



**HAL**  
open science

## **Projet SATAN : Synergie entre ATténuation et AdaptatioN : approche à l'échelle du territoire**

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

### ► To cite this version:

Patrick Vallet, H. Rakotoarison, Jordan Bello, Lucie Arnaudet, Charles Trouvé, et al.. Projet SATAN : Synergie entre ATténuation et AdaptatioN : approche à l'échelle du territoire. [Rapport de recherche] irstea. 2017, pp.21. hal-02606665

**HAL Id: hal-02606665**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02606665v1>**

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.

Nov.  
2017

---

# PROJET SATAN

---

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

---

**Rapport  
intermédiaire**



En partenariat avec :



## CITATION DE CE RAPPORT

Vallet Patrick, Rakotoarison Hanitra, Bello Jordan, Arnaudet Lucie, Trouvé Charles, Proutière Constance, Fortin Mathieu, Dufour Antony, 2017. Projet SATAN : Synergie entre ATténuation et AdaptatioN : Approche à l'échelle du territoire, rapport intermédiaire de la convention n°1660C0008, 21p.

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 Vallet Patrick, Rokotoarison Hanitra, Bello Jordan, Arnaudet Lucie, Trouvé Charles, Proutière Constance, Fortin Mathieu, Dufour Antony pour ce projet financé par l'ADEME**

**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
<b>1. Acquisition de connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Objectifs et avancements de la thèse .....</b>	<b>5</b>
1.1.1. Analyses de la croissance secondaire .....	5
1.1.2. Acquisition des ressources hydriques .....	6
<b>1.2. Valorisation .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Modèle de croissance climat-dépendant .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Modèle à large échelle .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. Modèles locaux climat-dépendants .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3. Méthode de couplage .....</b>	<b>9</b>
<b>2.4. Projection en fonction des scénarios climatiques.....</b>	<b>10</b>
<b>2.5. Simulateur sous Capsis.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Scénarios sylvicoles et climatiques .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Scénarios sylvicoles .....</b>	<b>11</b>
3.1.1. Scénarios de base .....	11
3.1.2. Scénarios alternatifs d'adaptation .....	13
<b>3.2. Scénarios d'usage du bois .....</b>	<b>13</b>
3.2.1. Scénarios de base .....	13
3.2.2. Scénarios alternatifs d'atténuation .....	16
<b>3.3. Scénarios climatiques.....</b>	<b>16</b>
<b>4. Simulations à l'échelle du territoire .....</b>	<b>17</b>
<b>5. Bilan sur l'avancement du projet.....</b>	<b>17</b>
Références bibliographiques .....	18
Liste des annexes.....	19



## 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 production d'énergie de substitution. 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 1). 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 à l'horizon 2100. 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 sur le stock de carbone sera réalisé grâce à la description de la filière. Un couplage avec le simulateur Aspen+ permettra d'estimer l'énergie de substitution produite avec le bois qui lui est dédié.

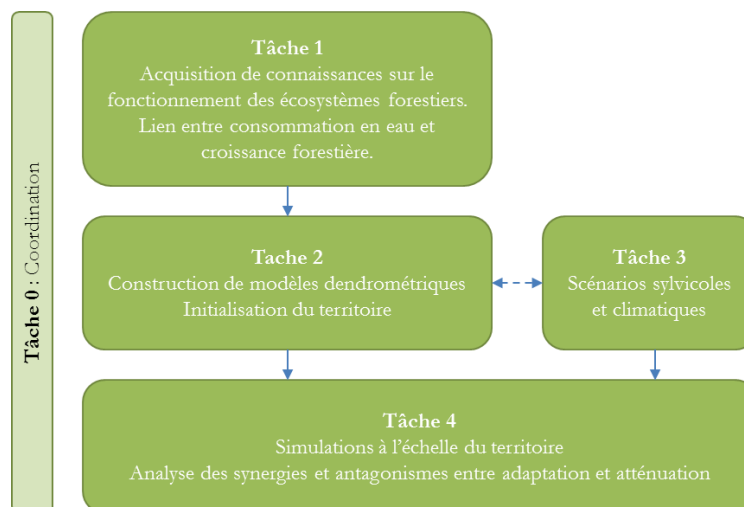


Figure 1 : diagramme opérationnel du projet SATAN

Ce rapport présente l'avancement du projet en novembre 2017, c'est-à-dire à environ la moitié de sa durée. Par souci d'efficacité, le rapport est constitué de résumés succincts pour chacune des tâches accompagnés d'annexes plus techniques. Un récapitulatif de l'avancée générale du projet est fourni en fin de document.

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

La tâche 1 du projet est portée s'articule autour de la thèse de Jordan Bello. Cette section est un résumé de l'avancement de la thèse, dont le détail figure en annexe 1 (rapport du deuxième comité de thèse).

## 1.1. Objectifs et avancements de la thèse

L'objectif principal de la thèse est de mettre en évidence les effets de la sylviculture sur la consommation d'eau et la croissance dans les peuplements purs et mélangés de chênes sessiles et de pins sylvestres en forêt domaniale d'Orléans. Ces effets sont étudiés grâce au suivi de la croissance secondaire (radiale). Le signal est étudié à l'échelle saisonnière. Cette croissance saisonnière est confrontée aux acquisitions de la ressource hydrique (en contexte de contrainte hydrique) grâce aux installations présentes sur le dispositif OPTMix (Korboulewsky et al. 2015), afin de pouvoir apporter des informations sur la sylviculture face au changement climatique.

### 1.1.1. Analyses de la croissance secondaire

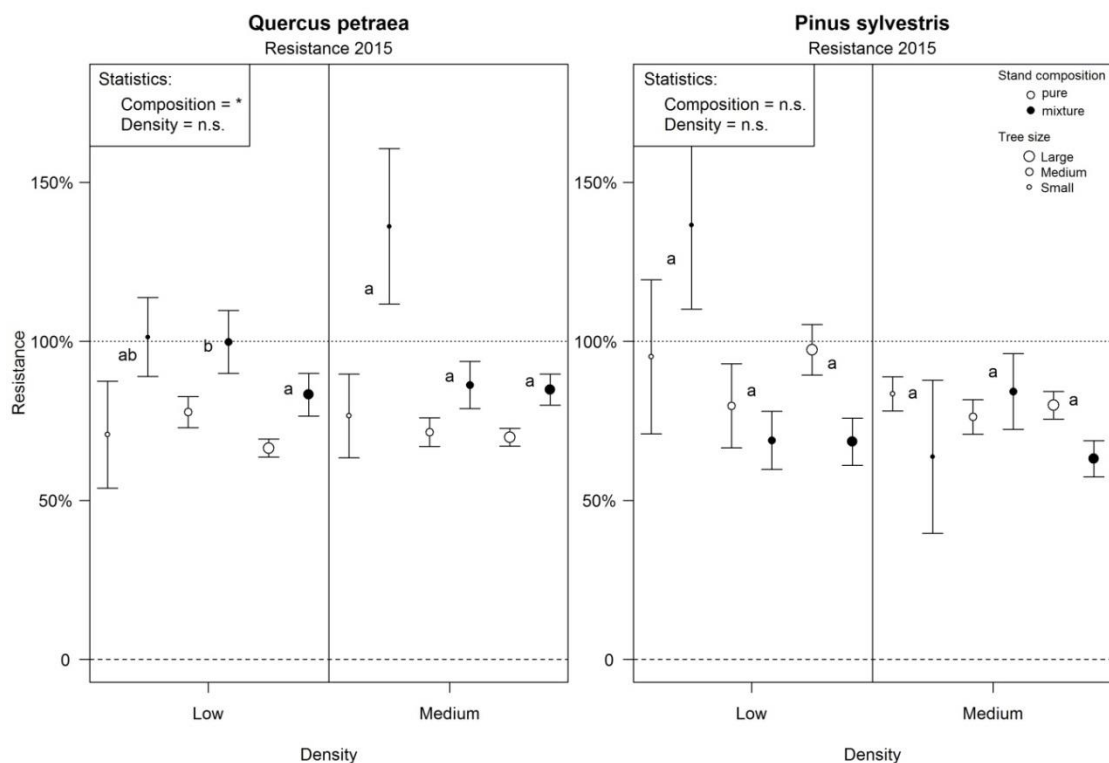
Nous avons analysé la croissance saisonnière des deux essences principales présentes en forêt d'Orléans grâce au suivi de 270 arbres équipés de dendromètres à bande sur le dispositif OPTMix. Nous avons étudié la réponse de la croissance des individus en fonction des différentes modalités des peuplements (composition, densité et taille des individus) sous différentes conditions de stress hydrique. 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. La méthode est décrite dans l'annexe 1.

Les principaux résultats de cette partie sont les suivants :

- La croissance radiale annuelle des individus ne diffère entre les espèces que lors de l'année sans contrainte hydrique. Lorsqu'une contrainte hydrique se produit durant la saison de végétation, la différence entre les espèces n'est plus significative.
- Lors de la contrainte estivale forte, la croissance est diminuée de 20% pour les chênes et de 31% pour les pins, par rapport à la même période sans stress.
- La contrainte hydrique diminue la différence de croissance intra-annuelle entre les gros et les petits individus. Les gros individus diminuent plus fortement leur croissance que les petits individus.
- La période de contrainte n'a pas les mêmes conséquences sur la croissance des individus et des essences. Lors d'un stress estival, il n'y a pas d'effet significatif du mélange pour les deux essences mais une réduction de la différence entre les individus de tailles différentes. 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.
- Un effet opposé du mélange est également identifié sur la résistance intra-annuelle des individus. Lors du stress estival, les chênes ont eu une meilleure résistance en mélange alors que les pins ont eu une meilleure résistance en monoculture, (figure ci-dessous).

Un article est en cours de préparation sur l'ensemble de cette partie.





Moyenne des résistances à la contrainte hydrique 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. Les différentes lettres indiquent les significativités entre les groupes.

### 1.1.2. Acquisition des ressources hydriques

Nous avons également réalisé plusieurs expérimentations afin de pouvoir mesurer le stress subi par les arbres : la profondeur de prélèvement de l'eau par les racines, la mesure de la surface foliaire du peuplement, et l'estimation de l'effet du mélange sur le flux de sève brute.

Par ailleurs, un stage de master 2 (Marine Fernandez) durant la première année de thèse a permis de mieux caractériser la distribution spatiale des racines en peuplements purs et mélangés, et un stage de master 2 (Anna-Karine Jean) pendant la deuxième année de thèse a permis de mieux décrire le fonctionnement de la nappe perchée, présente en forêt d'Orléans.

#### 1.1.2.1. Estimation de la profondeur de prélèvement de l'eau par les arbres

Des prélèvements de sol et de végétaux ont été effectués en période de stress hydrique afin d'analyser la profondeur de prélèvement de l'eau par les racines au moyen de dosages isotopiques. Grâce à la sécheresse estivale marquée au cours de l'été 2016, nous avons pu réaliser 3 campagnes de prélèvement.

En collaboration avec l'université de Bâle (Pr Ansgar Kahmen), nous avons réalisé l'extraction cryogénique de l'eau contenue dans ces échantillons. Une analyse par spectrométrie de masse a été réalisée afin de pouvoir mesurer les fractionnements isotopiques de l'oxygène ( $O^{16}/O^{18}$ ) et du deutérium ( $H/H^2$ ) contenus dans cette eau et ainsi pouvoir relier l'eau contenue dans le xylème et celle dans le sol.

Une autre collaboration, avec la Swedish University of Agricultural Sciences (Niles Hasselquist, Department of Forest Ecology and Management), est en cours pour interpréter les résultats. Niles a participé à l'élaboration de l'expérimentation et son expertise permettra la rédaction d'un article scientifique sur ce sujet. Cet échange a lieu du 06 novembre 2017 au 30 novembre 2017, à la suite de quoi cette collaboration continuera à distance.

### 1.1.2.2. *Autres suivis*

Le dispositif OPTMix est équipé de différents capteurs permettant de mesurer les variables climatiques et édaphique (thermocouples, pyranomètres, thermo hygromètres, pluviomètres, sondes de teneurs en eau du sol, piézomètres) reliés à des centrales d'acquisitions Campbell Scientific®. Ces différents capteurs permettent de relier finement les variations de croissance observées dans la première partie de la thèse et les conditions présentes au sein de chaque modalité du dispositif.

Afin de pouvoir quantifier le stress subi par les arbres, nous avons effectué plusieurs campagnes de mesure de potentiel hydrique foliaire de base durant la saison de végétation de 2016.

Nous avons mis en place 210 collecteurs de litière, avec une surface précise et connue afin de pouvoir recueillir les feuilles tombant sur le sol et ensuite calculer par imagerie (WinFolia) la surface foliaire du peuplement, dans le but de pouvoir réaliser un bilan hydrique pour les peuplements.

Nous avons installé 48 capteurs de flux de sève brute afin de pouvoir estimer le rapport de transpiration des arbres entre un peuplement mélangé ou pur durant une période de contrainte hydrique. Cette expérimentation repose sur la dissipation de chaleur due au flux de sève brut dans les vaisseaux du xylème. Les 48 individus ont été suivis de façon continue pendant toute la saison de végétation de 2017. Cette expérimentation est réalisée en collaboration avec l'Inra de Champenoux (Damien Bonal).

Un stage de master 2 a été réalisé par Anna-Karine Jean (Université Jean-Monnet, Saint-Etienne) dans le but de caractériser la nappe perchée temporaire présente dans les sols en forêt d'Orléans. Les résultats principaux sont une absence de la profondeur de plancher sur le niveau de la nappe perchée dans le sol et un retrait de la nappe plus lent à un seuil de 20cm pour les peuplements purs de pins par rapport aux peuplements mélangés ou purs de chênes.

## 1.2. Valorisation

Les résultats sur la croissance saisonnière ont été présentés lors d'une communication orale internationale à l'IUFRO 125th Anniversary Congress 2017, à Freiburg (Allemagne). Un article est en cours de rédaction sur la partie croissance radiale. Deux autres articles sont prévus sur l'expérimentation isotopique (Y a-t-il une différence entre la profondeur d'acquisition de l'eau par les arbres entre les peuplements purs et les mélanges ?) et sur les flux de sève brute (les individus ont-ils une transpiration plus importante en mélange qu'en monoculture lors d'une contrainte hydrique ?)

## 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'entrées difficiles à acquérir et utiliser en gestion courante. Par ailleurs, leurs paramétrages sont assez lourds, ce qui les rend difficilement généralisable 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.





Le résumé ci-dessous présente les résultats obtenus. L'annexe 2 détaille les données, les méthodes et les résultats. Il s'agit de l'ébauche d'un article scientifique en préparation, et est à ce titre confidentiel tant qu'il ne sera pas publié dans la littérature scientifique.

Les analyses ont porté sur les peuplements de chêne sessile, de pin sylvestre, et du mélange de ces deux espèces.

## 2.1. Modèle à large échelle à partir des données IFN

La méthodologie pour établir les modèles IFN a déjà été publiée dans plusieurs articles scientifiques (Vallet et Pérot 2011, Toigo et al. 2015, Toigo 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, donnés par l'équation :

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

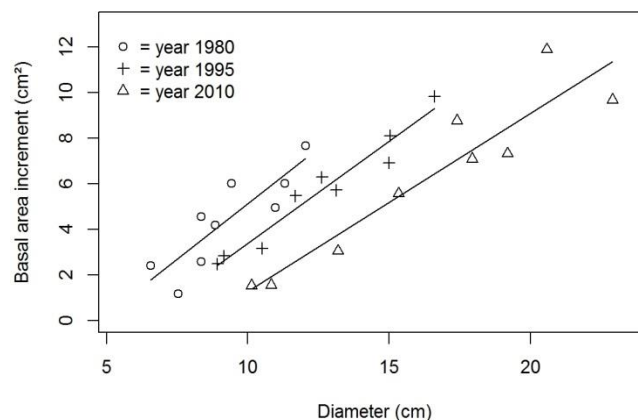
où BAI est l'accroissement du peuplement,  $X_m$  un ensemble de variables environnementales influençant la croissance de l'essence considérée, DI est la densité du peuplement, et Dg le diamètre quadratique moyen.

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.

## 2.2. Modèles locaux climat-dépendants

Pour cette partie, nous avons réutilisé des données provenance 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. 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 Windendro au laboratoire.

Pour chaque placette, et pour chaque année passée, on peut tracer l'accroissement individuel en fonction de son diamètre (cf. figure ci-dessous). 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.



*Exemple de relation accroissement en surface terrière – diamètre pour une placette de chêne pur pour 3 années différentes*

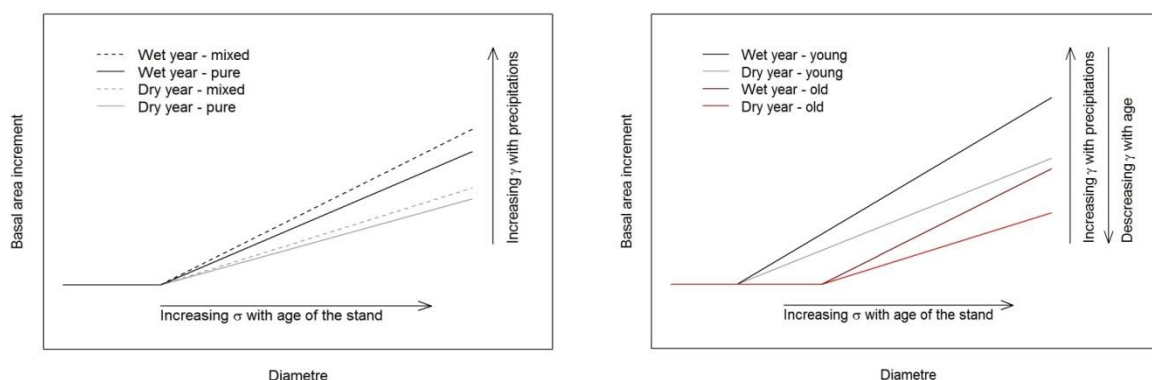


On peut alors modéliser l'accroissement individuel comme :

$$bai_t = \gamma \times (\text{diameter}_t - \alpha)$$

où  $bai$  est l'accroissement en surface terrière individuel,  $\gamma$  est la pente, et  $\alpha$  est l'intersection de la droite avec l'axe des abscisses. Avec la variation annuelle de la pente et son lien avec le climat, il est possible alors d'injecter des variables climatiques et de stage de développement dans les paramètres  $\gamma$  et  $\alpha$ .

Pour le chêne, la pente est influencée par les précipitations de décembre à juillet, en interaction avec la composition (pur vs. mélangé). Pour le pin, la pente est influencée par les précipitations de mai à août et diminue avec l'âge du peuplement. Pour les deux espèces,  $\alpha$  augmente avec l'âge du peuplement. Les figures suivantes synthétisent les résultats pour les deux essences. Les résultats détaillés figurent dans l'annexe 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 :

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

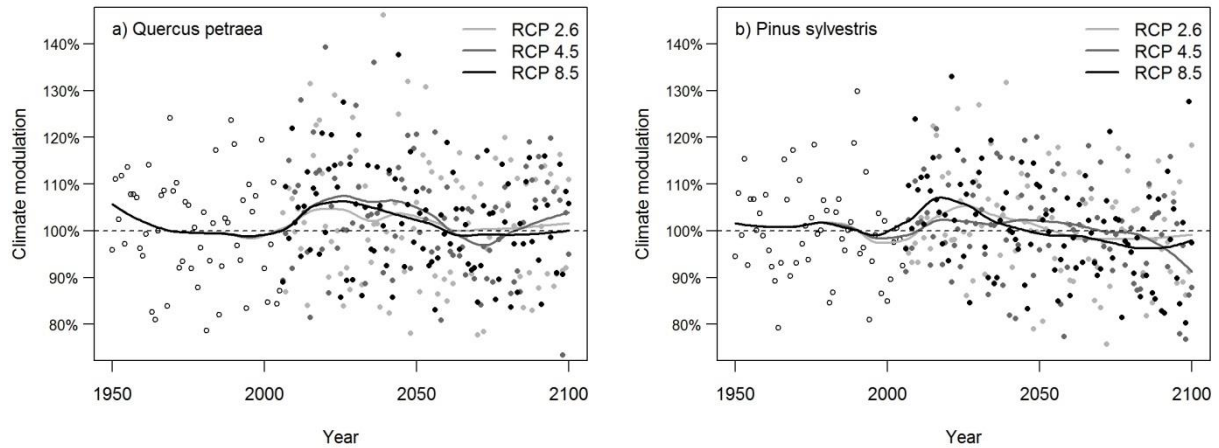
Or, nous pouvons montrer (cf. annexe 2), que le rapport des modèles local est égal au rapport entre les pentes du modèle. Ainsi, nous obtenons le modèle couplé suivant :

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

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.

## 2.4. Projection en fonction des scénarios climatiques

Nous avons utilisé les scénarios 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 (rapport des pentes). La projection à l'horizon 2100 de ces trois scénarios donne les figures suivantes :

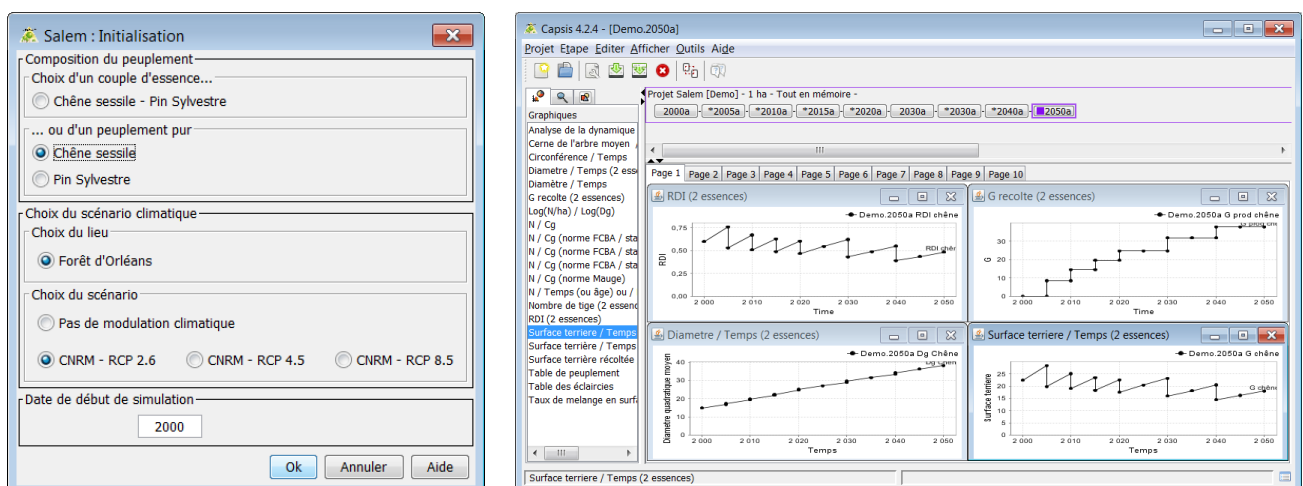


*Evolution de la modulation climatique en fonction des scénarios du GIEC régionalisés pour le chêne (à gauche) et le pin (à droite) pour la forêt d'Orléans.*

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.



*Captures d'écran du module SALEM implémenté dans la plateforme CAPSIS*



### 3. Scénarios sylvicoles et climatiques

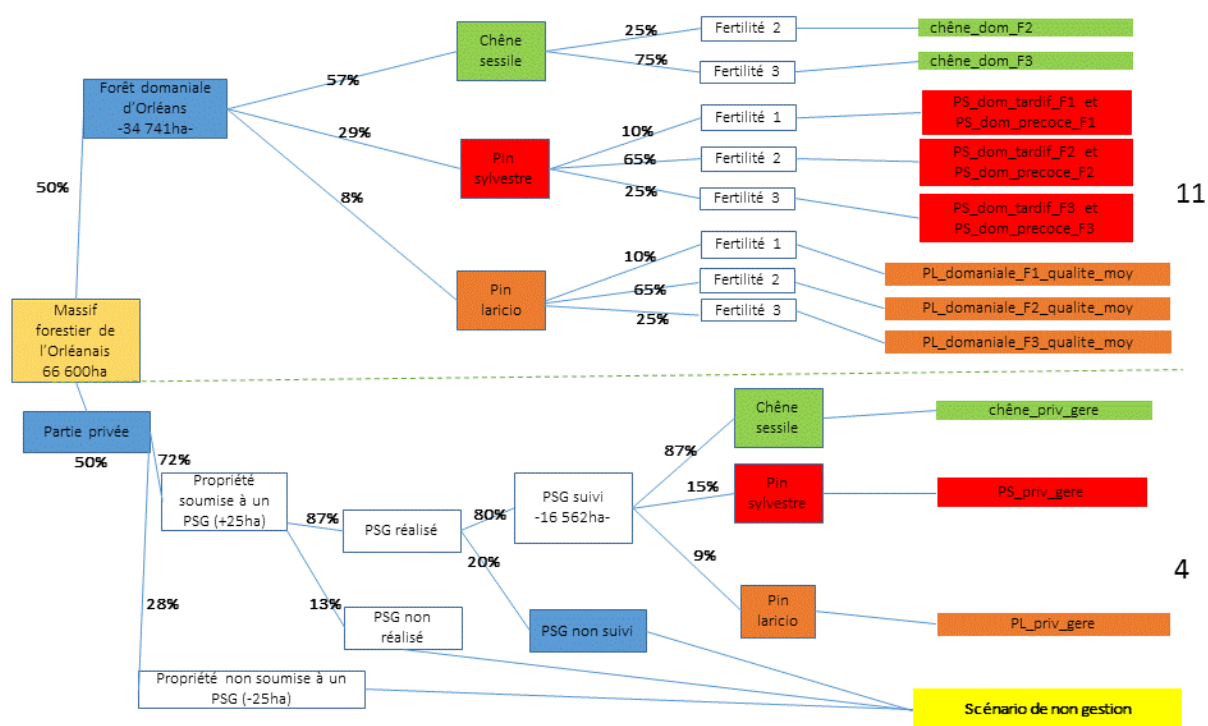
Dans le cadre du projet SATAN, la tâche 3 a pour objectif de décrire en détail la diversité des itinéraires sylvicoles et des usages du bois dans le territoire de la forêt d'Orléans qui constitue les scénarios de base. A cette échelle locale, nous analysons également les problèmes comme les points forts 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 le graphique ci-dessous.



Synthèse des itinéraires sylvicoles actuels

Pour pouvoir correspondre au modèle de croissance 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 et les mélanges d'essences, 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 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 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 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 %). 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 60-70 ans 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).

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, diminution de la densité dans les peuplements, raccourcissement des itinéraires et/ou augmentation des surfaces gérées.

## 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

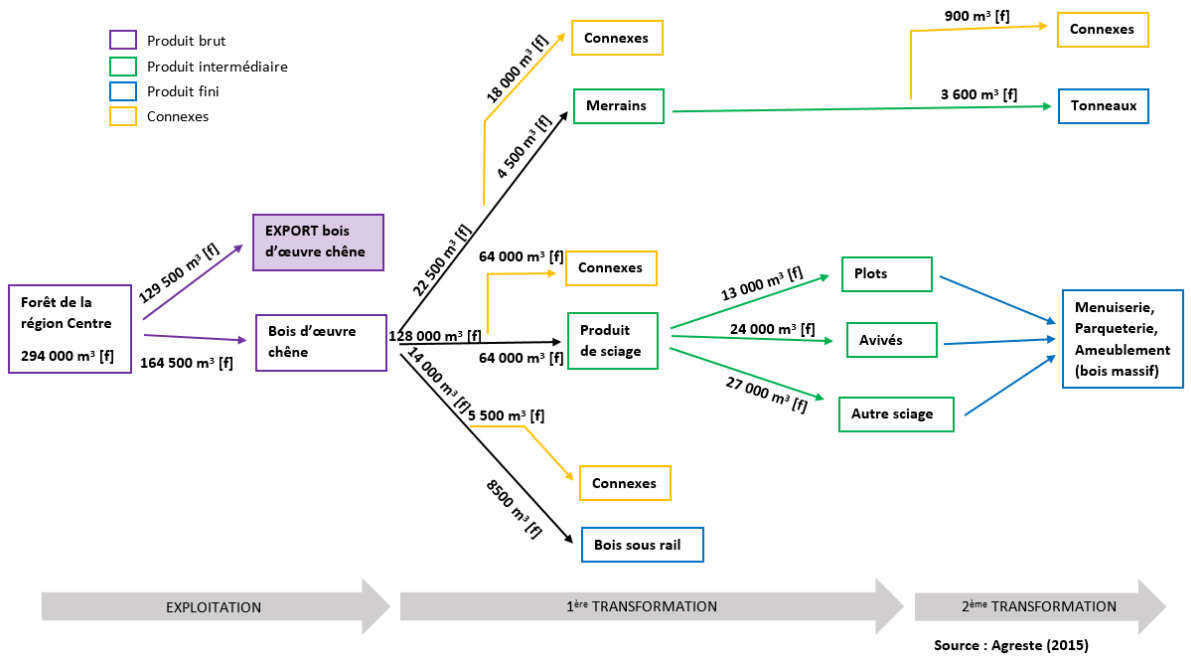
Nous avons rassemblé les statistiques disponibles provenant de plusieurs sources : IGN, Agreste, Arbocentre, DRAAF, rapports et études diverses ...

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. 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.

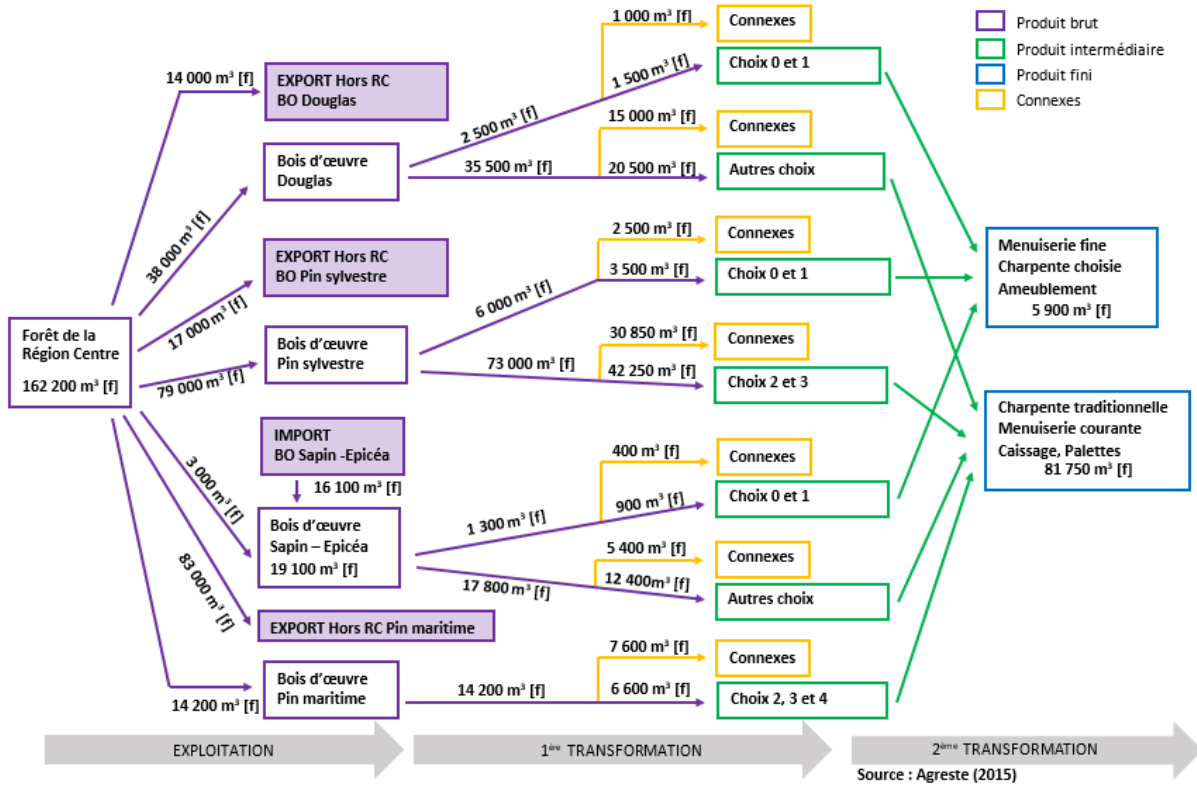


### 3.2.1.1. Bois d'œuvre de chêne



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

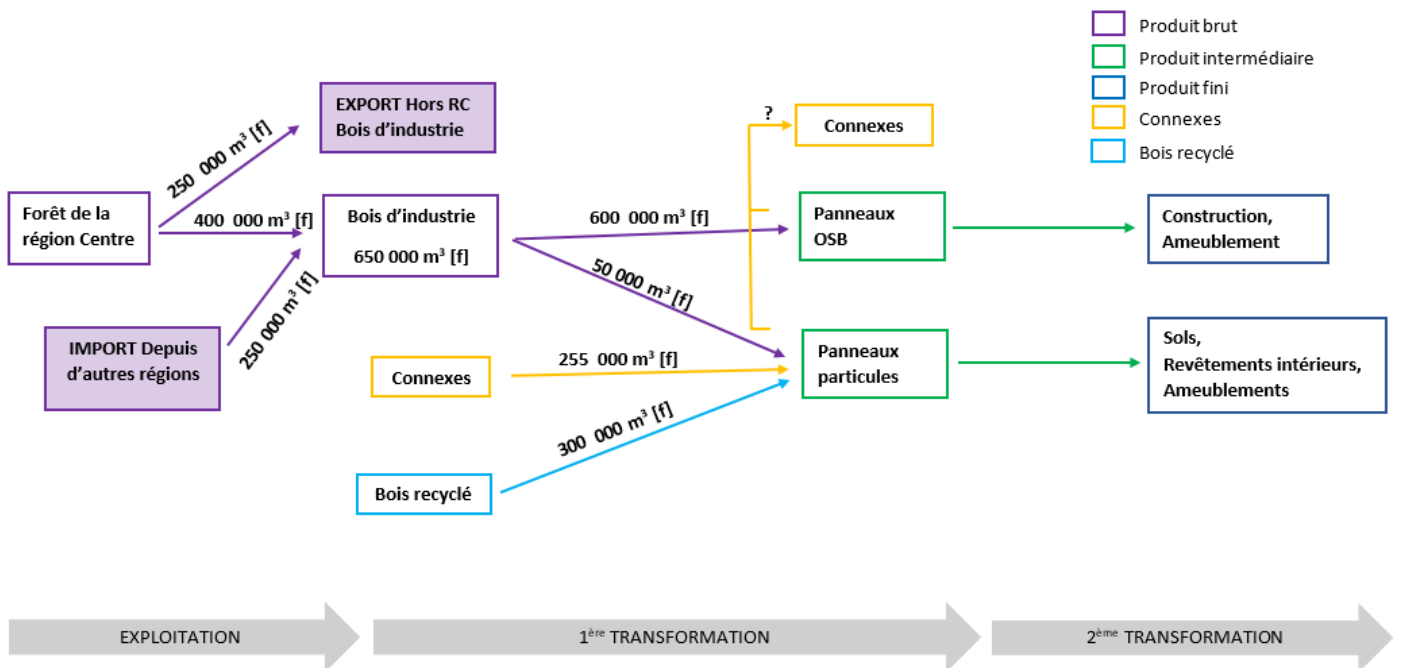
### 3.2.1.2. Bois d'œuvre résineux



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



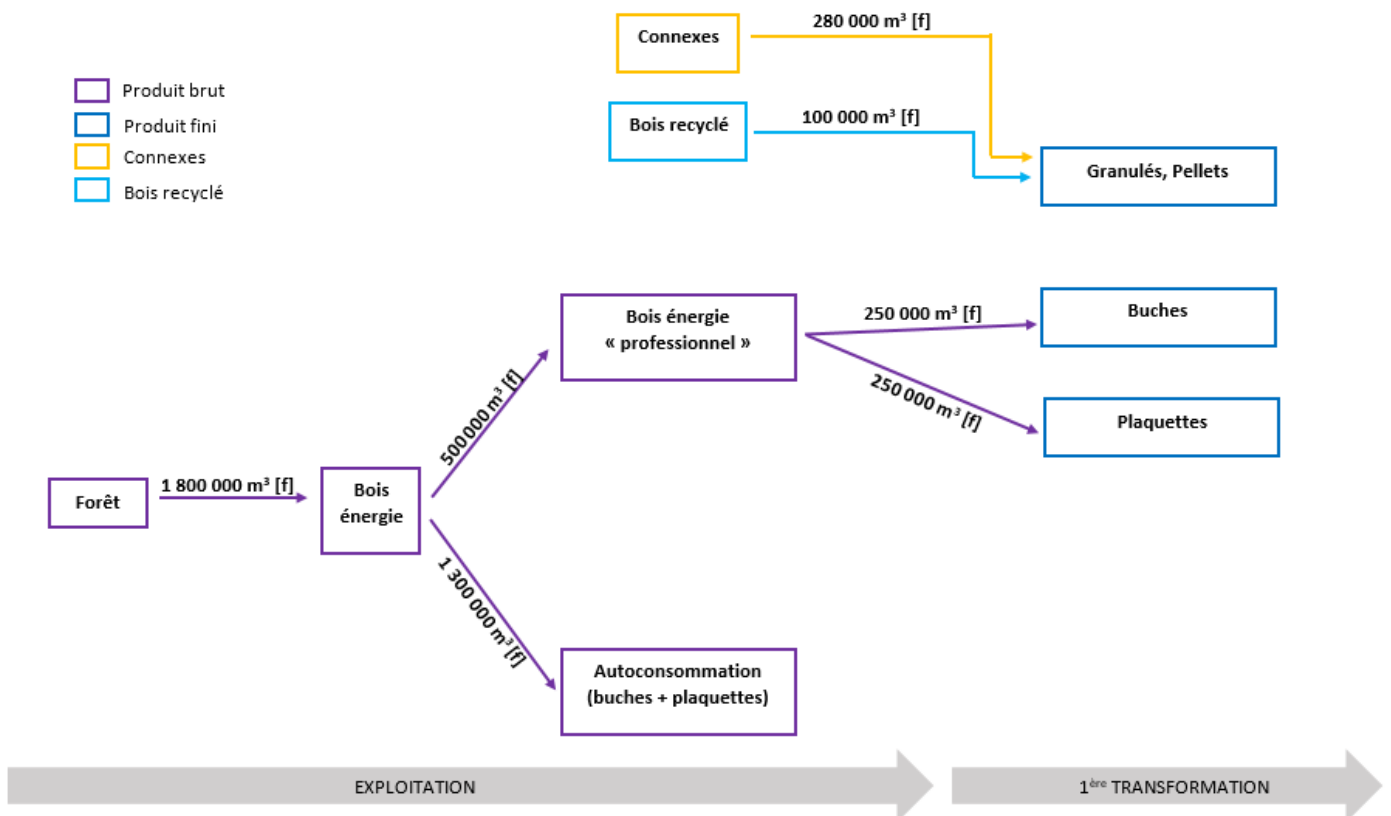
### 3.2.1.3. Bois industrie



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

Schématisation de la filière bois industrie en région Centre Val de Loire

### 3.2.1.4. Bois énergie



Sources : Arbocentre (2016), Agreste (2015)

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 font face 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 du changement climatique
- 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.

## 3.3. 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).

A horizon 2100, nous avons extrait de ce portail 4 variables climatiques : les températures quotidiennes minimales, maximales et moyennes, et les précipitations totales quotidiennes pour 102 points sur le département du Loiret où se trouve la forêt d'Orléans. Le modèle CNRM-2014 donne ces projections pour les trois RCP (2,6 ; 4,5 et 8,5) alors qu'avec le modèle IPSL-2014 ne renseigne que pour deux RCP (4,5 et 8,5). Ces données ont été transmises à Irstea dans le cadre de la tâche 2.



## 4. Simulations à l'échelle du territoire

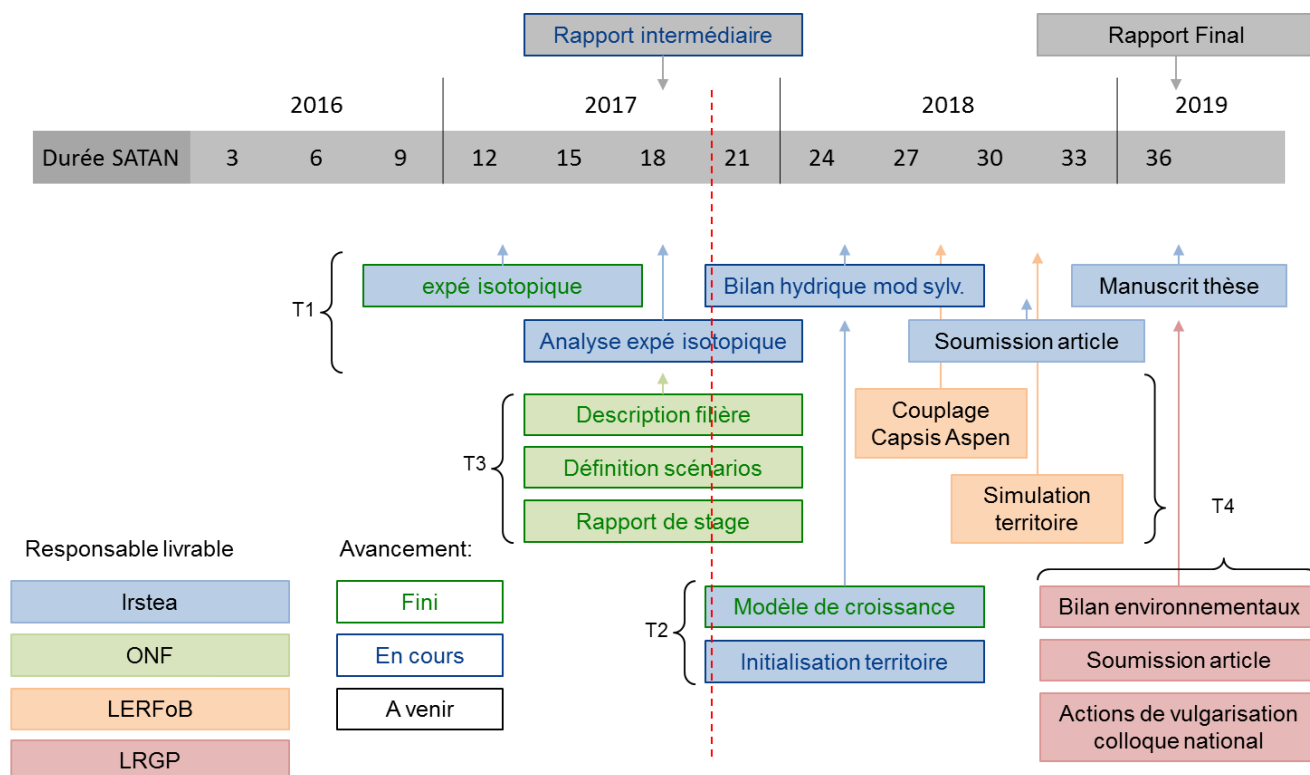
La tâche 4 doit débuter au mois de novembre 2017. La première étape consistera à adapter le modèle SALEM afin de le rendre compatible avec le module de simulation à l'échelle du massif (SIMMEM). Nous prévoyons quelques semaines de développement au sein de la plate-forme CAPSIS qui héberge SALEM et SIMMEM.

Au début de l'année 2018, les données de marché obtenues dans la tâche 3 seront intégrées sous la forme d'un modèle de marché dans l'outil de comptabilité carbone CAT développé au LERFoB. L'outil CAT sera également adapté pour y intégrer les procédés de production énergétique modélisés au LRGP. Le projet prévoyait initialement un pont informatique entre CAT et la plate-forme ASPEN qui est utilisée par le LRGP pour modéliser les différents procédés industriels. Toutefois, après discussion, il en ressort que ces modèles de procédés pourraient être intégrés directement dans CAT sous une forme simplifiée. C'est cette approche qui sera mise en œuvre au printemps 2018 car elle permettra une meilleure versatilité de la modélisation. Les bilans énergétiques des principales filières bois-énergie (différentes technologies de combustion et gazéification) ont déjà été établis au LRGP dans le cadre de la thèse de C. Pelletier. Nous allons traduire ces données dans un format simplifié compatible avec la plateforme CAT.

La conception d'un modèle de billonnage basé sur une répartition du volume commercial des peuplements doit également être réalisée au printemps 2018. Les simulations à l'échelle de la forêt d'Orléans devraient débuter à l'été 2018. Au printemps 2018, un chercheur post-doctoral sera engagé au LERFoB et au LRGP pour travailler sur ces aspects de simulations.

## 5. Bilan sur l'avancement du projet

A mi-parcours de la durée du projet, les différentes parties ont avancé au rythme prévu. La figure ci-dessous fournit le diagramme de Gantt du projet, en indiquant le degré d'avancement pour chacun des livrables. Il est à noter qu'aucun à l'heure actuelle ne subit de retard.



## 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- JARRET, Pascal. 2004. Chênaie atlantique. [Fontainebleau] ;[Paris]: ONF, 335 p.
- CHABAUD, Ludovic, NICOLAS, Loïc. 2009. Guide des sylvicultures, Pineraies 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.
- [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)



## Liste des annexes

Annexe 1 : Rapport du deuxième comité de thèse de Jordan Bello

Annexe 2 : Premier jet d'article scientifique sur la méthode de couplage des modèles (confidentiel tant que la publication n'est pas effective)

Annexe 3A : Rapport de stage ingénieur de Charles Trouvé (Apprenti Ingénieur en deuxième année de l'AgroParisTech)

Annexe 3B : Rapport de stage ingénieur de Constance Proutière (2<sup>ième</sup> année d'ingénieur Agro Bordeaux)



## 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.





# TITRE DE L'OUVRAGE XERUM SEQUO EXCES SUNTUR MAIONSEQUI OLLAUT

**Résumé** Remporenis denis sequi occullabo. Ut doles digendem intis restiaepedi ommolupta porio estiore excest, nullor alibus essitinte alisquo corestrum nonsedi comnisi.

Magnia quam, quae ped modipsus volores erspidit volendae voluptament hitatem hil magnimi, si re possimil magnat el ipis dolum rem et quasperum volupid isquati dolo maio et verro ex et expelis delitas enia voluptaque latur? Maximil itiaepa nonsequi.

Alis qui debis ipsandaecae min eari rem rempore scillendae nissunt eos non reicimint eati tem ea nostio cus ab ide ea quiaspelent utatem harci aute siminctum cupta ant laboritibus eum et audaectis ernam fuga. Itatet utatibus coressunt, te lacearuntius sit quaticinium lab is dolles non conetur magnam aliquas.

Magnia quam, quae ped modipsus volores erspidit volendae voluptament hitatem hil magnimi, si re possimil magnat el ipis dolum rem et quasperum volupid isquati dolo maio et verro ex et expelis delitas enia voluptaque latur? Maximil itiaepa nonsequi.

**Essentiel à retenir ou exergue  
ou discours marketing** Abore  
doluptis isto te mil isse vendion  
sectur? Ibusae vit quuntio rerunt.

*Itias ma nateceatate perroratur,  
cus, te occatur?*

*Cessit qui nulparc hiliqui  
quodignis aut ante porerorion nit  
etusant utemolu pidelitibus.*

*Soloress imusanimin pro idero  
volectus molorpo.*

ADEME



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

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

