



**HAL**  
open science

## **Rapport final du projet SATAN : Synergie entre ATténuation et AdaptatioN : Approche à l'échelle du territoire.**

Patrick Vallet, Lucie Arnaudet, Jordan Bello, A. Dufour, M. Fortin, C.  
Pelletier, C. Proutière, H. Rakotoarison

### ► To cite this version:

Patrick Vallet, Lucie Arnaudet, Jordan Bello, A. Dufour, M. Fortin, et al.. Rapport final du projet SATAN : Synergie entre ATténuation et AdaptatioN : Approche à l'échelle du territoire.. [Rapport de recherche] irstea. 2019, pp.50. hal-02609670

**HAL Id: hal-02609670**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02609670v1>**

Submitted on 16 May 2020

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

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



Mai  
2019

---

# PROJET SATAN

---

Synergie  
entre ATténuation  
et AdaptatiON :  
Approche à l'échelle du territoire

---

**Rapport Final**

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



## CITATION DE CE RAPPORT

Vallet Patrick, Arnaudet Lucie, Bello Jordan, Dufour Anthony, Fortin Mathieu, Pelletier Chloé, Proutière Constance, Rakotoarison Hanitra, Trouvé Charles, 2019. Projet SATAN : Synergie entre ATténuation et AdaptatiON : Approche à l'échelle du territoire, rapport final de la convention n°1660C0008, 44p+Annexes.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

### ***Ce document est diffusé par l'ADEME***

20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

***Numéro de contrat : 1660C0008***

***Étude réalisée par Patrick Vallet, Lucie Arnaudet, Jordan Bello, Anthony Dufour, Mathieu Fortin, Chloé Pelletier, Constance Proutière, Hanitra Rakotoarison, Charles Trouvé***

***Projet de recherche coordonné par : Patrick Vallet***  
***Appel à projet de recherche : REACTIF 2015***

***Coordination technique - ADEME : BUITRAGO Miriam***  
***Direction/Service : Forêt, Alimentation et Bioéconomie***

## TABLE DES MATIERES

Introduction.....	4
1. Acquisition de connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers .....	5
Objectifs .....	5
1.1. Analyses de la croissance secondaire.....	5
1.2. Complémentarité de l'acquisition en eau par les racines .....	9
1.3. Influence du mélange sur le flux de sève des individus .....	11
1.4. Conclusion sur les stratégies d'adaptation .....	14
2. Modèle de croissance climat-dépendant .....	15
2.1. Modèles à partir des données IFN .....	15
2.2. Modèles locaux climat-dépendants .....	15
2.3. Méthode de couplage .....	17
2.4. Projection en fonction des scénarios climatiques.....	18
2.5. Simulateur sous Capsis.....	18
3. Scénarios sylvicoles et climatiques .....	19
3.1. Scénarios sylvicoles .....	19
3.1.1. Scénarios de base .....	19
3.1.2. Scénarios alternatifs d'adaptation .....	21
3.2. Scénarios d'usage du bois .....	21
3.2.1. Scénarios de base .....	21
3.2.2. Scénarios alternatifs d'atténuation .....	24
4. Simulations à l'échelle du territoire .....	25
4.1. Description générale de la démarche.....	25
4.2. Initialisation du territoire .....	27
4.3. Modélisation de la filière et de la matière organique morte dans CAT .....	32
4.4. Analyse environnementale des filières bois-énergie .....	34
4.5. Résultat des simulations avec le couplage Simmem-CAT .....	39
4.6. Bilan de la filière intégrée .....	42
4.7. Limites des simulations.....	42
5. Conclusions .....	44
6. Bilan sur l'organisation du projet .....	45
7. Production scientifique .....	46
Références bibliographiques .....	47
Liste des annexes.....	48

## Introduction

D'un côté, les forêts subissent les effets du changement climatique, en particulier l'augmentation des épisodes extrêmes comme les sécheresses. D'un autre côté, elles participent à le limiter, via le stockage de carbone et la substitution d'énergies fossiles et de matériaux plus énergivores. La gestion forestière doit s'adapter pour que les forêts répondent au mieux aux multiples exigences actuelles et futures, parfois contradictoires. La sylviculture doit permettre l'adaptation des forêts au climat à venir, tout en participant activement à l'atténuation du changement climatique.

L'objectif général du projet SATAN est d'évaluer les synergies et antagonismes entre les stratégies d'adaptation des forêts sur les stratégies d'atténuation à l'échelle d'un grand territoire forestier, la Forêt d'Orléans.

Pour atteindre cet objectif, le projet est divisé en quatre tâches (figure ci-dessous). La première est une tâche d'acquisition de connaissances sur l'adaptation des forêts au changement climatique. Dans cette tâche, nous étudions notamment l'influence de la densité et de la composition du peuplement sur le lien entre la consommation en eau et la croissance arbres. La deuxième tâche utilise ces connaissances, et remobilise des données acquises pour élaborer un modèle de croissance simple et robuste, prenant en compte l'influence du climat. Ce modèle doit être adapté aux conditions du site d'étude. Parallèlement, la troisième tâche définit les scénarios climatiques et sylvicoles adaptés à la région. Dans cette tâche figure également une analyse de la filière locale servant à bien identifier les usages des bois produits dans la région. Enfin, la quatrième tâche utilisera les résultats des tâches 2 et 3 pour réaliser des simulations de synergie entre adaptation et atténuation. Le modèle de la tâche 2 sera utilisé sur l'ensemble du territoire concerné, en appliquant les règles sylvicoles établies en tâche 3. Le bilan de GES des actions sylvicoles est réalisé grâce à la description de la filière. Un couplage avec le simulateur Aspen+ permet d'estimer la production énergétique à partir du bois énergie.

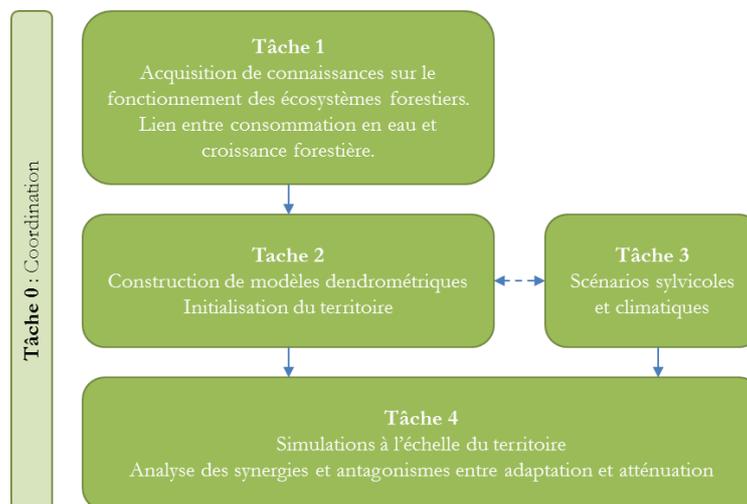


Diagramme opérationnel du projet SATAN

Ce document est le rapport final du projet. Par souci d'efficacité, le rapport est constitué de résumés succincts pour chacune des tâches. Les annexes donnent des éléments bien plus détaillés sur chacune des parties (articles scientifiques, mémoire de thèse, rapport de stage élaborés grâce au projet).

# 1. Acquisition de connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers

La tâche 1 du projet s'articule autour de la thèse de Jordan Bello (annexe 1A). Cette section est un résumé synthétique des différents travaux réalisés au cours de la thèse. Le manuscrit complet de la thèse, ainsi que les deux articles scientifiques parus au cours de la thèse (Bello et al. 2019a, présenté en annexe 1B, et Bello et al 2019b, présenté en annexe 1C) sont annexés à ce rapport. La thèse a été soutenue le 21 mars 2019 à l'université d'Orléans, en présence d'Eric DUFRENE (rapporteur), Catherine PICON-COCHARD (rapporteur), Xavier MORIN (examinateur), Franck BRIGNOLAS (président du jury), et Nathalie KORBOULEWSKY (directrice de thèse).

## Objectifs

L'objectif principal de la thèse est de mettre en évidence et de comprendre les effets de deux stratégies sylvicoles sur la consommation d'eau et la croissance des forêts. Les deux stratégies sylvicoles sont d'une part une diminution de la densité des peuplements (passage d'une densité moyenne à claire), et d'autre part le mélange d'essences (pur versus mélangé). La diminution de la densité pourrait limiter la consommation en eau du peuplement, ce qui limiterait les risques de sécheresse pour les arbres restants. Le mélange d'essences pourrait procurer une complémentarité de niche entre les espèces. Nous nous sommes focalisés sur les peuplements purs et mélangés de chênes sessiles et de pins sylvestres en forêt domaniale d'Orléans. Dans un premier temps, ces effets ont été étudiés grâce au suivi de la croissance secondaire (radiale). Le signal est étudié à l'échelle saisonnière. Cette croissance saisonnière est confrontée à la ressource hydrique en contexte limitant (ETP modélisée à partir des données SAFRAN), afin de pouvoir apporter des informations sur la sylviculture face au changement climatique. Dans un deuxième temps, deux expérimentations ont été conduites afin de comprendre les mécanismes sous-jacents d'acquisition de l'eau dans les peuplements purs et mélangés. Une expérimentation utilisant la signature isotopique des éléments de l'eau a permis d'identifier les profondeurs d'acquisition de l'eau en période de stress hydrique, afin d'identifier si une complémentarité entre les essences est à l'œuvre dans les peuplements mélangés. Une autre expérimentation a permis d'identifier l'influence du mélange d'essences sur le flux de sève des individus. D'autres travaux, comme la caractérisation des nappes perchées sont présentés dans le manuscrit de thèse.

### 1.1. Analyses de la croissance secondaire

Nous avons analysé la croissance saisonnière des deux essences principales présentes en forêt d'Orléans grâce au suivi de 270 arbres équipés de dendromètres à bande sur le dispositif OPTMix (cf. photo 1.1.1). Nous avons étudié la réponse de la croissance des individus en fonction des différentes modalités des peuplements (composition pur ou mélangé à environ 50%, densité et taille des individus) sous différentes conditions de contrainte hydrique. Le mélange de ces deux essences est courant en forêt d'Orléans. La réduction de densité étudiée correspond à une diminution de la densité par rapport aux standards de gestion classique de l'ONF. La croissance est analysée pour les années 2014, 2015 et 2016. Ces années sont particulièrement intéressantes car l'année 2014 a été très pluvieuse et peut être considérée comme un témoin sans stress hydrique. A l'inverse, l'année 2015 a subi un stress hydrique estival marqué, de début juin à fin août. L'année 2016 est caractérisée par un stress hydrique un peu plus tardif, de mi-juillet à mi-septembre (figure 1.1.2). La comparaison d'une année avec stress hydrique avec une année sans stress hydrique est effectuée sur la même période calendaire (figure 1.1.3). La méthode est décrite en détails dans l'annexe 1A.



Photo 1.1.1 : Dendromètre à bande installé sur un pin sylvestre en forêt d'Orléans

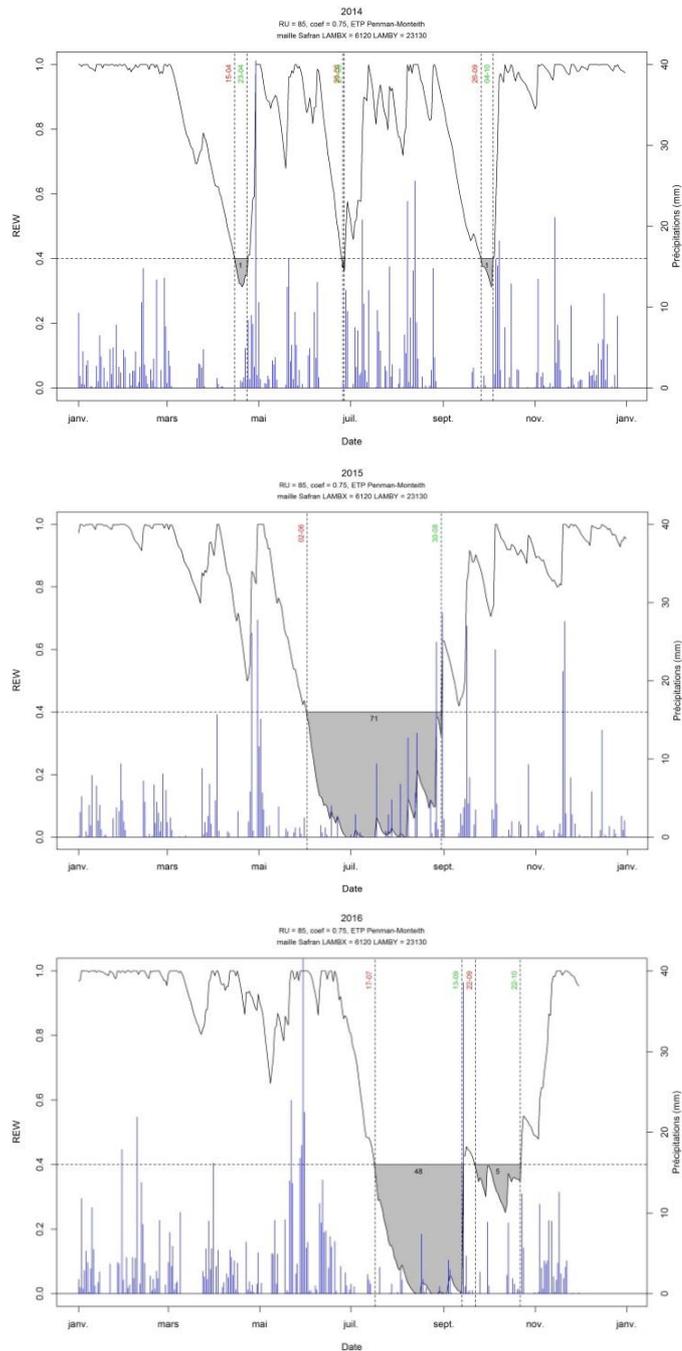


Figure 1.1.2 : Réserve en eau disponible en fonction du temps pour les années 2014, 2015 et 2016. Une REW de 1 signifie que le réservoir d'eau est maximal, et 0 qu'il n'y a plus d'eau disponible pour les plantes. En dessous de 0.4, on atteint des niveaux de sécheresse prononcée. Les traits bleus verticaux sont les pluies.

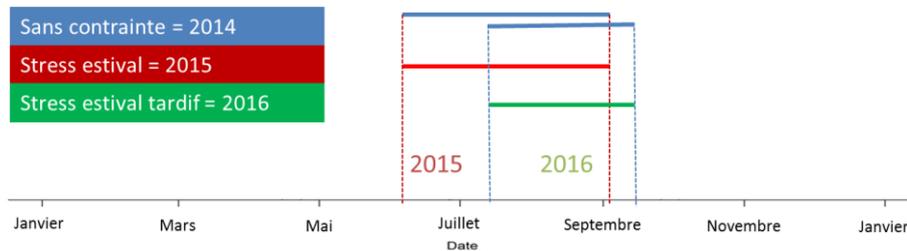


Figure 1.1.3 : Périodes de sécheresse étudiées. L'année 2014 était sans stress estival. La croissance au cours des périodes des sécheresses estivales de 2015 et 2016 a été comparée à celle de 2014, sur la même période calendaire

Les principaux résultats de cette partie sont les suivants :

- La croissance radiale annuelle des individus est un bon marqueur des conditions climatiques subies par les arbres. Sur l'ensemble des individus étudiés (i.e. sans considérer la composition, ou la densité), elle ne diffère entre les espèces que lors de l'année sans contrainte hydrique (croissance des pins supérieures). Lorsqu'une contrainte hydrique se produit durant la saison de végétation, la différence entre les espèces n'est pas significative.
- Lors de la contrainte estivale forte comme en 2015, la croissance est diminuée de 20% pour les chênes et de 31% pour les pins, par rapport à la même période sans stress. La sécheresse de 2015 ayant été assez intense, cela traduit de bons niveaux de résistance pour les deux espèces (figure 1.1.5).
- Pour les deux essences, la contrainte hydrique diminue la différence de croissance intra-annuelle entre les gros et les petits individus. Les gros individus du peuplement (pris dans le tiers des arbres les plus gros pour une essence) diminuent plus fortement leur croissance que les petits individus (pris dans le tiers des arbres les plus petits de l'essence).
- Les conséquences sur la croissance des individus n'est pas la même pour un stress estival et pour un stress estival tardif. Lors d'un stress estival, la croissance était la même entre peuplements purs et mélangés pour les deux essences. En revanche, la réduction de la croissance était plus forte pour les gros individus que les petits. Pour un stress estival tardif, le mélange a un effet positif sur le chêne, c'est-à-dire une meilleure croissance en mélange, et un effet négatif sur le pin, c'est-à-dire une meilleure croissance en monoculture. Cela est significatif uniquement en densité moyenne.
- Un effet opposé du mélange est également identifié sur la résistance intra-annuelle des individus (capacité à maintenir la croissance inchangée au cours de l'épisode de sécheresse). Lors du stress estival, les chênes ont eu une meilleure résistance en mélange alors que les pins ont eu une meilleure résistance en monoculture (marginale significatif, figure 1.1.4).

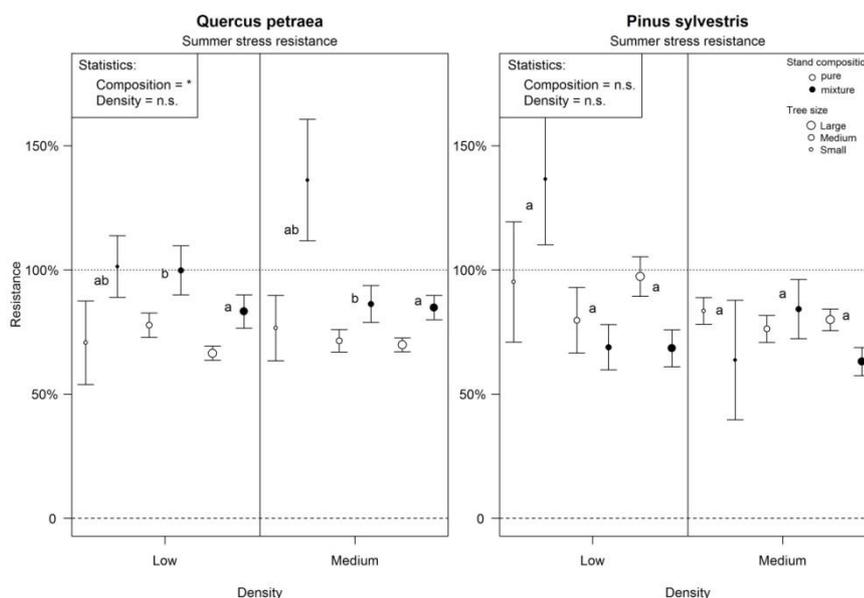
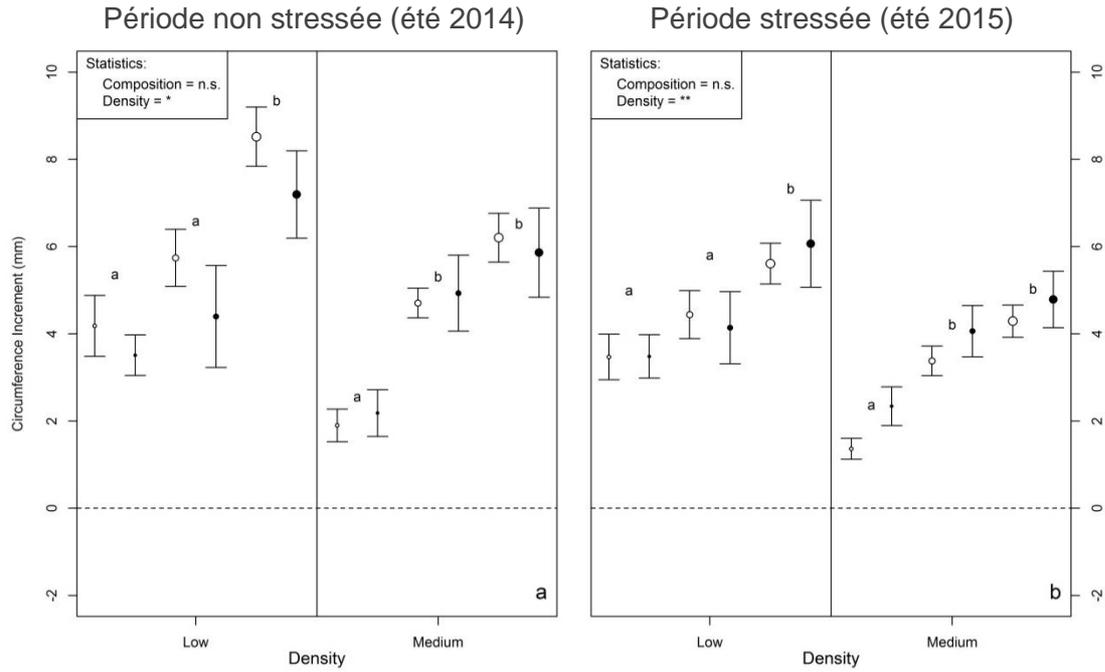


Figure 1.1.4 : Moyenne des résistances à la contrainte hydrique pour le chêne sessile et le pin sylvestre pour les deux densités de peuplement (faible ( $RDI \sim 0.4$ ) et moyenne ( $RDI \sim 0.7$ )). Les ronds ouverts sont pour les monocultures et les ronds fermés pour les mélanges. La taille des cercles indique la catégorie de taille des individus. Deux lettres identiques indiquent que les valeurs correspondantes ne sont pas significativement différentes.

## Chêne sessile



## Pin sylvestre

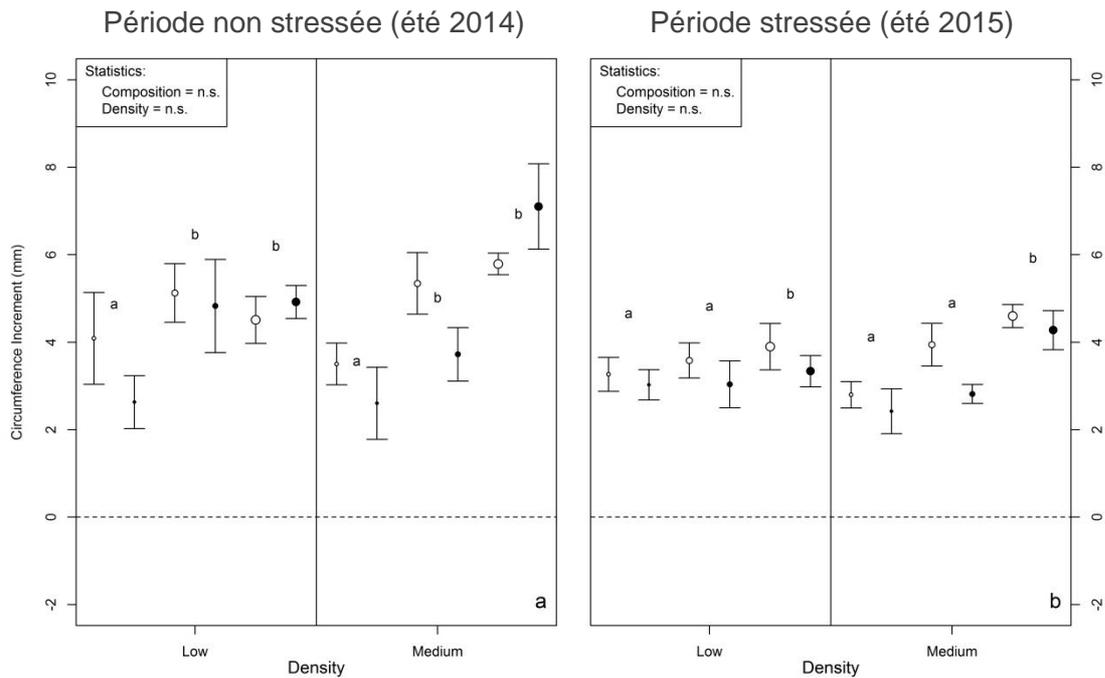


Figure 1.1.5 : Croissance moyenne en circonférence pendant la même période estivale en condition non stressée (2014) ou stressée (2015) pour le chêne sessile et le pin sylvestre pour les deux densités de peuplement (faible et moyenne). Les ronds ouverts sont pour les monocultures et les ronds fermés pour les mélanges. La taille des cercles indique la catégorie de taille des individus. Deux lettres identiques indiquent que les valeurs correspondantes ne sont pas significativement différentes.

## 1.2. Complémentarité de l'acquisition en eau par les racines

Une demande croissante émanant des gestionnaires forestiers est d'identifier les méthodes de sylviculture pour faire face aux pénuries d'eau prévues au cours des prochaines décennies. Une des solutions envisagées est le mélange des essences dans le même peuplement, ce qui augmente ainsi le partage des ressources et minimise la compétition pour l'eau limitante et cela a été étudié ici chez *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. et *Pinus sylvestris* L. lors d'un épisode de sécheresse intense.

Pendant la période de sécheresse estivale en 2016, nous avons analysé la signature isotopique ( $^{18}\text{O}$ ) de l'eau du xylème de petits et gros individus ainsi que l'eau du sol à plusieurs profondeurs, de façon à pouvoir relier la profondeur d'acquisition de l'eau de ces deux essences. Nous avons également mesuré le potentiel hydrique foliaire de base pour estimer le stress subi par chaque individu.

Le principe de la méthode repose sur la discrimination de deux isotopes stables de l'oxygène ( $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$ ) par l'évaporation de l'eau du sol : lors d'une sécheresse suffisamment prolongée, l'oxygène 16, plus léger, s'évapore préférentiellement par rapport à l'oxygène 18, créant ainsi un gradient dans le sol. A l'inverse, le prélèvement en eau par les racines n'est pas discriminant entre les deux isotopes. Ainsi, en comparant la signature isotopique de l'eau du xylème avec le profil isotopique du sol (figure 1.2.1), on obtient une mesure indirecte et peu destructive de la profondeur d'acquisition de l'eau par les arbres. Nous avons utilisé cette méthode pour étudier l'influence du mélange sur l'acquisition de l'eau. La méthode est couteuse en temps et financièrement. Nous l'avons réalisée en collaboration avec Ansgar Kahmen de l'Université de Bâle pour les analyses chimique, et de Niles Hasselquist de l'Université des Sciences Agronomiques en Suède (SLU) pour l'expertise sur la méthode. L'échantillonnage comportait 48 individus du dispositif OPTMix : 24 chênes et 24 pins, pour moitié en peuplements purs et en peuplements mélangés.

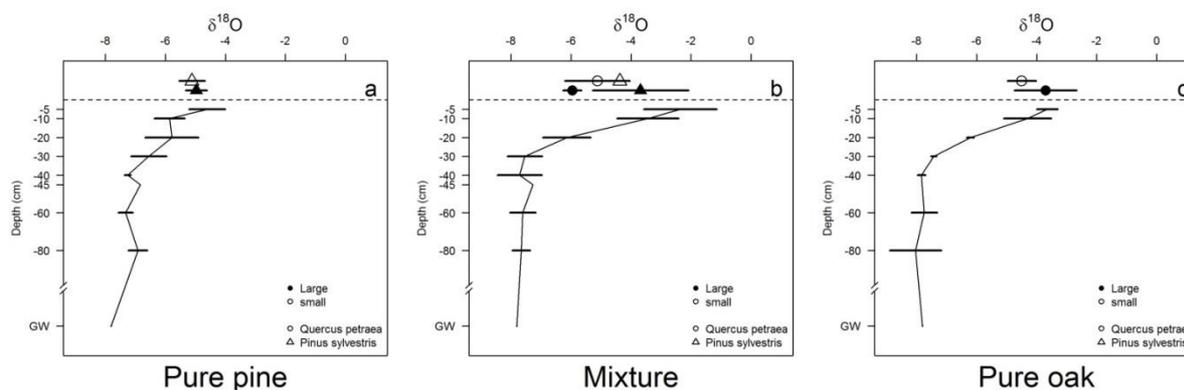


Figure 1.2.1 : Moyenne ( $\pm$  Erreur standard, ‰) des signatures isotopiques de l'eau du xylème ( $\delta^{18}\text{O}$ ) et de l'eau du sol trouvées dans le profil pédologique du pin pur (a), mélange (b) et chêne pur (c). Les cercles représentent des chênes et les triangles des pins. Les symboles plein et vide représentent respectivement les gros et les petits arbres

Dans les monocultures, les deux essences utilisent majoritairement l'eau du sol proche de la surface. Par contre, avec un déplacement du prélèvement vers les couches plus profondes, une complémentarité de niche partielle apparaît en mélange entre les essences, lorsque l'eau est limitante (figure 1.2.2), ce qui diminue la contrainte hydrique pour les chênes (*i.e.* potentiel hydriques de base moins négatifs, figure 1.2.3) par rapport à leur monoculture et ceci surtout pour les petits chênes.

Les résultats de cette étude montrent que des stratégies fonctionnelles contrastées du chêne et du pin pour l'utilisation de l'eau peuvent effectivement changer la disponibilité en eau et pourraient aider le chêne à faire face à la pénurie d'eau prévue dans le changement climatique.

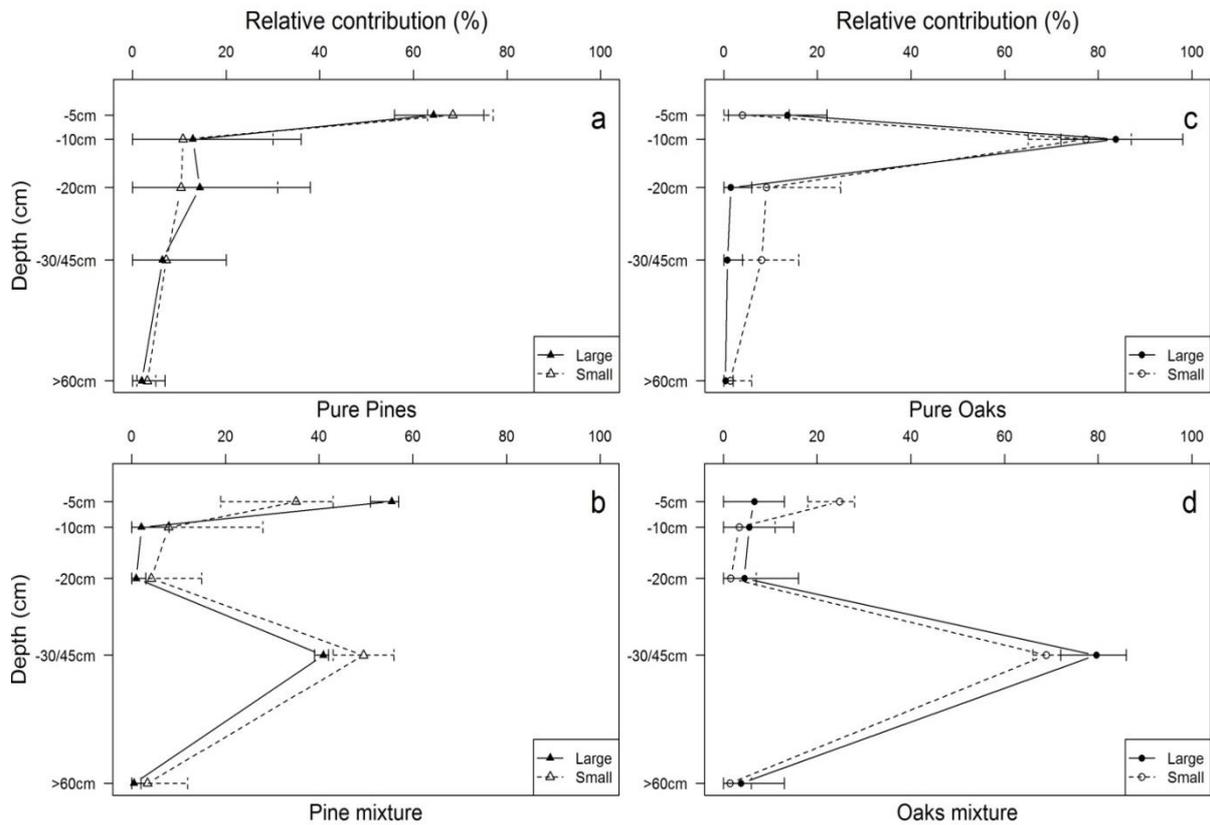


Figure 1.2.2 : Contribution relative des différentes sources d'eau utilisées par les petits arbres (symboles ouverts et lignes pointillées) et les grands arbres (symboles pleins et lignes pleines) dans les peuplements de pins purs (a), de pins dans les peuplements mélangés (b), de chênes purs (c) et de chênes dans les peuplements mélangés (d). Les symboles sont sur la moyenne et les barres représentent les 1er et 99e percentiles de distribution

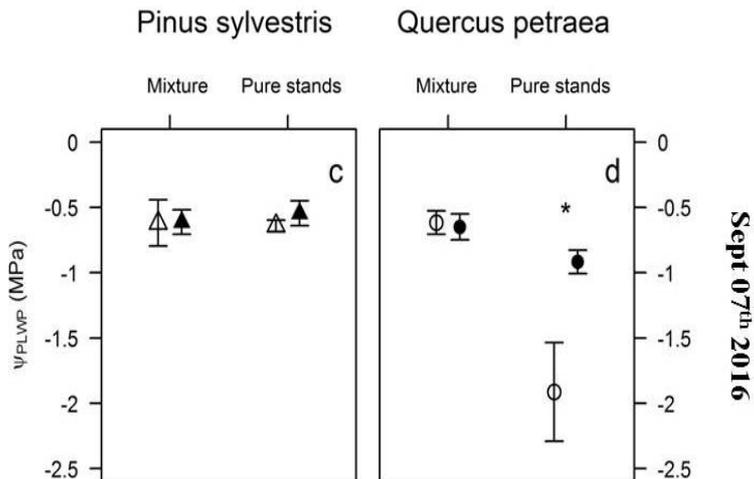


Figure 1.2.3 : Potentiel hydrique foliaire de base moyen ( $\pm$ SE) pour les grands (triangles pleins) et les petits (triangles ouverts) pins sylvestres et les grands (cercles pleins) et petits (cercles ouverts) chênes sessiles en peuplements purs (côté gauche) et mélangés (côté droit). Les mesures du PLWP ont été effectuées le 7 septembre 2016. Plus le potentiel est négatif, plus l'arbre subi un fort stress hydrique. L'astérisque indique une différence significative entre les grands et les petits chênes.

### 1.3. Influence du mélange sur le flux de sève des individus

Le comportement distinct entre les chênes sessiles et les pins sylvestres sur la consommation en eau lors d'un épisode de sécheresse permet de formuler l'hypothèse d'un maintien plus prononcé de la consommation en eau des individus en mélange lors d'une sécheresse édaphique. Nous avons alors suivi la densité de flux de chênes sessiles et de pins sylvestres en monoculture ainsi qu'en mélange durant l'intégralité d'une saison de végétation, afin d'estimer leur réaction à la contrainte en fonction de la composition du peuplement.

Les objectifs des travaux étaient ici de :

- (1) Comparer les densités de flux de sève brute entre les arbres en monoculture et ceux en mélange dans un contexte de contrainte hydrique.
- (2) Estimer l'effet de la succession d'épisodes de contraintes lors d'une saison de végétation sur la densité de flux des individus.

Les flux de sève ont été suivis sur l'ensemble de la saison de végétation de 2017 pour 47 individus de du dispositif OPTMix (défaut de matériel pour 1 chêne) : 23 chênes et 24 pins, pour moitié en peuplement pur et en peuplement mélangé (photo 1.3.1). Nous avons concentré l'échantillonnage sur les gros individus (dans le tiers des plus gros de l'essence pour le peuplement), dans les densités moyennes.

Photo 1.3.1 : Capteur de flux de sève installé sur un Pin sylvestre d'OPTMix



Un indice de teneur en eau du sol, standardisé entre 0 et 1 (ISWC) a été calculé pour caractériser l'état hydrique du sol (cf. chapitre 6 de la thèse pour plus de détails). La valeur de 0 correspond à une absence d'eau disponible, 1 à la capacité maximale du sol. A partir de cet indice, différentes périodes de huit jours chacune ont pu être identifiées dont une période non contraignante (définie comme période de référence, REF) et quatre périodes contraignantes pendant la saison de végétation (P1 à P4) (figure 1.3.2). La remontée de l'indice de teneur en eau du sol ( $<0.4$ ) et le fait qu'il s'agisse d'une seule période de végétation, ne permettent pas de considérer les différentes périodes de contraintes comme étant indépendantes, mais plutôt comme un cumul de contraintes.

La période de référence a été déterminée sur une période avec le moins de couverture nuageuse possible, sans pluie mais avec des conditions de teneur en eau du sol non contraignantes et avec un développement foliaire terminé. Il s'agit des conditions climatiques optimales pour le flux de sève. Les périodes de contraintes (P1, P2, P3 et P4) ont été déterminées en sélectionnant les huit jours précédant une valeur de teneur en eau minimale. Ainsi, les différentes périodes de mesures sont :

- 1 période non contraignante, utilisée comme référence :
  - REF à partir du 08 juin jusqu'au 15 juin
- 4 périodes de contraintes hydriques :
  - P1 à partir du 20 juin jusqu'au 27 juin
  - P2 à partir du 16 juillet jusqu'au 23 juillet
  - P3 à partir du 01 août jusqu'au 08 août
  - P4 à partir du 01 septembre jusqu'au 08 septembre

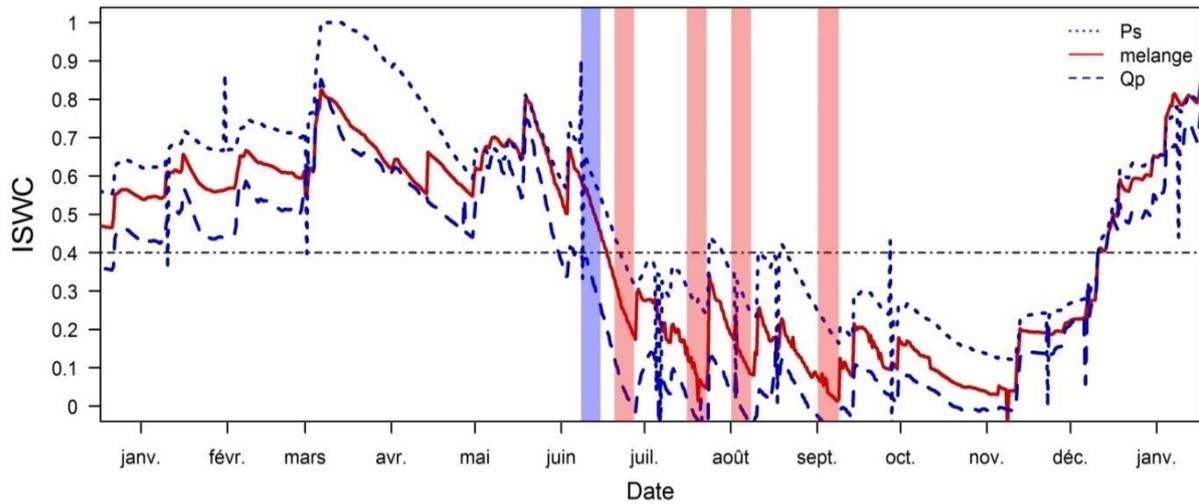


Figure 1.3.2 : Moyenne de l'indice de teneur en eau disponible du sol (ISWC) pour les monocultures de pin sylvestre (Ps), de chêne sessile (Qp) et des peuplements mélangés de ces deux essences (mélange) pour l'année 2017. L'aire de couleur bleu correspond à la période de référence (REF), les aires de couleur rouge correspondent aux différentes périodes de contrainte étudiées (P1, P2, P3 et P4)

La densité de flux de sève varie fortement avec le rayonnement lumineux, ainsi qu'avec l'humidité de l'air. Pour pouvoir comparer les périodes P1 à P4, il faut alors se ramener à un rayonnement et une humidité équivalents. La figure 1.3.3 présente la densité de flux de sève corrigée de ces deux facteurs pour la période de référence et les quatre périodes de contrainte.

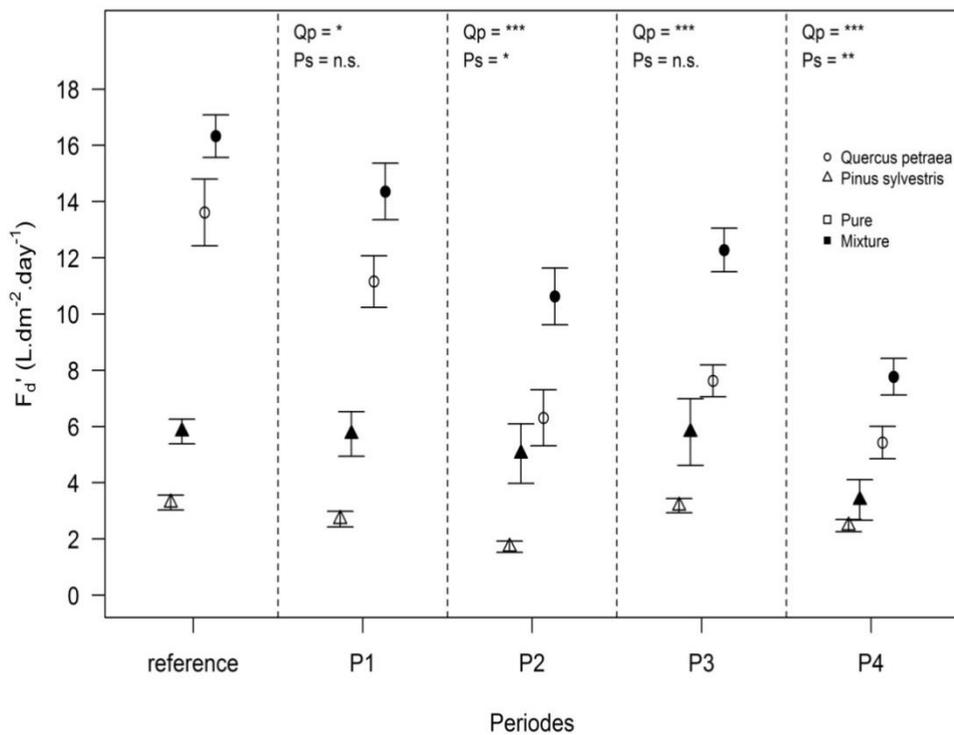


Figure 1.3.3 :  $F_d'$  : Densité de flux de sève, sans la part due au rayonnement global et au VPD de *Quercus petraea* (cercles) et de *Pinus sylvestris* (triangles) en monoculture (vide) ou en mélange (noir) pour les différentes périodes identifiées. La significativité entre  $F_d'$  de la période de référence et la période considérée est signalée en haut du graphique pour le chêne (Qp) et le pin (Ps) ( $p$ -value > 0.05 = n.s. ;  $p$ -value < 0.05 = \* ;  $p$ -value < 0.01 = \*\* ;  $p$ -value < 0.001 = \*\*\*)

### *Densité de flux de sève entre les deux essences :*

La densité de flux de sève  $F_d$  était plus importante pour le chêne que pour le pin quelle que soit la période. Les conditions édaphiques n'étaient pas différentes entre les types de peuplements dans notre étude, sauf pour P1. Cependant, à la différence du chêne sessile, la sensibilité du pin sylvestre à la teneur en eau du sol provoque le déclin rapide du flux de sève lorsque la contrainte augmente et cela démarre à des valeurs de teneurs en eau du sol qui semblent plus élevées que celles de notre étude lors de la période de référence. Cela révèle la probabilité que les pins ont pu s'acclimater déjà dans cette période de référence, en diminuant la densité de flux de sève. Ce comportement du pin sylvestre reflète le comportement d'une essence isohydrique pour laquelle le contrôle stomatique est précoce lors de la diminution de l'eau disponible dans les sols. En d'autres termes, le pin limite le flux de sève dès que les conditions de disponibilité en eau du sol sont contraignantes. Cette stratégie lui permet de limiter les risques de cavitation (envahissement brutal des cellules conductrices de la sève par des bulles d'air), mais limite la croissance.

Le chêne sessile diminue sa conductance stomatique plus tardivement que le pin sylvestre. Il a un comportement dit anisohydrique. Il poursuit sa croissance jusqu'à des niveaux de teneur en eau du sol très faibles, ce qui lui permet de maintenir un niveau de production assez soutenu même en période de sécheresse, mais qui le rend plus sensible aux périodes extrêmes.

### *Densité de flux de sève entre les individus en monoculture et ceux en mélange*

Les densités de flux de sève des individus en peuplement mélangé ont montré une tendance à être plus importante que celles en monoculture mais cette différence n'était pas significative.

Bonal et al. (2017) ont étudié l'effet du mélange sur le niveau de stress des arbres grâce à une autre variable, la signature isotopique du carbone dans les cernes. Contrairement à notre étude qui porte uniquement sur l'année 2017, celle-ci est à l'échelle inter-annuelle. Ils comparent la signature du carbone 13 de manière rétrospective, donc sur la trace que laissent les années avec des périodes de stress dans les cernes, alors que dans notre étude nous concentrons l'échantillonnage sur la période de stress uniquement. Ils ont observé que la discrimination du carbone 13 dans les cernes en réponse à la sécheresse tendait à être plus faible notamment dans les peuplements purs de chênes que dans les mélanges. Cela montre une tendance positive de l'effet du mélange mais cette tendance n'était pas non plus significative. Même si cette étude porte sur une autre variable, à l'échelle inter-annuelle, cela met en évidence que la tendance observée est systématique mais que la magnitude n'est pas suffisante ou alors que l'effet est de second ordre, de sorte que la puissance des tests statistiques n'est pas suffisante pour que cet effet soit significatif.

### *Densité de flux de sève en fonction de la période de contrainte*

$\Delta F_d'$  est la différence de flux (corrige de  $R_g$  et VPD), entre la période de référence et la période de sécheresse étudiée (Figure 1.3.4). La diminution de  $\Delta F_d'$  des chênes avec le cumul des périodes de contrainte est plus importante que celle des pins. Le niveau de  $F_d$  maximal des pins lors de la période de référence ( $0.57 \pm 0.01$  L.dm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) est plus faible par rapport à la densité de flux relevé par d'autres études sur cette essence (Irvine et al., 1998; Grossiord et al., 2013). Alors que celle des chênes ( $1.16 \pm 0.04$  L.dm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) correspond aux valeurs classiques de la littérature pour une période hors contraintes (Grossiord et al., 2014b). Le pin est une essence exerçant un contrôle stomatique précoce lors de la diminution de la teneur en eau des sols (Irvine et al., 1998; Sturm et al., 1998). Ainsi, la REW durant la période de référence peut être suffisamment faible pour provoquer la diminution de la densité de flux de sève (Lagergren and Lindroth, 2002; Poyatos et al., 2008). Cependant, l'exposition répétée sur le long terme des individus à la contrainte hydrique provoque la diminution de la sensibilité de  $F_d$  au VPD et à la REW (Grossiord et al., 2018). Or, il a été montré que le pin en mélange semble subir une compétition plus forte que dans la monoculture (Bello et al.,

2019), ce qui semble être renforcé ici par la différence significative de la composition du peuplement pour le pin lors de la dernière période de contrainte (P4). En effet, les pins en monoculture ne montrent pas de différence avec le cumul des périodes de contraintes. Par contre, les pins en mélange étant plus exposés à la contrainte hydrique (due à la présence du chêne) montrent une réaction plus faible à la diminution de la REW dans la période de référence que dans la monoculture (car la REW était déjà potentiellement contraignante pour les pins lors de cette période). Ils n'atteignent finalement le niveau de la densité de flux des pins en monoculture que lors de la dernière période de contrainte. A la différence des pins en monoculture qui ont gardé le même niveau de  $F_d$  en fonction des différentes périodes car ils subissent une compétition plus faible (Bello et al., 2019) et donc gardent une réaction à la REW plus importante (Grossiord et al., 2018), même lors de la période utilisée ici en référence.

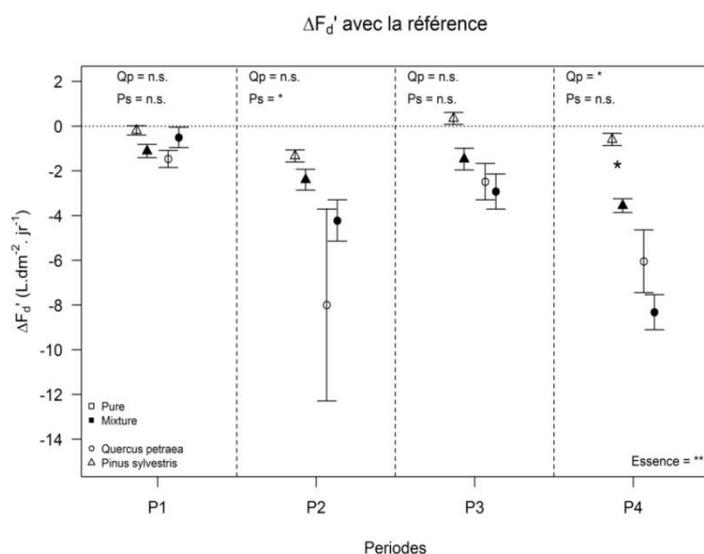


Figure 1.3.4 : Variation par rapport à la période de référence de la densité de flux de sève sans la part due au rayonnement global et au VPD ( $\Delta F_d'$ ) de *Quercus petraea* (cercles) et de *Pinus sylvestris* (triangles) en monoculture (vide) ou en mélange (noir) pour les différentes périodes identifiées. La significativité entre  $\Delta F_d'$  des deux essences dans la période P4 est indiquée. Les différences significatives entre les  $\Delta F_d'$  et zéro est indiqué pour le chêne (Qp) et le pin (Ps) pour chaque période de contrainte (p-value > 0.05 = n.s. ; p-value < 0.05 = \* ; p-value < 0.01 = \*\* ; p-value < 0.001 = \*\*\*)

## 1.4. Conclusion sur les stratégies d'adaptation

Lors de la contrainte estivale forte comme en 2015, la croissance a été diminuée de 20% pour les chênes et de 31% pour les pins, par rapport à la même période sans stress. Cela traduit une résistance plutôt bonne de ces espèces à cette perturbation dans le milieu étudié (forêt d'Orléans).

L'objectif d'une diminution de la densité du peuplement est de limiter la consommation en eau. Dans cette étude, nous avons comparé des peuplements de densité moyenne (RDI ~ 0.7) avec des peuplements de densité faible (RDI ~ 0.4). Pour le chêne sessile, la consommation se reporte partiellement sur les individus restants, ce qui est moins le cas pour les pins sylvestre. En conséquence, la perte de productivité du chêne est moindre que celle du pin, mais la consommation en eau est probablement moins réduite également. Ce report de croissance sur les individus restants implique qu'on n'a pas observé d'effet de la densité sur la résistance à la sécheresse.

Le mélange d'essences procure une complémentarité partielle de la consommation en eau dans les peuplements. Dans le contexte de l'étude, lors d'un stress hydrique, le mélange bénéficie au chêne au détriment du pin, probablement en raison des stratégies d'utilisation de l'eau anisohydrique du chêne, et isohydrique du pin. Le pin régule sa croissance à des niveaux de stress faibles, ce qui laisse plus d'eau pour le chêne. En revanche, l'effet est réciproque, c'est-à-dire que la forte consommation d'eau du chêne entraîne des niveaux de stress accrus pour le pin par rapport aux peuplements purs. Ces relations sont réduites dans les peuplements moins denses.

## 2. Modèle de croissance climat-dépendant

En raison de la grande longévité des arbres, la gestion forestière est traditionnellement basée sur des outils utilisant la prévisibilité de la production dans le temps. Les modèles dendrométriques et les simulateurs qui leur sont associés ont remplacé les tables de production, mais les concepts de stabilité temporelle sous-jacents sont les mêmes. Or, les changements climatiques ont rendu caduque cette stabilité, et de nouveaux outils sont nécessaires pour planifier la production forestière et la gestion sylvicole dans le temps. Les modèles mécanistes sont de bonnes options pour prendre en compte le changement climatique, en décomposant la croissance en processus élémentaires, et en analysant l'influence des facteurs climatiques sur chacun de ceux-ci. En revanche, ce type de modèle nécessite habituellement des variables d'entrée difficiles à acquérir et utiliser en gestion courante. Par ailleurs, leurs paramétrages sont assez lourds, ce qui les rend difficilement généralisables à de nombreux contextes sylvicoles. Enfin, la plupart fonctionnent à l'échelle du peuplement, et sont peu efficaces pour prendre en compte la structuration individuelle des peuplements. Des approches couplant un module de gestion forestière à un modèle basé sur les processus ont été entreprises (Guillemot et al. 2014) et sont prometteuses. Le couplage inverse, c'est-à-dire d'apporter un module climatique à un modèle dendrométrique n'a pas été abordé, et s'avère prometteur également. Dans la tâche 2 du projet SATAN, nous avons abordé cette possibilité.

Dans cette analyse, nous avons couplé deux types de modèles : un modèle dendrométrique à l'échelle peuplement basé sur les données de l'inventaire forestier national (IFN), et un modèle utilisant des données rétrospectives (carottages d'arbres sur le dispositif OPTMix). Les données de l'IFN apportent la multiplicité des situations sylvicoles et la robustesse de la prédiction. Les données rétrospectives, par l'influence du climat sur la largeur de cerne, apportent l'influence du climat annuel sur la croissance. Les analyses ont porté sur les peuplements de chêne sessile, de pin sylvestre, et du mélange de ces deux espèces. Le dispositif d'étude est le même que pour la tâche 1 (OPTMix). En revanche, les données analysées ne sont pas du même type.

Le résumé ci-dessous présente les résultats obtenus. Un article scientifique est paru dans la revue *Agricultural and Forest Meteorology* (Vallet et Perot 2018), et figure en annexe 2.

### 2.1. Modèles à partir des données IFN

La méthodologie pour établir les modèles IFN a déjà été publiée dans plusieurs articles scientifiques (Vallet et Pérot 2011, Toïgo et al. 2015, Toïgo et al. 2017). Nous avons repris les mêmes bases ici.

Il s'agit de modèles de croissance en surface terrière à l'échelle du peuplement, dont l'équation est :

$$BAI = (a_0 + \sum_{m=1}^n (a_m \times X_m)) \times (DI)^b \times \left( \frac{e^{(c_1 \times Dg)} + c_2}{1 + c_2} \right) + \varepsilon$$

où BAI est l'accroissement du peuplement,  $X_m$  un ensemble de variables environnementales influençant la croissance de l'essence considérée, DI est la densité du peuplement, et Dg le diamètre quadratique moyen. La première partie du modèle, i.e. la combinaison linéaire des variables environnementales, est un indice de fertilité. C'est l'accroissement maximal du peuplement, c'est-à-dire lorsque la densité est maximale, et que le peuplement est jeune. C'est ce que nous appelons la fertilité dans Salem, et qui est différente de la hauteur dominante à un âge de référence.

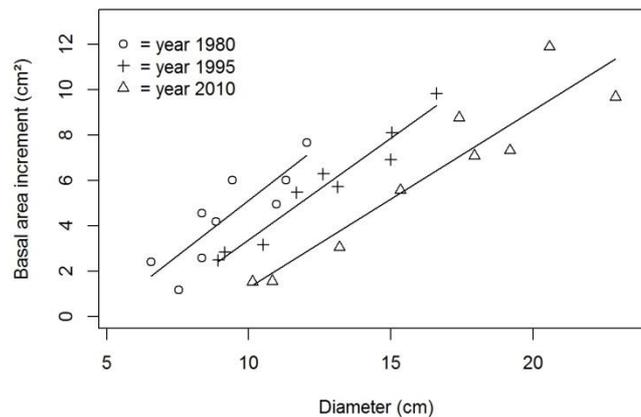
Les résultats des ajustements pour chacune des deux espèces sont donnés dans l'annexe 2. Il s'agit d'accroissements moyens, correspondant au climat subi par les individus pendant la période de croissance correspondant à la prise des mesures. L'ajustement sur des données nombreuses et à large amplitude spatiale (données de l'IFN) autorisent à appliquer ces modèles sur de larges situations biogéographiques, et sont donc particulièrement adaptés pour simuler la croissance à l'échelle d'un territoire.

### 2.2. Modèles locaux climat-dépendants

Pour cette partie, nous avons réutilisé des données provenant du dispositif OPTMix. Un échantillonnage stratifié d'arbres a été réalisé en 2012 et 2013. Il porte sur 3 placettes de chêne, 3 placettes de pins, et 3

placettes de mélange. Il s'agit pour toutes les placettes de peuplements adultes en densité moyenne. Dans chacune de ces placettes, 9 individus par essence ont été sélectionnés (donc 18 arbres en mélange) en équilibrant les catégories de tailles, puis abattus. La rondelle à 1.30 a été prélevée pour chacun de ces arbres, et les croissances ont été reconstruites avec le logiciel Windendro au laboratoire.

Pour chaque placette, et pour chaque année passée, on peut tracer l'accroissement individuel en fonction de son diamètre (figure 2.2.1). Il s'agit d'un schéma classique, linéaire, où les plus gros individus poussent plus que les plus petits. L'intérêt est que lorsqu'on trace ces droites pour chaque année, il est possible de relier ses paramètres au climat annuel de l'année correspondante.



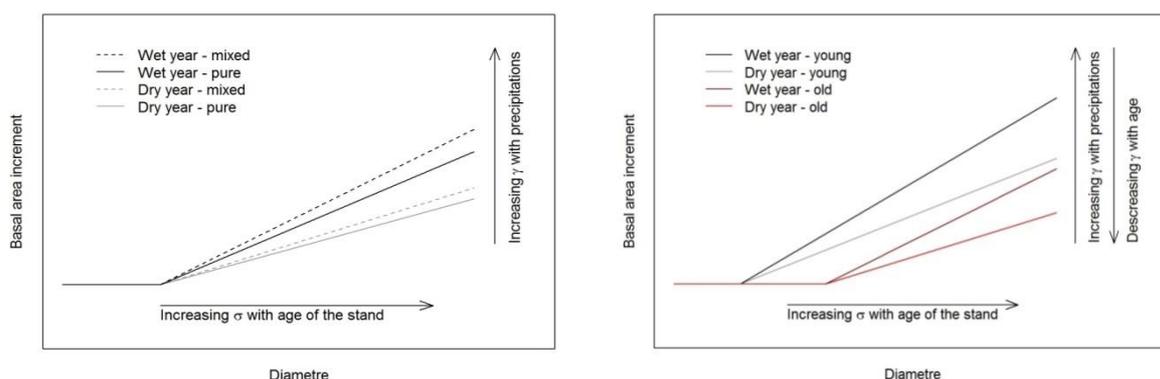


Figure 2.2 : Evolution schématique de la relation croissance en surface terrière – diamètre pour le chêne (à gauche), et le pin (à droite) en fonction du climat, de la composition, et de l'âge du peuplement

### 2.3. Méthode de couplage

Le principe général de la méthode de couplage est de considérer que le rapport entre l'accroissement pour un climat donné et pour un climat de référence doit être le même qu'il soit calculé avec le modèle IFN ou avec le modèle local. Ainsi, nous avons :

$$\frac{BAI_{NFI,clim}}{BAI_{NFI,clim\_ref}} = \frac{BAI_{loc,clim}}{BAI_{loc,clim\_ref}}$$

Or, nous pouvons montrer (cf. annexe 2), que le rapport des modèles local est égal au rapport entre les pentes du modèle. Ainsi, nous obtenons le modèle couplé suivant :

$$BAI_{NFI,clim} = \frac{\gamma_{clim}}{\gamma_{clim\_ref}} \times BAI_{NFI,clim\_ref}$$

où  $\gamma_{clim}$  et  $\gamma_{clim\_ref}$  sont les pentes du modèle local pour le climat courant et le climat de référence, et  $BAI_{NFI,clim\_ref}$  et le modèle IFN pour le climat correspondant aux données d'ajustement.

Dans cette dernière équation, ce rapport entre les pentes représente la variation de croissance induite par le climat par rapport à la croissance de référence. C'est une valeur en proportion. On peut l'appeler la modulation climatique.

$$\text{Modulation climatique} = \frac{\gamma_{clim}}{\gamma_{clim\_ref}} \times 100$$

Si le rapport des pentes est supérieur à 1, cela signifie que la croissance est supérieure à la période de référence, si elle est inférieure à 1, elle est inférieure à la période de croissance.

## 2.4. Projection en fonction des scénarios climatiques

Pour intégrer des scénarios climatiques, nous avons utilisé les données provenant du site internet du Drias (<http://www.drias-climat.fr>) qui a pour objectif de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME). Nous avons utilisé les scénarios de précipitation du GIEC régionalisés (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5) correspondant à la forêt d'Orléans comme données d'entrée pour évaluer la modulation climatique du modèle couplé. La projection à l'horizon 2100 de ces trois scénarios donne les figures 2.4.1 :

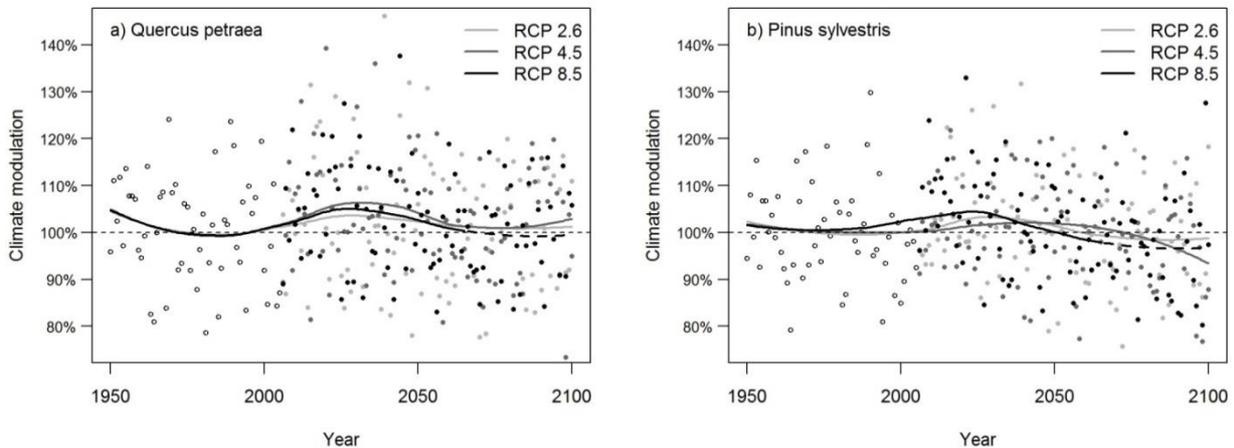


Figure 2.4.1 : Evolution du niveau de croissance, en pourcentage, par rapport à la période de référence (moyenne des données historiques, i.e. de 1950 à 2005) en fonction des scénarios du GIEC régionalisés pour le chêne (à gauche) et le pin (à droite) pour la forêt d'Orléans.

On observe que d'après ces scénarios et ces modèles, la croissance pourrait avoir une légère augmentation autour de 2020 – 2025 puis une légère diminution ensuite. La magnitude de l'effet est très faible. Ce résultat est lié au régime des pluies prédit par les scénarios du GIEC. Dans ce contexte sylvicole, où le sol est de très faible épaisseur, les pluies ont un rôle capital. On peut s'attendre à ce que pour d'autres contextes, avec des réserves utiles supérieures, les températures puissent avoir plus d'effet que les précipitations. Dans ces cas, l'influence du climat futur serait plus prégnante.

## 2.5. Simulateur sous Capsis

Dans le cadre du projet, ces résultats ont fait l'objet du développement d'un module de croissance dans la plateforme CAPSIS, en vue de son utilisation dans la tâche 4. Il s'agit du module SALEM (pour StAnd Level Model), dont une capture d'écran de la fenêtre d'entrée et des sorties sont données ci-dessous (figure 2.5.1). A l'heure actuelle, il n'y a pas de modèle de mortalité dans Salem. Les peuplements sans gestion ne peuvent pas être pris en compte. Le module SALEM est couplé au module SIMMEM, qui permet de passer à l'échelle du massif, en gérant simultanément un grand nombre de parcelles (cf. paragraphe 4.1).

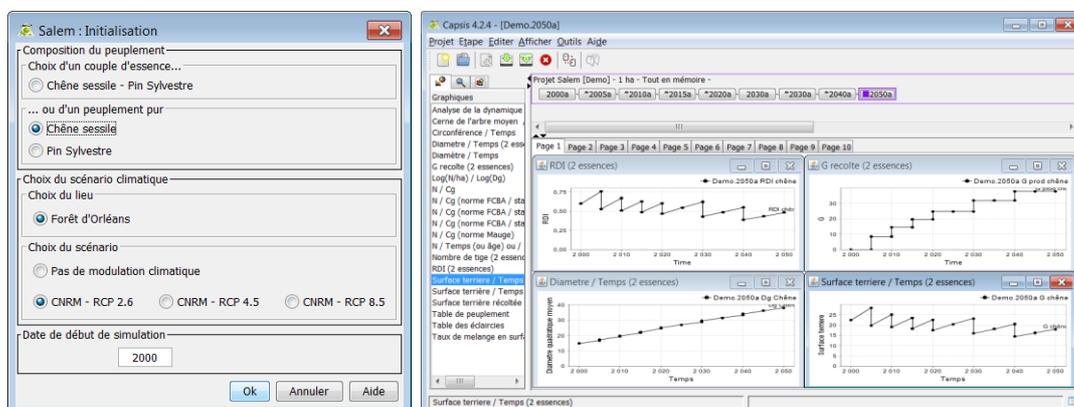


Figure 2.5.1 : Captures d'écran du module SALEM implémenté dans la plateforme CAPSIS

### 3. Scénarios sylvicoles et climatiques

Dans le cadre du projet SATAN, la tâche 3 a pour objectif de décrire en détail la diversité des itinéraires sylvicoles et des usages du bois dans le territoire de la forêt d'Orléans qui constitue les scénarios de base. A cette échelle locale, nous analysons également les problèmes comme les points forts de la filière forêt-bois qui peuvent faire évoluer les scénarios dans le cadre d'une recherche d'une meilleure adaptation et atténuation. Ces scénarios seront utilisés dans la tâche 4 du projet.

#### 3.1. Scénarios sylvicoles

Les scénarios sylvicoles sur le massif d'Orléans pour la simulation dans le projet SATAN sont issus du travail de Charles Trouvé, apprenti ingénieur en deuxième année à l'AgroParisTech. Le rapport est présenté en annexe 3A.

##### 3.1.1. Scénarios de base

Le scénario de base de la gestion forestière sur le massif de l'Orléanais est constitué par une diversité d'itinéraires sylvicoles : 11 en forêt publique, 4 en forêt privée, présentés dans la figure 3.1.1.

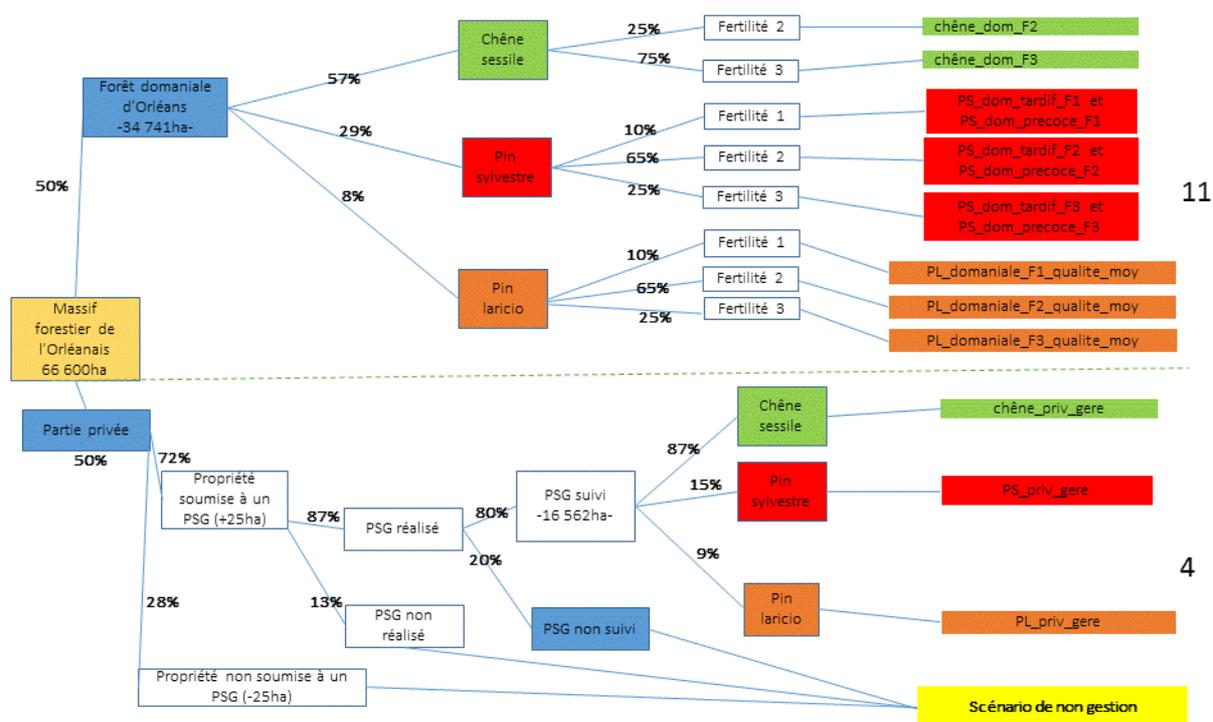


Figure 3.1.1 : Synthèse des itinéraires sylvicoles actuels

Pour pouvoir correspondre au modèle de croissance SALEM développé dans la tâche 2, seuls des itinéraires en futaie régulière ont été définis sur les trois essences principales du massif : le chêne sessile, le pin sylvestre et le pin laricio. Les taillis, les futaies irrégulières, qui représentent des surfaces importantes sur le massif de l'Orléanais, n'ont donc pas été pris en compte dans notre proposition de scénarios. Les scénarios de non gestion ne peuvent pas être simulés par SALEM à l'heure actuelle (des travaux sont en cours pour intégrer la mortalité, indispensable à prendre en compte pour ces scénarios). Ils sont exclus de la zone étudiée (mais ne participent pas non plus à la provision de bois).

Les informations sont issues d'une synthèse des documents de référence : inventaire IGN, aménagements forestiers, Schéma régional de gestion sylvicole, guides sylvicoles ONF, fiches essences du CRPF... Des entretiens avec des experts ONF et avec un membre du CRPF ont permis de synthétiser la problématique de la gestion forestière sur le massif d'Orléans.

### 3.1.1.1. *En forêt domaniale*

La forêt publique, qui représente la moitié de la surface forestière de la zone d'étude, est découpée en 5 massifs : Orléans, Ingrannes, Lorris-Châteauneuf, Lorris-Les-Bordes et les séries d'intérêt écologique (SIE). Chacun de ces massifs possède son propre aménagement (ONF, 2002, 2005, 2006, 2007 et 2008) qui couvre une période de 20 ans et se termine entre 2021 et 2027 selon les massifs.

L'objectif principal de ces 5 aménagements est la production forestière. Pour cela, les itinéraires sylvicoles que suivent les gestionnaires s'appuient sur les guides de sylviculture de l'ONF, spécifiques par essence (Jarret, 2004 ; Chabaud et Nicolas, 2009). Globalement, les aménagements et les guides de sylviculture sont cohérents mais ces derniers donnent des recommandations de la sylviculture à plus long terme.

La sylviculture de chêne sessile (essence dominante à 57 % des surfaces de la forêt domaniale d'Orléans) cherche à produire du bois de qualité « merrain » avec un diamètre moyen de 65 à 75 cm sur environ 190 ans. Selon les experts de l'ONF, cette sylviculture est contrainte par une fertilité faible (dominance de la classe de fertilité 3, la plus faible, à 75 %), une production en volume de bois inférieure à ce qui a été définie dans le guide et une régénération naturelle plus longue (environ 15 ans de régénération).

La forêt domaniale d'Orléans présente des potentialités de production de bois résineux assez intéressantes (dominance de la fertilité moyenne classe de fertilité 2 à 65 %, contre 10% à fertilité 1 et 25% à fertilité 3). Pour le pin sylvestre (29 % des surfaces), l'objectif est de produire 45-50 cm de diamètre d'exploitabilité sur 80-95 ans en moyenne. Les experts pensent qu'il serait plus adapté de diminuer l'intensité de prélèvement lors de la 1ère éclaircie et de maintenir un nombre d'arbres plus élevés à la coupe finale par rapport aux itinéraires du guide de sylviculture. Pour le pin laricio (8 % des surfaces), l'objectif est de produire du 45-50 cm de diamètre d'exploitabilité en 60-70ans en moyenne. Selon les experts, le massif d'Orléans est actuellement touché par la maladie des bandes rouge. Cette maladie diminue la croissance des pins laricio et remet en question le renouvellement des peuplements avec cette essence.

D'autres objectifs secondaires existent selon les aménagements des massifs. L'accueil du public et le paysage concernent surtout les massifs d'Orléans et d'Ingrannes. La préservation de l'environnement et la protection de la biodiversité s'appliquent à l'ensemble mais plus particulièrement aux SIE qui sont des zones Natura 2000. Ceci explique que cet aménagement contient un peu plus d'îlots de vieillissement que le reste de la forêt domaniale : 7 % de la surface des SIE contre 1 % en moyenne dans les autres massifs. Mais ces objectifs secondaires ne semblent pas modifier fondamentalement les itinéraires de référence définis ci-dessus.

### 3.1.1.2. *En forêt privée*

Modéliser les forêts privées en forêt d'Orléans est plus complexe que la forêt domaniale car les interlocuteurs sont multiples et les informations sont assez disparates. De plus, à chaque moment le propriétaire privé peut décider de suivre ou non les itinéraires ou de les adapter en fonction de son expérience et de sa situation personnelle.

Nous avons estimé que 63 % de la surface boisée privée de l'Orléanais est réellement gérée. Il s'agit des surfaces appartenant à des propriétés de plus de 25 ha et faisant l'objet d'un suivi des PSG (plan simple de gestion). Dans les simulations, les forêts non gérées ne sont pas prises en compte.

Sur le chêne sessile, les experts forestiers (CRPF et experts privés) ont tendance à conseiller des durées de production plus longues et des diamètres d'exploitabilité plus élevés que les coopératives. On retiendra que sur 55 % des propriétés gérées, le diamètre d'exploitabilité ciblé est de 70 cm en 150-160 ans. Et sur les 45 % autres, on retiendra le diamètre de 60 cm en 140 ans. On observe ainsi que la durée de production du chêne sessile en forêt privée est nettement plus courte qu'en forêt domaniale.

Sur les résineux, il existe plusieurs itinéraires sylvicoles selon la densité initiale de plantation et les travaux sylvicoles préconisés. Nous avons retenu un seul scénario pour le pin sylvestre et le pin laricio d'après les itinéraires recommandés par le CRPF (CRPF Ile-de-France et du Centre, 2005). Dans ces itinéraires, les éclaircies sont pilotées par la hauteur et les objectifs sont d'arriver à des diamètres finaux de 45-50 cm.

### 3.1.2. Scénarios alternatifs d'adaptation

Dans le rapport, nous présentons d'autres pistes de scénarios alternatifs à approfondir : évolution de la répartition en essence par conversion de peuplement vers d'autres essences ou provenances plus adaptées au changement climatique et/ou en augmentant la part de peuplements mélangés, diminution de la densité dans les peuplements, raccourcissement des itinéraires et/ou augmentation des surfaces gérées. Ces scénarios alternatifs sont à la base des scénarios testés dans la tâche 4.

## 3.2. Scénarios d'usage du bois

Les scénarios d'usage du bois pour la modélisation du carbone dans le projet SATAN, sont issus du travail de Constance Proutière, élève ingénieur en deuxième année à l'Agro de Bordeaux. Le rapport est présenté en annexe 3B.

Pour analyser l'usage du bois dans ce territoire, nous avons mené une étude de la filière à une échelle du territoire plus large que la forêt d'Orléans, qui est la région Centre Val de Loire du fait des flux physiques et monétaires entre les départements, les régions et même avec l'international. Le marché du bois ne peut pas être abordé à l'échelle de la forêt d'Orléans.

Les étapes suivies ont été : l'analyse des entreprises présentes sur le territoire en termes de nombre d'entreprises et de salariés, la répartition des volumes de bois utilisés par les différents secteurs d'activité dans la filière et enfin l'analyse des ventes de la direction territoriale Centre Ouest Auvergne Limousin de l'ONF, comme un échantillon des ventes de bois.

### 3.2.1. Scénarios de base

Nous avons rassemblé les statistiques disponibles provenant de plusieurs sources : IGN, Agreste, Arbocentre, DRAAF, rapports et études diverses ...

Au niveau de la récolte de bois, globalement les prélèvements sont inférieurs à l'accroissement naturel de la forêt. Mais depuis 2009, la récolte de bois a tendance à augmenter. Les quantités de bois d'œuvre et de bois d'industrie récoltées restent stables mais les récoltes de bois énergie progressent (sans prise en compte de l'estimation de la part auto consommée). En 2015, près de 2 millions de m<sup>3</sup> de bois ont été récoltés en région Centre - Val de Loire (Agreste 2017) plus environ 1 million de m<sup>3</sup> d'autoconsommation (Arbocentre, 2016). 54 % de la récolte en région Centre Val de Loire est cependant transformé en dehors de la région. Par ailleurs, les industries du bois ne s'approvisionnent pas exclusivement par du bois provenant de la région Centre Val de Loire. Ceci est un élément à considérer dans l'analyse du carbone.

A partir de là, nous avons construit des schémas de flux de volumes de la forêt vers la 1<sup>ère</sup> transformation puis la 2<sup>ème</sup> transformation et jusqu'à la fin de vie par type de produits : bois d'œuvre de chêne, bois d'œuvre de résineux, bois industrie et bois énergie (Figure 3.2.1 à 3.2.4). Ces flux de volume (méthode expliquée dans la 2<sup>ème</sup> partie du rapport de stage de Constance Proutière) vont alimenter le modèle Carbon Accounting Tool du LERFOB. Néanmoins, les estimations de quantités de volume de production sont quasi-inexistantes à partir de la 2<sup>ème</sup> transformation.

### 3.2.1.1. Bois d'œuvre de chêne

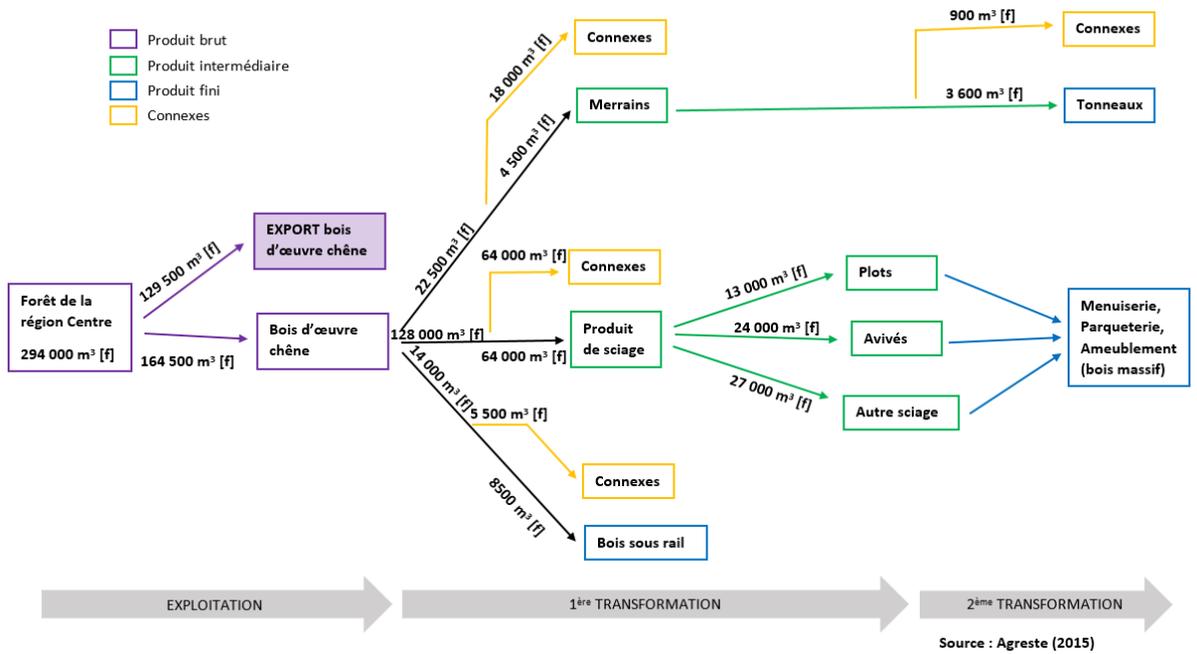


Figure 3.2.1 : Schématisation de la filière bois d'œuvre de chêne en région Centre Val de Loire

### 3.2.1.2. Bois d'œuvre résineux

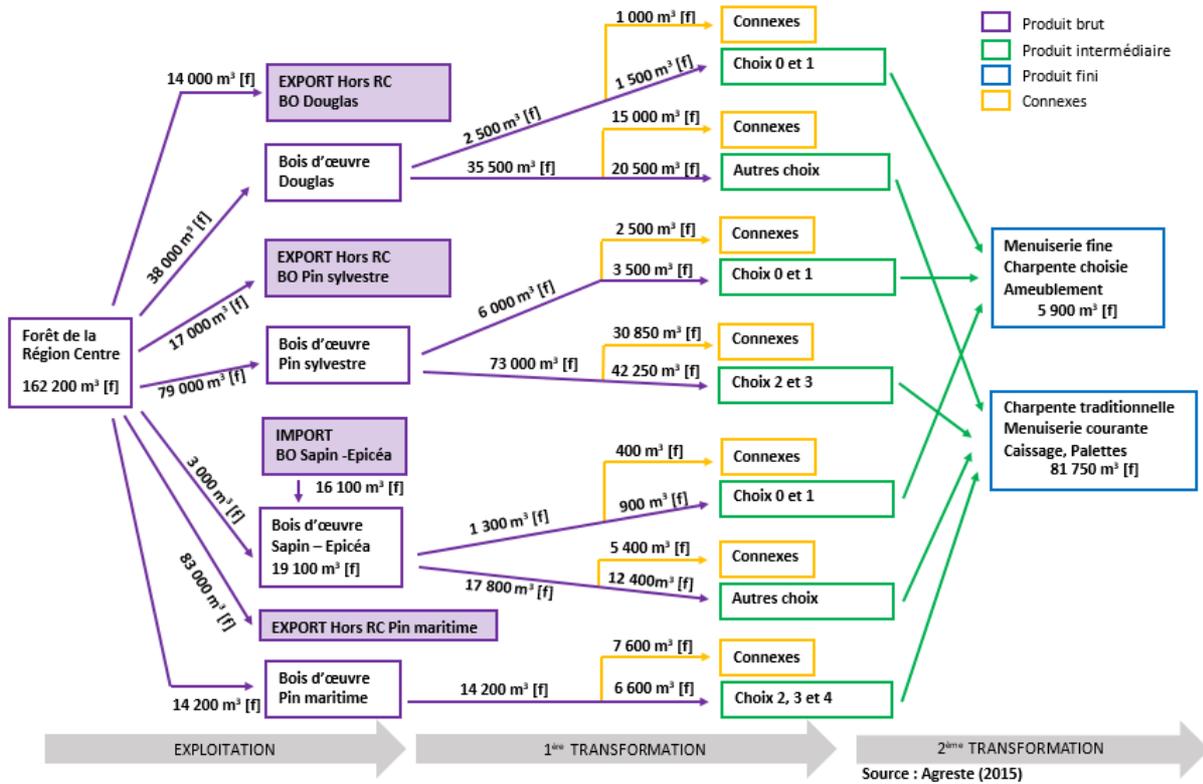
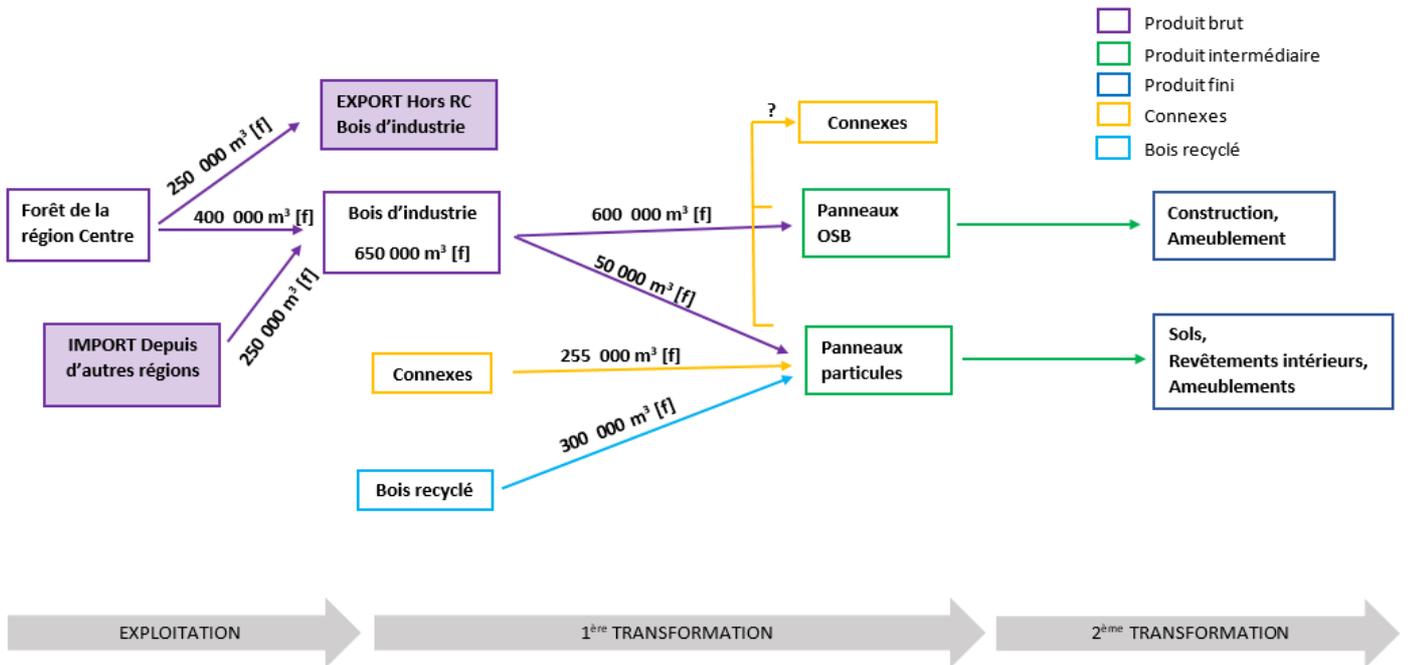


Figure 3.2.2 : Schématisation de la filière bois d'œuvre résineux en région Centre Val de Loire

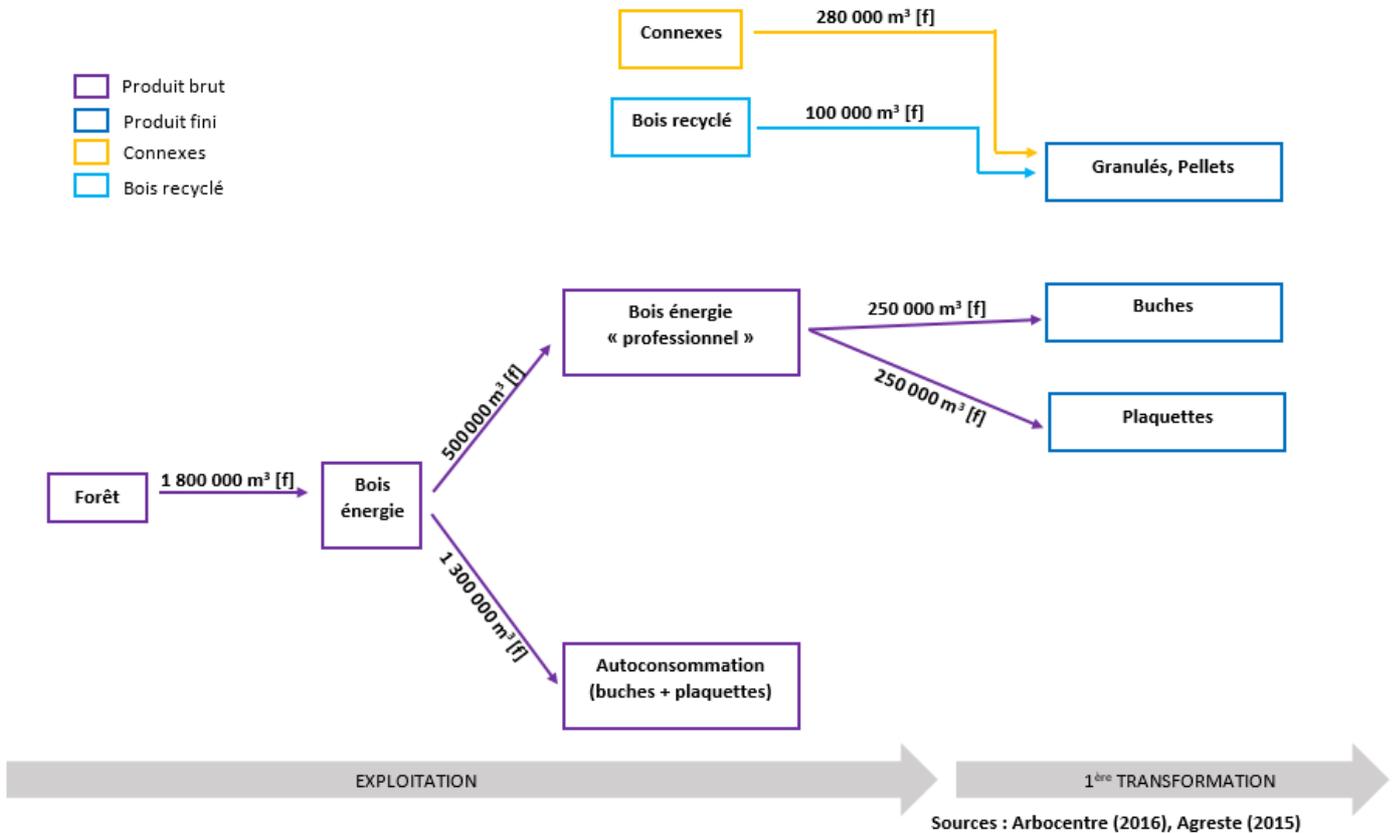
### 3.2.1.3. Bois industrie



Source : Agreste (2015), Groupement Gallileo (2011)

Figure 3.2.3 : Schématisation de la filière bois industrie en région Centre Val de Loire

### 3.2.1.4. Bois énergie



Sources : Arbocentre (2016), Agreste (2015)

Figure 3.2.4 : Schématisation de la filière « bois énergie » en région Centre Val de Loire

### 3.2.1.5. Contexte économique de la filière forêt-bois et quelques évolutions en cours

La filière forêt-bois possède un poids économique important en termes d'emplois locaux et de tissu industriel : plus 19 000 emplois et environ 2 300 entreprises en 2016 dans la région Centre Val de Loire (Arbocentre, 2016).

Le marché du bois rond (entre la forêt et la 1<sup>ère</sup> transformation) est cependant assez différent selon les produits. Le bois d'œuvre de chêne sessile est un produit phare du point de vue économique dans ce territoire avec des prix de vente élevés et un marché dynamique (taux d'inventus faibles, demande élevée...). A l'inverse, le bois d'œuvre de résineux présente des taux d'inventus élevés et des prix moyens assez faibles. Ceci vient de plusieurs facteurs mais on peut citer en particulier les difficultés auxquelles fait face la 1<sup>ère</sup> transformation (les entreprises de travaux forestiers et les scieries) : une mécanisation peu importante, un nombre d'entreprises insuffisant et qui continue à diminuer et des entreprises qui réalisent peu de marge.

La 2<sup>ème</sup> transformation est assez dispersée et connaît une évolution très hétérogène. Les secteurs de l'ameublement et de la menuiserie, qui sont surtout constitués de petites entreprises valorisant le bois d'œuvre de feuillus ont tendance à diminuer. A contrario, le secteur de la construction de maison se développe mais la part du bois dans les constructions est inconnue à l'échelle régionale. On ne connaît pas non plus l'évolution des volumes dans ce secteur. Ceci est dû à l'absence de statistique sur cette information mais également du fait de la diversité des matériaux de construction et de la provenance du bois (bois d'origine des autres régions, d'autres pays).

Les secteurs des panneaux et du bois énergie semblent également évoluer positivement permettant une valorisation des petits bois et des bois moyens. Enfin, le recyclage du bois semble encore être faible et composé majoritairement par les connexes de scierie.

### 3.2.2. Scénarios alternatifs d'atténuation

Des incertitudes existent sur les évolutions de l'usage du bois dans la région Centre – Val de Loire. En effet, un certain nombre d'acteurs de la région comme l'Arbocentre, le CRPF, l'ONF ainsi que d'autres acteurs mènent des actions pour faire évoluer la filière. Leurs projets visent à :

- Développer les marchés et l'utilisation de bois locaux
- Appuyer les projets de développement des entreprises
- Mobiliser plus de bois dans le cadre de la réduction des émissions GES d'origine fossile
- Animer et renforcer la cohésion de la filière

Certains objectifs chiffrés ont été estimés d'ici 2018 comme une augmentation des volumes de sciage de 30 000 m<sup>3</sup>/an et une hausse des logements en bois de 600 logements par an. Les différents moyens de parvenir à ces objectifs sont variés et consistent en général à multiplier les moyens d'actions et de communications entre les secteurs afin que toute la filière puisse se développer au même rythme. Enfin, il reste sans doute des possibilités d'augmenter le recyclage du bois.

Néanmoins la faisabilité et la plausibilité des scénarios d'atténuation du changement climatique restent à étudier du fait des difficultés actuelles des entreprises évoquées ci-dessus.

## 4. Simulations à l'échelle du territoire

### 4.1. Description générale de la démarche

L'objectif général du projet Satan est d'évaluer l'influence de stratégies sylvicoles d'adaptation au changement climatique sur l'atténuation du changement climatique que les espaces forestiers réalisent (i.e. stockage de carbone, émissions fossiles évitées par l'utilisation accrue du bois), à l'échelle d'un grand territoire sur un horizon de 50 ans, soit jusqu'en 2070. En raison de contraintes de modélisation (absence de modèle de mortalité à l'heure actuelle), les stratégies étudiées portent sur les surfaces forestières actuellement gérées. Les simulations ont été réalisées sous la trajectoire climatique RCP 8.5 telle que définie par le GIEC (2013, Ch. 12). Parmi les stratégies de gestion possibles, trois sont étudiées dans ce projet sont :

- la réduction du capital sur pied par des éclaircies plus intenses ;
- la réduction de la longueur des révolutions forestières ;
- la conversion d'une partie des peuplements de chêne en résineux (pin sylvestre en l'occurrence) car sur certaines stations, les essences de pins semblent mieux adaptées et seront donc a priori plus résistantes au stress hydrique.

Plus spécifiquement, nous avons voulu tester quatre scénarios :

- Un scénario dit « **business as usual** » où la sylviculture demeure ce qu'elle est actuellement en forêts publiques et privées, comme décrite dans le paragraphe 3.1. Il s'agit du scénario de référence ;
- Un scénario de **forêt claire** où les peuplements sont gérés selon une densité de 20 % inférieure à celle du scénario business as usual sur l'ensemble de la révolution. L'objectif est de limiter la consommation en eau, et de maintenir un niveau hydrique supérieur pour les arbres restants. Dans ce scénario, les diamètres objectifs restent les mêmes, mais sont obtenus plus rapidement ;
- Un scénario de **diminution des diamètres objectifs** (ou **petits bois**) où les diamètres objectifs sont de 20 % inférieurs à ceux du scénario business as usual, dans l'objectif de raccourcir les révolutions, et de limiter ainsi les risques de perte en capital ;
- Un scénario de **conversion** où les peuplements de chêne sur les sites les moins fertiles sont progressivement convertis en peuplement de pin sylvestre.

Ces scénarios correspondent soit à un objectif de limitation de la consommation en eau, comme le scénario « forêt claire » (cf. chapitre 1.4), soit à des scénarios envisagés par les gestionnaires (cf. chapitre 3).

Les peuplements retenus pour la conversion sont ceux dont l'indice de fertilité (au sens de la fertilité du modèle Salem, c'est-à-dire un accroissement maximal en surface terrière) était dans les 30 rangs percentiles les plus faibles. La conversion n'est opérée qu'au moment où le peuplement subit une coupe finale. À terme, la conversion toucherait environ 17% de la surface simulée (voir section 4.2f). L'indice de fertilité pour les peuplements convertis a été fixé à 60, ce qui est légèrement inférieur à la moyenne des indices de fertilité observés sur le territoire d'étude (voir figure 4.2.6).

Pour simuler ces scénarios à l'échelle du territoire, plusieurs étapes sont nécessaires. Le schéma 4.1.1 ci-dessous les synthétise.

Les données d'entrée sont une description spatialisée de zones homogènes de la forêt d'Orléans. À partir de ces données, les 5 grandes étapes suivantes sont réalisées. Elles sont schématisées dans la figure 4.1.1.

- ① Une première étape de discrétisation est nécessaire pour obtenir des unités de gestion correspondant au grain géographique de la simulation. Les opérations sylvicoles s'appliquent à cette échelle-là.
- ② Une fois le territoire discrétisé, chaque unité de gestion doit être initialisée, ce qui signifie qu'il faut lui affecter des caractéristiques initiales, notamment dendrométriques et de fertilité. Pour cette étape, nous avons analysé les données brutes des placettes de terrain de l'IFN de 2005 à 2013 pour la zone étudiée, et modélisé les distributions des valeurs d'intérêt (fertilité, diamètre, densité).
- ③ La dynamique forestière de chaque unité de gestion est ensuite simulée grâce au modèle Salem, développé dans le lot 2 du projet Satan et présenté en chapitre 2. Le simulateur Simmem permet de gérer simultanément les simulations de toutes les unités de gestion. Simmem permet également à l'utilisateur de définir les règles sylvicoles correspondant aux scénarios d'aménagement du territoire.

L'évolution de la dynamique avec Salem est réalisée pour toutes les parcelles, et pour autant de pas de temps que nécessaire. Le pas de temps de Salem est de trois ans.

- ④ Pour chaque pas de temps, un état dendrométrique de chacun des peuplements est disponible en sortie de Salem. Des étapes de downscaling ont été construites pour reconstituer des histogrammes d'arbres à partir des données de niveau peuplement. Ces sorties permettent d'alimenter l'outil CAT (Carbon Accounting Tool, Pichancourt et al. 2018), qui permet de décrire les flux et stocks de bois de différents usages issus des récoltes sur la zone étudiée. La filière est décrite dans CAT grâce aux analyses réalisées présentées dans le chapitre 3. Sa déclinaison pour les simulations est présentée dans le chapitre 4.3.
- ⑤ Le rendement des procédés de combustion ont été modélisés dans la plate-forme Aspen et ont été intégrés dans CAT de façon à pouvoir prédire le rendement énergétique à l'échelle du territoire.

Les étapes ① et ② sont des étapes d'initialisation. Elles sont décrites dans la section 4.2 ci-dessous. L'étape ③, appliquée à chaque unité de gestion pour chaque pas de simulation, est réalisée avec le modèle Salem décrit en détail dans le chapitre 2 de ce rapport. Les étapes ④ et ⑤ sont décrites dans les sections 4.3 à 4.6 ci-dessous.

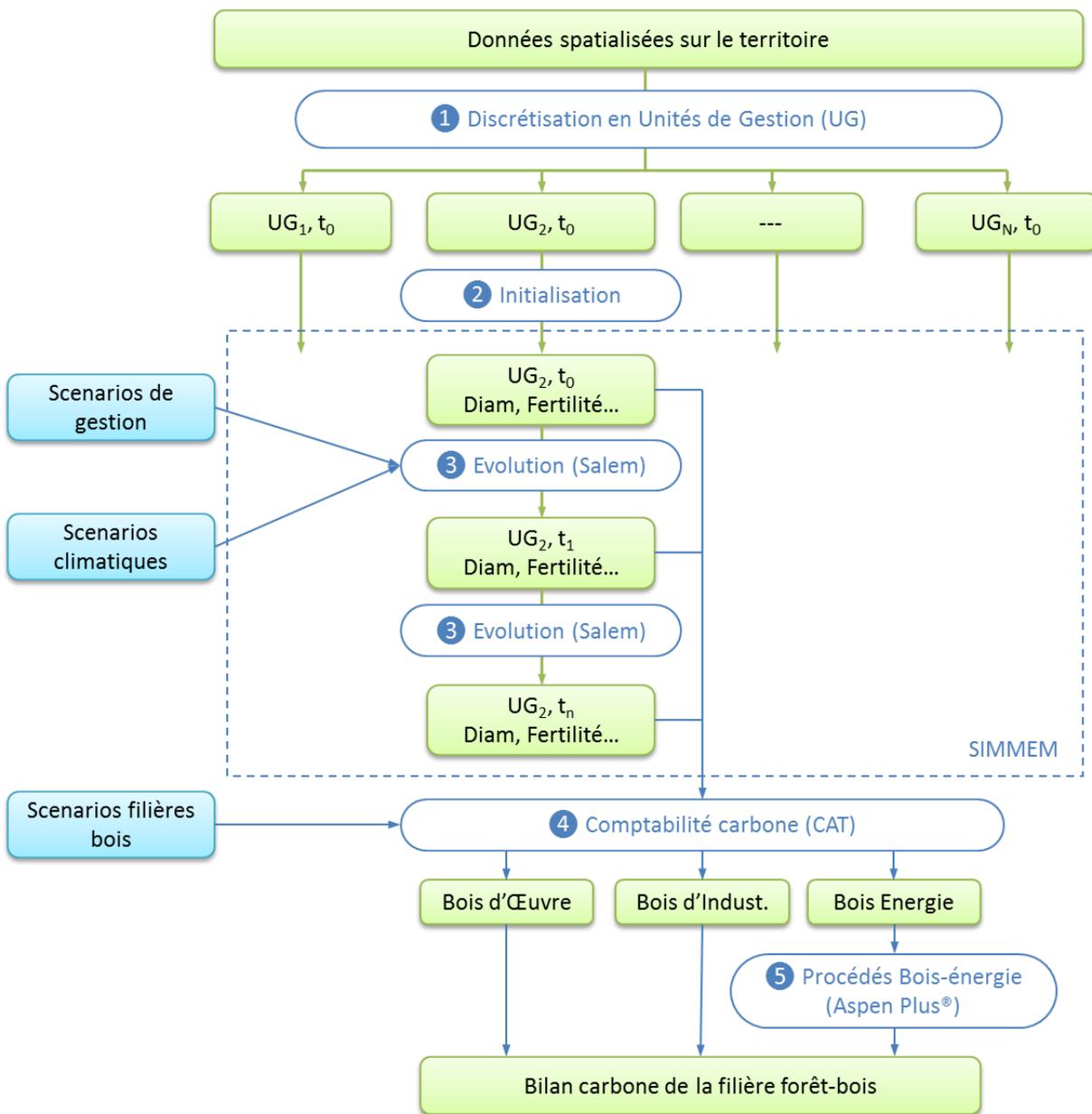


Figure 4.1.1 : Schéma présentant la succession des étapes pour réaliser les simulations

## 4.2. Initialisation du territoire

### a - Définition du parcellaire

Les simulations réalisées dans le projet Satan portent sur la région forestière « Orléanaise » telle que définie par l'IGN dans la « BD Forêt V1 » (photos aériennes de 2001). La carte de la figure 4.2.1 représente des polygones pour lesquels la zone forestière est considérée homogène lors de la photo interprétation de l'IGN.

Nous avons utilisé cette information en entrée pour deux raisons. D'une part, elle est exhaustive, et permet donc de prendre en compte l'ensemble du territoire étudié. D'autre part, elle est réalisée de manière homogène, et ainsi ne génère pas de disparités entre les différentes parties de la zone d'étude. En particulier, nous n'avons pas utilisé le parcellaire ONF, qui bien que plus détaillé pour les forêts publiques, aurait généré une information différenciée entre forêts publiques et privées.

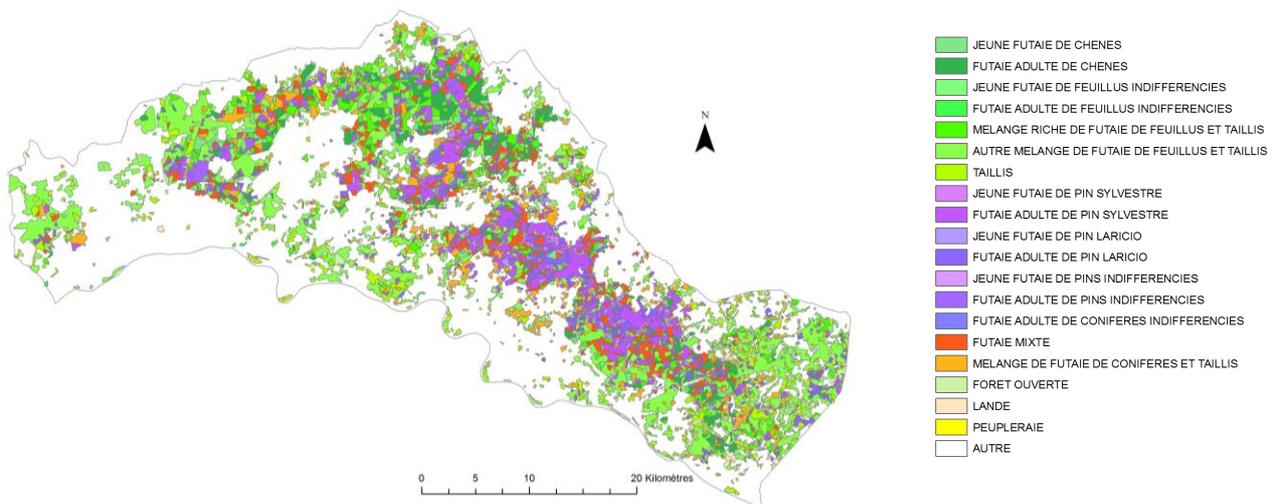


Figure 4.2.1 : Zone d'étude du projet SATAN. Région forestière « Orléanaise » de l'IGN

La réalisation des simulations nécessite la constitution d'une scène initiale. Le grain du simulateur SIMMEM est l'unité de gestion, sur laquelle les opérations sylvicoles sont simulées pour correspondre au scénario défini par l'utilisateur. Or les polygones correspondant aux zones homogènes photo interprétées par l'IGN ont des tailles largement supérieures aux unités de gestion. Le plus grand polygone de la zone d'étude a une surface de plus de 1700 hectares. Traiter une telle surface comme une unité homogène générerait des phénomènes de seuil, notamment lorsqu'elle passerait en coupe de régénération.

Un algorithme de découpe des parcelles a été construit dans un précédent projet (ANR FORGECO), et une interface graphique est désormais disponible. Cet outil a été utilisé ici. Les parcelles d'une surface supérieure à celle définie par l'utilisateur sont découpées horizontalement ou verticalement suivant la plus grande des deux dimensions. Pour le projet Satan, nous avons choisi comme taille maximale de parcelle 30 ha dans le cas des parcelles publiques, et 20 hectares pour les parcelles privées. La figure 4.2.2 illustre l'étape de discrétisation du territoire d'étude. Nous obtenons au final un parcellaire de 5830 peuplements.

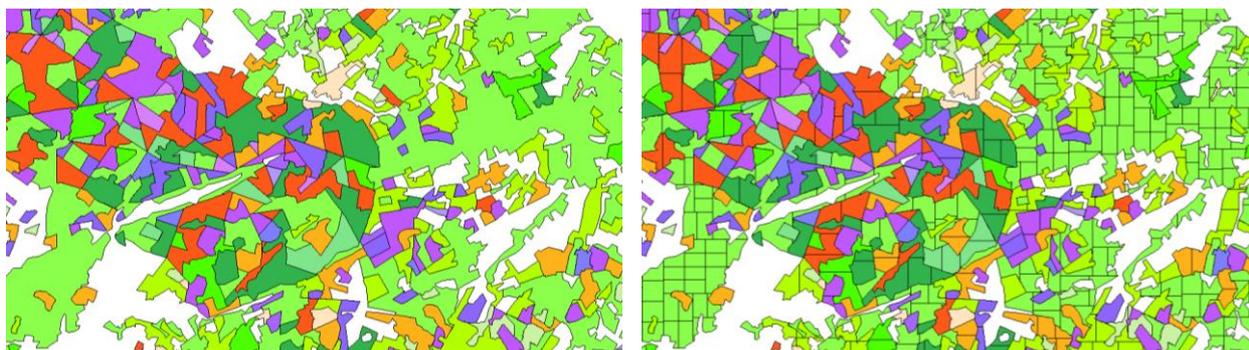


Figure 4.2.2 : Exemple d'une partie du massif des Bordes (Sud-Est de l'Orléanais) avant et après le redécoupage des parcelles

### b - Affectation d'un modèle à chaque parcelle

Les peuplements de la zone orléanais sont majoritairement constitués de chênes (surtout sessile) et de pins (surtout sylvestre). Pour les simulations, les peuplements définis par l'IFN comme étant majoritairement de chênes ou de feuillus sont simulés avec le module Salem « Chêne sessile », ceux de pins avec le module Salem « Pin sylvestre », et les peuplements mélangés avec le module Salem « Chêne sessile – Pin sylvestre ». Le tableau 4.2.3 ci-dessous indique la correspondance entre les types identifiés par l'IFN et le module choisi pour les simulations.

Code IFN	Libellé IFN	Modèle Associé	Surface (ha)	% du total
30	Forêt ouverte	Non simulé	829	1.1
40	Lande	Non simulé	558	0.8
50	Peupleraie	Non simulé	115	0.2
AAA	Futaie adulte de chênes	Salem chêne sess.	5320	7.2
AAJ	Jeune futaie de chênes	Salem chêne sess.	3003	4.1
AFA	Futaie adulte de feuillus indifférenciés	Salem chêne sess.	111	0.2
AFJ	Jeune futaie de feuillus indifférenciés	Salem chêne sess.	18	0.0
HFW	Autre mélange de futaie de feuillus et taillis	Salem chêne sess.	24312	33.0
HFZ	Mélange riche de futaie de feuillus et taillis	Salem chêne sess.	5209	7.1
QF	Taillis	Salem chêne sess.	5451	7.4
FR	Futaie mixte	Salem chêne sess. – Pin sylv.	6553	8.9
MR	Mélange de futaie de conifères et taillis	Salem chêne sess. – Pin sylv.	6168	8.4
CNA	Futaie adulte de pin laricio	Salem Pinsylv.	3739	5.1
CNJ	Jeune futaie de pin laricio	Salem Pin sylv.	753	1.0
CPA	Futaie adulte de pins indifférenciés	Salem Pin sylv.	988	1.3
CPJ	Jeune futaie de pins indifférenciés	Salem Pin sylv.	130	0.2
CRA	Futaie adulte de conifères indifférenciés	Salem Pin sylv.	287	0.4
CSA	Futaie adulte de pin sylvestre	Salem Pin sylv.	9446	12.8
CSJ	Jeune futaie de pin sylvestre	Salem Pin sylv.	793	1.1

Tableau 4.2.3 : Correspondance entre les types de peuplements issus de la photo-interprétation de l'IFN et les modules utilisés pour les simulations. Les surfaces correspondantes sont également indiquées

### c - Affectation d'une fertilité à chaque parcelle

Une fertilité au sens du modèle SALEM (accroissement maximal en surface terrière, cf. paragraphe 2.1) doit être affectée à chacune des 5830 parcelles, or nous ne la connaissons que pour les placettes de mesure sur le terrain de l'IFN. Les fertilités de ces points sont aléatoirement distribuées sur la forêt d'Orléans. Nous avons alors affecté à chaque parcelle une fertilité tirée dans la distribution des fertilités observées sur les placettes de mesure IFN. Cette distribution est modélisée par une loi normale dont les paramètres sont indiqués dans le tableau 4.2.4. Il s'agit de la fertilité SALEM, c'est-à-dire le potentiel de croissance tel que défini dans la section 2.1 de ce rapport. On observe statistiquement deux distributions différentes pour le chêne en pur et en mélange, alors qu'on n'a qu'une seule distribution pour le pin, indépendamment de sa composition.

	Composition	Loi	Moyenne	Ecart-type
Chêne	Pur	Normale	30.47	1.45
	Mélange	Normale	29.46	1.87
Pin	Pur et mélange	Normale	63.86	3.79

Tableau 4.2.4 : Paramètres des lois de distributions de fertilité SALEM pour le chêne et le pin en forêt d'Orléans. Il s'agit du potentiel de croissance (fonction f1 du modèle principal de Salem, présenté dans le chapitre 2), et non d'une hauteur dominante à un âge de référence.

Pour les mélanges, on a observé une faible corrélation entre les potentiels du chêne et du pin. Celle-ci est négligée.

Les figures 4.2.5 et 4.2.6 illustrent les résultats du modèle de distribution pour le chêne et pour le pin (en densité ou en fréquence). On remarque que la fertilité de la zone Orléanaise pour le chêne sessile est assez faible par rapport à la ressource nationale (Figure 4.2.5), alors qu'elle est plutôt élevée pour le pin sylvestre (Figure 4.2.6).

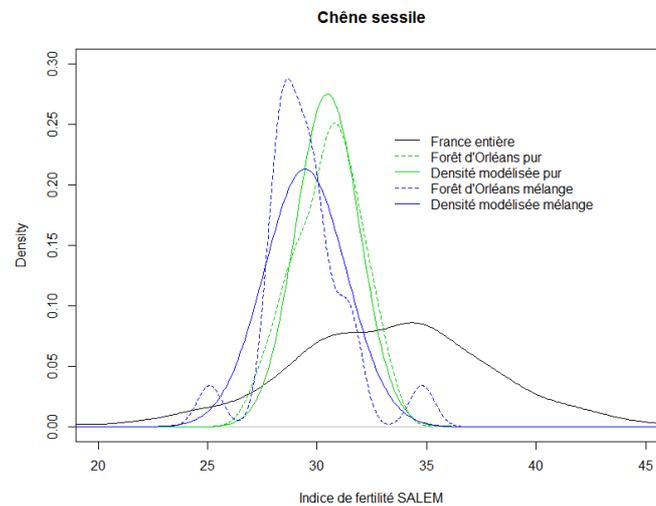


Figure 4.2.5 : Densité de la distribution des indices de fertilité SALEM pour le chêne sessile de la forêt d'Orléans, en peuplement pur (en vert) ou en mélange (en bleu)

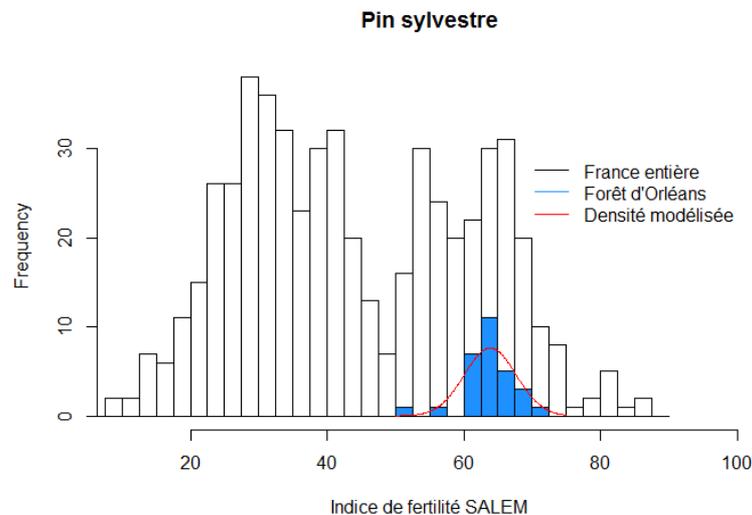


Figure 4.2.6 : Distribution en fréquence des indices de fertilité SALEM pour le pin sylvestre pour la France entière (noir), et pour la forêt d'Orléans (en bleu)

#### d - Affectation d'un diamètre quadratique moyen à chaque parcelle

La première étape a été de construire une correspondance entre les placettes de terrain observées par l'IFN, et les données photo-interprétées. En particulier, les types IFN sont la plupart du temps classés en peuplements « jeunes » ou « adultes » (cf. tableau 4.2.3 ci-dessus). A titre d'exemple, les peuplements purs de pins sylvestre sont différenciés en deux classes : « Futaie adulte de pin sylvestre » ou « Jeune futaie de pin sylvestre ». Nous avons alors calculé la proportion des surfaces de peuplements « jeunes » et « adultes » d'après ces polygones. Les placettes de terrain de l'IFN étant positionnées sur une maille systématique, nous les avons alors réparties en « jeunes » et « adultes » au prorata de leur nombre, en fonction de leur diamètre quadratique moyen. Le tableau 4.2.7 fournit les pourcentages observés en groupant selon le modèle de Salem utilisé (chêne, pin, ou mélange).

Essence principale	Jeune	Adulte	Indifférencié	% de jeunes
Chênes	32783	10641		75.5
Mélange			12721	
Pins	1676	14460		10.4
Total général	34459	25101	12721	57.9

Tableau 4.2.7 : Répartition de la zone d'étude en surface (ha) par classe de maturité pour les peuplements à dominante de chênes, de pins, ou de mélange

Nous avons analysé les données des placettes de terrain de l'IFN pour connaître leur distribution en diamètre. Cependant, l'IFN a un seuil de pré-comptage des arbres à 7.5 cm de diamètre. En-deçà de ce diamètre seuil, les arbres ne sont pas mesurés. Dans une approche à l'échelle du territoire comme celle du projet Satan, il convient de prendre en compte cet aspect pour ne pas négliger les stages jeunes qui composent le renouvellement de la forêt. Les placettes IFN classées comme « non recensables » ont alors été incluses dans les peuplements jeunes. D'après le tableau 4.2.7, 75.5% des placettes sont de type « jeunes ». Nous leur affectons alors des diamètres tirés dans la distribution des 75.5% de placettes de terrain ayant les plus petits diamètres quadratiques de l'IFN, incluant les peuplements dont les arbres ne sont pas recensables.

Pour le chêne sessile, les distributions de diamètre sont modélisées par une loi de Weibull ( $\lambda=36.70$ ,  $K=2.33$ ). Nous utilisons ensuite cette loi de Weibull pour tirer aléatoirement les diamètres pour chaque parcelle. On utilise le ratio de surface entre les peuplements jeunes (75.5%) et adultes (24.5%) pour équilibrer les tirages dans cette loi.

Pour le pin sylvestre, la distribution des diamètres est ne suit pas une forme simple comme pour le chêne sessile. Nous avons alors plus simplement fait un tirage directement dans les valeurs de la distribution observée dans les données IFN. La figure 4.2.8 donne à titre d'exemple le résultat de la distribution des diamètres pour l'ensemble des parcelles de pins dans la scène finale construite.

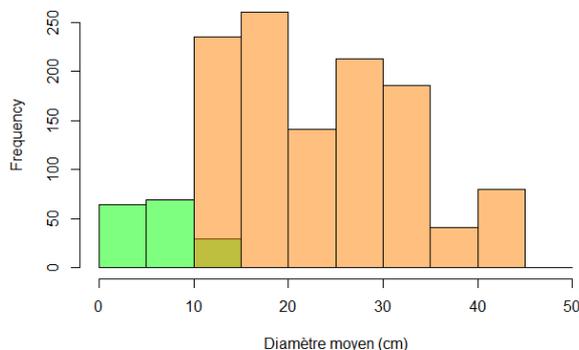


Figure 4.2.8 : Histogramme des diamètres de pins simulés lors de la phase d'initialisation. En vert, les peuplements « jeunes », en orange les peuplements « adultes »

### e - Affectation d'une densité de peuplement à chaque parcelle

De la même manière que pour la fertilité ou les diamètres, la densité du peuplement (en RDI) a été modélisée. Elle est identique pour les chênes et les pins. Elle est également indépendante du stade de développement (en RDI). Nous avons ajusté une distribution normale, de paramètres ( $m=0.540$ ,  $\sigma=0.257$ ) sur les données brutes IFN de la zone (Figure 4.2.9).

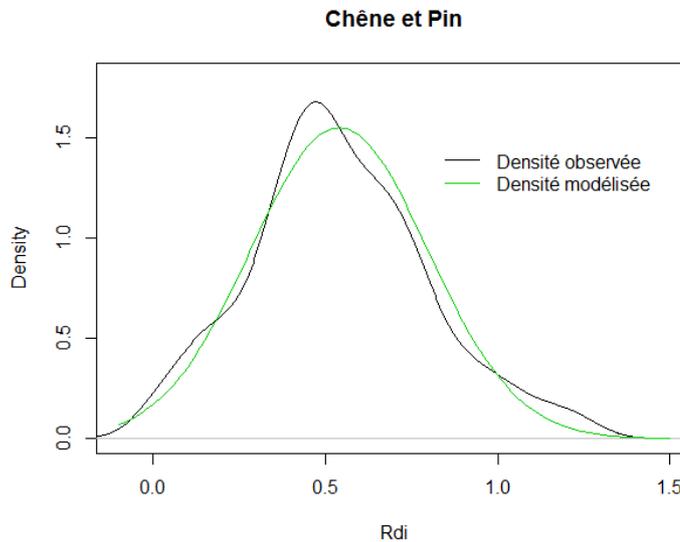


Figure 4.2.9 : Densité de distribution des RDI observée et modélisée pour la zone d'étude

Nous avons ensuite affecté aux peuplements de la scène initiale des densités tirées dans cette loi de distribution. Si les densités étaient supérieures à 1 ou inférieures à 0 pour une parcelle donnée, un nouveau tirage a été réalisé.

### f - Sélection des parcelles gérées

Compte tenu des contraintes de modélisation, notre domaine d'étude était limité aux forêts gérées. La scène initiale comprenait des parcelles localisées en forêt publique et d'autres en forêt privée. Environ la moitié des forêts privées sont actuellement sous gestion. Il nous était impossible de savoir quelles étaient les parcelles en forêt privée qui étaient gérées. Nous avons donc retenu la moitié des parcelles en forêt privée auxquelles s'ajoutent toutes celles en forêt publique.

Au total, ce sont 3823 parcelles qui ont été simulées pour une surface de 51 916 ha. De ces 3823 parcelles,

- 2173 étaient des parcelles de chêne;
- 977 étaient des parcelles de pin;
- 673 étaient des parcelles de mélange.

### 4.3. Modélisation de la filière et de la matière organique morte dans CAT

Les flux de la filière ont été présentés pour différentes branches de la filière dans la section 3.2. Ces différentes branches ont été combinées et intégrées dans CAT à l'aide du gestionnaire de flux. Une représentation de la filière dans son ensemble est présentée à la figure 4.3.1. Cette représentation de la filière est disponible sur le site web de CAT pour un chargement dans Capsis. Chaque carré de la figure 4.3.1 représente un processus de la filière et ceux en bleus sont des processus qui génèrent des produits finis. Ces processus de produits finis permettent aussi de définir des facteurs de substitution propres à chaque produit. Dans le cas présent, nous avons utilisé des facteurs de substitution issus d'études antérieures (Petersen Raymer 2006; Petersen et Solberg 2005). Ces facteurs sont présentés dans le tableau 4.3.2.

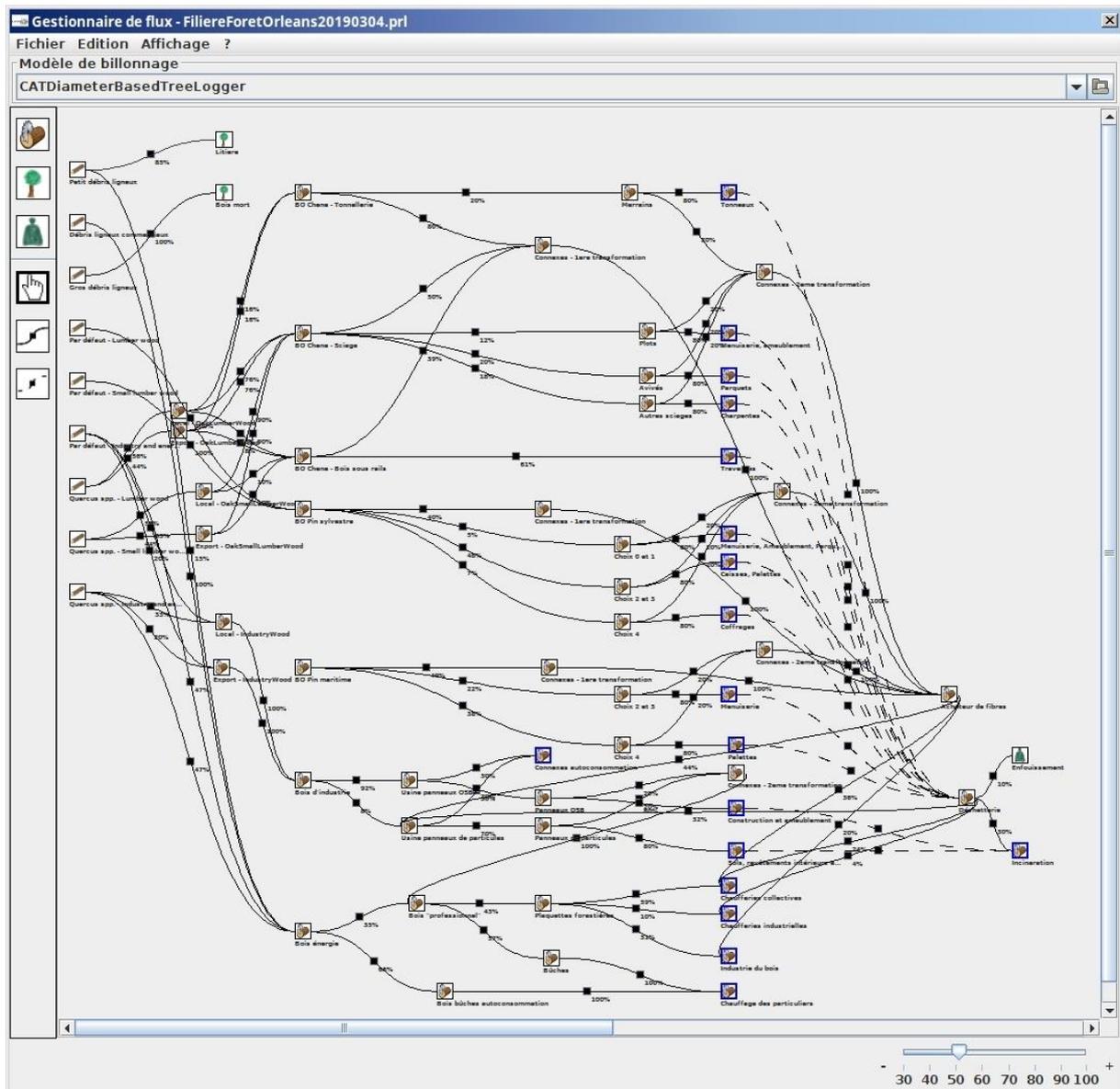


Figure 4.3.1 : Représentation des flux dans la filière. Chaque boîte représente un processus. Les boîtes en bleu sont celles qui génèrent des produits finis

Les processus situés à la gauche représentent des billons de différentes catégories basées sur le diamètre des arbres. Selon son diamètre, un arbre peut produire une certaine quantité de bois d'œuvre (BO), de petit bois d'œuvre (petit BO) et de bois d'industrie et d'énergie (BIBE) d'un arbre. Cette quantité est estimée comme une proportion du volume commercial de l'arbre. Nous avons utilisé la relation mise au point dans Colin et al. (2009, p. 15) pour déterminer la proportion de BO, petit BO et BIBE dans chaque arbre en fonction de son

diamètre. Cette méthode permet de déterminer le potentiel de BO. En pratique, une certaine proportion des arbres dont les dimensions permettent de produire du bois d'œuvre n'ont pas la qualité nécessaire en raison de défauts mécaniques ou esthétiques. Une défalcation est donc nécessaire. Après comparaison avec d'autres études (Arbocentre 2018) et quelques simulations préliminaires, ce sont 15 % des volumes de BO potentiel qui sont défalcqués en BIBE.

Tableau 4.3.2 - Produits finis avec leurs durées de vie moyennes et leurs facteurs de substitution par espèces.

Espèce	Produits	Durée de vie moyenne (années)	Unité fonctionnelle (Mg)	Substitution (Mg CO <sub>2</sub> eq./unité fonctionnelle)
Chêne	Tonneaux	4,0	0,488	n/a
	Menuiserie et ameublement	20,0	1,000	0,958
	Parquets	40,0	0,488	0,811
	Charpentes	40,0	0,488	0,811
	Traverses	10,0	0,488	0,841
Pin	Menuiserie, Ameublement, Parquets, Terrasses	20,0	0,488	0,222
	Caisses, Palettes	6,3	0,488	0,535
	Coffrages	10,0	0,488	0,841
Chêne/pin	Panneaux OSB pour construction et ameublement	20,0	0,488	0,222
	Panneaux de particule pour sols, revêtements intérieurs et ameublements	20,0	0,488	0,222
	Bois énergie en chaufferies collectives	1,7	0,510	0,464
	Bois énergie en chaufferies industrielles	1,7	0,510	0,471
	Bois énergie - plaquettes	1,7	0,510	0,471
	Bois énergie - bois bûche	1,7	0,510	0,310

Il est à noter que CAT ne considère pas l'aspect économique de la filière. C'est en fait la forêt qui génère le bois et le pousse littéralement dans la filière. Ainsi, les changements observés entre les scénarios ne représentent pas de contextes économiques différents, mais plutôt des bois de dimensions différentes.

La configuration des flux présentée à la figure 4.3.1 comprend également des flux vers la litière et le bois mort. Nous avons posé l'hypothèse que 15% des houppiers des arbres coupés étaient récoltés à des fins de production de bois bûches, les 85% restants intégrant la litière. Dans le cas des souches, nous avons posé l'hypothèse qu'elles devenaient du bois mort. Nous avons utilisé des durées de vie moyennes de 10 et 32 ans pour la litière et le bois mort, respectivement. Ces valeurs ont été obtenues de la littérature (Boddy et Swift 1984; Zell et al. 2009).

Les stocks de carbone et de biomasse dans produits bois et la matière organique morte contenue dans la litière et dans le bois mort sont actualisés à chaque pas de croissance de la simulation. Cette actualisation suit une loi de probabilité exponentielle dont le paramètre est égal à l'inverse de la durée de vie moyenne (Lawless 2003).

#### 4.4. Analyse environnementale des filières bois-énergie

Les simulations avec l'outil CAT produisent une quantité de bois partant dans la filière bois-énergie, dont le bilan carbone est analysé dans ce chapitre (cf. schéma général 4.1.1).

Ce travail a fait l'objet d'un article dans un journal de haut rang (Applied Energy, impact factor 7.9) qui est présenté en annexe 4. Dans ce paragraphe, nous résumons cet article. Les « supplementary material » ne sont pas fournis dans ce rapport. Ils décrivent plus en détails certaines données et des résultats. Ils sont disponibles sur ce lien : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918317653?via%3Dihub#s0075>

L'unité fonctionnelle pour cet article était le chauffage d'une maison de 100 m<sup>2</sup> (incluant l'eau chaude sanitaire). Les résultats de cette étude sont ensuite ramenés en termes de « kilogramme » de bois anhydre pour les inclure dans l'outil CAT (voir paragraphe 4.3).

La figure 4.4.1 décrit la méthodologie générale adoptée pour ce travail.

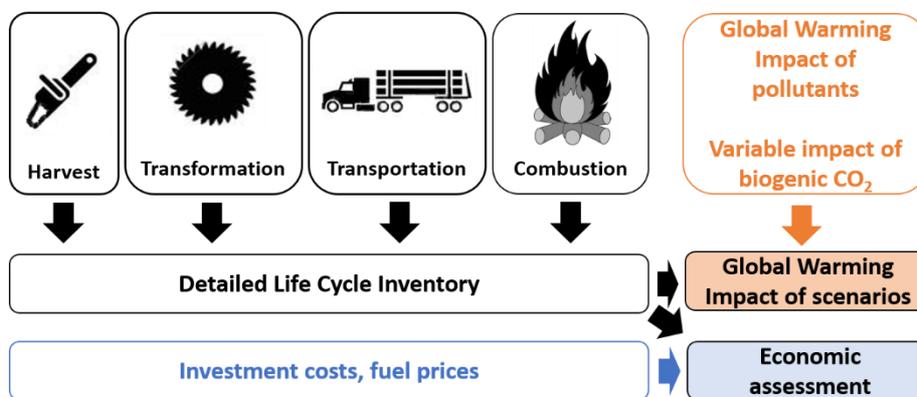


Figure 4.4.1 : Méthodologie générale pour l'étude des filières bois-énergie : analyse environnementale (impact sur le réchauffement climatique) et économique

La première étape de toute analyse environnementale est d'établir un **inventaire du cycle de vie** précis. Cet inventaire consiste en un bilan matière et énergie de la filière considérée. Puis les données de l'inventaire (par exemple des masses de polluant par unité fonctionnelle) sont ensuite traduites en termes **d'impacts environnementaux** (analyse du cycle de vie, avec le logiciel Simapro). Dans cette étude nous avons uniquement considéré l'impact « réchauffement climatique ».

Nous avons également conduit une **analyse technico-économique** des filières bois-énergie à partir de données transmises par EIFER (EDF/KIT).

L'inventaire du cycle de vie a été réalisé à partir de données de la littérature (Pelletier, 2019, pour les parties transport et prétraitement du bois) et d'une modélisation des procédés de combustion.

Nous avons modélisé en détails les procédés de combustion à l'aide du logiciel Aspen Plus®. Aspen Plus® est un logiciel très utilisé pour modéliser tout type de procédés. Il est intéressant car il permet de bien boucler les bilans atomiques (C, H, O pour le bois, minéraux, etc.) et enthalpiques. De plus, ce logiciel est bien adapté pour modéliser les « solides non conventionnels » comme le bois. Cette modélisation est donc la première étape nécessaire pour établir un bilan matière-énergie des filières bois-énergie. Nos modélisations sont suffisamment détaillées pour traiter les émissions de polluants. Ces émissions sont établies à partir de données industrielles présentées dans notre article.

Nous avons considéré les filières représentées sur la figure 4.4.2 :



Figure 4.4.2 : Différentes filières bois-énergie étudiées dans le cadre du projet SATAN

Nous avons étudié :

- 1) différents types de combustibles bois : bûches, plaquettes forestières, granulés, en incluant les besoins énergétiques et rejets de ces prétraitements ;
- 2) différentes distances de transport (20, 50, 150 km) pour les plaquettes forestières ;
- 3) différentes technologies de combustion adaptées aux combustibles bois : poêle individuel à bûches, à granulés, chaudière automatique à plaquettes forestières distribuant la chaleur sur un réseau de chaleur, etc.

Nous avons également considéré des filières fossiles et électriques pour la production de chaleur. Par ailleurs, la combustion du bois ne peut pas toujours couvrir 100% des besoins énergétiques d'une maison car les chaudières bois sont parfois peu flexibles et ne peuvent pas fonctionner à très faibles taux de charge. Nous avons donc également considéré des appoints de chaleur électrique ou gaz en fonction de ces taux de charge (voir la publication Pelletier 2019 pour plus de détails).

La figure 4.4.3 présente les résultats de notre étude en terme d'impact « réchauffement climatique » (« global warming potential », GWP) par unité de chaleur produite (GJ) pour les différentes filières considérées en considérant une neutralité carbone des émissions de CO<sub>2</sub> de la combustion du bois.

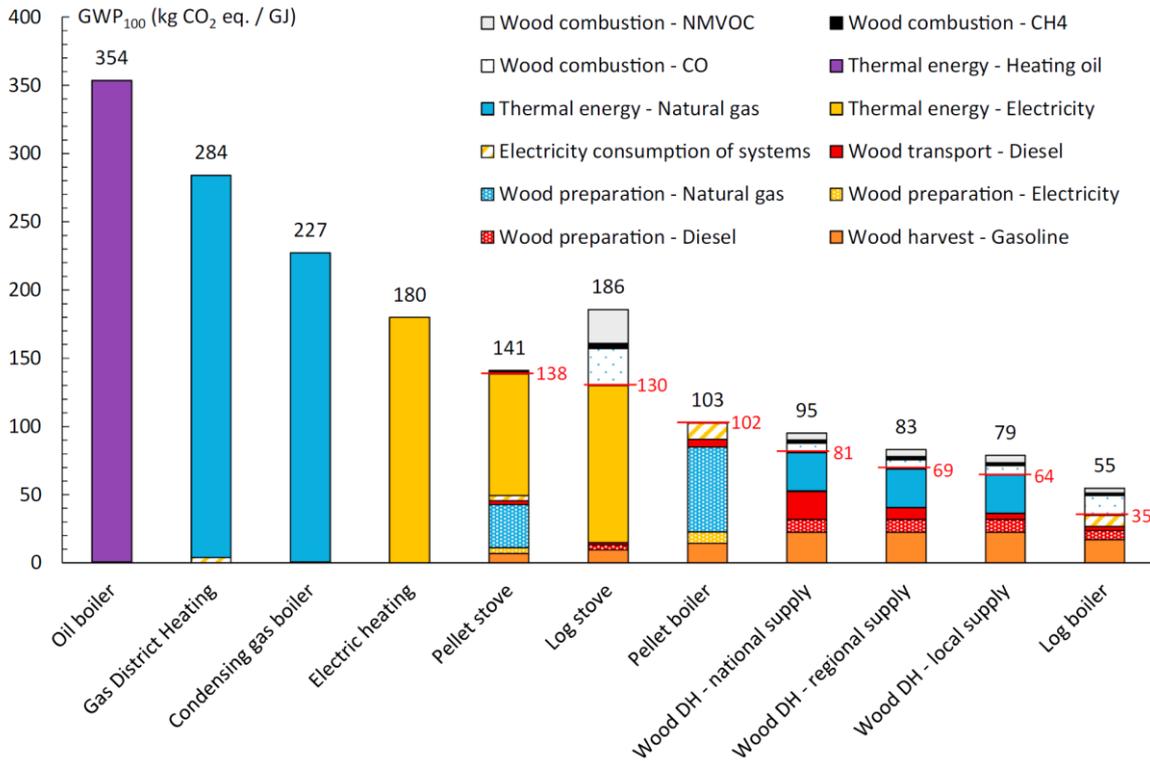


Figure 4.4.3 : Impact réchauffement climatique par unité de chaleur produite pour différentes filières bois-énergie et pour des filières fossiles (fuel et gaz naturel) et électrique (mix électrique Français). Les valeurs en rouge représentent le GWP des scénarios de bois sans la contribution de polluants mineurs comme le CO et les composés organiques volatils non méthaniques

Cette figure présente sur l'axe des abscisses les différentes filières considérées :

- 1) « oil boiler » = chaudière fuel ;
- 2) « gas district heating » = réseau de chaleur collectif avec chaudière au gaz naturel ;
- 3) « condensing gas boiler » = Chaudière à gaz à condensation
- 4) « electric heating » = chauffage individuel électrique ;
- 5) « pellet stove » = poêle à granulés (chauffage direct, pas de réseau d'eau chaude dans la maison), donc avec un besoin de chauffage d'appoint (chauffage électrique) ;
- 6) « log stove » = poêle à bûche (appoint chauffage électrique) ;
- 7) « pellet boiler » = chaudière à granulés (réseau d'eau chaude et radiateurs dans la maison, appoint par chauffage électrique) ;
- 8) « wood DH – national supply » = une chaudière automatique à plaquettes forestières transportées sur 150km, avec un réseau de chaleur collectif et un appoint (chaudière gaz naturel) ;
- 9) Idem mai avec un transport sur 50km ;
- 10) Idem mais avec un transport sur 25km ;
- 11) « log boiler » = chaudière à bûches (réseau d'eau chaude et radiateurs dans la maison, appoint par chauffage électrique).

La figure 4.4.3 présente sur l'axe des ordonnées les contributions à l'impact « réchauffement climatique » des polluants, imbrûlés de la combustion du bois comme le CO, les COV, etc. Notre modélisation détaillée sous Aspen Plus nous permet de décrire avec précision ces polluants. Par exemple, pour les poêles et chaudières à bûches, on peut remarquer l'importante contribution de ces rejets sur l'impact réchauffement climatique car ces technologies de combustion sont moins bien maîtrisées que les appareils de combustion à granulés ou à plaquettes forestières. Ces derniers systèmes rejettent moins de polluants car leur alimentation est bien contrôlée et continue et donc les températures et temps de séjour des fumées sont mieux maîtrisés.

La filière qui augmenterait le moins le réchauffement climatique serait la chaudière bûche (« log boiler ») du fait d'une faible consommation énergétique pour produire les bûches (comparé aux granulés et plaquettes forestières) et grâce à une couverture énergétique améliorée (par le réseau d'eau chaude dans la maison). La distance de transport du bois a un impact non négligeable. Pour les plaquettes forestières, leur transport de 25km (figure 4.4.3, wood DH, local supply) à 150km (figure 4.4.3, wood DH, national supply) représente respectivement 4.2kg CO<sub>2</sub> eq/GJ à 20.6kg CO<sub>2</sub> eq/GJ (soit 20% des 95 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ émis, pour un transport de 150km).

La figure 4.4.3 montre que globalement toutes les filières bois-énergie (sauf le poêle à bois-bûche) présentent un plus faible impact réchauffement climatique que les filières électriques ou fossiles. Mais ce résultat dépend fortement de l'impact réchauffement climatique considéré pour le CO<sub>2</sub> émis durant la combustion du bois. Ici nous avons considéré une parfaite neutralité carbone. C'est-à-dire que les émissions de CO<sub>2</sub> de la combustion sont totalement compensées par l'absorption du CO<sub>2</sub> durant la croissance du bois. Le facteur d'impact « CO<sub>2</sub> biogénique » est alors fixé à 0 kg CO<sub>2</sub> eq/ kg CO<sub>2</sub> stocké dans le bois. Un facteur d'impact converti une donnée physique (par ex. 1 kg de méthane ou de CO<sub>2</sub>) en une mesure commune permettant de ressortir un indicateur numérique (par ex. 20kg CO<sub>2</sub> eq/kg de méthane). Ainsi toutes les substances participant à l'impact « réchauffement climatique » (le méthane, le CO, les COV, etc.) sont converties en « kg équivalent CO<sub>2</sub> ». Mais le carbone « biogénique » (émis sous forme de CO<sub>2</sub> durant la combustion du bois) n'est en réalité pas totalement neutre vis-à-vis du réchauffement climatique. Des études ont montré que son impact « réchauffement climatique » pouvait fortement varier en fonction du mode de sylviculture, de la région considérée, etc.

Nous avons donc étudié l'effet du facteur d'impact « CO<sub>2</sub> biogénique » sur les résultats (figure 4.4.4). Nous l'avons fait varier entre 0 et 0,5 kg CO<sub>2</sub> eq/ kg CO<sub>2</sub> stocké dans le bois. Cette gamme de valeur est discutée et justifiée dans notre article (annexe 4). Une quantification plus précise de ce facteur d'impact pour la forêt d'Orléans n'était pas prévue dans le cadre de ce projet. Elle nécessiterait un travail conséquent avec des climatologues pour étudier l'impact « réchauffement climatique » selon une approche d'analyse du cycle de vie dynamique comme par exemple l'étude conduite par Cherubini et al. (2012). Ces auteurs ont notamment démontré que l'impact réchauffement climatique des filières bois-énergie dépendait du type de bois, de leur mode de sylviculture, du climat local, de l'horizon temporelle considérée (20, 100 ou 500 ans), de l'effet sur l'albedo de la récolte du bois-énergie, etc. La valeur de 0,5 kg CO<sub>2</sub> eq/ kg CO<sub>2</sub> stocké dans le bois est une valeur haute qui intègre l'ensemble de ces aspects (voir l'article en annexe 4).

A 0 kg CO<sub>2</sub> eq/ kg, les résultats considèrent la complète neutralité carbone du CO<sub>2</sub> émis lors de la combustion du bois (même résultats que pour la figure 4.4.3.). On peut remarquer que les filières bois-énergie deviennent beaucoup moins avantageuses en terme d'impact « réchauffement climatique » quand le facteur d'impact augmente de 0 à 0,5 kg CO<sub>2</sub> eq/ kg. L'effet de la distance de transport présenté par les groupes de 3 points pour « wood DH » (=district heating, chaudière collective aux plaquettes) devient beaucoup moins important que l'effet de ce facteur d'impact. La majorité des filières bois-énergie devient même plus impactante que les filières fossiles (sauf pour la chaudière fuel) avec un facteur d'impact de 0,5 kg CO<sub>2</sub> eq/ kg CO<sub>2</sub>.

En termes de coût, la chaudière collective à plaquettes forestières avec réseau de chaleur collectif présenterait le plus faible coût du fait d'une économie d'échelle et du plus faible coût des plaquettes forestières (comparées aux granulés).

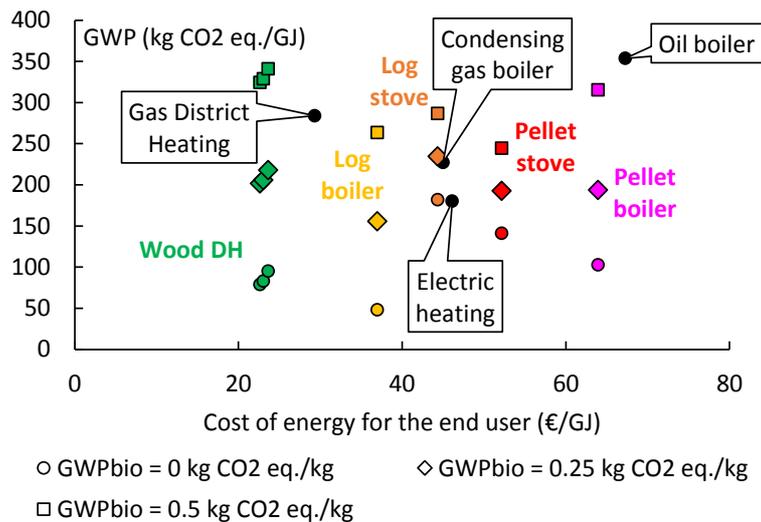


Figure 4.4.4 : Impact réchauffement climatique en fonction du facteur d'impact du CO<sub>2</sub> biogénique (kg CO<sub>2</sub> eq/kg CO<sub>2</sub> stored in wood) et coût

Ces résultats obtenus à l'aide des logiciels Aspen Plus et Simapro ont été ensuite globalisés en terme de kgCO<sub>2</sub> eq./kg de bois anhydre pour l'outil CAT. Pour l'étude ACV de la filière « bois-énergie » nous avons présenté les émissions par kg CO<sub>2</sub> eq/unité de chaleur fournie à l'utilisateur final (GJ). L'outil CAT manipule des masses de bois anhydre. C'est pourquoi nous avons alors traduit ces résultats pour les principales technologies étudiées en terme de kgCO<sub>2</sub> eq./kg de bois anhydre (correspondant à tous les polluants émis par la combustion du bois) et en MWh/kg de bois anhydre. Les résultats d'ACV pour des filières « énergie » sont le plus souvent présentés par unité d'énergie finale. Les résultats d'analyse de filières forêt-bois sont plutôt représentés par unité de kg de bois anhydre (ou par unité de surface comme en partie 4.5.) pour intégrer les différents usages de la forêt (énergie, matériaux et stockage/séquestration).

## 4.5. Résultat des simulations avec le couplage Simmem-CAT

Les scénarios ont été simulés jusqu'en 2073 à partir de la date initiale de 2001 sous l'hypothèse de la trajectoire climatique RCP 8.5. L'évolution des stocks de carbone est présentée sur la figure 4.5.1. Pour les scénarios business as usual (BAU) et conversion, les stocks de carbone dans la biomasse vivante augmentent jusqu'en 2040, puis diminuent très légèrement jusqu'en 2073 (Figure 4.5.1a). Les scénarios de densité réduite et de petits bois (baisse du diamètre objectif) montrent des stocks de carbone dans la biomasse vivante plus faibles que le BAU mais relativement stables dans le temps. Pour l'ensemble des scénarios à l'exception du scénario petits bois (baisse du diamètre objectif), la dernière décennie affiche une légère réduction du stock.

Le scénario de petits bois est celui dans lequel l'accumulation de matière organique morte est la plus faible (Figure 4.5.1b). Le scénario de densité réduite montre une forte accumulation en début de simulation, puis tend à se stabiliser pour atteindre des valeurs légèrement inférieures à celles des scénarios business as usual et conversion. Il convient de souligner que les valeurs nulles au début du scénario sont fictives. En l'absence de données sur ce compartiment, les simulations considèrent que le compartiment est initialement vide alors que dans les faits, la matière organique morte est présente en forêt. La comparaison entre les différents scénarios doit donc se baser sur les valeurs qui sont obtenues lorsque les stocks se stabilisent, soit après 2050. En l'occurrence, on peut affirmer, moyennant toutes les limites aux modèles et dans le contexte orléanais, que les scénarios business as usual et conversion permettent de maintenir des stocks de carbone dans la matière morte et vivante légèrement supérieurs à ceux simulés dans les scénarios de densité réduites et de petits bois.

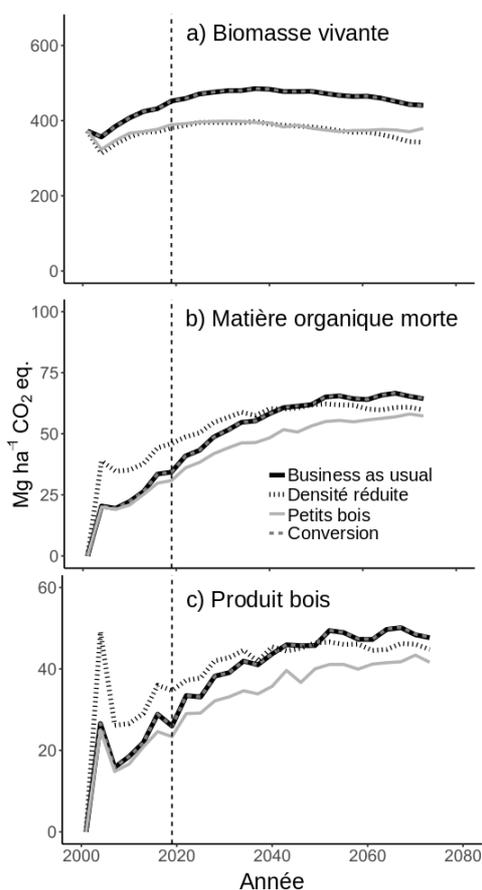


Figure 4.5.1 : Evolution des stocks de carbone en CO<sub>2</sub> équivalent dans les différents compartiments sous l'hypothèse de la trajectoire climatique RCP 8.5. La ligne pointillée verticale indique l'année 2019

Les stocks de carbone dans les produits du bois suivent des tendances similaires à ceux de la matière organique morte (Figure 4.5.1c). Les valeurs nulles en début d'horizon sont dues à une absence de données sur ce compartiment. Après stabilisation des stocks vers 2050, on constate que les scénarios business as usual et conversion maintiennent un stock de carbone total dans la biomasse vivante, la matière organique morte et dans les produits bois un peu plus élevé (environ  $550 \text{ Mg ha}^{-1}$  de  $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ ) que ceux simulés dans les scénarios de densité réduite ( $480 \text{ Mg ha}^{-1}$  de  $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ ) et de petits bois ( $450 \text{ Mg ha}^{-1}$  de  $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ ).

La substitution cumulative de carburant fossile par l'utilisation de bois énergie montre des valeurs plus élevées pour le scénario de densité réduite (Figure 4.5.2). En fin d'horizon, les scénarios business as usual et conversion affichent des substitutions cumulatives qui s'approchent de celles du scénario de densité réduite. Finalement, le scénario de petits bois est celui pour lequel la substitution cumulative est la plus faible.

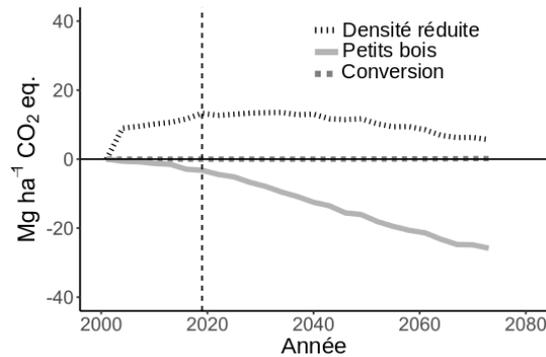


Figure 4.5.2. Substitution cumulative par rapport au scénario business-as-usual. La ligne de référence montre une substitution cumulative équivalente à celle du scénario business-as-usual.

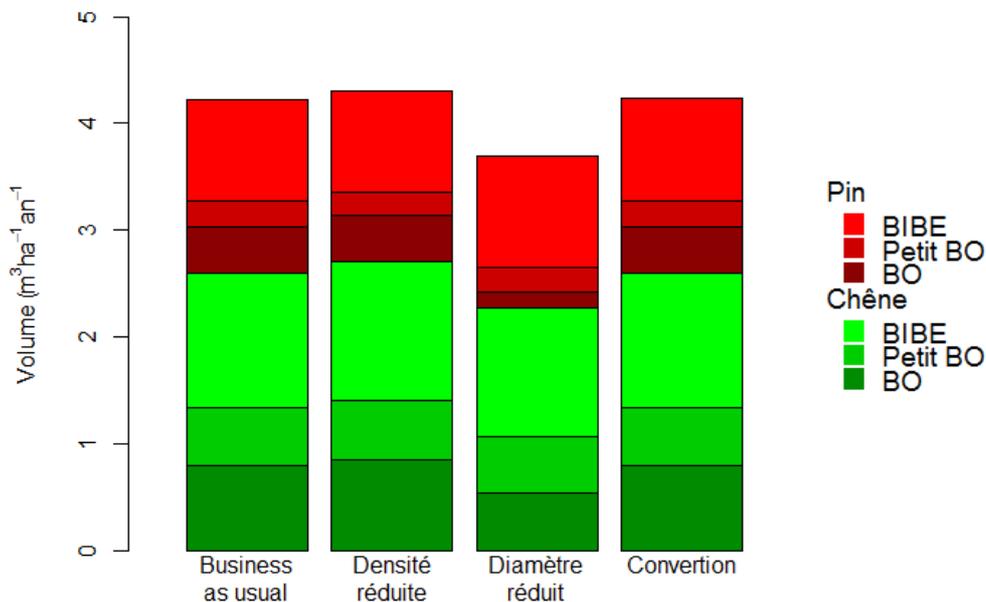


Figure 4.5.3 : Ventilation de la récolte annuelle moyenne au cours de l'horizon de simulation par catégorie de billon et par espèce. BIBE: bois d'industrie et bois énergie, BO: bois d'œuvre

Les moyennes des volumes récoltés annuellement sont présentées à la figure 4.5.3. Pour le chêne, tous les scénarios affichent des valeurs légèrement supérieures à  $2,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , à l'exception du scénario de petits bois pour lequel la récolte est légèrement inférieure à cette valeur. Pour le pin, la récolte annuelle moyenne est légèrement supérieure à  $1,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , à l'exception du scénario avec une baisse de 20 % des diamètres objectifs appelés « petits bois ». Dans tous les cas, le bois d'industrie et le bois énergie comptent pour au moins la moitié du volume récolté. Les proportions de BI et BE dans le groupe BIBE sont respectivement de 53 et 47%.

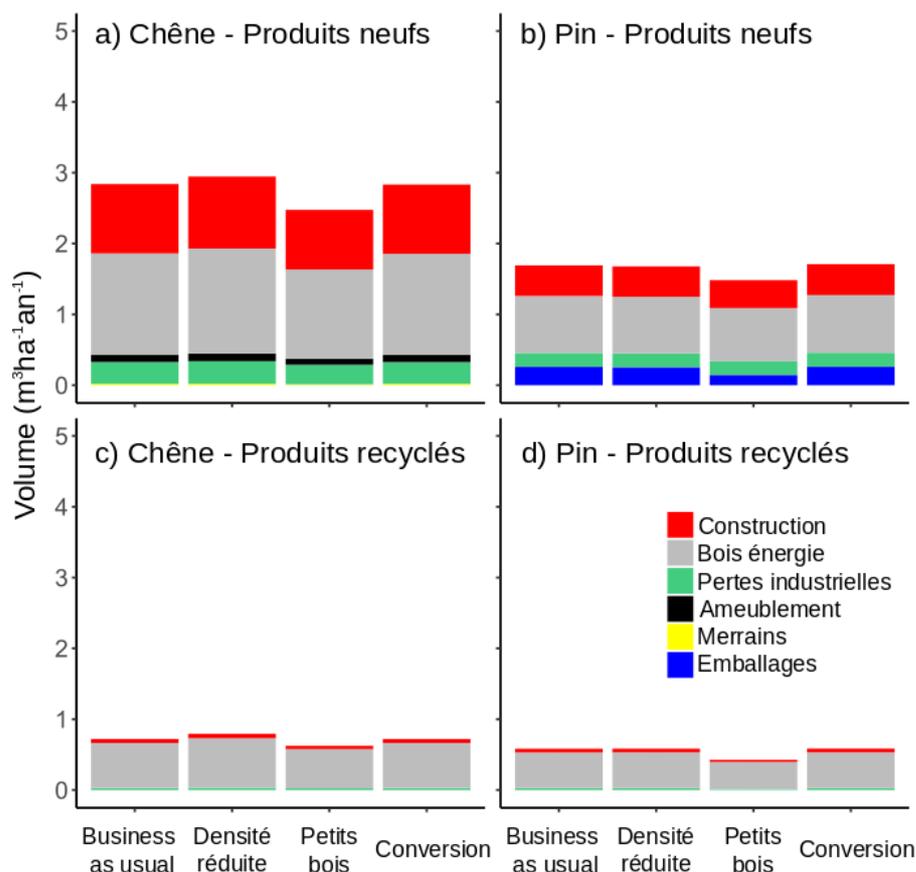


Figure 4.5.4 : Production annuelle moyenne de produits neufs et recyclés

La production annuelle moyenne de produits neufs et recyclés est présentée à la figure 4.5.4. Sous réserve de non modification des taux de recyclage actuel au cours des 70 ans, dans les deux cas la tendance observée est similaire à celle des volumes récoltés : les scénarios business as usual, de conversion et de densité réduite produisent plus que le scénario de petits bois. Le bois énergie compte pour au moins la moitié des produits neufs et plus de 90 % des produits recyclés.

La production énergétique de chaque scénario est présentée à la figure 4.5.5. Le patron observé correspond à celui de la substitution (Figure 4.5.2). Le scénario de densité réduite, de conversion et business as usual affichent les productions énergétiques les plus élevées, avec des valeurs supérieures à  $460 \text{ MWh ha}^{-1}$ . En comparaison, le scénario de petits bois atteint une production énergétique d'un peu plus de  $400 \text{ MWh ha}^{-1}$ .

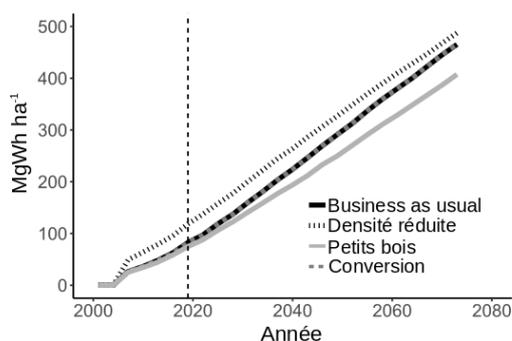


Figure 4.5.5 : Production cumulative d'énergie en fonction du scénario de gestion

## 4.6. Bilan de la filière intégrée

Parmi les quatre scénarios simulés, il ressort que le scénario dit de « petits bois » (abaissement du diamètre objectif de 20%) est celui qui affiche le bilan de carbone le moins appréciable. Il maintient des stocks de carbone dans la matière organique morte et dans les produits bois qui sont moins élevés que ceux des autres scénarios (Figure 4.5.1b,c). Il affiche des stocks de carbone dans la biomasse vivante qui sont semblables à ceux du scénario de densité réduite lesquels sont déjà nettement plus faibles que les stocks simulés dans les scénarios de conversion et business as usual. Comme la récolte en volume est plus faible, le scénario de petits bois génèrent moins de produits bois et donc moins de substitution et moins d'énergie.

Comparé au scénario de référence (BAU), le scénario de densité réduite (abaissement de la densité de 20%) engendre une forte récolte dans les premières années ce qui génère plus de produits bois, plus de substitution et plus d'énergie au début de l'horizon de simulation. Toutefois ce gain s'amenuise en fin d'horizon. Par ailleurs, la décapitalisation du volume sur pied entraîne une baisse des stocks dans la biomasse vivante qui ne se résorbe pas en fin d'horizon et qui n'est pas compensée par les gains dans les autres compartiments.

Finalement, les effets de la conversion sont à peu près négligeables sur l'horizon de simulation. Il importe de souligner que ce sont seulement 30 % des peuplements de chêne qui sont convertis et que la conversion n'intervient qu'après la coupe finale des peuplements actuels. Or la forêt d'Orléans est composée majoritairement par des jeunes peuplements. Par ailleurs, dans les premières décennies après la coupe finale, la croissance des deux espèces n'est pas drastiquement différente. En somme, il faudrait une stratégie de conversion beaucoup plus importante et un horizon de simulation plus long pour en apprécier les effets. A long terme, on peut penser que la conversion vers le pin pourrait être bénéfique en matière de séquestration de carbone dans la biomasse vivante. En effet, la croissance du pin est plus rapide et même si sa densité est plus faible que celle du chêne, la biomasse totale pourrait atteindre des valeurs plus élevées lors de la première révolution. Il est toutefois possible que cette stratégie soit perdante à long terme comme l'ont démontré Vallet et al. (2009), les coupes finales étant réalisées plus tôt, pendant que le chêne continue à stocker du carbone.

## 4.7. Limites des simulations

Les limites de nos simulations sont étroitement liées aux limites des différentes étapes qui composent la chaîne de modèles. En ce qui concerne le modèle de croissance, bien que Salem tienne compte des scénarios RCP de changement climatique, il ne permet pas d'évaluer totalement l'effet du changement climatique sur la forêt. En effet, les effets du stress hydrique sur la mortalité ne sont pas pris en compte dans les simulations. Seules les tendances du climat sur la productivité le sont. Les effets de stress hydrique sur la mortalité sont plus susceptibles d'affecter les scénarios business as usual et conversion puisque les densités  $y$  sont les plus élevées. Les résultats des simulations permettent de montrer l'influence qu'auraient ces trois stratégies d'adaptation de la forêt en climat changeant sur l'atténuation du changement climatique, plutôt qu'une recherche du scénario optimal.

Ensuite, une limite importante de nos résultats provient du fait que les structures et les compositions forestières du massif Orléanais sont plus complexes que celles pour lesquelles le modèle Salem est calibré. En effet, bien que ce massif soit majoritairement composé de futaies régulières de chêne sessile, de pin sylvestre, ou de mélange de ces deux espèces, ce ne sont pas les seules situations forestières du massif. Or, pour une approche à l'échelle du territoire, il est nécessaire d'avoir un bilan complet des surfaces de production. Nous avons alors réduit la diversité du massif à ces trois types de structures forestières. En particulier, nous avons simulé l'ensemble des futaies de pins laricio avec le modèle pin sylvestre (futaie régulière, 6.1% du territoire), de même que l'ensemble des futaies de pin indifférenciés (1.5%) et des futaies d'autres résineux (0.4%). De même, toutes les futaies d'autres feuillus que le chêne ont été simulées avec le modèle chêne (0.2%). Enfin, la structure n'est pas nécessairement de type futaie régulière. En particulier, une large part du territoire est classée par l'IGN en « mélange riche de futaie de feuillus et taillis » (7.1%) ou en « autre mélange de futaie de feuillus et taillis » (33%). L'effet de la structure est donc négligé lorsqu'on simule ces peuplements avec un modèle de type futaie régulière. Néanmoins, pour une approche à l'échelle du territoire, nous avons considéré que l'effet de la structure était d'une magnitude faible. Le module Salem est évolutif, et de nouveaux types de

structures et de nouvelles compositions de peuplements sont en cours d'intégration, qui pourront être mobilisées dans les études ultérieures.

Une autre limite de nos analyses est l'absence d'une analyse économique à long terme au niveau des itinéraires selon les acteurs, et leur capacité d'investissement. Un prolongement futur à tester serait de comparer les coûts des solutions d'adaptation à l'échelle de la parcelle ou de la forêt, aux impacts potentiels sur la valeur de la production bois, la valeur du carbone et la valeur de l'ensemble des services écosystémiques (accueil du public, paysage, biodiversité etc.).

L'outil CAT permet de simuler une filière. Nous faisons l'hypothèse forte que cette filière reste immuable tout au long de l'horizon de simulation. Cependant, les données provenant du territoire montrent que des évolutions socio-économiques et techniques sont en train de modifier légèrement la filière : augmentation de la demande en construction bois, développement des chauffages en réseau collectif... Par ailleurs, la première transformation y compris l'exploitation forestière traverse des difficultés économiques importantes. La répartition des produits bois a été conditionnée par la dimension des arbres récoltés et non pas par le marché. Or, on peut penser que de nouveaux produits bois ou des technologies de transformation de produits bois plus performantes feront leur apparition au cours de l'horizon de simulation au détriment d'autres produits plus classiques. Cette limite a été soulignée par Pichancourt et al. (2018) mais aucune étude prospective dans ce sens et à cette échelle existe actuellement. Une version de CAT permettant des mutations de la filière est actuellement en développement.

Concernant la modélisation des filières bois-énergie, notre modèle ne prend pas en compte l'évolution du type de bois (essence, vitesse de croissance, etc.) sur la formation des polluants. Le plus simple pour intégrer ces aspects serait de réaliser les essais et d'inclure les émissions réelles et les rendements dans notre modèle Aspen Plus pour chaque cas.

## 5. Conclusions

Dans un contexte où les changements environnementaux pourraient exacerber l'effet des stress hydriques, on peut envisager des scénarios d'adaptation comme celui de réduire les diamètres objectifs (objectif de minimiser les risques de perte du capital) ou de gérer les peuplements à des densités plus faibles que les niveaux actuels (objectif de maintenir un niveau de ressource hydrique supérieur pour les arbres restants). Il s'agit d'un exercice théorique qui ne prend pas en compte d'autres facteurs tels que la qualité des bois, la concurrence du sous-étage, ou la déstabilisation des peuplements qui pourraient accompagner les baisses de densité, notamment en forêt publique (cf. chapitre 3 et annexe 3A). Notre étude montre que la diminution des diamètres objectifs mène à un bilan carbone (biomasse + produits bois + substitution) nettement moins bon que celui qui serait obtenu sous une gestion comparable à celle qui est actuellement faite dans les peuplements de chêne et de pin de l'Orléanais. Alors que les scénarios business as usual et de conversion affichent en 2073 des stocks de carbone totaux de 550 Mg ha<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> eq. dans la biomasse vivante, la matière organique morte et dans les produits bois, le scénario de baisse du diamètre objectif n'atteint que 450 Mg ha<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> eq. Le scénario de densité réduite est légèrement plus performant avec un total de 480 Mg ha<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> eq. à l'horizon 2073.

Toutefois, une gestion basée sur la diminution des densités pourrait atténuer les stress hydriques à court et moyen termes tout en générant plus de produits bois et une plus grande substitution d'énergie fossile (figure 4.5.1c et figure 4.5.2). Cette plus grande disponibilité en produits bois et cette plus grande substitution tendent à se résorber après 2040 à moins que les stress hydriques plus fréquents n'entraînent une forte diminution de la croissance dans les peuplements plus denses. Par ailleurs, une gestion basée sur la diminution des densités entraîne une réduction des stocks de carbone dans la biomasse vivante qui ne pourrait être observée dans le scénario business as usual que si les stress hydriques induits par le réchauffement climatique entraînaient une mortalité importante, et donc des décapitalisation massive de carbone dans la végétation. L'impact d'une mortalité accrue liée au stress hydrique dans les simulations à long terme mériterait d'être approfondi.

Enfin, nous nous sommes concentrés sur trois stratégies d'adaptation parmi d'autres. En effet, par rapport au changement climatique, plusieurs autres stratégies sont envisagées, comme d'augmenter les mélanges (limiter les risques liés aux problèmes phytosanitaires), substituer certaines essences par des essences et provenances mieux adaptés aux futures stations, ou diminuer l'exposition aux risques (protéger les sols par des cloisonnements, travailler contre le risque incendie...).

Ce projet a obtenu **des résultats intéressants dans chacune de ses parties** : influence de la sylviculture sur les stress hydriques (chap. 1), construction de modèles de croissance climat-dépendants (chap. 2), analyse des scénarios sylvicoles et du contexte économique de la filière dans l'Orléanais (chap. 3), modélisation de la filière et analyse environnementale des filières bois-énergie (chap. 4). Mais **de manière plus globale, nous avons montré la possibilité de construire une chaîne de traitement intégrant tous ces éléments, pour comparer l'influence de stratégies sylvicoles d'adaptation sur l'atténuation du changement climatique à l'échelle d'un grand massif forestier** (figure 4.1.1). Malgré toutes les incertitudes liées aux différentes analyses et aux simplifications nécessaires pour utiliser les modèles à l'échelle d'un grand territoire comme la forêt d'Orléans, **nous avons montré que les stratégies d'adaptation sont en contradiction avec les stratégies d'atténuation du changement climatique**. Néanmoins, elles seront sans doute obligatoires pour maintenir la viabilité des peuplements.

## 6. Bilan sur l'organisation du projet

Tout au long du projet, les différentes parties ont avancé au rythme prévu. La figure 6.1 ci-dessous donne le diagramme de Gantt du projet tel que présenté lors du démarrage du projet, en indiquant les différents livrables. Tous ont été fournis dans les temps prévus.

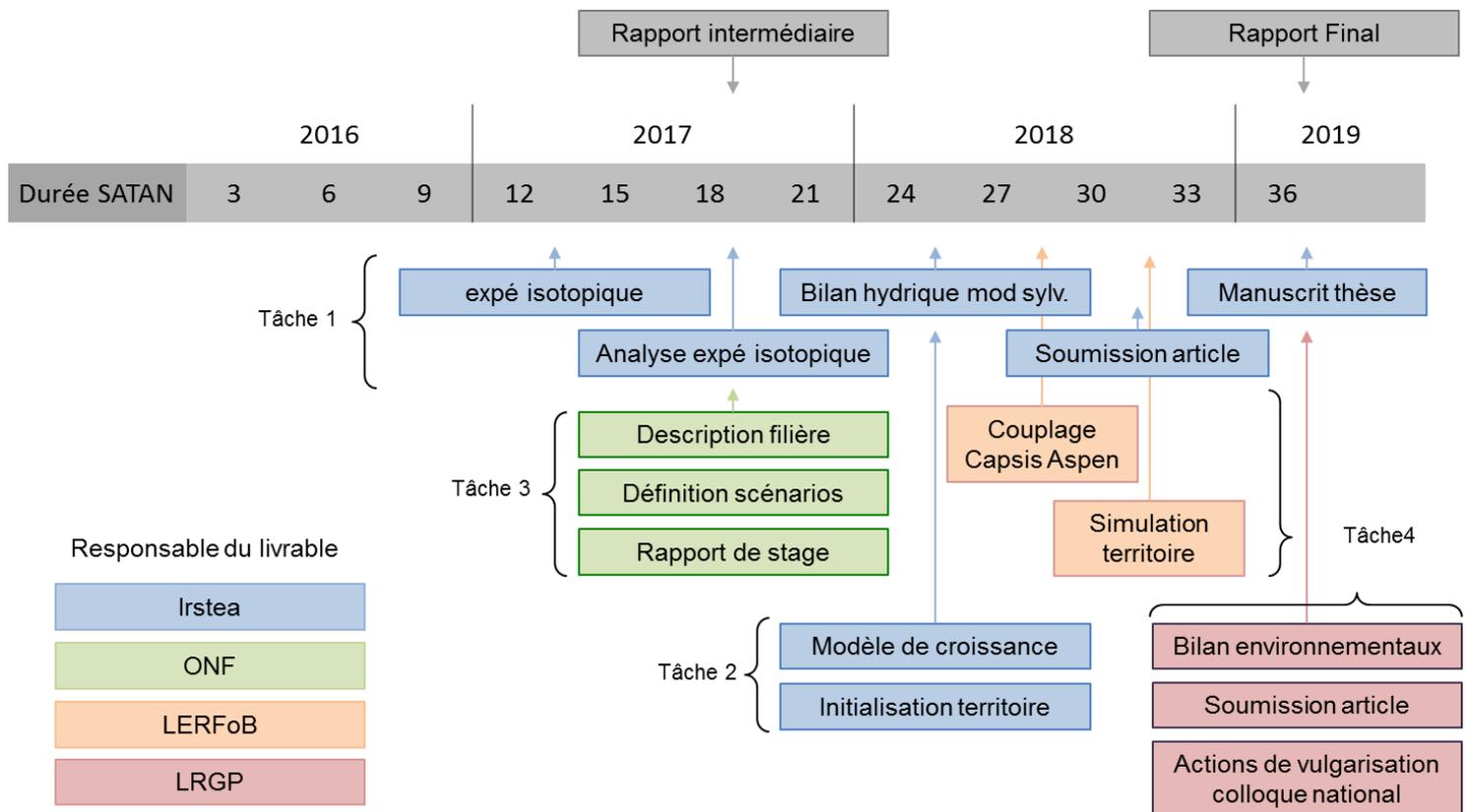


Figure 6.1 : diagramme de Gantt du projet

## 7. Production scientifique

L'ensemble de la production scientifique issue du projet SATAN est répertorié ci-dessous.

### Articles scientifiques

- Bello, J., Hasselquist, N.J., Vallet, P., Kahmen, A., Perot, T., Korboulewsky, N., 2019. Complementary water uptake depth of *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in mixed stands during an extreme drought. *Plant and Soil* 437, 93-115.
- Bello, J., Vallet, P., Perot, T., Balandier, P., Seigner, V., Perret, S., Couteau, C., Korboulewsky, N., 2019. How do mixing tree species and stand density affect seasonal radial growth during drought events? *Forest Ecology and Management* 432, 436-445.
- Pelletier, C., Rogeau, Y., Dieckhoff, L., Bardeau, G., Pons, M.-N., Dufour, A., 2019. Effect of combustion technology and biogenic CO<sub>2</sub> impact factor on global warming potential of wood-to-heat chains. *Applied Energy* 235, 1381-1388.
- Vallet, P., Perot, T., 2018. Coupling transversal and longitudinal models to better predict *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* stand growth under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 263, 258-266.

### Rapports d'étudiants

- Jordan Bello, Thèse 2016-2019 . Réactions à la contrainte hydrique des chênes sessiles et pins sylvestres en fonction de la sylviculture : étude de la croissance secondaire et de l'utilisation de l'eau. Mémoire de thèse de doctorat, Université d'Orléans, 127p.
- Charles Trouvé, 2017. Définition de scénarios de gestion sylvicole sur le massif d'Orléans. Rapport de stage de deuxième année d'Ingénieur AgroParisTech. 22p.
- Constance Proutière, 2017. Analyse de la filière bois en région Centre -Val de Loire, Rapport de stage de deuxième année ingénieur, Bordeaux Sciences Agro. 41p.

### Rapports scientifiques

- Vallet P., Rakotoarison H., Bello J., Arnaudet L., Trouvé C., Proutière C., Fortin M., Dufour A., 2017. Projet SATAN : Synergie entre ATténuation et AdaptatioN : Approche à l'échelle du territoire, rapport intermédiaire de la convention ADEME n°1660C0008, 21p.

### Présentations nationales et internationales

- Dufour, A., An overview of research work conducted at CNRS Nancy on biomass thermochemical conversion : from routes scale to molecular scale. Invited Keynote, BEE 2019, Tianjin, 2019.
- Dufour, A., Valorisation énergétique et chimique du bois : mécanismes, procédés et filières, Conférence invitée pour le GDR CNRS Bois, Cluny, 20-22 Nov. 2018.
- Vallet P., Perot T., 2018. Intégrer le climat annuel dans les modèles de croissance dendrométriques par couplage de modèles, Communication orale aux Journées Caqsis 2018, Clermont-Ferrand, 27-29 mars 2018.
- Rakotoarison H., Arnaudet L., Legay M., Trouvé C., Proutière C., Vallet P., Bello J., Fortin M., Dufour A., 2018. Projet SATAN Synergie entre ATténuation et AdaptatioN : approche à l'échelle du territoire. Plénière du département Recherche, Développement et Innovation de l'ONF, Ardon, 30-31 mai- 1er juin 2018.
- Bello J., Korboulewsky N., Vallet P., Bonal D., Perot T., Seigner V., Perret S., Couteau C., Dumas Y., Balandier P., 2018. Can mixed forest help to save water ? *Climate Change and Water*, Tours, 5-7 February 2018.
- Vallet P., Bello J., Rakotoarison H., Arnaudet L., Trouvé C., Pérot T., Fortin M., Dufour A., 2017. Projet SATAN Synergie entre ATténuation et AdaptatioN : approche à l'échelle du territoire. Séminaire R&D Ademe « Comment optimiser la contribution des forêts et de la filière bois à l'atténuation du changement climatique ? », Paris, 11-12 décembre 2017.
- Bello J., Vallet P., Perot T., Seigner V., Balandier P., Korboulewsky N., 2017. Combining effects of mixing tree species and reducing stand density on radial growth during drought even. IUFRO 125th Anniversary Congress, Freiburg, 18-22 september 2017.

### Créations informatiques

- Vallet P., 2017. Module SALEM (StAnd LEvel Model). Plate-forme CAPSIS. <http://capsis.cirad.fr/capsis/>
- Fortin M., Vallet P., 2018. Connexion des modules SIMMEM-SALEM. Plate-forme CAPSIS. <http://capsis.cirad.fr/capsis/>
- Pelletier C., Bounaceur R., Dufour A., 2018. Modules sous Aspen Plus de combustion du bois.

# Références bibliographiques

- AGRESTE. 2015. Enquête annuelle de branche : scierie.
- AGRESTE. 2017. Récolte de bois et production de sciages en 2015. 2017-AR10.
- ARBOCENTRE. 2016. « Filière forêt - bois en région Centre Vue d'ensemble - Février 2016.
- ARBOCENTRE. 2018. Filière forêt-bois en région Centre-Val de Loire - Juin 2018. Observatoire régional Arbocentre.
- BELLO, J., HASSELQUIST, N. J., VALLET, P., KAHMEN, A., PEROT, T., & KORBOULEWSKY, N. (2019). Complementary water uptake depth of *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in mixed stands during an extreme drought. *Plant and Soil*, 437, 93-115.
- BELLO, J., VALLET, P., PEROT, T., BALANDIER, P., SEIGNER, V., PERRET, S., COUTEAU, C., KORBOULEWSKY, N. (2019). How do mixing tree species and stand density affect seasonal radial growth during drought events? *Forest Ecology and Management*, 432, 436-445. doi: 10.1016/j.foreco.2018.09.044
- BODDY, L. & SWIFT, M.J. (1984) Wood decomposition in an abandoned beech and oak coppiced woodland in SE England. *Holarctic Ecology* 7, 229–238.
- CHERUBINI, F., BRIGHT, R.M., STRØMMAN, A.H., 2012. Site-specific global warming potentials of biogenic CO<sub>2</sub> for bioenergy: Contributions from carbon fluxes and albedo dynamics. *Environmental Research Letters* 7.
- COLIN, A., BARNERIAS, C., SALIS, M., THIVOLLE-CAZAT, A., COULON, F. & COUTURIER, C. (2009) Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020. Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'Inventaire Forestier National (IFN), avec l'Institut Technique Forêt Cellulose Bois Ameublement (FCBA) et l'association SOLAGRO. Contrat n°0601C0134
- CRPF Ile-de-France et du Centre, 2005. Schéma régional de gestion sylvicole de la région Centre. Tome 3 : le Loiret, 32 p.
- GALLILEO BC. 2011. « Etude stratégique sur les potentialités de la filière Bois en région Centre.
- GIEC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- GUILLEMOT, J., DELPIERRE, N., VALLET, P., FRANCOIS, C., MARTIN-STPAUL, N.K., SOUDANI, K., NICOLAS, M., BADEAU, V. & DUFRENE, E. (2014) Assessing the effects of management on forest growth across France: insights from a new functional-structural model. *Annals of Botany*, 114, 779-793.
- KORBOULEWSKY, N., PEROT, T., BALANDIER, P., BALLON, P., BARRIER, R., BOSCARDIN, Y., DAUFFY-RICHARD, E., DUMAS, Y., GINISTY, C., GOSSELIN, M., HAMARD, J.-P., LAURENT, L., MÂRELL, A., NDIAYE, A., PERRET, S., ROCQUENCOURT, A., SEIGNER, V. & VALLET, P. (2015) OPTMix – Dispositif expérimental de suivi à long terme du fonctionnement de la forêt mélangée. *Rendez-Vous Techniques - ONF*, 47, 60-70.
- LAWLESS, J. 2003. Statistical models and methods for lifetime data. John Wiley & Sons Inc. Hoboken.
- ONF. 2002. Révision d'aménagement forêt domaniale d'Orléans Aménagement du massif de Lorris-Les-Bordes (2002-2021), 185 p.
- ONF. 2005. Révision d'aménagement forêt domaniale d'Orléans Massif d'Orléans (2005-2024). 232 p.
- ONF. 2006. Révision d'aménagement forêt domaniale d'Orléans Série d'Intérêt Ecologique (2006-2025), 211 p.
- ONF. 2007. Révision d'aménagement forêt domaniale d'Orléans massif d'Ingrannes (2007-2026), 207p.
- ONF. 2008. Révision d'aménagement forêt domaniale d'Orléans massif de Lorris-Châteauneuf (2008-2027) 207 p.
- PETERSEN RAYMER, A.K. (2006) A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy. *Biomass and Bioenergy* 30, 605–617.
- PETERSEN, A.K. & SOLBERG, B. (2005) Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden. *Forest Policy and Economics* 7, 249–259.
- JARRET, Pascal. 2004. Chênaie atlantique. [Fontainebleau] ; [Paris]: ONF, 335 p.
- CHABAUD, Ludovic, NICOLAS, Loïc. 2009. Guide des sylvicultures, Pinaies des plaines du Centre et du Nord-Ouest, ONF, 399 p.
- TOÏGO, M., PEROT, T., COURBAUD, B., CASTAGNEYROL, B., GÉGOUT, J.-C., LONGUETAUD, F., JACTEL, H. & VALLET, P. (2017) Difference in shade tolerance drives the mixture effect on oak productivity. *Journal of Ecology*, n/a-n/a.
- TOÏGO, M., VALLET, P., PEROT, T., BONTEMPS, J.-D., PIEDALLU, C. & COURBAUD, B. (2015) Overyielding in mixed forests decreases with site productivity. *Journal of Ecology*, 103, 502-512.
- VALLET, P. & PEROT, T. (2011) Silver fir stand productivity is enhanced when mixed with Norway spruce: evidence based on large-scale inventory data and a generic modelling approach. *Journal of Vegetation Science*, 22, 932-942.
- VALLET, P. & PEROT, T., (2018). Coupling transversal and longitudinal models to better predict *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* stand growth under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 263, 258-266.  
[http://www.arbocentre.asso.fr/s\\_informer/observatoire-regional-2.html](http://www.arbocentre.asso.fr/s_informer/observatoire-regional-2.html)  
[www.drias-climat.fr](http://www.drias-climat.fr)
- VALLET, P., MEREDIEU, C., SEYNAVE, I., BELOUARD, T. & DHOTE, J.-F. (2009) Species substitution for carbon storage: Sessile oak versus Corsican pine in France as a case study. *Forest Ecology and Management* 257: 1314-1323.
- ZELL, J., KANDLER, G. & HANEWINKEL, M. (2009). Predicting constant decay rates of coarse woody debris – A meta-analysis approach with a mixed models. *Ecological modelling*, 220:904–912.

## Liste des annexes

- Annexe 1A : Manuscrit de thèse.** Jordan Bello. Réactions à la contrainte hydrique des chênes sessiles et pins sylvestres en fonction de la sylviculture : étude de la croissance secondaire et de l'utilisation de l'eau. Mémoire de thèse de doctorat, Université d'Orléans, 127p.
- Annexe 1B : Article scientifique.** Bello, J., Vallet, P., Perot, T., Balandier, P., Seigner, V., Perret, S., Couteau, C., Korboulewsky, N., 2019. How do mixing tree species and stand density affect seasonal radial growth during drought events? *Forest Ecology and Management* 432, 436-445.
- Annexe 1C : Article scientifique.** Bello, J., Hasselquist, N.J., Vallet, P., Kahmen, A., Perot, T., Korboulewsky, N., 2019. Complementary water uptake depth of *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in mixed stands during an extreme drought. *Plant and Soil* 437, 93-115.
- Annexe 2 : Article scientifique.** Vallet, P., Perot, T., 2018. Coupling transversal and longitudinal models to better predict *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* stand growth under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 263, 258-266.
- Annexe 3A : Rapport de stage** de 2<sup>ième</sup> année d'ingénieur de Charles Trouvé, AgroParisTech
- Annexe 3B : Rapport de stage** de 2<sup>ième</sup> année d'ingénieur de Constance Proutière, Bordeaux Science Agro.
- Annexe 4 : Article scientifique.** Pelletier, C., Rogaume, Y., Dieckhoff, L., Bardeau, G., Pons, M.-N., Dufour, A., 2019. Effect of combustion technology and biogenic CO2 impact factor on global warming potential of wood-to-heat chains. *Applied Energy* 235, 1381-1388.

## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### ILS L'ONT FAIT

*L'ADEME catalyseur* : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

*L'ADEME expert* : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### FAITS ET CHIFFRES

*L'ADEME référent* : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

*L'ADEME facilitateur* : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### HORIZONS

*L'ADEME tournée vers l'avenir* : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



## Résumé

Les forêts participent à l'atténuation du réchauffement climatique en stockant du carbone dans les écosystèmes, dans les produits bois, et en évitant du carbone fossile pour l'énergie ou la provision de matériaux. À l'inverse, le réchauffement climatique aura une incidence sur la dynamique des forêts, et des stratégies sylvicoles seront nécessaires pour les adapter au climat futur. L'objectif de ce projet est d'évaluer l'incidence des stratégies d'adaptation des forêts au réchauffement climatique sur l'atténuation qu'elles peuvent procurer, en utilisant un grand massif forestier comme territoire d'étude, la forêt d'Orléans.

Pour répondre à cette question, nous avons étudié l'influence de la sylviculture sur le stress hydrique, analysé les scénarios sylvicoles et le contexte économique du territoire d'étude, et construit une chaîne de modèles couplant la croissance des peuplements forestiers en fonction des scénarios climatique du GIEC, la dynamique des produits – et donc du carbone – dans la filière, et les procédés de production d'énergie à partir du bois. Nous avons ainsi comparé la capacité d'atténuation de 3 scénarios par rapport au scénario de référence (Business as Usual) : une réduction de 20% de la densité des peuplements (objectif de réduire la consommation en eau, et donc d'éviter les stress hydriques pour les arbres restants), une diminution de 20% des diamètres objectifs d'exploitabilité (objectif de limiter les risques de perte en capital), et une conversion résineuse des peuplements les moins fertiles (substitution d'essence a priori plus résistante au réchauffement climatique).

De manière générale, les stratégies d'adaptation sont en opposition avec les stratégies d'atténuation du réchauffement climatique. Après environ 70 ans d'évolution, la diminution de la densité des peuplements ou des diamètres objectifs d'exploitation de 20% a entraîné une diminution des stocks de carbone d'environ 20% également. La conversion a en revanche eu peu d'influence sur les stocks de carbone pour cet horizon temporel.

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

