITABILITÉ-1 (EXP1)	CODE EXPLOITABILITÉ-2 (EXP2)	CODE ESPÈCE PRINCIPALE FUTAIE (1)	CODE ESPÈCE PRINCIPALE TAILLIS (*)	SURFACE D'EXTENSION DU POINT (ha)	
6	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	034-210	N	25330N241-0	862000	2230375	AUTRE FORÊT	8	4							0	
7	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	102-190	N	25330N123-1	878968,7	2236650	AUTRE FORÊT	5	2							0	
8	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	104-230	N	25330N243-1	879500	2242125	AUTRE FORÊT	3	4							0	
9	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	120-214	N	25324N201-1	883500	2232125	AUTRE FORÊT	1	4							0	
10	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	130-188	N	25338N108-1	886000	2237250	AUTRE FORÊT	1	4							0	
11	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	136-168	N	25338N166-1	887500	2243500	AUTRE FORÊT	5	4							0	
12	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	180-202	N	25362N200-1	889486,3	2232891	AUTRE FORÊT	3	2							0	
13	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	188-198	N	25368N189-1	900500	2234125	AUTRE FORÊT	3	2							0	
14	25	3	COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DU GRAND BESANCON	062-162	N	25362N126-0	863000	2245375	AUTRE FORÊT	5	4							0	
15	25	3	COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DU GRAND BESANCON	082-160	N	25380N125-0	874000	2249125	AUTRE FORÊT	5	4							0	
16	25	3	COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DU GRAND BESANCON	096-124	N	25384N162-0	875000	2257250	AUTRE FORÊT	6	4							0	
17	25	3	COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DU GRAND BESANCON	104-166	N	25366N143-1	879500	2235500	AUTRE FORÊT	5	4							0	
18	25	3	COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DU GRAND BESANCON	112-124	N	25314N122-1	881616,7	2257250	AUTRE FORÊT	6	2							0	
19	25	3	COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DU GRAND BESANCON	120-128	N	25328N102-1	883500	2256000	AUTRE FORÊT	5	2							0	
20	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	022-202	N	25322N220-0	859000	2222875	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	8	4	HA	1	2	1	12		103,4336	
21	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	022-200	N	25320N220-0	859000	2233500	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	8	4	ER	2	2	1	03		32,19510087	
22	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	030-188	N	25338N108-0	861000	2237250	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	8	4	ER	2	2	1	02		101,757	
23	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	034-188	N	25338N148-0	861957,5	2237250	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	8	4	SX	1	0	1	62		131,3073	
24	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	034-202	N	25332N240-0	862000	2232875	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	8	4	HA	1	2	1	11		103,4336	
25	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	034-196	N	25336N149-0	862000	2234750	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	HA	1	1	1	09		167,34536	
26	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	034-194	N	25334N149-0	862000	2236575	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	ER	1	0	1	22		102,5588375	
27	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	034-180	N	25330N149-0	862000	2236625	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	8	2	ER	1	1	1	09		116,978	
28	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	034-166	N	25336N146-0	862000	2237975	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	8	4	ER	1	1	1	04		101,757	
29	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	036-200	N	25330N260-0	862500	2233900	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	4	HA	3	1	1	09	14	517,226	
30	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	038-188	N	25338N188-0	862000	2237250	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	IH	1	0	1	09		102,7933333	
31	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	040-166	N	25346N108-0	863500	2237250	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	JA	1	2	3	03		208,8549182	
32	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	042-166	N	25346N128-0	864000	2237975	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	JA	1	0	1	11		208,8549182	
33	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	046-166	N	25348N168-0	865000	2237975	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	JA	1	0	1	11		167,34536	
34	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	048-208	N	25348N280-0	865000	2237975	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	4	W'X	2	1	2	03		169,714	
35	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	050-204	N	25354N200-0	866000	2232250	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	4	W'X	2	1	2	03		208,8549182	
36	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	050-166	N	25356N108-0	866000	2237975	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	JA	1	1	1	62		102,7933333	
37	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	052-196	N	25356N128-0	866486,2	2234715	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	IH	1	1	3	03		102,7933333	
38	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	052-182	N	25352N128-0	866500	2236000	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	4	JA	3	2	7	02	11	208,8549182	
39	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	052-180	N	25356N128-0	866500	2237250	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	4	CU	3	2	3	54		21,5316	
40	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	052-184	N	25354N126-0	866500	2236900	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	W'X	3	2	0	20		169,714	
41	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	054-208	N	25358N240-0	867000	2230000	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	IH	2	0	2	14		102,7933333	
42	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	058-178	N	25358N187-0	868000	2240750	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	4	SX	4	2	2	03		183,271475	
43	25	3	SECTEUR DE LA "LOUE - LISON"	062-212	N	25362N221-0	889000	2229750	FORÊT DE PRODUCTION LEVEE	5	2	EU	3	1	2	22	31	108,1208	

Annexe 5

TYPE DE PEUPLEMENT	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	STD	MEAN	MODE
Jeune futaie de pins	40	36000	0.575000	0.668293	0.093293	0.020250	0.626858	0.630313
Jeune futaie de feuillus indifférenciés	5598	5038200	-0.014085	0.711443	0.725527	0.057273	0.602520	0.636827
Jeune futaie de sapins	670	603000	0.416216	0.672131	0.255915	0.032023	0.600938	0.606215
Jeune futaie de hêtre	4171	3753900	0.044586	0.724138	0.679552	0.079054	0.594537	0.625855
Jeune futaie de douglas	542	487800	0.461988	0.712821	0.250832	0.041654	0.593159	0.598559
Futaie adulte de hêtre	27499	24749100	0.097826	0.721649	0.623823	0.051233	0.592782	0.598416
Jeune futaie de chênes	2064	1857600	0.158470	0.709497	0.551027	0.070620	0.591176	0.619633
Futaie adulte de Douglas	554	498600	0.456140	0.693989	0.237849	0.048321	0.583825	0.628416
Mélange de futaie de hêtre et taillis	16949	15254100	0.101449	0.701863	0.600414	0.062785	0.577461	0.603843
Mélange riche de futaie de chêne et taillis	8356	7520400	0.163842	0.677778	0.513936	0.035816	0.576167	0.592710
Mélange pauvre à moyen de futaie de chênes et taillis	57605	51844500	-0.115385	0.735160	0.850544	0.053395	0.574970	0.598416
Jeune futaie de conifères indifférenciés	1292	1162800	0.123596	0.696078	0.572483	0.063642	0.574320	0.601771
Mélange de futaie de feuillus indifférenciés et taillis	197862	178076000	-0.160000	0.737288	0.897288	0.066347	0.573436	0.590266
Futaie adulte de feuillus indifférenciés	43049	38744100	-0.243243	0.720207	0.963451	0.061250	0.568479	0.583420
Futaie adulte de chênes	2155	1939500	0.135678	0.690476	0.554798	0.044665	0.567916	0.579713
Jeune futaie d'épicéa	1448	1303200	0.077922	0.697297	0.619375	0.063711	0.563532	0.593052
Futaie mixte	95282	85753800	-0.084548	0.753191	0.837740	0.066635	0.557327	0.580776
Mélange de futaie de conifères et taillis	10377	9339300	-0.188679	0.702128	0.890807	0.078504	0.556881	0.605861
Taillis de feuillus indifférenciés	50518	45466200	-0.200000	0.719101	0.919101	0.086681	0.551467	0.605885
Futaie adulte de sapin	27199	24479100	0.019355	0.742857	0.723502	0.060489	0.541902	0.557262
Futaie adulte de conifères indifférenciés	7290	6561000	-0.008547	0.678161	0.686708	0.065979	0.537675	0.550119
Jeune futaie de sapin-épicéa	998	898200	0.100671	0.683673	0.583002	0.077543	0.536865	0.522945
Futaie adulte d'épicéa	8901	8010900	0.000000	0.709091	0.709091	0.066232	0.531587	0.578635

Forêt ouverte de feuillus	12722	11449800	-0.100000	0.723214	0.823214	0.080673	0.528630	0.567462
Futaie adulte de sapin-épicéa	23298	20968200	0.009346	0.742857	0.733511	0.069301	0.524180	0.568482
Futaie adulte de pins	2291	2061900	0.004926	0.691429	0.686502	0.067119	0.488268	0.487916
Peupleraie	271	243900	0.087248	0.678899	0.591651	0.117577	0.480682	0.568987
Lande	2292	2062800	0.162791	0.680412	0.517622	0.075460	0.478378	Lande
Forêt ouverte de conifères	76	68400	0.366337	0.538462	0.172125	0.036314	0.444000	0.444077

Valeurs de NDVI par type de peuplement issu de la cartographie forestière

Annexe 6

Âge d'exploitabilité des principales essences forestières

Type de peuplement /essence	Âge d'exploitabilité en années	Source
Taillis de chêne	25 à 30	CRPF Poitou-Charentes
Chêne sessile, chêne pédonculé	100 à 150	CRPF Poitou-Charentes
Chêne sessile, chêne pédonculé	100 à 200	CRPF Nord pas de Calais
Chêne sessile	150	Document de gestion de la forêt communale de Fontain période 2005-2024
Chêne pédonculé	120	Document de gestion de la forêt communale de Fontain période 2005-2024
Chêne sessile	150 à 200	Foret Web Davy
Chêne pédonculé	100 à 150	Foret Web Davy
Chêne	135	FOGEFOR Ardennes 2009
Futaie de frêne	60	CRPF Poitou-Charentes
Chêne	150 à 250	ONF
Chêne	150 à 180	DOCOB Natura 2000 / ONF
Chêne	175 à 220	Ballu, J.-M., 2004
Frêne	75	FOGEFOR Ardennes 2009
Feuillus précieux	90	Document de gestion de la forêt communale de Fontain période 2005-2024
Feuillus précieux	60 à 100	CRPF Nord pas de Calais
Feuillus précieux	60	FOGEFOR Ardennes 2009
Hêtre	120	Document de gestion de la forêt communale de Fontain période 2005-2024
Hêtre	80 à 100	CRPF
Hêtre	80 à 100	ONF
Hêtre	100 à 140	ONF
Hêtre	Avant 120	CRPF Nord pas de Calais
Hêtre	80 à 100	DOCOB Natura 2000 / ONF
Hêtre	120	Ballu, J.-M., 2004
Chêne rouge d'Amérique, frêne, grands érables, merisier, noyer	50 à 70	CRPF Poitou-Charentes
Autres feuillus (bouleau, charme,	40 à 80	CRPF Nord pas de Calais

aulne)		
Peuplier	12 à 30	CRPF Poitou-Charentes CRPF Nord pas de Calais
Peuplier	25	Ballu, J.-M., 2004
Douglas, autres pins (futaie régulière bois d'oeuvre)	50 à 70	CRPF Poitou-Charentes
Douglas (futaie régulière petit bois d'oeuvre et bois d'industrie)	40 à 45	CRPF Poitou-Charentes
Douglas	50	IFN /ADEME (évaluation du gisement de bois pour l'énergie)
Pin	90	Ballu, J.-M., 2004
Pin Sylvestre, Douglas, Mélèze	100 à 160	ONF
Pin Sylvestre, épicéa	80	IFN /ADEME (évaluation du gisement de bois pour l'énergie)
Résineux	80 à 90 selon les essences	Document de gestion de la forêt communale de Fontain période 2005-2024
Épicéa commun	60 à 80	CC Doustres
Épicéa commun	60	IFN (étude RESS)
Épicéa commun	45 à 70	CRPF Alsace Lorraine
Épicéa commun	200 (âge maximum)	Domenicus Malléotus
Sapin, épicéa	120 à 140	ONF
Sapin pectiné	90 à 120	Foret Web Davy (sources : ONF, ENGREF, CRPF)
Sapin	100 à 140	ONF

Âge d'exploitabilité et rotation des coupes dans les formations de taillis

Essence	Âge d'exploitabilité /intervalle entre les coupes rases	Source
Charme	30 - 45ans	CRPF (2007)
Chêne rouvre ou pédonculé	25 -35 ans	CRPF (2007)
Chêne pubescent	30 - 45 ans	CRPF (2007)
Robinier	20 -30 ans	CRPF (2007)
Divers (Tilleul, Tremble, Bouleau)	20 - 30 ans	CRPF (2007)
Feuillus indifférenciés	20 - 30 ans	Bastien (2002)
Taillis simple	15 à 40 ans	Société d'exploitation des bois du sud-ouest

Annexe 7

Valeurs de production de biomasse ligneuse feuillue

Espèce	Production nette primaire en t/ha/an	Source	Remarques
Quercus (chêne), âge non précisé	12,2	Duvigneau adn Denaeyer-DeSmet (1970) in [DAY, 1977]	Masse foliaire incluse
Quercus (chêne), âge non précisé	8,9	Reiners (1972) in [DAY, 1977]	Masse foliaire incluse
Quercus rubra (chêne rouge, présent en Europe depuis le début du XVIII ^{ème} siècle), âge non précisé	8,28	Whittaker (1966) in [DAY, 1977]	Masse foliaire incluse
Quercus rubra, âge non précisé	5,68	Whittaker (1966) in [DAY, 1977]	Masse foliaire incluse → « <i>aboveground biomass</i> »
Chênaie, 48 ans	8,3	Lémée (1974) in [ARN, 1997]	Bois + litière → masse foliaire incluse
Chênaie à noisetiers, 120 ans	10,8	Lémée (1974) in [ARN, 1997]	Bois + litière → masse foliaire incluse
Chêne pédonculé, 67 ans	17,7 (dont 54 % pour les racines → 8,1 t/ha/an)	[CUR, 2005]	Masse foliaire incluse
Chênaie, forêt tempérée, âge non précisé	8	Université de Saint-Étienne	Pas de précisions sur la compartimentation de la biomasse calculée
Chênaie, âge non précisé	8,2	J.-D Ovington et D.-B. Lawrence, cité in [ROU, 1971]	« Production primaire » → masse foliaire incluse
Chêne pédonculé, âge non précisé	5,4	C. Le Guillon	Pas de précisions sur la compartimentation de la biomasse calculée
Chênaie, âge non défini	12 - 15	P. Duvigneau et P. Ambroes, cités in [ROU, 1971]	« Production primaire »
Hêtraie, 85 ans	9,9	Lémée (1974) in [ARN, 1997]	Bois + litière → masse foliaire incluse
Hêtraie, âge non précisé	9,7	Lémée (1974) in [ARN, 1997]	Bois + litière → masse foliaire incluse
Hêtre, âge non précisé	7 - 12,5	[ERN, 2000]	Masse foliaire incluse
Hêtraie, forêt tempérée, âge non précisé	11	Université de Saint-Étienne	Pas de précisions sur la compartimentation de la biomasse calculée

Espèce	Production nette primaire en t/ha/an	Source	Remarques
Hêtre, 30-35 ans	19,9	[KOZ, 2001]	Pas de précisions sur la compartimentation de la biomasse calculée
Hêtre, 100 ans	15,4	[KOZ, 2001]	Pas de précisions sur la compartimentation de la biomasse calculée
Hêtraie	8 -13,5	P. Duvigneau et P. Ambroes, cités in [ROU, 1971]	« Production primaire »
Hêtraie, 120 ans	10 (dont 3 t de feuilles et fruits)	[OTT, 1998]	Distinction ligneux/foliaire effectuée
Hêtre, âge non précisé	7,1	C. Le Guillon	Pas de précisions sur la compartimentation de la biomasse calculée
Hêtre pur, modèle 1 ¹	12,6 ³	[ROU, 1971]	« Production primaire »
Hêtre pur, modèle 2 ²	18,7 ⁴	[ROU, 1971]	« Production primaire »
Feuillus indifférenciés, âge non précisé	5,6 - 8,6	[TAT, 2004]	Précisé « racines exclues »
Feuillus indifférenciés	5,13	[NEW, 2006]	Précisé « racines exclues »
Bétulaie (bouleau), 35 ans	11,9	Lémée (1974) in [ARN, 1997]	Bois + litière → masse foliaire incluse
Forêt mixte, âge non précisé	6,3	[LIU, 1993]	Précisé « racines exclues »

¹ Modèle 1 : feuillages supposés horizontaux et absolument opaques. Valeurs un peu élevées par rapport à d'autres valeurs de la littérature.

² Modèle 2 : feuillages étalés en 6 plans successifs → correspondrait à une futaie étagée. Valeurs surestimées.

Valeurs de production de biomasse ligneuse résineuse

Espèce	Production nette primaire en t/ha/an	Source	Remarques
Sapin pectiné	6,7	[DEC, 1967] ³	Données en m ³ de bois fort
Pin Sylvestre, 100 ans	7,5	Lémée (1974) in [ARN, 1997]	Aiguilles incluses
Pin, 74 ans	8,1	[CUR, 2005]	
Épicéa, âge non défini	4 -12	[ERN, 2000]	Aiguilles incluses
Épicéa, 76 ans	15,5	J.-D Ovington et D.-B. Lawrence, cité in [ROU, 1971]	« Production primaire » → masse des aiguilles incluse
Épicéa pur, modèle 1	9,2	[ROU, 1971]	« production primaire » : aiguilles incluses
Épicéa pur, modèle 2	12,5	[ROU, 1971]	« Production primaire » → masse des aiguilles incluse
Picéa abies (épicéa commun), 100 ans	11,9	Lémée (1974) in [ARN, 1997]	Aiguilles incluses
Épicéa, 45 ans	9,2	[DEC, 1971] ⁴	Données en m ³ de bois fort
Épicéa, 90 ans	3,6	[DEC, 1971] ⁵	Données en m ³ de bois fort
Douglas, 0-20 ans	6,7 (dont 4,5 t pour le tronc et 2,17 t pour le reste de la biomasse aérienne)	[RAN, 1996] ⁵	Compartimentation effectuée entre masse ligneuse et masse des aiguilles
Douglas, 20-40 ans	15,4 (dont 11 t pour le tronc et 4,4 t pour le reste de la biomasse aérienne)	[RAN, 1996] ⁶	Compartimentation effectuée entre masse ligneuse et masse des aiguilles
Douglas, 40-60 ans	13,2 (dont 9,2 t pour le tronc et 4 t pour le reste de la biomasse aérienne)	[RAN, 1996] ⁶	Compartimentation effectuée entre masse ligneuse et masse des aiguilles
Douglas, âge non défini	6,8	Bouchon (1982), cité in [RAN, 1996] ⁶	Données en m ³
Douglas, 50 ans	10,6	[RON, 2002] ⁶	Données en m ³
Douglas, 50 ans	11,6	[DEC, 1967] ⁶	Données en m ³

³ Production donnée en m³/ha/an. Conversion effectuée en utilisant une valeur de masse volumique égale à 0,45t/m³ (source : agenda forestier et de l'industrie du bois)

⁴ Production donnée en m³/ha/an. Conversion effectuée en utilisant une valeur de masse volumique égale à 0,47 t/m³ (source : agenda forestier et de l'industrie du bois)

⁵ Production donnée en m³/ha/an. Conversion effectuée en utilisant une valeur de masse volumique égale à 0,53t/m³ (source boisetpaille.com)

Espèce	Production nette primaire en t/ha/an	Source	Remarques
Douglas, âge non défini	9,9 - 12,2	Valeurs de référence de différents auteurs, cités in [DEC, 1967] ⁶	Pas de précisions quant à la compartimentation. Données e nm ³

Récapitulation des valeurs de production de biomasse arborée

Essence	Intervalles de valeurs de production de biomasse arborée⁶ en t/ha/an
Chêne	5,4 - 15
Hêtre	7,1 - 19,9
Bétulaie	11,9
Feuillus indifférenciés	5,13 - 8,6
Peuplements mixtes	6,3
Sapin	6,7
Pin	7,5 - 8,1
Épicéa	3,6 - 15,5
Douglas	6,7 - 15,4

⁶ Les données étant exprimées en intégrant la biomasse foliaire, il est préférable de parler de biomasse arborée que de biomasse ligneuse.

Table de production du chêne (DECOURT, 1984)

SECTEUR LIGÉRIEN

N° de plots	N° de parcelles	ÉCLAIRCIES						Production totale (m³/ha)	Accroissement courant (m³/ha)	Accroissement moyen (m³/ha)	Age ans
		Nombre de tiges	Volume moyen (m³)	Volume total (m³)	Volume total (m³)	% en élévation	Volume total (m³)				
(500)	1	1	1	1	1	1	16	-	0,5	30	
400	16	-	-	4	5	9,1	55	6,5	1,5	36	
320	22	-	-	8	13	13,5	96	6,8	2,3	42	
320	28	0,05	15	28	28	19,7	142	7,7	3,0	48	
320	35	0,07	23	51	51	26,6	192	8,3	3,6	54	
144	41	0,14	20	71	71	29,6	240	8,0	4,0	60	
100	50	0,18	18	89	89	31,1	286	7,7	4,3	66	
84	57	0,24	20	109	109	33,0	330	7,3	4,6	72	
60	63	0,37	22	131	131	35,1	373	7,2	4,6	78	
48	66	0,40	19	150	150	36,1	415	7,0	4,9	84	
44	72	0,48	21	171	171	37,4	457	7,0	5,1	90	
44	82	0,61	27	198	198	38,7	512	6,9	5,2	96	
42	86	0,67	28	226	226	39,9	567	6,9	5,4	106	
42	97	0,76	32	258	258	41,5	622	6,9	5,5	114	
28	104	1,11	31	269	269	42,7	677	6,8	5,6	122	
24	110	1,25	30	319	319	43,6	731	6,8	5,6	130	
28	119	1,50	39	358	358	44,9	786	6,7	5,7	140	
18	126	2,11	38	396	396	45,8	864	6,6	5,8	150	
16	135	2,50	40	436	436	47,0	927	6,3	5,8	160	
12	145	3,00	36	472	472	47,9	986	5,9	5,8	170	
13	151	3,08	40	512	512	49,2	1040	5,4	5,8	180	
8	160	3,62	29	541	541	49,7	1088	4,8	5,7	190	
7	167	3,71	26	567	567	50,2	1130	4,2	5,7	200	
48	173	4,17	200				1169	3,9	5,6	210	
27	207	6,26	169				1189	4,0	5,5	215	
26	198	5,61	165				1202	2,6	5,5	220	
19	210	6,63	126				1208	1,2	5,4	225	

REFERENCES : * Table de production pour les forêts de chêne rouvre de qualité tranchage du secteur ligérien.- Notes techniques forestières, n° 11, mars 1962, 1ère section de la Station de Recherches et Expériences Forestières, Nancy, pp. 1-6.

CHENE (d'après PARDE-1962)

Age ans	PEUPLIEMENT APRÈS ÉCLAIRIE							
	Hauteur dominante (m)	Hauteur moyenne (m)	Nombre de tiges	Croissance moyenne (cm)	Croissance dominante (cm)	Volume bois moyen (m³)	Surface terrière (m²)	Volume (m³)
30	12,0	10,6	2240	14	45	0,01	3,5	15
36	14,0	12,4	1840	22	51	0,03	7,1	50
42	15,6	14,0	1520	29	57	0,05	10,2	83
48	17,4	15,5	1200	37	65	0,09	13,1	114
54	18,8	16,8	880	44	72	0,16	13,6	141
60	20,0	18,0	786	51	78	0,23	15,2	169
66	21,0	19,1	636	58	83	0,31	17,0	197
72	22,0	20,3	552	65	89	0,40	18,6	221
78	23,0	21,4	492	72	95	0,49	20,3	242
84	23,9	22,4	444	78	100	0,60	22,1	265
90	24,8	23,5	400	86	106	0,71	23,5	286
96	25,8	24,7	356	95	112	0,88	25,6	314
106	26,8	25,9	314	104	119	1,08	27,0	341
114	27,7	27,0	272	113	126	1,34	27,6	364
122	28,7	28,1	244	122	133	1,59	28,9	388
130	29,5	29,0	220	130	139	1,87	29,6	412
140	30,5	30,0	194	141	-	2,27	30,7	440
150	31,3	30,9	176	152	-	2,66	32,4	468
160	32,0	31,7	160	162	-	3,07	33,4	491
170	32,7	32,4	148	172	-	3,47	34,8	514
180	33,2	33,0	135	180	-	3,81	34,8	528
190	33,8	33,6	127	187	-	4,31	35,3	547
200	34,3	34,1	120	194	-	4,69	35,9	563
REGENERATION								
210(1)	34,5	34,5	72	201		5,58	33,1	402
213(2)	34,7	34,7	45	203		5,62	14,8	263
220(3)	34,8	34,8	19	209		6,32	6,6	120
225(4)			0					

(1) Emplacement
(2) Succession
(4) définitive

REGENERATION - Les chiffres donnés par la table ne sont que des indications.

Table de production du hêtre (DECOURT, 1984)

HÊTRE (d'après SCHÖBER-1972)

Age ans	PEUPLÈMENT APRÈS ÉCLAIRÉ						Volume total (m³)	Surface terrière (m²)	Volume total (m³)
	Hauteur dominante (m)	Hauteur moyenne (m)	Nombre de tiges	Densité moyenne (n/m²)	Volume arbre moyen (m³)	Surface terrière (m²)			
30	8,6	7,9	7326	4,9	-	13,6	-	-	
35	10,6	9,9	4310	6,8	0,01	15,7	44	-	
40	12,8	12,1	2819	8,9	0,03	17,5	74	-	
45	15,0	14,3	2002	11,0	0,05	18,9	107	-	
50	17,0	16,3	1491	13,1	0,08	20,1	139	-	
55	18,9	18,2	1153	15,2	0,15	21,0	169	-	
60	20,6	19,9	927	17,3	0,21	21,8	198	-	
65	22,1	21,4	768	19,3	0,29	22,5	225	-	
70	23,4	22,7	643	21,4	0,39	23,1	249	-	
75	24,8	24,1	545	23,4	0,50	23,5	272	-	
80	26,1	25,4	468	25,5	0,63	23,9	293	-	
85	27,2	26,5	406	27,5	0,77	24,2	311	-	
90	28,4	27,7	355	29,6	0,93	24,4	329	-	
95	29,4	28,7	313	31,6	1,10	24,6	346	-	
100	30,4	29,7	278	33,7	1,30	24,8	362	-	
105	31,3	30,6	248	35,8	1,52	25,0	376	-	
110	32,2	31,5	222	38,0	1,76	25,1	390	-	
115	33,0	32,3	200	40,1	2,01	25,2	402	-	
120	33,7	33,0	181	42,2	2,29	25,3	414	-	
125	34,4	33,7	164	44,4	2,59	25,4	425	-	
130	35,0	34,3	149	46,7	2,92	25,5	436	-	
135	35,6	34,8	136	48,9	3,26	25,6	444	-	
140	36,0	35,3	124	51,3	3,65	25,6	453	-	
145	36,5	35,8	113	53,8	4,08	25,7	461	-	
150	37,0	36,3	103	56,4	4,55	25,7	469	-	

Classe 7 - Accroissement moyen à 100 ans : 7 m³/ha/an

CLASSE 7

NORD-EST (suite)

Nombre de tiges	ÉCLAIRCIES						Produits totale (m³)	Accrois- sement courant (m³/an)	Accrois- sement moyen (m³/an)	Age ans
	Quos- sité moyenne (n/m²)	Volume arbre moyen (m³)	Volume (m³)	Volumes totaux (m³)	% récolte en éclaircie					
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30
3016	3,5	-	-	-	-	44	-	1,3	35	
1491	5,0	-	-	-	-	74	6,1	1,9	40	
817	6,9	-	-	-	-	114	8,0	2,5	45	
511	8,9	0,03	7	21	13,1	160	9,1	3,2	50	
338	11,1	0,06	20	41	19,5	210	10,0	3,8	55	
226	13,4	0,11	24	65	24,7	263	10,6	4,4	60	
159	15,8	0,18	28	93	29,2	318	10,9	4,9	65	
125	17,8	0,25	31	124	33,2	373	11,1	5,3	70	
98	19,9	0,34	33	157	36,6	429	11,1	5,7	75	
77	22,3	0,46	35	192	39,6	485	11,0	6,1	80	
62	24,5	0,58	36	228	42,3	539	10,9	6,3	85	
51	26,4	0,71	36	264	44,5	593	10,7	6,6	90	
42	28,4	0,86	36	300	46,4	646	10,5	6,8	95	
35	30,4	1,03	35	336	48,1	698	10,3	7,0	100	
30	32,3	1,20	36	372	49,7	748	10,1	7,1	105	
26	34,1	1,38	36	408	51,1	798	9,9	7,3	110	
22	36,4	1,64	36	444	52,5	846	9,6	7,4	115	
19	38,6	1,89	36	480	53,7	894	9,4	7,5	120	
17	40,1	2,06	35	515	54,8	940	9,2	7,5	125	
15	41,6	2,27	34	549	55,8	984	8,9	7,6	130	
13	44,5	2,62	34	583	56,8	1027	8,7	7,6	135	
12	45,9	2,83	34	617	57,7	1070	8,5	7,6	140	
11	47,6	3,09	34	651	58,5	1112	8,5	7,7	145	
10	49,2	3,40	34	685	59,4	1154	8,4	7,7	150	

Table de production du sapin (DECOURT, 1984)

PRODUCTION DE REFERENCE (suite)

ECLAIRCIE ENLEVÉE										PEUPELEMENT APRES ECLAIRCIE					PRODUCTION					
Age	Haut. am. moy.	Haut. H	N	Dm. moy.	Dm. Do	Vol. v	Surf. terrée G	Vol. Arb. moy.	Type s/g	Haut. moy. H	Nbre tiges N	Diam. moy. Dg	Vol. Arb. moy. V	Surf. terrée G	Volume V	Total en vol.	Accrois. moyen annuel	Accrois. constant annuel	Age A	
																				Vol. am. s/g	Vol. m³	%
25	12,7	10,6	2200	12	22	0,06	25,3	124	9,8	885	9	0,03	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
50	16,9	14,7	1315	19	30	0,19	35,8	249	13,8	440	15	0,11	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
75	20,2	18,3	875	25	37	0,44	44,6	363	17,3	245	22	0,31	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
100	23,0	21,4	630	32	44	0,78	50,0	493	19,9	183	27	0,55	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
125	26,4	24,6	447	40	52	1,42	56,5	636	22,5	100	34	1,00	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
150	28,9	27,5	347	47	58	2,10	59,6	730	23,9	68	39	1,47	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
175	30,9	29,5	279	53	63	2,92	60,5	786	25,0	51	44	1,96	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
200	32,5	31,3	228	58	67	3,58	60,2	817	26,0	40	48	2,50	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
225	34,0	32,8	188	63	70	4,42	59,1	831	27,0	32	53	3,13	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
250	35,4	34,2	156	69	72	5,35	57,7	834	26,6	27	58	3,70	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
275	36,7	35,5	129	74	75	6,43	56,1	829	26,8	22	63	4,55	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
300	38,0	36,7	107	80	77	7,65	54,6	819	25,1	19	68	5,26	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5

Classe de productivité : 12 - Hauteur de référence : 30,40

43	12,7	10,6	2200	12	22	0,06	25,3	124	9,8	885	9	0,03	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
51	16,9	14,7	1315	19	30	0,19	35,8	249	13,8	440	15	0,11	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
59	20,2	18,3	875	25	37	0,44	44,6	363	17,3	245	22	0,31	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
67	23,0	21,4	630	32	44	0,78	50,0	493	19,9	183	27	0,55	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
79	26,4	24,6	447	40	52	1,42	56,5	636	22,5	100	34	1,00	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
91	28,9	27,5	347	47	58	2,10	59,6	730	23,9	68	39	1,47	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
103	30,9	29,5	279	53	63	2,92	60,5	786	25,0	51	44	1,96	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
115	32,5	31,3	228	58	67	3,58	60,2	817	26,0	40	48	2,50	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
127	34,0	32,8	188	63	70	4,42	59,1	831	27,0	32	53	3,13	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
139	35,4	34,2	156	69	72	5,35	57,7	834	26,6	27	58	3,70	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
151	36,7	35,5	129	74	75	6,43	56,1	829	26,8	22	63	4,55	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
163	38,0	36,7	107	80	77	7,65	54,6	819	25,1	19	68	5,26	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5

Classe de productivité : 10 - Hauteur de référence : 27,60

48	12,5	10,4	2200	12	22	0,05	24,2	117	9,4	942	9	0,03	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
58	16,9	14,8	1258	19	30	0,20	36,1	254	13,7	412	15	0,12	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
68	20,5	18,5	846	26	36	0,47	45,7	369	17,3	227	22	0,33	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7
78	23,3	21,5	619	32	45	0,82	51,0	510	19,9	147	27	0,58	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
90	25,9	24,2	472	39	51	1,30	55,3	614	21,9	93	33	0,91	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
102	27,9	26,3	379	44	56	1,81	57,4	685	23,4	67	37	1,27	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
114	29,6	28,0	312	49	59	2,35	58,0	732	24,5	52	41	1,63	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
126	31,1	29,5	260	53	63	2,94	57,9	783	25,8	41	45	2,07	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
138	32,4	30,9	219	56	66	3,58	57,4	784	26,2	34	49	2,50	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
150	33,7	32,3	185	62	69	4,32	56,6	789	26,7	28	53	3,04	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
162	35,0	33,5	157	67	71	5,15	55,8	809	26,0	24	57	3,54	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
174	36,2	34,7	133	73	74	6,12	54,9	815	25,6	20	61	4,25	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9

Table de production de l'épicéa (DECOURT, 1984)

PRODUCTION (Sylviculture moyenne observée) (suite)

ÉCLAIRIE ENLEVÉE				PEUPLIÈRE APRÈS ÉCLAIRIE				PRODUCTION			
Vol. cumulé t ve	Vol. m ³	Type ve	Haut. moy. H'	Nbre tiges N	Diem. moy. Dg	Vol. Arb. moy. V	Surf. terre O	Yours V	Totaux en vol.	Avance moyen annuel	Age
53	13	0,30	15,2	1985	18	0,18	48,9	352	404	8,1	50
196	849	34	0,50	22,3	848	26	0,58	46,4	489	738	75
192	441	45	0,70	26,6	528	32	1,02	43,3	536	978	100
159	801	49	0,70	30,3	375	38	1,67	45,2	626	1226	125
145	748	52	0,70	33,8	282	45	2,48	45,8	691	1436	150
137	883	54	0,70	36,6	219	52	3,38	45,8	740	1623	175
0	0	0,0	11,8	3000	14	0,08	45,3	254	254	5,1	50
166	188	31	0,50	19,1	1149	23	0,37	46,6	421	808	75
183	370	45	0,70	23,1	681	28	0,67	42,2	458	829	100
151	521	49	0,70	26,7	470	35	1,16	46,3	545	1067	125
137	659	52	0,70	29,9	347	41	1,76	45,2	612	1271	150
132	791	54	0,70	33,0	265	47	2,51	45,4	665	1456	175
0	0	0,0	10,9	2500	14	0,08	40,4	207	207	3,4	60
123	123	25	0,50	17,4	1272	22	0,30	46,3	377	499	90
179	301	42	0,70	21,4	728	27	0,57	42,0	418	719	120
155	457	48	0,70	25,1	481	34	1,04	43,6	499	956	150
149	605	52	0,70	28,6	338	41	1,67	44,1	566	1171	180

EPICEA COMMUN - ALPES DU NORD TABLE DE

PEUPLIÈRE AVANT ÉCLAIRIE				ÉCLAIRIE ENLEVÉE									
Age	Haut. com. H	Nbre tiges N	Diem. moy. Dg	Vol. Arb. moy. V	Haut. moy. H'	Nbre tiges N	Diem. moy. Dg	Vol. Arb. moy. V	Surf. terre O	Age			
50	16,6	14,4	3000	15	22	0,12	58,0	404	9,8	1515	9	0,03	9,0
75	23,8	20,9	1985	21	31	0,39	68,1	688	17,7	1137	16	0,17	21,6
100	28,3	25,9	848	30	39	0,88	80,0	729	24,1	320	26	0,60	18,7
125	31,7	29,7	528	37	45	1,49	57,5	788	27,5	153	32	1,04	12,3
150	34,6	33,0	375	44	51	2,23	56,1	836	30,3	93	38	1,56	10,3
175	37,2	36,0	282	50	56	3,11	54,9	878	32,7	63	43	2,16	9,1
50	13,4	11,8	3000	14	19	0,08	45,3	254	0,0	0	0	0,0	0,0
75	20,4	17,7	1985	17	27	0,20	70,8	608	14,9	1051	13	0,10	24,2
100	24,9	22,5	1149	25	34	0,56	60,4	641	20,9	488	22	0,39	18,2
125	28,3	26,2	681	33	41	1,02	57,4	695	24,3	211	28	0,72	13,1
150	31,2	29,4	470	39	47	1,59	56,1	750	27,2	123	33	1,12	10,8
175	33,8	32,4	347	45	52	2,30	55,0	797	29,2	82	39	1,61	9,6
50	12,3	10,9	2500	14	19	0,08	40,4	207	0,0	0	0	0,0	0,0
75	19,7	16,3	1985	18	26	0,20	63,6	499	13,6	1228	13	0,10	17,3
100	23,0	20,6	1272	25	33	0,47	61,5	587	19,1	544	21	0,33	19,4
125	26,5	24,4	728	32	40	0,80	58,1	655	22,6	247	27	0,63	14,6
150	29,7	28,0	481	39	46	1,48	58,5	714	25,8	143	33	1,04	12,4

Table de production du Douglas (DECOURT, 1984)

Age des arbres	ÉCLAIRCIES						Production totale (m³)	Accroissement constant (m³/an)	Accroissement moyen (m³/an)	Age des arbres
	Nombre de tiges	Croissance moyenne (cm)	Volume moyen (m³)	Volume (m³)	Volume total (m³)	% enlevé en éclaircie				
15	510	38	0,09	43	-	162	27,6	10,8	15	
20	420	46	0,14	60	43	303	30,0	15,2	20	
25	310	55	0,29	90	103	462	36,4	18,5	25	
30	220	65	0,33	72	265	627	30,7	20,9	30	
35	126	72	0,61	77	342	769	27,7	22,0	35	
40	74	78	0,86	64	406	904	25,9	22,6	40	
45	54	86	1,15	62	466	1028	22,8	22,8	45	
50	36	92	1,26	46	514	1130	17,9	22,6	50	
55	24	97	1,46	36	549	1207	13,8	22,0	55	
60	19	101	1,53	29	578	1266	11,1	21,1	60	
65	-	-	-	-	-	1318	8,9	20,3	65	
19	610	40	0,09	54	-	162	-	8,5	19	
25	350	66	0,15	54	54	335	26,4	13,4	25	
30	275	54	0,25	69	177	475	27,8	15,8	30	
35	181	63	0,40	72	248	613	26,5	17,5	35	
40	128	70	0,52	66	315	741	24,2	18,5	40	
45	68	74	0,71	48	363	892	20,3	19,0	45	
50	42	78	0,83	35	398	944	15,8	18,9	50	
55	28	80	1,04	29	427	1013	12,0	18,4	55	
60	-	-	-	-	-	1064	8,4	17,7	60	
23	230	34	0,05	14	-	162	-	7,0	23	
25	405	40	0,10	42	14	218	26,4	6,7	25	
30	305	46	0,16	49	56	342	24,8	11,4	30	
35	240	53	0,24	58	105	466	24,4	13,3	35	
40	168	59	0,34	57	220	586	22,3	14,7	40	
45	106	64	0,40	47	262	689	17,8	15,3	45	
50	60	68	0,62	37	289	764	13,8	15,3	50	
55	37	70	0,62	23	342	827	10,2	15,0	55	
60	-	-	-	-	-	866	6,6	14,4	60	

NORD-EST DU MASSIF CENTRAL

DOUGLAS (DECOURT-1966)

Age des arbres	PEUPLEMENT APRES ECLAIRCIE						Volume (m³)
	Hauteur moyenne (m)	Hauteur moyenne (m)	Nombre de tiges	Croissance moyenne (cm)	Volume moyen (m³)	Surface (ha)	
15	14,0	12,0	2100	60	0,08	26,7	162
20	17,9	15,8	1590	52	0,16	34,2	260
25	21,7	19,6	1170	55	0,31	39,3	359
30	25,3	23,1	860	78	0,50	41,6	434
35	28,5	26,3	640	92	0,79	43,1	504
40	31,4	29,1	514	105	1,09	45,1	562
45	34,1	31,6	440	116	1,41	47,1	622
50	36,3	33,6	366	126	1,71	48,8	662
55	36,0	35,1	350	133	1,98	49,3	693
60	39,5	36,3	326	139	2,21	50,1	719
65	40,6	37,3	307	145	2,41	51,4	740
19	15,0	12,0	2100	63	0,08	26,7	162
25	18,0	16,6	1490	55	0,19	35,9	281
30	22,4	19,9	1140	66	0,32	39,3	367
35	25,5	23,0	865	78	0,50	41,9	436
40	28,4	26,7	684	90	0,72	44,1	492
45	30,9	28,1	558	100	0,97	44,4	540
50	33,0	29,9	490	108	1,19	45,5	581
55	34,6	31,3	448	115	1,37	47,1	615
60	35,9	32,3	420	119	1,52	47,3	637
23	14,8	12,0	2100	65	0,08	26,7	162
25	16,3	13,6	1870	45	0,11	30,1	204
30	19,5	16,8	1465	55	0,19	35,3	286
35	22,6	19,7	1160	65	0,31	39,0	361
40	25,4	22,4	920	75	0,46	41,2	423
45	27,8	24,6	752	85	0,62	43,2	469
50	29,6	26,2	646	92	0,78	43,5	502
55	31,2	27,5	566	97	0,90	43,8	528
60	32,3	28,3	545	101	0,99	44,6	544

CL.1

CL.2

CL.3

Table de production du pin (DECOURT, 1984)

SOLOGNE

Age ans	ECLAIRCIES						Production totale (m³)	Accroissement courant (m³/ha)	Accroissement moyen (m³/ha)	Age ans
	Nombre de tiges	Circou- lérance moyenne (cm)	Volume moyen (m³)	Volume (m³)	Volume taux (m³)	% enlevé en éclaircie				
	-	-	-	(13)	(13)	13,0	(100)	-	(5,0)	20
	1916 (33)	0,02	(41)	(54)	28,6	189	19,6	7,6	25	
	545	0,11	58	112	38,5	291	20,1	9,7	30	
	225	0,25	55	167	42,8	390	19,0	11,1	35	
	145	0,35	51	216	45,3	481	17,0	12,0	40	
	88	0,51	45	263	47,0	560	16,2	12,4	45	
	52	0,61	42	305	47,4	643	15,7	12,9	50	
	36	0,84	33	338	47,1	717	13,3	13,0	55	
	19	0,86	20	358	46,4	771	9,6	12,8	60	
	14	0,89	1,14	374	45,8	816	8,5	12,5	65	
	-	-	-	(9)	9,7	(93)	-	(4,2)	22	
	1953 (25)	0,01	(21)	(30)	21,4	140	15,0	5,6	25	
	775	0,05	36	66	31,3	212	15,5	7,1	30	
	370	0,13	49	115	39,0	295	15,9	8,4	35	
	166	0,25	42	157	42,3	371	14,5	9,3	40	
	136	0,38	38	195	44,3	440	13,5	9,8	45	
	76	0,49	37	232	45,8	506	12,8	10,1	50	
	91	0,53	48	280	46,3	604	11,9	10,4	55	
	56	0,69	50	330	47,5	695	9,4	10,5	60	
	20	0,85	20	350	46,7	749	6,2	10,1	74	
	15	0,88	1,13	367	46,2	794	4,4	9,7	82	
	-	-	-	(12)	12,2	(98)	-	(3,9)	25	
	1727 (27)	0,02	(23)	(35)	23,0	152	10,8	5,1	30	
	547	0,05	28	63	30,5	206	11,8	5,9	35	
	298	0,12	37	100	37,0	270	12,2	6,8	40	
	308	0,21	65	165	42,7	386	11,2	7,7	50	
	170	0,35	60	225	45,5	494	10,2	8,2	60	
	92	0,56	52	277	47,0	569	8,9	8,4	70	
	52	0,83	43	320	47,6	672	5,0	8,4	80	

PIN SYLVESTRE (DECOURT-1965)

PEUPLIEMENT APRES ECLAIRCIE

Age ans	Hauteur dominée (m)	Hauteur moyenne (m)	Nombre de tiges	Circou- lérance moyenne (cm)	Circou- lérance dominée (cm)	Volume moyen (m³)	Surface terre (m²)	Volume (m³)	CL
20	(10,5)	(8,8)	(3336)	(32)	(0,03)	(27,2)	(87)		
25	14,0	12,4	1420	47	0,09	25,0	136		
30	17,0	15,5	875	62	0,20	26,8	179		
35	18,6	16,1	650	75	0,34	29,1	223		
40	21,8	20,4	505	87	0,52	30,4	263		
45	23,7	22,3	417	98	0,71	31,9	297		
50	25,3	24,0	365	108	0,93	33,9	338		
55	26,9	25,6	329	117	1,15	35,8	379		
60	28,1	26,8	310	122	1,33	36,7	413		
65	29,0	27,8	296	126	1,46	37,4	442		
22	(10,2)	(8,5)	(3958)	(30)	(0,02)	(25,4)	(84)		
25	12,1	10,5	2005	38	0,05	23,0	110		
30	14,8	13,2	1230	50	0,12	24,5	146		
35	17,1	15,6	860	62	0,21	26,3	180		
40	19,1	17,6	692	72	0,31	28,5	214		
45	20,8	19,4	556	81	0,44	29,0	245		
50	22,4	21,0	480	90	0,57	30,9	274		
55	24,5	23,2	389	103	0,83	32,8	324		
60	26,4	25,1	333	114	1,11	34,4	365		
65	27,6	26,3	313	119	1,28	35,3	389		
70	28,5	27,3	298	124	1,43	36,5	427		
25	(10,4)	(8,7)	(3542)	(32)	(0,02)	(26,9)	(86)		
30	12,6	11,0	1615	40	(0,06)	23,1	117		
35	14,6	13,0	1268	49	0,11	24,2	143		
40	16,4	14,9	970	59	0,17	26,9	170		
45	18,5	18,0	662	74	0,33	28,6	221		
50	22,1	20,7	492	88	0,55	30,3	269		
55	24,2	22,9	400	101	0,78	32,5	312		
60	25,9	24,6	348	112	1,01	34,7	352		

Annexe 8

Synthèse des paramètres des principaux types de futaie présents sur nos terrains d'étude

Essence principale	Hêtre
Masse volumique	0,71
Facteur d'expansion de biomasse	1,64
Age d'exploitabilité théorique	100 ans
Premières éclaircies	45 ans
Accroissement moyen à l'âge d'exploitabilité	7 m ³ /ha/an 5 t/ha/an

Essence principale	Chêne
Masse volumique	0,69
Facteur d'expansion de biomasse	1,49
Age d'exploitabilité théorique	135 ans
Premières éclaircies	30 ans
Accroissement moyen à l'âge d'exploitabilité	5,6 m ³ /ha/an 3,9 t/ha/an

Essence principale	Douglas
Masse volumique	0,53
Facteur d'expansion de biomasse	1,15
Age d'exploitabilité théorique	50 ans
Premières éclaircies	25 ans
Accroissement moyen à l'âge d'exploitabilité	15,3 m ³ /ha/an 8,1 t/ha/an

Essence principale	Sapin / Épicéa
Masse volumique	0,46
Facteur d'expansion de biomasse	1,25
Age d'exploitabilité théorique	100 ans
Premières éclaircies	Avant 50 ans
Accroissement moyen à l'âge d'exploitabilité	env.11 m ³ /ha/an env. 5 t/ha/an

Essence principale	Pin
Masse volumique	0,53
Facteur d'expansion de biomasse	1,33
Age d'exploitabilité théorique	80 ans
Premières éclaircies	25 ans
Accroissement moyen à l'âge d'exploitabilité	9,7 m ³ /ha/an 5,1 t/ha/an

Table des tableaux

Tableau 1 : les taux de boisements par départements	35
Tableau 2 : synthèse des dispositifs en faveur du bois-énergie	61
Tableau 3 : Principales phases de développement de la filière bois-énergie	63
Tableau 4 : structure globale de la consommation de bois-énergie en Franche-Comté	65
Tableau 5 : chaufferies mises en place par les bailleurs sociaux, associations, et établissements de santé	73
Tableau 6 : décomposition du coût de la plaquette forestière	84
Tableau 7 : synthèse des méthodes issues de la foresterie	150
Tableau 8 : mesures du NDVI et types de végétation	169
Tableau 9 : caractéristiques des capteurs Landsat 7 TM	171
Tableau 10 : caractéristiques des chaufferies existantes dans le Pays Loue-Lison	213
Tableau 11 : caractéristiques des chaufferies de la CAGB	216
Tableau 12 : principales caractéristiques des approvisionnements de Planoise et de Fertans	227
Tableau 13 : gradient de distance et flux de plaquettes forestières à destination du site de Planoise	234
Tableau 14 : gradient de distance et flux de plaquettes forestières à destination du site de Fertans	234
Tableau 15 : valeurs de biomasse fournies par Chrono-Environnement	272
Tableau 16 : Quelques facteurs d'expansion de biomasse.	276
Tableau 17 : valeurs de biomasse des essences feuillues	286
Tableau 18 : synthèse des valeurs de biomasse de différentes essences résineuses	291
Tableau 19 : âge d'exploitabilité de différentes essences feuillues et résineuses	306
Tableau 20 : extrait de table d'accroissement/éclaircie (hêtre)	307
Tableau 21 : paramètres d'exploitation pour les futaies	317
Tableau 22 : biomasse énérgisable annuellement pour le Pays Loue Lison et la CAGB selon différents types de peuplement (en tonnes de matière sèche), première étape quinquennale	319
Tableau 23 : rayons et superficie des bassins d'approvisionnement en fonction des contraintes d'exploitation	338

Table des figures

Figure 1 : synopsis de la thèse	11
Figure 2 : bois-bûche	19
Figure 3 : plaquettes forestières	19
Figure 4 : processus de production de la plaquette forestière	20
Figure 5 : granulés de bois	22
Figure 6 : les différentes catégories de combustibles bois	23
Figure 7 : les parties de l'arbre	25
Figure 8 : taillis à très courte rotation	31
Figure 9: les taux de boisement des régions françaises	33
Figure 10 : les massifs forestiers comtois	34
Figure 11 : forêts privées versus forêts publiques	35
Figure 12 : clairière au sein d'un bois	37
Figure 13 : image satellitale des environs d'Ornans	37
Figure 14 : exemple de formation de taillis	39
Figure 15 : arbres abattus à finalité de bois d'œuvre en futaie	40
Figure 16 : les types forestiers en Franche-Comté	42
Figure 17 : éléments constitutifs d'une chaufferie bois	44
Figure 18 : typologie des maîtrises d'ouvrages et secteurs types	46
Figure 19 : l'énergie au sein de la filière bois	47
Figure 20 : répartition nationale des projets retenus par la Commission de Régulation de l'Énergie suite à son deuxième appel d'offres	58
Figure 21 : rayons d'approvisionnement des différents projets en cours de réalisation en Franche-Comté, Bourgogne et Lorraine	59
Figure 22 : évolution du nombre de chaufferies en Franche-Comté	65
Figure 23 : évolution du nombre de chaufferies dans l'industrie du bois	66
Figure 24 : évolution de la consommation dendroénergétique en Franche-Comté	67
Figure 25 : puissance cumulée par classes de 1 MW	68
Figure 26 : structure globale des installations de consommation dans le secteur collectif / tertiaire. Découpage 1 MW	69
Figure 27 : structure des installations de consommation dans le secteur collectif / tertiaire, inférieures à 1 MW. Découpage 100 kW	69
Figure 28 : structure des installations de consommation dans le secteur collectif / tertiaire, inférieures à 1 MW. Découpage 10 kW	69
Figure 29 : structure de la consommation dans le secteur industriel	70
Figure 30 : cartographie des chaufferies franc-comtoises selon le type de maîtrise d'ouvrage	71
Figure 31 : répartition du nombre de chaufferies du secteur collectif/tertiaire selon la maîtrise d'ouvrage en Franche-Comté	72
Figure 32 : répartition des chaufferies par type de collectivités	73
Figure 33 : Gisements ligno-cellulosiques théoriques	79
Figure 34 : approvisionnement et mobilisation des dendrocombustibles	82
Figure 35 : coûts des différents combustibles	84
Figure 36 : les enjeux de la filière plaquettes forestières	90
Figure 37 : Acteurs et sous-processus des approvisionnements en plaquettes forestières	91
Figure 38 : Les étapes du montage d'un projet	93
Figure 39 : principaux flux de plaquettes forestières en Franche-Comté	99

Figure 40 : schémas type d'approvisionnement en plaquettes forestières	101
Figure 41 : deux visions différentes de la structuration de la filière dendroénergétique	104
Figure 42 : dendroénergie et territoire	107
Figure 43 : méthodologie globale	116
Figure 44 : Méthodologie de détermination des potentiels de plaquettes forestières	119
Figure 45 : les conditions de réalisation d'une interaction spatiale	123
Figure 46 : le mouvement comme interaction spatiale	125
Figure 47 : exemple de matrice d'interactions spatiales	128
Figure 48 : Forme générale des aires de marché (un et deux centres)	137
Figure 49 : méthodologie générale d'estimation des volumes ligneux exploitables à des fins énergétiques	140
Figure 50 : méthode des simulations par classe d'âge.	145
Figure 51 : méthode d'évaluation du gisement en bois-énergie (ADEME-IFN-SOLAGRO)	146
Figure 52 : méthode d'évaluation de la disponibilité technico-économique (ADEME-IFN-SOLAGRO)	148
Figure 53 : les potentialités des PAT	150
Figure 54 : exemples de traitements et de cartographie issus du PAT	152
Figure 55 : Méthodologie générale de l'inventaire forestier	158
Figure 56 : Trois des quatre phases de l'inventaire forestier	160
Figure 57 : les types forestiers départementaux de l'IFN, pour le Doubs	162
Figure 58 : compartimentation de l'arbre et volume IFN	164
Figure 59: densité surfacique des haies et alignements par maille de 100 km ²	165
Figure 60 : Propriété de réflectance des végétaux et des sols	166
Figure 61 : NDVI et activité chlorophyllienne	168
Figure 62 : méthodologie d'estimation et de cartographie des volumes ligneux	175
Figure 63 : accessibilité et exploitabilité	179
Figure 64 : classes d'exploitabilité IFN	180
Figure 65 : incidence des pentes sur les méthodes de bûcheronnage	183
Figure 66 : méthodologie d'estimation de la fraction énergisable de la biomasse ligneuse	188
Figure 67 : principe du modèle de production / prélèvement	192
Figure 68 : synopsis de la partie 3	202
Figure 69 : le cadre des terrains d'étude	204
Figure 70 : la population communale de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon et du Pays Loue-Lison	206
Figure 71 : zonage en aires urbaines de l'espace rural (ZAUER) des terrains d'étude	207
Figure 72 : couvert boisé et principaux massifs forestiers	208
Figure 73 : la forêt du Pays Loue-Lison	208
Figure 74 : vue sur le couvert boisé de la CAGB, depuis la colline de Rosemont	209
Figure 75 : chantier de production de plaquettes forestières dans la forêt de Chailluz	209
Figure 76 : les types forestiers départementaux de l'IFN (département du Doubs)	210
Figure 77 : structure de la consommation dendroénergétique du Pays loue-Lison	211
Figure 78 : chaufferies en projets dans le Pays Loue-Lison	213
Figure 79 : chaufferie bois de Besançon Planoise	214
Figure 80 : les chaufferies existantes ou en cours de réalisation dans la CAGB	215
Figure 81 : les chaufferies en projet dans la CAGB	217
Figure 82 : distances réseaux et distances euclidiennes	221
Figure 83 : flux de plaquettes forestières à destination de la plateforme de Fertans	225
Figure 84 : flux de plaquettes forestières à destination de la chaufferie de Planoise	226

Figure 85 : forme globale des aires d'approvisionnement de Planoise et des chaufferies alimentées par la plateforme de Fertans	228
Figure 86 : rôle des forêts de Chailluz et de Chaux dans les approvisionnements des chaufferies bisontines	229
Figure 87 : flux et gradients d'éloignement	230
Figure 88 : couvert boisé et taux de boisement	232
Figure 89 : démarche globale et test de l'analogie gravitaire	237
Figure 90 : attractivité des chaufferies de Planoise et de Fertans calculée selon le modèle de Huff	239
Figure 91 : taille des polygones et continuum forestier	241
Figure 92 : application du modèle d'interaction spatiale à la chaufferie de Planoise	246
Figure 93 : cartographie des résidus entre les flux réels et les flux modélisés	248
Figure 94 : Méthode d'estimation et de cartographie de la biomasse ligneuse	254
Figure 95 : données et méthodes pour la cartographie du couvert boisé	257
Figure 96 : image Landsat TM avec et sans normalisation topographique	259
Figure 97 : premier résultat de cartographie du couvert forestier	262
Figure 98 : méthodologie de cartographie du couvert forestier	263
Figure 99 : Données mobilisées pour lever les confusions de la cartographie du couvert forestier par classification	264
Figure 100 : cartographie forestière versus cartographie du couvert boisé	266
Figure 101 : cartographie du couvert boisé dans le Pays Loue Lison et la CAGB	267
Figure 102 : cartographie du NDVI	269
Figure 103 : indice de végétation et couvert boisé	270
Figure 104 : répartition des points d'inventaire renseignés par l'IFN	273
Figure 105 : détermination de la volumétrie ligneuse pour chaque placette inventoriée par l'IFN	277
Figure 106 : histogramme de distribution de la volumétrie ligneuse des placettes inventoriées par l'IFN	278
Figure 107 : corrélation volumétrie ligneuse /NDVI des essences feuillues	280
Figure 108 : corrélation volumétrie ligneuse /NDVI des essences résineuses	280
Figure 109 : corrélation volumétrie ligneuse /NDVI des peuplements mixtes	281
Figure 110 : valeurs de NDVI et types de peuplements forestiers	282
Figure 111 : représentation schématique de la relation entre NDVI et biomasse	285
Figure 112 : histogramme de distribution des valeurs de biomasse (futaies de feuillus) après régression statistique sur les valeurs modales de NDVI	287
Figure 113 : valeurs de biomasse et exposition	288
Figure 114 : biomasse aérienne des peuplements feuillus et résineux adultes	293
Figure 115 : cartographie de la biomasse aérienne	294
Figure 116 : démarche globale du modèle de production/prélèvement pour une zone d'observation	299
Figure 117 : accroissement ligneux selon l'âge des peuplements (hêtre)	303
Figure 118 : accroissement ligneux selon l'âge des peuplements (sapin)	303
Figure 119 : exemple de table de production (hêtre). Extrait de N. Decourt (1984)	304
Figure 120 : compartimentation de l'arbre, et part ligneuse énergisable (proportions de biomasse aérienne)	309
Figure 121 : cycle du taillis	310
Figure 122 : accroissement courant et biomasse selon l'âge du peuplement	311
Figure 123 : entrée de l'application de calcul	314
Figure 124 : Interpolation des âges des peuplements à partir des valeurs de biomasse connues	315

Figure 125 : désagrégation des effectifs par année	316
Figure 126 : accroissement du stock de biomasse et prélèvements possibles	318
Figure 127 : biomasse énergisable annuellement sur le long terme dans la CAGB	320
Figure 128 : biomasse énergisable annuellement sur le long terme dans le Pays Loue Lison	321
Figure 129 : biomasse énergisable annuellement sur le long terme dans la CAGB par type de peuplement	321
Figure 130 : biomasse énergisable annuellement sur le long terme dans le Pays Loue Lison par type de peuplement	322
Figure 131 : contribution des types de peuplements à la production de biomasse énergisable dans la CAGB	323
Figure 132 : contribution des différents types de peuplement à la production de biomasse énergisable dans le Pays Loue-Lison	323
Figure 133: démarche globale du modèle de définition des bassins d'approvisionnement locaux	329
Figure 134 : classes d'exploitabilité simplifiée	331
Figure 135 : itérations par pas de distance	331
Figure 136 : bassins d'approvisionnement à court terme et bassin exploité dans la durée. Exemple d'Amancey.	334
Figure 137 : bassin d'approvisionnement et types de peuplement exploités.	335
Figure 138: bassin d'approvisionnement et types de peuplement exploités.	336
Figure 139 : comparaison des emprises spatiales des bassins d'approvisionnement finaux considérant ou non les contraintes d'exploitabilité liées à la pente et au réseau viaire	337
Figure 140 : taux de superposition des bassins d'approvisionnement de la CAGB	340
Figure 141: emprises spatiales des bassins d'approvisionnement des chaufferies de la CAGB (chaufferies en fonctionnement en 2010)	341
Figure 142 : emprises spatiales des bassins d'approvisionnement des chaufferies du Pays Loue Lison (chaufferies en fonctionnement en 2010)	342
Figure 143 : taux de superposition des bassins d'approvisionnement du Pays Loue Lison	343

Table des matières

Introduction générale	7
PARTIE 1 Enjeux et problématiques liés à la valorisation énergétique de la biomasse ligneuse et aux approvisionnements en plaquettes forestières	13
Introduction de la partie 1	15
Chapitre 1. A propos de la dendroénergie	17
1. Dendroénergies et dendrocombustibles	18
1.1. Les différents types de combustibles bois	18
1.1.1 Les combustibles issus des gisements naturels : bois-bûche et plaquettes forestières	18
1.1.2. Les combustibles issus des gisements industriels	21
1.1.3. Les bois non traités valorisés par voie de densification : briquettes et granulés	21
1.1.4. Le charbon de bois	22
1.2. Les techniques de production et les valorisations énergétiques possibles	24
1.2.1. La production d'énergie thermique	24
1.2.2. La cogénération	24
1.2.3. Les « ligno-carburants »	25
2. Le gisement ligneux et les espaces producteurs : le bois-énergie côté offre	25
2.1. Arbres et matière ligneuse	25
2.2. Les espaces boisés forestiers : caractéristiques morphologiques et dendrométriques	27
2.3. Les arbres hors forêt et les espaces agroforestiers	28
2.3.1. Des espaces hétérogènes et fortement différenciés	28
2.3.2. Les espaces agroforestiers et taillis à courte révolution	30
2.3.3. Les pré-bois, ou pâturages boisés	32
2.4. Le gisement ligneux franc-comtois	33
2.4.1. Un taux de boisement important, une majorité de forêts publiques	33
2.4.2. Caractéristiques et répartition spatiale des peuplements	36
2.4.3. Une forêt en extension et sous-exploitée : un important potentiel bois-énergie	43
3. Le bois-énergie côté demande	44
3.1. Éléments constitutifs d'une chaufferie bois	44
3.2. Secteurs types	45
Chapitre 2. Une filière en pleine mutation, une augmentation de la demande sans précédent	49
1. Les moyens mis en place en faveur du développement de la filière bois-énergie	50
1.1. L'énergie dans la politique forestière	50
1.1.1. Les grandes lignes de la politique forestière nationale	50
1.1.2. La prise en compte de la problématique énergétique	51

1.1.3. Les politiques et moyens mis en œuvre à l'échelon régional et infra-régional	52
1.2. Les dispositifs de soutien à la production de bois-énergie	53
1.2.1. Les actions mises en place au niveau national	54
1.2.2. Les politiques, actions et dispositifs au niveau local et régional	62
2. Le bois-énergie en Franche-Comté : une augmentation exponentielle de la demande pour les secteurs industriels et collectif/tertiaire	64
2.1. Une augmentation exponentielle de la demande depuis 1996	65
2.2. Une majorité de petites installations	68
2.3. Des chaufferies collectives plus nombreuses mais des chaufferies industrielles plus puissantes	68
2.4. Les collectivités et le secteur petit collectif locatif, des acteurs prépondérants du secteur collectif/tertiaire	72
2.5. Un secteur industriel très largement dominé par les industries du bois	72

Chapitre 3. Les approvisionnements en plaquettes forestières : un enjeu majeur, une problématique géographique	77
1. Les enjeux inhérents à l'utilisation des plaquettes forestières	78
1.1. La plaquette forestière, un combustible amené à se développer	78
1.1.1. Une forte augmentation de la demande dans les décennies à venir	78
1.1.2. Un débouché pour la forêt et les espaces boisés...	81
1.3.1. ... mais des coûts importants	82
1.2. Un enjeu de développement local	85
1.2.1. Le local : un terme difficile à définir	85
1.2.2. Développement local et proximité des approvisionnements	86
1.2.3. Enjeux économiques et environnementaux liés à la minimisation des distances de transport	87
2. La structuration actuelle des approvisionnements : fonctionnement et limites	90
2.1. Les étapes de l'approvisionnement	90
1.2.1. En amont : exploitation et production	92
1.2.2. En aval : le stockage, distribution, le transport	93
2.2. L'approvisionnement dans les documents constitutifs d'un projet de chaufferie bois	94
2.2.1. Les étapes d'un projet de chaufferie bois	94
2.2.2. Les approvisionnements dans l'analyse d'opportunité et l'étude de faisabilité	95
2.2.3. Le contrat d'approvisionnement : le document, ses objectifs, ses garanties	97
2.3. L'organisation actuelle des approvisionnements	98
2.3.1. Des logiques d'approvisionnement économiques et peu géographiques pour les chaufferies de forte puissance	98
2.3.2. Les sociétés d'approvisionnement et fournisseurs de plaquettes forestières	100
2.3.3. Deux logiques d'approvisionnements qui s'entrecroisent...	102
2.3.4. Une structuration de la filière par la demande	104
3. Une problématique géographique	105
3.1. La structuration des approvisionnements... un enjeu éminemment spatial	105
3.2. Des processus complexes et fortement spatialisés	109

3.2.1. Une logique de flux	109
3.2.2. Des interactions spatiales entre lieux de production et sites de consommation	110
Conclusion de la partie 1	111
PARTIE 2 Éléments de méthode pour la modélisation des approvisionnements et la quantification des potentiels ligneux énergisables	113
Chapitre 4. Des données de traçabilité aux bassins d'approvisionnement : l'apport des modèles d'interactions spatiales	121
1. Interactions spatiales et approvisionnements	122
1.1 La problématique de l'interaction spatiale	122
1.1.1. Une problématique centrale en géographie	122
1.1.2. A la base : un différentiel né de l'hétérogénéité de l'espace géographique	123
1.1.3. Émissivité (des espaces boisés) et attractivité (des chaufferies)	124
1.2. La modélisation des interactions spatiales	124
2. Des données de traçabilité à la modélisation des bassins d'approvisionnement	127
2.1. Description d'une matrice de flux et résultats dérivés de son analyse	127
2.2. Les données constitutives de la matrice de flux de plaquettes forestières	128
3. L'analogie gravitaire : une méthode pertinente pour la modélisation des flux de plaquettes forestières et la délimitation de bassins d'approvisionnement ?	130
3.1. Forces et limites de l'analogie gravitaire	131
3.1.1. Un modèle pour l'explication et la prévision des flux largement utilisé en géographie et en aménagement	131
3.1.2. Théorie de la relativité géographique et limites du modèle gravitaire	132
3.2. Principes et formulation mathématique de base	134
3.3. Modèle gravitaire, aires d'influence et bassins d'approvisionnement	136
Chapitre 5. Quantifier la fraction énergisable des ressources ligneuses	139
1. Les différentes méthodes d'estimation de biomasse forestière	141
1.1. Les modèles issus de la foresterie	141
1.1.1. Typologie des études existantes au niveau national	141
1.1.2. Quelques exemples	143
1.1.3. Une indispensable dimension spatiale et des résultats à l'échelle locale avec les Plans d'Approvisionnements Territoriaux (PAT)	150
1.2. Apports de l'information géographique pour la modélisation de la biomasse	153
1.2.1. Apports et limites de la télédétection en foresterie	154
1.2.2. Le LIDAR, une technologie prometteuse	155
2. Caractériser les espaces producteurs : les arbres et la forêt	156
2.1. Des données d'inventaire pour caractériser la ressource forestière...	156
2.1.1. Les méthodes d'inventaire (échantillonnage ponctuel et levés de terrains)	157
2.1.2. Les données fournies par l'IFN	160

2.1.3. Les limites d'utilisation	163
2.2.... Mais très peu de données sur les espaces boisés non forestiers et les prébois	165
2.3. Les indices de végétation, un indicateur pertinent pour la caractérisation et la quantification de la biomasse... et des volumes ligneux ?	166
2.3.1. De la réflectance du couvert végétal...	166
2.3.2. ... à la production d'indices de végétation	167
2.3.3. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	168
2.3.4. L'indice de surface foliaire (leaf area index)	169
2.3.5. Matériel	170
3. Déterminer la fraction énergisable de la ressource ligneuse	171
3.1. Méthodes d'estimation de la biomasse ligneuse (en forêt et hors forêt)	172
3.1.1. Principe de la démarche	172
3.1.2. L'utilisation des données satellitaires et leur couplage aux données d'inventaire	173
3.2. Déterminer la fraction énergisable des ressources ligneuses	175
3.2.1. Estimer les besoins concurrentiels	176
3.2.2. Exploitabilité et contraintes technico-socio-économiques	178
3.2.3. Contraintes environnementales : assurer la durabilité des prélèvements en préservant la ressource en arbres et forêts	183
Chapitre 6. Modélisation de bassins d'approvisionnement locaux durables	189
1. Calcul de la biomasse énergisable durable sur un espace défini	189
2. Modélisation de bassins d'approvisionnement locaux : principes et démarche	192
2.1. Zone de prospection et rayon d'approvisionnement : la méthode d'ONF Énergie	193
2.1.1. Principe de la démarche	193
2.1.2. Formalisation	193
2.2. Modélisation de bassins d'approvisionnement locaux	194
2.2.1. Objectifs	194
2.2.2. Démarche	195
Conclusion de la partie 2	197
Partie 3 Application à deux terrains d'étude. Résultats et discussion	199
Introduction de la partie 3	201
Chapitre 7 Deux territoires aux caractéristiques dendroénergétiques différentes	203
1. Cadre général	203
2. D'importantes ressources ligneuses	207
3. Les chaufferies bois : petites structures dans le Pays Loue-Lison et polarisation bisontine dans la CAGB	211
3.1. Un réseau de chaufferies de taille modeste dans le Pays Loue-Lison	211
3.2. Des projets eux aussi de faible envergure	213
3.3. Une structure de consommation fortement polarisée par Besançon dans la CAGB	214
3.4. De vastes projets de chaufferies pour la capitale franc-comtoise	216

Chapitre 8 Analyse des données de traçabilité et test d'un modèle d'interaction spatiale simple	219
1. Traitements préalables des données	220
1.1. Géoréférencement des lieux d'origine et de destination	220
1.2. Quelle distance pour quel réseau de transport ?	221
1.2.1. Distances euclidiennes versus distance réseau	221
1.2.2. Les spécificités du transport du bois	222
2. Distribution spatiale et statistique des flux en fonction de la puissance des chaufferies	223
2.1. Un jeu de données incomplet, ne reflétant qu'imparfaitement la réalité	223
2.2. Intensité et portée des interactions en fonction de la puissance de la chaufferie	224
2.2.1. Représentation cartographique des flux de plaquettes forestières	224
2.3.2. Des bassins d'approvisionnement fonction de la puissance des chaufferies ?	228
2.2.3. Un rôle structurant des grands massifs forestiers ?	229
2.3. Importance des flux, gradients de distance et structure forestière	230
2.3.1. Flux et gradients d'éloignement	230
2.3.2. Structure forestière et approvisionnements	231
3. Test du modèle gravitaire. Des interactions fonction de la masse et de la distance ?	235
3.1. Démarche globale	236
3.2. Test d'un modèle d'interaction concurrentiel spatiale simple (Huff)	237
3.3. Formalisation du modèle et vérification des hypothèses	239
3.3.1. Construction du modèle	240
3.3.2. Forme du modèle et méthodes statistiques utilisées	242
3.3.3. Résultats et discussion	243
Chapitre 9 Évaluation de la ressource ligneuse et du potentiel dendroénergétique	253
1. Démarche générale pour l'estimation et la cartographie de la biomasse ligneuse aérienne	253
2. Les traitements de l'imagerie satellitaire et leurs résultats	256
2.1. La cartographie du couvert boisé	256
2.1.1. Choix de l'image et prétraitement	257
2.1.2. Première cartographie de la couverture du sol par classification non supervisée	259
2.1.3. Traitements complémentaires et résultats	263
2.2. L'indice de végétation normalisé : cartographie et intervalles de valeurs	268
3. Caractérisation de la ressource ligneuse via les données d'inventaires et levés dendrométriques du laboratoire de Chrono-Environnement	271
3.1. Les données du laboratoire Chrono-Environnement	271
3.1.1. Localisation des zones inventoriées	271
3.1.2. Valeurs de biomasse selon les caractéristiques forestières	271
3.2. Les données de l'Inventaire Forestier National	272
3.2.1. Répartition des points d'inventaire et caractéristiques dendrométriques	272
3.2.2. Améliorer la précision des données avec des équations allométriques et des facteurs d'expansion de biomasse	273
3.2.3. Estimer la volumétrie ligneuse moyenne pour chaque placette	277

4. Corrélation entre caractéristiques dendrométriques et indices de végétation	278
4.1. Des corrélations peu significatives avec les données ponctuelles de l'IFN et de Chrono-Environnement	279
4.1.1. Les relations NDVI / volumétrie ligneuse par type d'essence	279
4.1.2. Les raisons de l'absence de corrélation statistique	281
4.1.3. Signature radiométrique et valeurs de NDVI des types de peuplements issus de la cartographie forestière	282
5. Calibrage du modèle et cartographie de la biomasse ligneuse	283
5.1. Méthodologie	283
5.2. Le calibrage des différents modèles de biomasse	284
5.2.1. Modéliser la biomasse aérienne des feuillus	285
5.2.2. Modéliser la biomasse aérienne des résineux adultes	290
5.2.3. La biomasse aérienne des peuplements mixtes	291
5.2.4. Le modèle "biomasse jeunes résineux"	292
5.3. Cartographie de la biomasse ligneuse aérienne	292
Chapitre 10 Détermination de la quantité énergisable sur la biomasse ligneuse	297
1. Objectif et démarche globale : évaluation des prélèvements durables de biomasse ligneuse aérienne, sur un secteur donné et par type de peuplement	298
2. Masse énergisable durablement prélevée en futaie	301
2.1. Accroissement du stock ligneux par production biologique, les rythmes d'éclaircies et l'âge d'exploitabilité	302
2.1.1. Des rythmes d'accroissement différents selon les essences	302
2.1.2. Coupes et accroissement	305
2.1.3. Âge d'exploitabilité	305
2.2. Des prélèvements par éclaircie et par exploitation	306
2.2.1. Accroissement et prélèvements en éclaircie	307
2.2.2. Prélèvements en exploitation	308
2.3. Déterminer la fraction énergisable sur les prélèvements en futaie	308
3. Les formations de taillis : des coupes rases, une forte proportion de biomasse énergisable	310
4. Les arbres hors forêt : un potentiel énergisable intéressant, mais de fortes incertitudes	312
4.1. Incertitudes sur la biomasse	312
4.2. Une morphologie particulière	312
5. Mise en œuvre par une application ad hoc	313
6. Résultats pour le Pays Loue-Lison et la CAGB	318
6.1. La biomasse énergisable à court terme	318
6.2. Mobilisation des ressources ligneuses sur le long terme, et par type de peuplement	320
6.3. L'adéquation offre/demande	323
6.4. Intérêts et limites du modèle de production/prélèvement	325
Chapitre 11 Évaluation de la demande et modélisation exploratoire d'aires d'approvisionnement	327
1. Les hypothèses de base et les conditions à satisfaire	328
2. La démarche	328
3. La définition des bassins d'approvisionnement : une double itération spatiale et temporelle	331

4. Application du modèle : résultats et discussion	332
4.1. Les bassins d'approvisionnement à court terme et finaux	333
4.2. Contribution des différents types de peuplement	335
4.3. Des contraintes d'accessibilité n'influençant que modérément les distances d'approvisionnement	336
4.4. Emprises et concurrence des bassins d'approvisionnement finaux	339
Conclusion générale	351
Bibliographie	357
Annexes	373
Table des tableaux	399
Table des figures	400
Table des matières	405