



HAL
open science

I-MAESTRO : Complexité et résilience des forêts

Patrick Vallet, Raphaël Aussenac, Arnaud Guyennon, Björn Reineking,
Jean-Matthieu Monnet, Benoît Courbaud, Nathéo Beauchamp, Sophie
Labonne, Thomas Cordonnier

► **To cite this version:**

Patrick Vallet, Raphaël Aussenac, Arnaud Guyennon, Björn Reineking, Jean-Matthieu Monnet, et al.. I-MAESTRO : Complexité et résilience des forêts : Rapport final du projet ERA-Net I-Maestro. INRAE. 2022, pp.1-45. hal-04275899

HAL Id: hal-04275899

<https://hal.inrae.fr/hal-04275899>

Submitted on 8 Nov 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

I-MAESTRO : COMPLEXITE ET RESILIENCE DES FORETS

Projet
ERA-NET ForestValue

RAPPORT FINAL

EXPERTISES

Oct.
2022

REMERCIEMENTS

Ce rapport est cosigné par les auteurs mentionnés ci-dessous. Néanmoins, il s'agit d'un travail réalisé en étroite collaboration avec des partenaires de cinq autres laboratoires Européens. Les auteurs souhaitent vivement les remercier pour cette collaboration fructueuse. Il s'agit notamment des collègues suivants :

Potsdam Institute For Climate Impact Research : Christopher Reyer, Mats Mahnken, Martin Gutsch

European Forest Institute : Marcus Lindner, Laura Nikinmaa, Gesche Schifferdecker, Sergey Zudin, Jose Bolanos,

Université de Ljubljana : Tom Nagel, Gal Fidej, Matteo Cerioni, Matija Klopčič

Université de Cracovie : Jarosław Socha, Luiza Tyimińska, Ewa Grabska, Paweł Hawryło, Srdan Keren

Université de Wageningen : Mart-Jan Schelhaas

Les auteurs tiennent à remercier l'ONF et le PNR du Massif des Bauges pour leur contribution à la collecte de données sur le terrain et de données LIDAR aéroporté dans la zone d'étude française, ainsi que l'IGN pour avoir fourni gratuitement les données de l'Inventaire forestier national français. Les auteurs souhaitent également remercier le Service des forêts de Slovénie pour avoir fourni les données de l'inventaire forestier de la zone d'étude slovène. Enfin, les auteurs souhaitent remercier le Bureau polonais de gestion des forêts et de géodésie pour avoir fourni les données de la zone d'étude polonaise.

I-Maestro est un projet ERA-NET du programme Cofund ForestValue financé par l'ADEME (France), FNR (Allemagne), MIZS (Slovénie), NCN (Pologne). ForestValue a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne sous la convention de subvention n°773324.

CITATION DE CE RAPPORT

VALLET Patrick, AUSSENAC Raphaël, GUYENNON Arnaud, REINEKING Björn, MONNET Jean-Matthieu, COURBAUD Benoît, BEAUCHAMP Nathéo, LABONNE Sophie, CORDONNIER Thomas, 2023. I-MAESTRO : complexité et résilience des forêts. 45 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

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

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1903C0009

Étude réalisée par Patrick Vallet, Raphaël Aussenac, Arnaud Guyennon, Björn Reineking, Jean-Matthieu Monnet, Benoit Courbaud, Nathéo Beauchamp, Sophie Labonne, et Thomas Cordonnier pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Patrick Vallet

Appel à projet de recherche : ForestValue 2017

Coordination technique - ADEME : BUITRAGO Miriam

Direction Bioéconomie et Energies Renouvelables / Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	6
1. CONTEXTE DU PROJET	7
1.1. Perturbations et changement climatique	7
1.2. Résilience des services écosystémiques après une perturbation	7
1.3. Stratégies de gestion face aux perturbations	7
1.4. Résilience et complexité des forêts.....	8
1.5. Objectif principal du projet I-Maestro	8
2. METHODOLOGIE GENERALE DU PROJET	9
3. ANALYSE DE LA COMPLEXITE STRUCTURALE ET DE LA RESILIENCE..	11
3.1. Indices de complexité	11
3.1.1. Complexité structurale à l'échelle du peuplement.....	11
3.1.2. Complexité structurelle à l'échelle du paysage.....	12
3.2. Indices de résilience	12
3.3. Indicateurs des services écosystémiques	12
3.4. Package R.....	13
4. COMPLEXITE ET RESILIENCE A L'ECHELLE DU PEUPEMENT	14
4.1. Méthodes	14
4.1.1. Initialisation des peuplements.....	14
4.1.2. Sol.....	15
4.1.3. Climats.....	15
4.1.4. Perturbations.....	15
4.1.5. Indices de résistance, récupération et résilience.....	16
4.1.6. Analyse	16
4.2. Résultats.....	16
4.3. Conclusions	18

5.	COMPLEXITE ET TEMPETES A L'ECHELLE DU PAYSAGE	19
5.1.	Génération de données à l'échelle des territoires	19
5.2.	Scenarios de tempête	21
5.2.1.	Méthode de construction des scénarios de tempêtes	21
5.2.2.	Scénarios de tempête simulés	22
5.3.	Scenarios de gestion	23
5.3.1.	Plan de simulation générique	23
5.3.2.	Description du scénario « Baseline »	25
5.3.3.	Définition des scénarios alternatifs	26
5.3.4.	Bilan au niveau du territoire de la répartition des types de gestion	27
5.3.4.2.	Milicz	28
5.3.4.3.	Sneznik	29
5.4.	Simulations	29
5.5.	Résultats	30
5.5.1.	Compromis entre la diversité à l'échelle du peuplement et du paysage	30
5.5.2.	Effet de la complexité sur les services écosystémiques	31
5.5.2.1.	Evolution du volume au cours du temps	31
5.5.2.2.	Volume sur pied moyen en fin de période	33
5.5.2.3.	Volume récolté au cours de la simulation	34
5.5.2.4.	Volume de chablis au cours de la simulation	36
5.5.2.5.	Biodiversité : conservation de vieux arbres	37
5.5.2.6.	Biodiversité : variance du taux de couvert forestier	38
5.6.	Conclusion sur les services écosystémiques	39
6.	CONCLUSION GENERALE	40
	BILAN DES LIVRABLES DU PROJET	41
	LISTE DES ANNEXES	41
	ARTICLES SCIENTIFIQUES DU PROJET	42
	INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	43

RÉSUMÉ

Le changement climatique va modifier la structure et la dynamique des forêts et affecter la production de bois ainsi que d'autres services écosystémiques comme le stockage du carbone et la biodiversité. Les perturbations peuvent moduler les effets du changement climatique sur les fonctions essentielles des écosystèmes comme la productivité soit en augmentant les effets négatifs, soit en facilitant l'adaptation.

Dans I-MAESTRO, un projet ERA-NET du programme européen ForestValue 2017, nous avons étudié le lien entre les choix sylvicoles et la résilience des forêts aux perturbations, notamment les tempêtes. Nous avons en particulier évalué l'influence des stratégies de complexification de la forêt sur la résilience des services écosystémiques, en prenant en compte les stratégies de complexification soit à l'échelle de la parcelle forestière (mélanges d'essences, diversité des tailles des arbres), et à l'échelle du massif forestier (diversité des types de gestion, diversité des essences objectif), avec la question principale suivante : « la complexité des forêts est-elle une stratégie pertinente pour la résilience des services écosystémiques ? ».

Pour répondre à ces questions, nous avons comparé les résultats de simulations à l'échelle de la parcelle de quatre modèles de la dynamique forestière : LandClim, Salem, Samsara, et 4C. Avec les deux premiers modèles, nous avons également simulé l'évolution de 3 massifs forestiers entiers (les Bauges en France, Milicz en Pologne, et Sneznik en Slovénie) selon différents scénarios de gestion sylvicole.

Nous montrons qu'à l'échelle de la parcelle, la complexité a peu d'incidence sur la résilience de la production de bois. La résilience est par contre sensible à l'intensité de la tempête et au diamètre moyen du peuplement. En revanche, complexifier la forêt à l'échelle du territoire (diversité des types de gestion) peut avoir un effet sur les volumes de chablis, positif ou négatif selon les conditions initiales du territoire. En moyenne à l'échelle du territoire, les futaies irrégulières contiennent des volumes de bois sur pied plus importants que les futaies régulières, qui passent par des stades juvéniles avec peu de volume. Les diamètres moyens sont également plus élevés. En conséquence, l'augmentation de la part de futaie irrégulière dans le territoire augmente proportionnellement le volume de chablis. Avec des diamètres moyens plus importants, la futaie irrégulière augmente aussi les indicateurs de biodiversité liés aux gros bois.

1. Contexte du projet

1.1. Perturbations et changement climatique

Le changement climatique va modifier la structure et la dynamique des forêts via des effets directs (précipitations, température) et indirects (perturbations) qui affecteront la production de bois ainsi que d'autres services écosystémiques comme le stockage du carbone et la biodiversité (Lindner et al. 2014). Dans certaines régions, les modèles prévoient des pertes élevées de services écosystémiques (Elkin et al. 2013), en particulier pour les services d'approvisionnement et de régulation (ex. Mina et al. 2017).

Les perturbations (tempêtes, feux, attaques d'insectes...) pourraient s'intensifier à l'avenir. Par exemple, Seidl et al. (2017) ont constaté une augmentation de la fréquence des sécheresses et des tempêtes ainsi que des dommages causés par les ravageurs qui interagissent de façon significative avec les changements climatiques actuels. Ces perturbations sont des facteurs clé qui peuvent moduler les effets du changement climatique sur les fonctions essentielles des écosystèmes comme la productivité (Reyer et al. 2017). Dans ce cas, la perturbation peut soit augmenter les effets négatifs du changement climatique (effets combinés ; Millar & Stephenson 2015), soit faciliter l'adaptation en fonction de la composition de la communauté forestière et du type de perturbation concerné. Une synthèse récente a également souligné que les impacts des perturbations peuvent différer selon les services écosystémiques (Thom & Seidl 2016) avec, par exemple, des impacts positifs pour la biodiversité et négatifs pour le stockage du carbone.

1.2. Résilience des services écosystémiques après une perturbation

L'intensification des perturbations et ses interactions avec le changement climatique remettent en question la capacité des écosystèmes forestiers à atteindre les objectifs de bioéconomie de l'UE, à savoir obtenir une utilisation durable des ressources tout en préservant la fourniture d'autres services écosystémiques comme le stockage du carbone et la biodiversité (Lindner & Suominen 2017). Dans ce contexte, la résilience des forêts peut jouer un rôle majeur pour limiter la dégradation des forêts et des services écosystémiques associés. La résilience des forêts est définie comme la capacité de la forêt à persister et à maintenir ses structures et ses fonctions face aux perturbations (Ingrisch & Bahn 2018). Elle est généralement décrite par deux processus principaux : la capacité de la forêt à réduire l'impact de la perturbation (appelée résistance, robustesse, vulnérabilité, etc.) et la capacité de la forêt à se remettre de l'impact de la perturbation (appelée récupération, élasticité, etc.). Fuller et Quine (2016) ont mis en évidence deux autres composantes essentielles de la résilience lorsque le rétablissement complet n'est pas atteint : l'adaptation (retour à un autre état qui a essentiellement la même structure et la même fonction) et la transformation vers un nouvel état lorsque l'adaptation se révèle impossible.

La résilience peut être quantifiée à différentes échelles spatiales et temporelles à l'aide de différents paramètres (voir Ingrisch et Bahn 2018 ; Scheffer et al. 2015). Favoriser la résilience est devenu un objectif clé de l'adaptation forestière (Puettmann et al. 2009) et doit être considéré comme une condition préalable au développement de la bioéconomie forestière (Winkel 2017). En outre, la résilience des forêts deviendra de plus en plus cruciale à mesure que les sociétés augmenteront l'utilisation des ressources forestières.

1.3. Stratégies de gestion face aux perturbations

Le développement d'une bioéconomie durable exige la définition de stratégies de gestion novatrices qui favorisent la résilience de la production de bois et favorisent la flexibilité pour répondre aux changements de la demande en bois tout en préservant d'autres services importants des écosystèmes forestiers. La plupart des études antérieures se sont concentrées sur la façon dont la gestion pourrait atténuer les impacts du changement climatique sur la fourniture de services écosystémiques. Notre compréhension de la manière dont les perturbations naturelles peuvent déclencher l'effondrement de ces services écosystémiques sous l'effet du changement climatique apparaît beaucoup plus limitée. Pour progresser sur cette question urgente, nous devons mieux comprendre (i) les changements passés et futurs des régimes de perturbation et la capacité de résilience des forêts à différentes échelles et pour de multiples services écosystémiques, (ii) comment la gestion peut atténuer les impacts des perturbations (Millar & Stephenson 2015 ; Seidl et al. 2018) et influencer les processus de récupération (O'Hara & Ramage 2013). Cela nous permettra d'élaborer des stratégies de gestion qui garantissent la résilience et des niveaux élevés de fourniture de services écosystémiques à différentes échelles, allant des peuplements et paysages au niveau européen.

1.4. Résilience et complexité des forêts

La complexité structurale, définie comme la diversité des éléments de composition et de structure de la forêt (diversité des tailles, diversité des espèces...), peut modifier la résilience et l'approvisionnement en services écosystémiques à différentes échelles par la complémentarité des espèces et des tailles des arbres (Forrester & Bauhus 2016 ; Dănescu et al. 2016 ; Seidl et al. 2018), par la création de différents itinéraires pour la gestion post-perturbation (O'Hara & Ramage 2013) ou par la réduction de la propagation des perturbations (cf. hétérogénéité spatiale ; Turner et al. 2012). Cependant, la complexité structurale est une propriété émergente qui peut être influencée par des interactions complexes entre les perturbations, la gestion forestière et le changement climatique. Par exemple, la diversité des espèces d'arbres peut être modulée de façon non additive par des perturbations et des interventions de gestion (Kunstler et al. 2013). Dans le même ordre d'idées, la diversité des tailles peut être renforcée par une dynamique de trouées liée soit à la perturbation, soit à la gestion (ex. Lafond et al., 2014). On ne sait donc pas encore clairement quand et comment la complexité structurale favorise la fourniture des services écosystémiques et leur résilience. En outre, la question de savoir à quel point la complexité influe sur la résilience des forêts et la fourniture des services écosystémiques fait encore l'objet de débats (cf. Schall et al. 2017). Les stratégies d'aménagement qui favorisent la complexité structurale pourraient présenter un fort potentiel de développement de forêts résilientes, ce qui justifie des analyses plus approfondies.

1.5. Objectif principal du projet I-Maestro

L'objectif principal de notre projet est d'améliorer les connaissances scientifiques pour développer des stratégies de gestion qui augmentent la résilience de la bioéconomie face aux futures perturbations naturelles et au changement climatique, tout en maintenant un niveau élevé de production de bois, de stockage du carbone et de qualité d'habitat pour la biodiversité.

Ainsi, la question générale abordée dans le projet I-Maestro est la suivante :

La complexité structurale des forêts, de l'échelle du peuplement à l'échelle de vastes territoires forestiers, permet-elle d'améliorer la résilience des services écosystémiques, dont la bioéconomie, face aux perturbations naturelles ?

Pour répondre à cette question, le projet a poursuivi plusieurs objectifs particuliers :

- Faire une revue de synthèse des connaissances sur les perturbations forestières et sur la résilience des forêts afin d'améliorer les connaissances sur la résistance aux perturbations et sur les processus de récupération, et développer une base de données à jour sur les perturbations (Schelhaas et al., 2003) pour produire des scénarios de perturbations forestières en Europe ;
- Simuler les impacts des perturbations, de la gestion et des scénarios de changement climatique sur la production de bois, le stockage du carbone et la conservation de la biodiversité (résilience, approvisionnement) à différentes échelles (peuplement, et grand massif forestier) ;
- Evaluer l'influence de la complexité structurale sur les services écosystémiques et la valeur des stratégies de gestion fondées sur la complexité ;
- Améliorer l'évaluation de la biodiversité dans les modèles de dynamique forestière en définissant des fonctions de lien de la biodiversité (c'est-à-dire tout algorithme ou indicateur permettant d'évaluer un service écosystémique à partir des résultats des modèles de dynamique forestière ; Blattert et al., 2017) à l'échelle du paysage qui intègre les effets des perturbations ;
- Synthétiser des recommandations fondées sur des données concrètes pour améliorer la résilience grâce à des stratégies de gestion adaptative ciblant les décideurs politiques et les gestionnaires.

À l'aide de modèles de simulation forestière intégrant la perturbation, la gestion et le changement climatique, I-Maestro aborde les quatre hypothèses suivantes :

- i. La gestion forestière influence les processus de régénération après une perturbation avec des impacts élevés sur la production de bois et d'autres services écosystémiques ;
- ii. L'amélioration de la complexité structurale à l'échelle du peuplement conduit à une plus grande résilience des services écosystémiques en favorisant les processus liés à la réactivité de la croissance ;
- iii. La complexité structurale à l'échelle du paysage atténue les effets des perturbations en diversifiant les réponses des peuplements et en modulant leur sensibilité ;
- iv. La taille optimale du grain spatial pour gérer les compromis entre les services écosystémiques dépend des caractéristiques des perturbations (ex. taille, fréquence) et devrait être prise en compte dans l'adoption des stratégies locales de gestion.

En étudiant les interactions entre les perturbations, la gestion forestière, les changements climatiques et la complexité structurale, I-Maestro apporte des éléments de connaissance pour élaborer de nouvelles pratiques de gestion adaptative qui amélioreront la bioéconomie forestière.

2. Méthodologie générale du projet

I-Maestro aborde les relations entre la gestion et les services écosystémiques à trois échelles : peuplement, paysage et pays. Cette approche multi-échelle permet à I-Maestro d'étudier les différents processus de gestion forestière influençant la bioéconomie : sylviculture, aménagement et stratégie (niveaux régional).

Au niveau du paysage, trois zones d'étude de cas, de plusieurs milliers d'hectares chacune, ont été sélectionnées en France (Bauges), en Slovénie (Sneznik) et en Pologne (Milicz). Les paysages sont complémentaires en matière de systèmes de gestion (inéquienne en France, équienne en Pologne et mixte en Slovénie), et de régimes de perturbation (peu fréquents en France, fréquents en Pologne et intermédiaires en Slovénie). À toutes les échelles, le projet prend en compte les écosystèmes forestiers tempérés dominés par le sapin, l'épicéa, le hêtre et le pin sylvestre. Les simulations à l'échelle des pays (France et Allemagne) sont encore en cours, notamment avec nos partenaires de Potsdam. Elles visent la couverture la plus complète possible des situations sylvicoles en matière d'essence ou de structure.

La figure 1 illustre l'organisation par lots et par tâches (WP) du projet I-Maestro. Le projet utilise des modèles de dynamique forestière complémentaires (4C, Samsara2, LandClim et Salem) pour étudier les relations entre la gestion, la perturbation et la résilience des services écosystémiques. Ces modèles sont évalués sur un jeu de données commun, issu du WP1. Le WP1 fournit également aux modèles les données initiales pour les simulations aux trois échelles d'étude (peuplement, cas d'étude régional, pays).

Une base de données des perturbations observées à l'échelle européenne est développée par les partenaires de l'EFI dans le WP2. Elle est alimentée lors d'un travail conjoint de mobilisation de l'information existante à l'échelle européenne. Grâce à cette information, des scénarios de perturbations pour les années à venir sont élaborés en collaboration entre les collègues travaillant sur la base de données des perturbations et les modélisateurs.

Dans le WP3, un important travail de simulation à partir des 4 modèles et pour les 3 échelles d'étude est réalisé. Ces simulations sont alimentées par des scénarios de gestion co-construits entre les partenaires et avec les acteurs des territoires. Ces simulations fournissent des valeurs de services écosystémiques et de complexité structurale, et sont analysées pour répondre aux questions générales du projet, avec l'appui de synthèses issues de la littérature scientifique (WP4).

Dans ce rapport final, nous ne présentons que les parties principales, sans détailler l'ensemble des résultats intermédiaires.

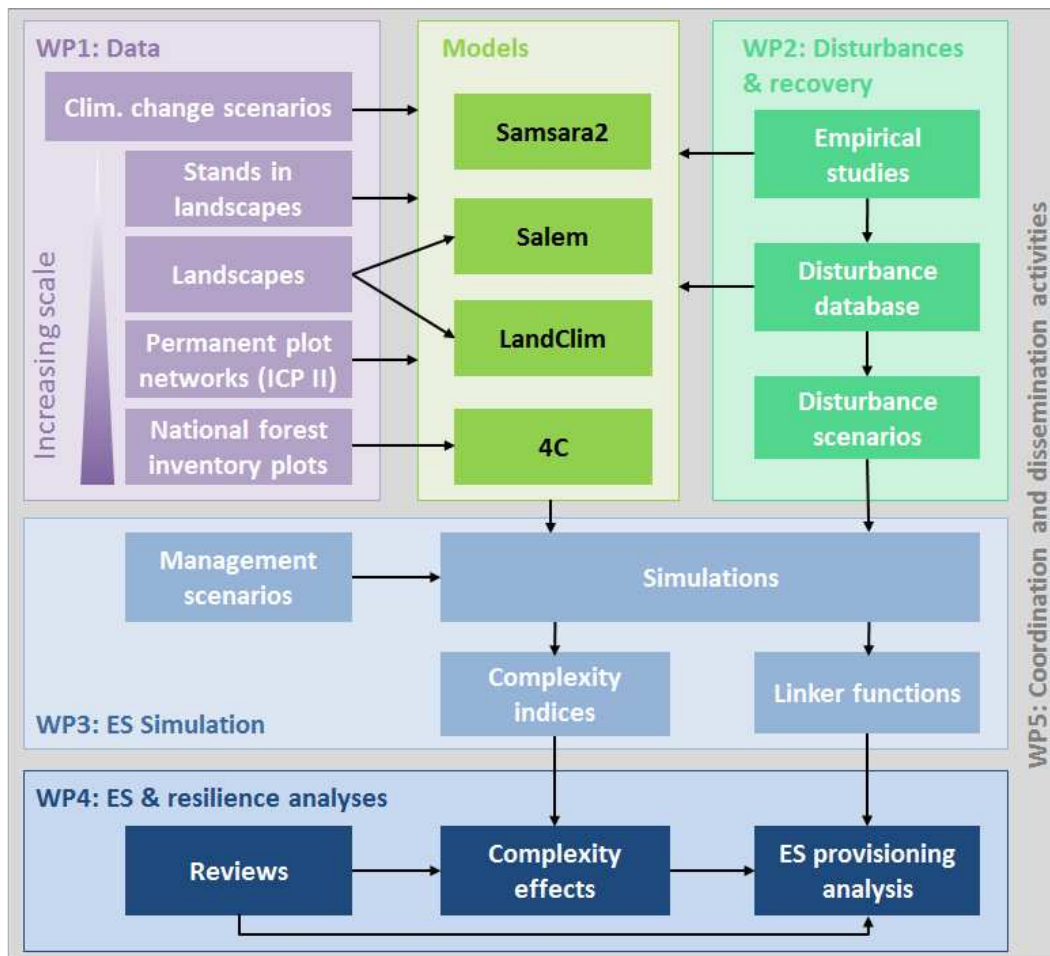


Figure 1 : Schéma illustrant les principaux éléments du projet I-Maestro

3. Analyse de la complexité structurale et de la résilience

Les sections 3.1 à 3.3 ci-dessous résument les éléments essentiels du livrable D1.2 qui figure en annexe A.

3.1. Indices de complexité

Dans le projet I-Maestro, la complexité structurale est définie comme la diversité des éléments de composition et de structure du peuplement forestier (Fahey et al. 2018). En général, la complexité structurale comporte trois dimensions : la diversité des espèces d'arbres, la diversité des tailles des arbres (diamètre, hauteur) et l'hétérogénéité spatiale des arbres. À l'échelle du paysage, elle comprend également l'organisation spatiale de ces différentes dimensions. Ces dimensions sont complémentaires de la composition des espèces (identité des espèces) et de la diversité fonctionnelle. Dans des études récentes, la complexité structurale a également été évaluée au moyen de mesures de télédétection (par ex. la texture, Hardiman et al. 2011) ou de mesures LIDAR terrestres (Seidel et al. 2019). Comme les modèles ne peuvent pas produire de telles évaluations, nous baserons notre analyse de l'hétérogénéité structurale sur des mesures classiques des arbres (surface terrière, diamètre, hauteur, coordonnées spatiales). Dans I-Maestro, la complexité structurale sera considérée comme un facteur en soi (analyse de l'effet de la gestion sur la complexité structurale) ou sera combinée avec d'autres indices (couverture de la canopée, par exemple) pour évaluer la conservation de la biodiversité (ex. Storch et al. 2018).

3.1.1. Complexité structurale à l'échelle du peuplement

La diversité des espèces prend en compte le nombre d'espèces et leur abondance relative. L'abondance désigne ici la densité des tiges, la surface terrière, le volume ou la biomasse. Les mesures utilisées pour évaluer la diversité des espèces sont nombreuses mais les plus classiques sont les suivantes : richesse en espèces, indice de diversité des espèces basé sur l'indice d'entropie de Shannon (Jost 2006), inverse de l'indice de dominance de Simpson. Tous ces indices, qui sont en réalité des nombres de Hill (Chao et al. 2014), ont été retenus pour analyser les simulations.

Les mesures relatives à la diversité des tailles des arbres (diamètre, surface terrière, hauteur, volume ou biomasse) peuvent être continues (indice de Gini; Damgaard & Weiner 2000) ou basées sur des classes de taille (indice de diversité de Shannon appliqué aux diamètres; Lexerod & Eid 2006). Habituellement, plus les différences de taille entre les arbres sont importantes, plus les valeurs de l'indice sont élevées. Toutefois, certains indices décrivent mieux l'inégalité des tailles (indice de Gini) et d'autres mettent mieux en évidence la façon dont l'abondance est répartie entre les classes de taille (indice de Shannon).

Dans I-Maestro, l'hétérogénéité spatiale à l'échelle du peuplement ne peut être évaluée que par un seul modèle (Samsara2). L'idée principale est dans ce cas d'évaluer la variabilité spatiale des espèces et des tailles d'arbres mais aussi la façon dont les arbres sont répartis spatialement au sein du peuplement (agrégés, aléatoires ou réguliers). Pour la distribution spatiale des arbres, certaines approches sont très informatives (ex. fonctions de Ripley) mais posent des difficultés pour en dériver une mesure synthétique. Nous avons décidé d'utiliser des indices produisant une seule valeur pour un peuplement : indices de différenciation en mélange et en taille et l'indice d'angle uniforme (Aguire & Hui 2003, Pommerening & Uria-Diez 2017). D'autres approches ont été proposées par les auteurs pour résumer plusieurs dimensions en un seul indice. C'est le cas par exemple de l'indice d'hétérogénéité des peuplements développé par Zenner et Hibbs (2000) qui intègre l'hétérogénéité spatiale et la diversité des tailles. Nous mobiliserons également cet indice.

3.1.2. Complexité structurale à l'échelle du paysage

La complexité structurale à l'échelle du paysage exprime la façon dont la densité, les espèces, la taille et la distribution spatiale des arbres varient d'un peuplement à l'autre.

Pour la densité des peuplements (surface terrière, volume, biomasse, couvert), nous avons retenu des indices simples de dispersion des valeurs, en tenant compte de la superficie des peuplements (coefficient de variation pondéré).

Concernant la diversité des espèces et la diversité des tailles des arbres, nous considérons la décomposition classique des indices de diversité de Shannon en trois composantes : diversité α (moyenne de la diversité des peuplements), diversité β (diversité entre les peuplements) et diversité γ (diversité à l'échelle du paysage) (Blattert et al. 2018). Dans ce cas on obtient la relation suivante : $\gamma = \alpha \times \beta$.

Il est important de noter qu'avec cette approche, nous n'évaluons pas la configuration spatiale des caractéristiques des peuplements (par exemple, agrégation/ségrégation) dans le paysage. Le consortium a décidé pour le moment de ne pas étudier cet aspect de l'hétérogénéité. Il a été décidé en revanche d'analyser la complexité pour différentes résolutions : 1 ha, 25 ha et 100 ha.

3.2. Indices de résilience

Le projet REFORCE (Eranet Sumforest) a défini un ensemble de 10 indices caractérisant la résilience ingénieriale¹. Ces 10 indices peuvent être appliqués à toute variable d'intérêt calculée à l'échelle du peuplement ou du paysage. Dans I-Maestro nous avons toutefois décidé de simplifier cette approche pour améliorer l'interprétabilité des résultats. Nous avons ainsi utilisé :

- 1- Des indices de résistance, récupération et résilience qui soient additifs (résilience = résistance + récupération) dans le cadre d'une expérimentation virtuelle (cf. section 4) visant à analyser la réponse à une perturbation par le vent de peuplements ayant différentes structures et compositions.
- 2- Un indice très synthétique dans le cas des simulations réalisées à l'échelle du massif (cf. section 5), à savoir le volume cumulé (ou ramené à l'hectare et par an) de chablis. Cet indice ne tient pas compte du volume d'arbres mort induit par des sécheresses car certains modèles ne disposent pas de module interne gérant ce type de perturbation.

3.3. Indicateurs des services écosystémiques

Ces indicateurs ont été définis à l'échelle du peuplement (tableau 1). Ils permettront d'évaluer les services de production de bois, de carbone et de biodiversité. Des indicateurs de structure ont également été définis pour compléter les indicateurs de services rendus. A l'échelle du paysage il a été décidé de ne retenir qu'un indice de diversité du couvert pour compléter les indices liés aux espèces saproxyliques (quantité de bois mort, densité de très gros bois). Tous les modèles ne peuvent pas estimer tous les indices à toutes les échelles (cf. tableau 1).

¹ Capacité d'un écosystème à persister et à maintenir son état et ses fonctions face à une perturbation ; elle est déterminée par la capacité à réduire l'impact (résistance) et la capacité à se remettre de l'impact d'une perturbation (récupération) (Ingrisch & Bahn 2018)

3.4. Package R

Les fonctions utiles aux calculs des indices de diversité mentionnés dans les chapitres précédents ont été implémentées au sein d'un package actuellement déposé à l'adresse suivante :

<https://gitlab.com/arnaud.guyennon/forestdiversity>

L'objectif initial de ce package est de mettre à disposition des collaborateurs du projet des méthodes de calcul communes; la diffusion du package reste à discuter en fonction de l'intérêt pour une communauté plus large.

Le calcul des indices de peuplement (avec ou sans hétérogénéité spatiale) se fait à partir des sorties de modèle ou des observations à un format préalablement défini au sein du projet I-Maestro.

CRITERIA	METRIC	NAME	UNIT
wood production	Total volume harvested	VH	m3ha-1yr-1
wood production	Volume harvested per species	VHsp	m3ha-1yr-1
wood production	Volume harvested per species and dbh class	VHsp,dbh	m3ha-1yr-1
wood production	Basal area increment	BAI	m2ha-1yr-1
wood production	Basal area increment per species	BAIsp	m2ha-1yr-1
wood production	Basal area increment per species and dbh class	BAIsp,dbh	m2ha-1yr-1
wood production	Volume increment	VI	m3ha-1yr-1
wood production	Volume increment per species	VIsp	m3ha-1yr-1
wood production	Volume increment per species and dbh class	VIsp,dbh	m3ha-1yr-1
wood production	Total volume stocking	V	m3ha-1
wood production	Volume stocking per species	Vsp	m3ha-1
wood production	Volume stocking per species and dbh class	Vsp,dbh	m3ha-1
carbon storage	Aboveground carbon (living trees)	Ca	t ha-1
carbon storage	Belowground carbon (living trees)	Cb	t ha-1
carbon storage	Deadwood carbon	CDW	t ha-1
carbon storage	Soil carbon	Cs	t ha-1
biodiversity	Deadwood volume	VDW	m3ha-1
biodiversity	Number of large standing dead trees	LSDTN	ha-1
biodiversity	Deadwood diversity	DWD	ha-1
biodiversity	Number of very large living trees	LLTN	ha-1
biodiversity	Number of trees with dendromicrohabitats	NDMH	ha-1
biodiversity	Integrated biodiversity index	BI	-
other structural attribute	Total basal area	BA	m ² ha-1
other structural attribute	Basal area per species	BAsp	m ² ha-1
other structural attribute	Basal area per species and dbh class	BAsp,dbh	m ² ha-1
other structural attribute	Total number of trees	N	ha-1
other structural attribute	Number of trees per species	Nsp	ha-1
other structural attribute	Number of trees per species and dbh class	Nsp,dbh	ha-1
other structural attribute	Quadratic mean diameter	QMD	m
other structural attribute	Quadratic mean diameter per species	QMDsp	m
other structural attribute	Arithmetic mean total tree height	H	m
other structural attribute	Arithmetic mean total tree height per species	Hsp	m
other structural attribute	Regeneration cover	RC	%
other structural attribute	Regeneration cover per species	RCsp	%
other structural attribute	Regeneration density	RN	ha-1
other structural attribute	Regeneration density per species	RNsp	ha-1

Tableau 1 : indicateurs utilisés pour évaluer les services rendus par les écosystèmes forestiers.

4. Complexité et résilience à l'échelle du peuplement

La complexité structurale des peuplements est considérée comme une stratégie intéressante pour faire face aux perturbations et ainsi accroître la résilience. L'augmentation de la richesse en espèces augmente les chances que les espèces répondent de manière différente aux perturbations (Jourdan et al. 2021) et donc d'atteindre une plus grande résilience. Les effets de complémentarité peuvent également dans certains cas améliorer la productivité (Morin et al. 2011) et donc la récupération du peuplement après une perturbation. La diversité des tailles des arbres est aussi mentionnée comme une option valable pour diminuer la sensibilité des peuplements aux tempêtes. Le raisonnement est que les forêts inéquiennes présentent en permanence un potentiel de récupération élevé en raison de la présence constante de semis et de jeunes plants dans le peuplement (Cordonnier et al. 2008).

Afin de tester ces hypothèses générales, nous avons développé une approche de simulation pour vérifier si la richesse en espèces et la diversité des tailles des arbres, deux dimensions majeures de la complexité structurale des peuplements, sont des facteurs importants et positifs pour la résilience des peuplements aux tempêtes. Afin de rendre notre approche plus générique, nous avons utilisé les quatre modèles mobilisés dans le projet (Samsara2, LandClim, Salem et 4C) pour simuler la récupération des peuplements après perturbation, perturbation simulée à l'aide du modèle ForestGALES². Afin d'analyser l'effet de la complexité structurale des peuplements, nous avons élaboré un plan expérimental pour initialiser les peuplements.

En considérant la réponse de la surface terrière du peuplement sur une période de 50 ans, nos hypothèses plus spécifiques étaient les suivantes : (i) d'après la littérature, la composition des espèces et le diamètre moyen du peuplement sont les principaux moteurs de la résistance et de la récupération du peuplement, (ii) en raison de la complémentarité des espèces, la richesse en espèces améliore la récupération du peuplement, (iii) pour un diamètre moyen donné, la diversité des tailles diminue la résistance car elle augmente la proportion de grands arbres dans le peuplement, (iv) à l'inverse, la diversité des tailles augmente la récupération en augmentant la proportion de petits arbres.

4.1. Méthodes

4.1.1. Initialisation des peuplements

Nous avons construit un ensemble de peuplements virtuels basés sur un plan d'expérience factoriel complet de trois facteurs décrit dans le tableau 2 : diamètre quadratique moyen (2 modalités), indice de Gini (4) et composition (15) (voir tableau 2). La surface terrière a été fixée à 30 m². Le choix d'une seule modalité pour la surface terrière repose sur la redondance avec les trois modalités de vitesse de vent qui induisent des dégâts de différentes intensités et donc différentes surfaces terrières après perturbation. Nous avons choisi d'étudier quatre espèces importantes en Europe qui peuvent croître au sein d'un même peuplement : *Picea abies* (épicéa), *Fagus sylvatica* (hêtre), *Pinus sylvestris* (pin sylvestre) et *Quercus petraea* (chêne sessile). Pour la distribution des diamètres des arbres, notre choix s'est porté sur une distribution de Weibull avec un diamètre minimum de 7,5 cm et un diamètre maximum de 150 cm. En raison du nombre limité d'arbres dans les peuplements, nous avons effectué 1000 tirages pour chaque type de peuplement sur la base de la distribution théorique et avons conservé celui qui était le plus proche des valeurs cibles expérimentales. Dans les peuplements mélangés, les espèces sont réparties de manière égale entre les classes de diamètre.

Le plan d'échantillonnage comporte donc 1440 modalités (la richesse en espèces est incluse dans les compositions).

² <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/fthr/forestgales/>

Facteur	Valeurs	Nombre de modalités
Vitesse du vent (km/h)	75 / 80 / 85	3
Climat	1 / 2 / 3 / 4	4
Composition	hêtre, pin sylvestre, épicéa, chêne sessile	15
Richesse en espèces	1 / 2 / 3 / 4	4 (induit par la composition)
Diversité des tailles (gini)	0.3 / 0.4 / 0.5 / 0.6	4
Diamètre moyen quadratique (cm)	30 / 40	2
Surface terrière (m ² ha ⁻¹)	30	1
TOTAL		3 x 4 x 15 x 4 x 2 x 1 = 1 440 modalités

Tableau 2 : Modalités de l'expérimentation virtuelle.

4.1.2. Sol

Les données pédologiques pour initialiser les modèles ont été dérivées de la base de données européenne des sols v2.0 (Panos 2006, ESDB). L'ESDB fournit des informations spatiales sur la distribution des types de sol prédominants à travers l'Europe en tant qu'unités de type de sol (UTS). Dans cette base de données, les UTS sont liées aux caractéristiques du sol qui sont pertinentes pour la croissance des arbres, comme la capacité en eau disponible. Nous avons calculé la prévalence des différentes UTS dans les zones de co-occurrence des quatre espèces. Puis nous avons sélectionné les informations pédologiques de l'UTS ayant la plus grande surface. Cette UTS présente une forte réserve utile en eau, une faible capacité d'échange cationique et une texture argilo-sableuse.

4.1.3. Climats

Afin de tester un éventuel effet du climat sur la réponse des peuplements à une tempête, nous avons sélectionné quatre modalités climatiques compatibles avec la présence des quatre espèces étudiées et représentatives de conditions climatiques contrastées et réalistes en Europe. Ces modalités climatiques consistent en des séries chronologiques de 50 ans (1961-2010) de variables climatiques quotidiennes nécessaires au fonctionnement des modèles, comprenant par exemple les valeurs journalières de température moyenne, minimale et maximale, l'humidité relative, la somme des précipitations et la pression atmosphérique de surface. Les séries temporelles sont obtenues à partir d'un ensemble de données de forçage météorologique mondial composé de données W5E5 (<http://doi.org/10.5880/pik.2019.023>) et GSWP3 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.3648654>) traitées dans le cadre du projet ISIMIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, <https://www.isimip.org/>) à une résolution spatiale de 0,5°.

4.1.4. Perturbations

Pour simuler les perturbations nous avons calculé, à l'aide de ForestGALES, la vitesse critique au-delà de laquelle les arbres sont renversés ou endommagés. Cette vitesse critique dépend des caractéristiques des arbres (espèce, hauteur, diamètre, volume), des peuplements (espacement des arbres, hauteurs moyenne et dominante, diamètre moyen), mais aussi du type de sol et de la profondeur d'enracinement. Nous avons ensuite retiré des peuplements initiaux les individus dont la vitesse critique était inférieure à la vitesse du vent simulé (75, 80, 85 km/h), ces arbres étant considérés détruits par la tempête.

4.1.5. Indices de résistance, récupération et résilience

Les indices de résistance, récupération et de résilience sont appliquées à la surface terrière (BA, m²ha⁻¹). La résistance représente la capacité du peuplement à ne pas changer au moment de la perturbation. La résistance est calculée de la manière suivante :

$$\text{Resist} = 1 - (BA_{\text{before}} - BA_{\text{after}}) / BA_{\text{before}}$$

Resist varie entre 0 et 1, les valeurs les plus élevées correspondant à une plus grande résistance (par exemple, 0.9 signifie que 90% de la surface terrière est encore présente après perturbation). On peut également définir la sensibilité comme 1 moins la résistance (dans l'exemple, 1-0.9=0.1, donc 10% de la surface terrière est détruite par la tempête).

La récupération est définie comme la capacité d'un peuplement perturbé à retourner vers son état initial. Elle est définie par :

$$\text{Rec} = (BA_t - BA_{\text{after}}) / BA_{\text{before}}$$

t étant le temps après perturbation, pris après 50 ans dans notre analyse. Rec varie entre 0 et +∞ (en considérant que les variations de la surface terrière sont positives après la perturbation). Des valeurs plus élevées de cet indice signifient une récupération plus importante.

Enfin, la résilience est la capacité d'un peuplement à retrouver son état initial après une perturbation, et est calculée comme suit :

$$\text{Resil} = (BA_t - BA_{\text{before}}) / BA_{\text{before}}$$

La résilience peut être ainsi décomposée avec Resil = Rec + Resist.

4.1.6. Analyse

Pour déterminer quels facteurs sont les plus pertinents dans les indices de résilience, nous avons utilisé une approche permettant de quantifier l'importance des variables (Fisher, A. et al. 2019), en mobilisant le package R DALEX (Explainers for Complex Predictive Models in R). Nous avons défini un modèle linéaire avec les différents facteurs comme variables explicatives des indices de résilience. Ensuite, pour chaque variable explicative, un ensemble de permutations est appliqué aux variables, avec à chaque fois un calcul de la Root Mean Square Error (RMSE) du modèle. Si pour une variable la permutation conduit à une RMSE plus élevée que lorsqu'aucune permutation n'est réalisée, cela signifie que cette variable a un impact substantiel sur l'explication de l'indice de résilience, des différences de RMSE plus élevées signifiant des relations plus fortes.

La résistance est exprimée en fonction de l'indice de Gini, du diamètre quadratique Dg, de la composition et de la vitesse du vent. La récupération est exprimée en fonction du Gini, du Dg, de la composition, du climat et du modèle forestier. Dans chaque cas, les variables explicatives sont exprimées en tant que facteurs. La résilience n'est pas analysée directement mais comme la différence entre les deux modèles linéaires de résistance et de récupération : résilience = récupération + résistance.

4.2. Résultats

La figure 2a montre les résultats obtenus pour l'importance des variables dans le cas de l'indice de résilience. Les facteurs ayant le plus d'importance sont la vitesse de vent, le modèle et le diamètre quadratique moyen. La composition arrive en 4^{ème} position seulement. Enfin, la diversité des tailles et le climat ont un effet très limité sur la résilience. La richesse en espèces (niveau de 1 à 4), lorsque substituée au facteur composition, présente une importance plus forte que la diversité des tailles, mais reste toutefois nettement plus réduite que les autres facteurs (figure 2b).

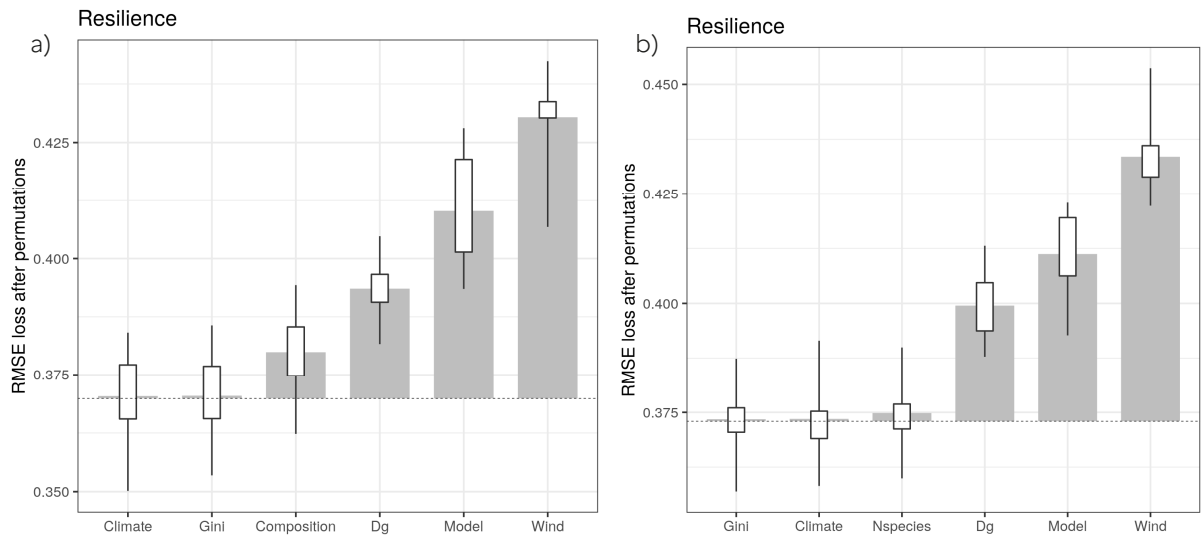


Figure 2 : Importance des facteurs de l'expérimentation virtuelle pour expliquer la résilience de la surface terrière de peuplement à une perturbation de type tempête. Des diagrammes à barres plus élevés signifient une plus grande importance des variables.

La figure 3 et la figure 4 présentent le détail des résultats des simulations par modèle pour les indices de récupération, sensibilité et résilience. Pour l'effet de la diversité des tailles (figure 3), il ne se dégage aucun patron clair excepté un léger effet négatif sur la résistance pour la plus faible vitesse de vent et le diamètre quadratique de 30cm. Dans le cas de la richesse en espèces, on observe de fortes divergences entre modèles. En particulier, on obtient des effets négatifs de la richesse sur la récupération avec le modèle 4C et un effet positif dans le cas du modèle LanClim. Concernant la résilience, aucun patron clair ne se dessine.

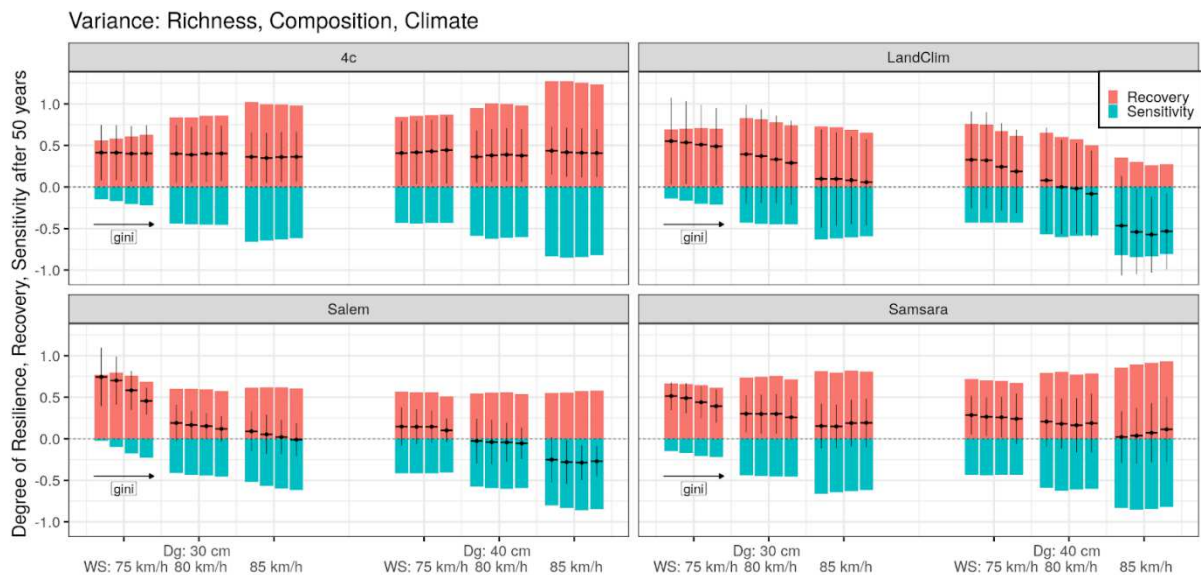


Figure 3 : Effet de la vitesse du vent (WS), du diamètre quadratique moyen (Dg), du modèle et de la diversité des tailles (gini) sur la sensibilité, la récupération et la résilience des peuplements (croix noires, calculées comme la somme de la sensibilité et de la récupération). Les quatre barres d'un même groupe correspondent à une diversité des tailles croissantes (gini, niveaux de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6)

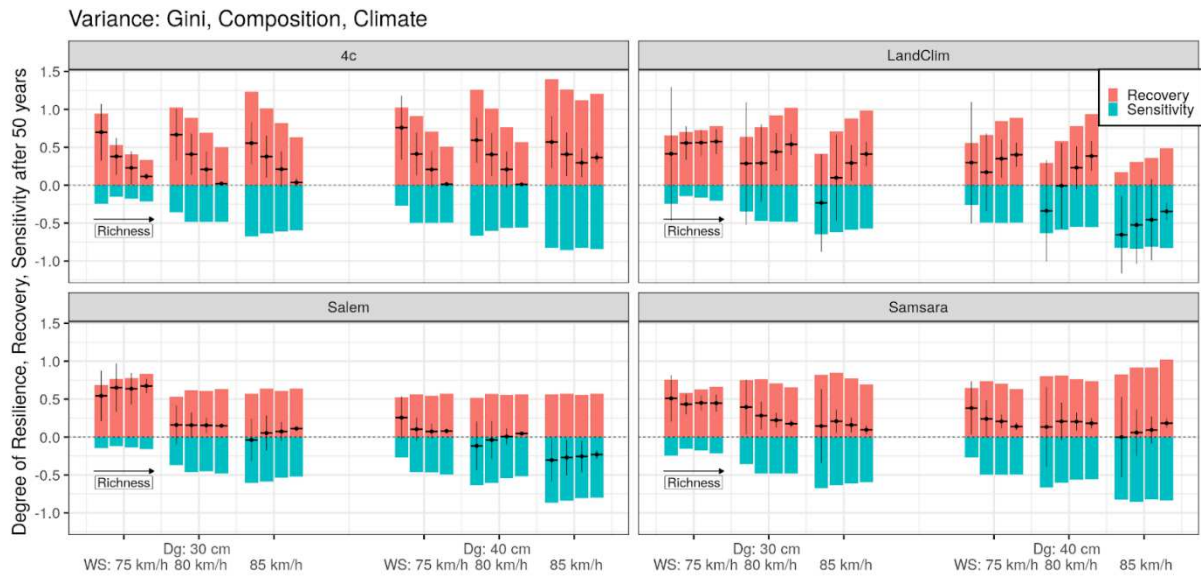


Figure 4 : Effet de la vitesse du vent (WS), du diamètre quadratique moyen (Dg), du modèle et de la richesse en espèce (Richness) sur la sensibilité, la récupération et la résilience des peuplements (croix noires, calculées comme la somme de la sensibilité et de la récupération). Les quatre barres d'un même groupe correspondent à une richesse en espèce croissantes (Richness, niveaux de 1 à 4 espèces)

4.3. Conclusions

Contrairement à nos hypothèses, notre expérimentation virtuelle n'a pas mis en évidence un effet important de la complexité structurale per se (richesse en espèces, diversité des tailles) sur la résilience des peuplements après une perturbation par le vent. Pour la diversité des tailles, l'ensemble des modèles indique un effet très limité, potentiellement négatif dans certaines situations. Pour la richesse en espèces, les résultats des modèles divergent et il n'est donc guère possible de conclure. Les facteurs ayant un effet notable sur la résilience sont le diamètre quadratique moyen et la composition. Il est important de souligner qu'il s'agit d'un exercice pur de modélisation et que les résultats sont donc dépendant de la structure des modèles et de la manière dont ils gèrent les interactions entre espèces et entre strates. Par ailleurs, ces résultats ne doivent pas être généralisés au cas d'autres perturbations, par exemple des sécheresses sévères ou des dégâts dus aux insectes ravageurs.

5. Complexité et tempêtes à l'échelle du paysage

Le projet I-Maestro a également abordé la question du lien entre la complexité structurale et l'influence des tempêtes à l'échelle de grands paysages forestiers. Dans cette partie, nous nous sommes placés dans le cadre de trois cas d'étude réels, et nous avons simulé à l'aide de modèles de dynamique forestière l'effet de scénarios de gestion induisant des niveaux de complexité variés sur l'influence des tempêtes sur les volumes de chablis ainsi que sur plusieurs services écosystémiques. La figure 5 décrit les différentes étapes nécessaires à la réalisation des simulations des trois cas d'étude. Les sections suivantes décrivent plus en détail l'étape d'initialisation (section 5.1), les scénarios de perturbation construits (section 5.2), et les scénarios de gestion appliqués (section 5.3). Les scénarios climatiques sont issus de modèles existants et ont été compilés pas les collègues de PIK. Enfin, nous présentons les conclusions tirées des simulations (section 5.5).

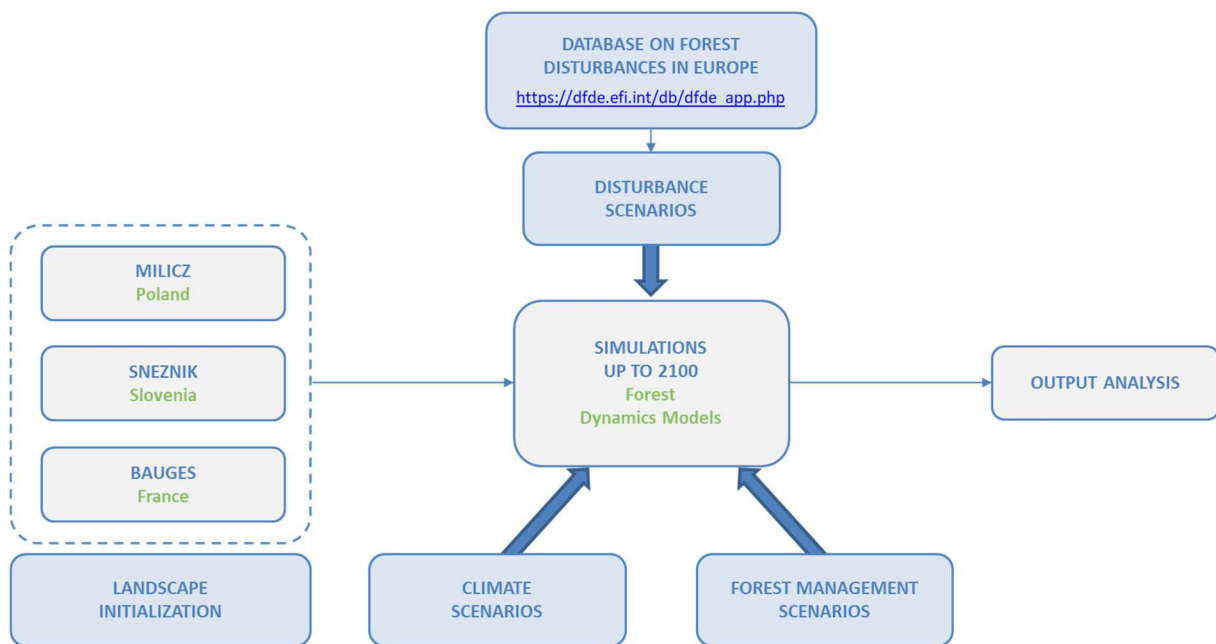


Figure 5 : Etapes de réalisation des simulations à l'échelle du paysage

5.1. Génération de données à l'échelle des territoires

Dans cette partie, nous avons évalué l'influence de la complexité à l'échelle du territoire (diversité β), mais également de la complexité des peuplements qui le compose (diversité α). Evaluer l'ensemble des indicateurs de diversité à différentes échelles nécessite d'avoir une description exhaustive des arbres qui composent les peuplements, pour l'ensemble des territoires étudiés ; un échantillon de peuplements représentatifs ne serait pas suffisant pour aborder les questions de diversité.

Nous nous sommes appuyés sur les données acquises dans le projet PROTEST³ pour élaborer une méthode générique de génération de données à l'échelle d'un grand territoire. Cette méthode correspond à la partie « Landscape initialization » de la figure 5. Nous avons construit des algorithmes et une chaîne de traitement pour combiner données de télédétection LiDAR aérien et informations de terrain pour simuler de manière spatialisée (à l'échelle de pixels de 1/16e d'hectare) l'ensemble des caractéristiques dendrométriques des arbres de ces territoires. La chaîne de traitement est illustrée dans la figure 6.

Dans un premier temps, nous utilisons des données de terrain pour calibrer les modèles de variables dendrométriques de niveau peuplement (surface terrière, diamètre quadratique moyen, proportion de

³ <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/5607-protest-prospective-territoriale-spatialisee.html>

feuillus/résineux) issus des scans LiDAR (LiDAR Mapping sur la figure). Ces informations sont spatialisées au pas de 25 mètres (pixels de 1/16 d’hectare).

Nous avons ensuite une méthode de descente d’échelle (downscaling) qui permet pour chacun de ces pixels de générer une distribution de diamètre pour les arbres de manière très réaliste. Cette méthode est détaillée plus en profondeur dans un article scientifique en préparation. Elle consiste à appairer les pixels du territoire aux données de terrain suivant une métrique basée sur les variables dendrométriques (surface terrière, diamètre quadratique moyen, proportion de feuillus/résineux). La distribution des arbres de la placette terrain a alors des valeurs peuplement proches de celle du pixel correspondant. Les diamètres sont ensuite modifiés avec un modulateur construit pour que les valeurs peuplements soient exactement celles du LiDAR. Cette modification est légère grâce à l’appariement initial, et permet de conserver les mêmes rapports de diamètres entre espèces dans les données simulées que ceux des placettes de terrain dont ils sont issus. Par exemple, si la placette de terrain comportait un mélange de gros sapin avec des petits hêtres, le ratio de diamètre entre ces deux espèces est conservé par notre algorithme.

Nous avons également développé des modèles circonférence-hauteur (height models) permettant d’enrichir les arbres obtenus avec des hauteurs individuelles.

Enfin, nous avons pu mener une validation en comparant les hauteurs dominantes sur chacun des pixels aux hauteurs dominantes directement calculées à partir du LiDAR. Cette deuxième manière de calculer les hauteurs dominantes est indépendante de notre algorithme (Figure 7), ce qui permet cette comparaison.

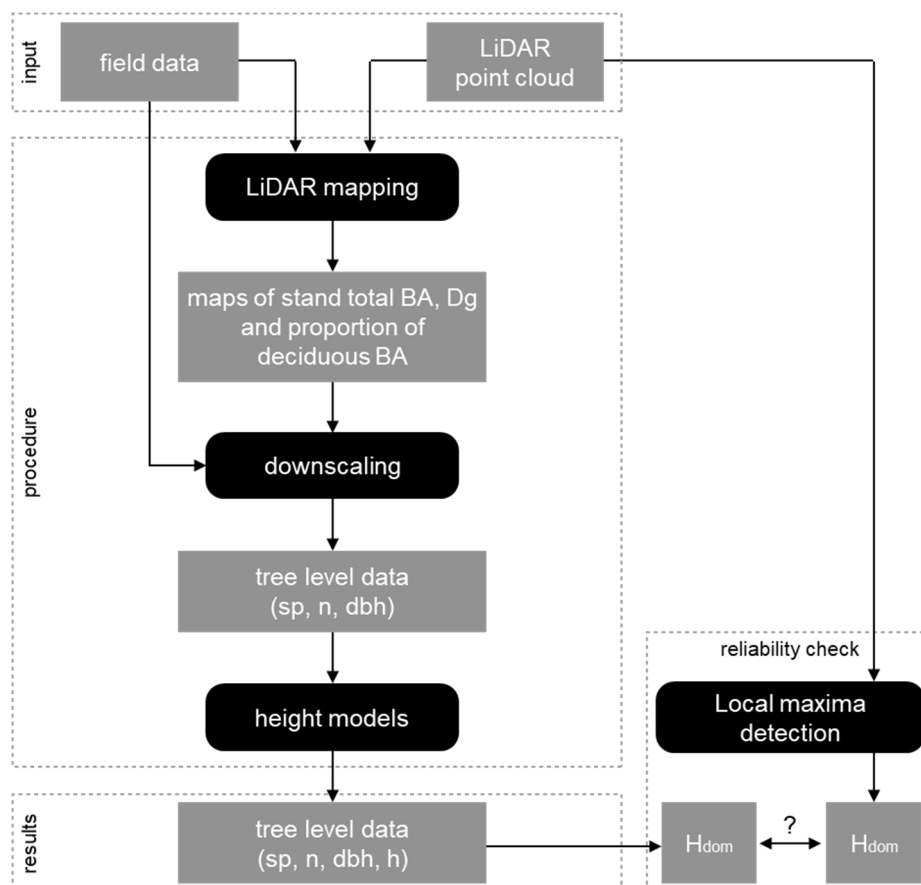


Figure 6 : Chaîne de traitement pour reconstruire les caractéristiques des arbres pour de grands territoires

Pour le projet I-Maestro, nous avons ainsi reconstruit les caractéristiques dendrométriques de plus de 42 millions d'arbres de 51 espèces différentes : 35.1 millions d'arbres de 40 espèces différentes pour les Bauges, 5.7 millions arbres de 32 espèces différentes à Milicz, et 1.5 millions d'arbres de 16 espèces différentes à Sneznik. Les résultats sont très satisfaisants, et un Data Paper est en instance de soumission. Cet article permettra d'une part de présenter la méthodologie, qui est facilement reproductible et pourra être appliquée sur d'autres territoires, et d'autre part fournira à la communauté des données dendrométriques pour l'ensemble de grands territoires pour de multiples usages (simulations de la dynamique, analyse de la diversité, calcul de services écosystémiques, etc.).

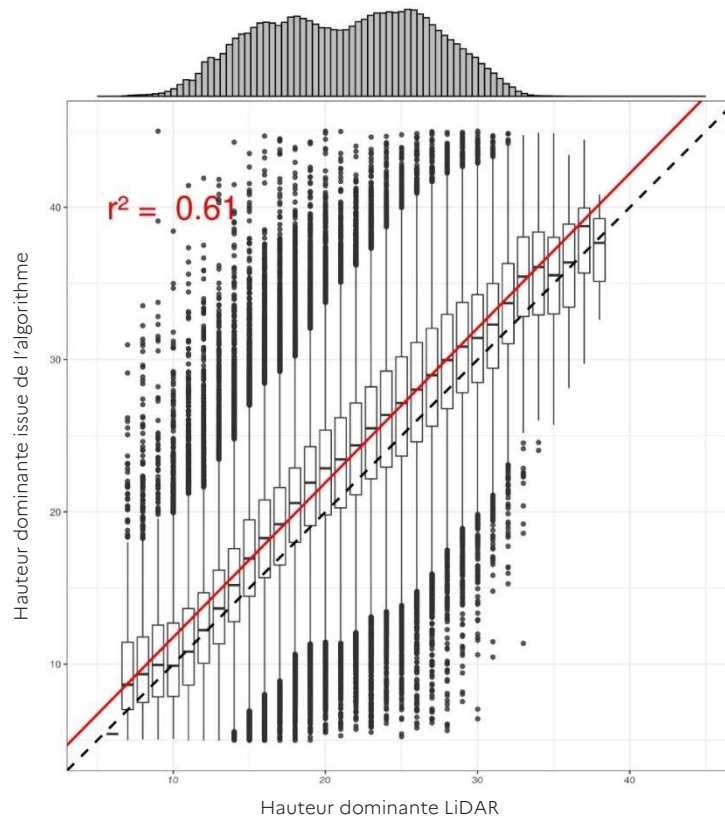


Figure 7 : Exemple du massif des Bauges. Comparaison de la hauteur dominante issue du LiDAR (en abscisses), avec la hauteur dominante calculée par l'algorithme (en ordonnées). L'histogramme au-dessus du graphe indique le nombre de pixels de chaque hauteur dominante.

5.2. Scénarios de tempête

5.2.1. Méthode de construction des scénarios de tempêtes

Les scénarios de tempête ont été construits en deux étapes principales.

La première étape a consisté à définir un régime de tempête constitué pour chaque site d'une série fictive de tempêtes chacune définie par sa force (vitesse maximale du vent), sa direction, et l'année à laquelle elle frappera le site. Ces séries de tempêtes ont été générées en utilisant la base de données des perturbations observées à l'échelle européenne construite dans le cadre du WP2. Cette base de données développée dans le projet I-Maestro est disponible en ligne (https://dfde.efi.int/db/dfde_app.php).

La seconde étape a été de développer un modèle pour associer à chaque tempête des dégâts (i.e. la disparition d'arbres simulés) en fonction de la force de la tempête ainsi que la direction du vent. Pour ce faire nous avons utilisé une fonction de lien tirée de la littérature (Canham et al. 2001) qui associe à chaque arbre une probabilité d'avoir été détruit par le vent selon son espèce, son diamètre, et la sévérité de la tempête. Nous avons également utilisé des données de terrain sur les dégâts liés à la tempête de décembre 1999 à petite échelle (parcelle) dans les Bauges afin de calibrer la notion de sévérité d'une tempête.

Une tempête n'affecte pas uniformément un paysage avec, selon l'exposition des parcelles, des dégâts extrêmement variables. Nous avons pour chaque site et chaque tempête tiré aléatoirement une proportion de parcelles (de 1 ha dans nos simulations) qui ont été effectivement affectées par des dégâts, les restantes ne subissant aucun dégât. Cette proportion a été calculée pour chaque site de telle sorte que les dégâts à l'échelle d'un site entier soient cohérents avec les dégâts reportés dans la base de données européenne. Le tirage aléatoire intègre également le degré d'exposition de chacune des parcelles, qui est calculé en fonction de la topographie et de la direction du vent. Ainsi plus une parcelle est exposée, plus sa probabilité d'être affectée par la tempête est élevée.

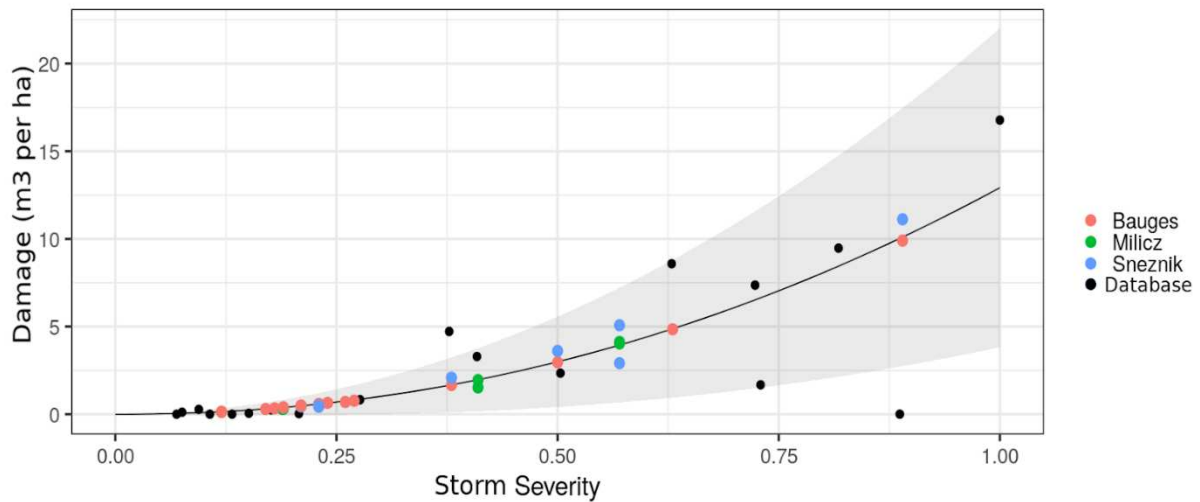


Figure 8 : Dégâts à l'échelle du paysage (en m3 par hectare) en fonction de la sévérité d'une tempête. En noir les observations de la base de données, en couleur les dégâts simulés sur chacun des sites après calibration.

5.2.2. Scénarios de tempête simulés

Nous avons utilisé la méthode exposée ci-dessus pour générer des scénarios de tempête pour les trois sites d'étude. Ces scénarios sont illustrés dans la figure 10 pour les trois sites. Au cours de la période 2015-2100, le scénario compte 18 tempêtes dans le massif des Bauges, 6 à Milicz, et 8 à Sneznik. La majorité des tempêtes simulées sont d'assez faible intensité, mais plusieurs tempêtes sont de sévérité supérieure à 0.5 : 3 dans les Bauges, 2 à Milicz, et 5 à Sneznik. L'intensité la plus forte est en 2037 pour les Bauges et pour Sneznik.

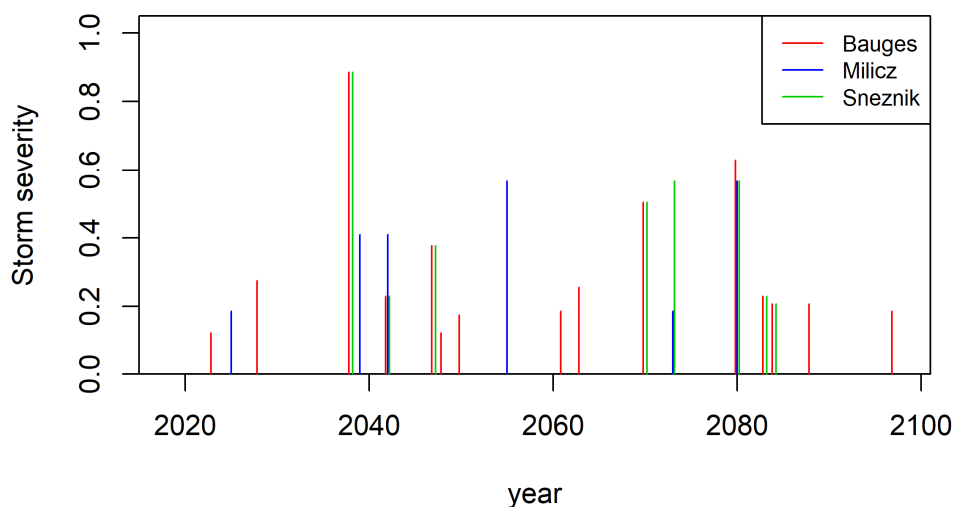


Figure 9 : Scénarios de tempêtes simulés dans I-Maestro

5.3. Scenarios de gestion

Nous avons défini des scénarios de gestion à appliquer aux trois territoires en deux temps.

Dans un premier temps, nous avons défini un plan de simulation générique, à appliquer pour les trois territoires. La structure de ce plan de simulation est construite pour aborder la question du lien entre complexité structurelle et les services écosystémiques fournis par la forêt.

Dans un deuxième temps, ces scénarios sont déclinés en scénarios de gestion et en règles sylvicoles pour chacun des territoires. En effet, les caractéristiques dendrométriques et sylvicoles initiales sont très différentes entre nos trois cas d'étude, et les règles à appliquer diffèrent d'autant.

Ces scénarios de gestion sont ensuite utilisés par les différents modèles ayant simulé l'évolution des territoires. Les modèles étant de nature et de fonctionnement différents, l'application de ces règles peut légèrement varier d'un modèle à l'autre.

5.3.1. Plan de simulation générique

Le plan de simulation (tableau 3) est construit en croisant dans un premier temps des facteurs de deux types : l'intensité de la sylviculture, et son échelle d'application (peuplement ou territoire). Pour l'intensité de la sylviculture, nous avons défini des scénarios tendanciels (appelés « Baseline » par la suite), basés sur les guides de sylviculture, les connaissances, et les échanges avec les acteurs des trois sites d'étude. Nous avons ensuite appliqué des scénarios plus intensifs et d'autres plus extensifs. Cette modulation de l'intensité de la sylviculture a des déclinaisons à l'échelle du peuplement, et à l'échelle du territoire.

A l'échelle du peuplement, l'intensification consiste à réduire les diamètres d'exploitabilité, et à augmenter l'intensité des coupes. L'extensification est l'opération opposée.

A l'échelle du territoire, l'intensification consiste à augmenter la surface mise en gestion, alors que l'extensification consiste à augmenter les surfaces de non-gestion.

Nous avons également évalué des scénarios croisés, appelés trade-off 1 et 2 par la suite. Dans ces scénarios, nous appliquons une extensification à l'échelle du peuplement et une intensification territoire (trade-off 1), ou une intensification à l'échelle du peuplement et une extensification territoire (trade-off 2).

Nous obtenons ainsi 5 grands types de scénarios : Baseline, Extensification, Intensification, Trade-off 1, et Trade-off 2.

Enfin, nous avons croisé ces 5 grands types de scénarios avec 2 niveaux de mesures favorisant la complexité. Ce facteur permet de répondre au questionnement principal du projet sur l'effet de la complexité. Ces mesures ont elles-aussi des déclinaisons à l'échelle du peuplement (favoriser les mélanges, augmenter l'irrégularité des diamètres), et à l'échelle du territoire (diversifier les diamètres moyens de récolte, aller vers un équilibre des types de structures, notamment régulières ou irrégulières), mais sont analysées dans leur ensemble.

Ce plan de simulation comporte 10 modalités (tableau 3). Chacune de ces modalités est simulée avec trois scénarios climatiques.

Type de scénario	Echelle peuplement: Règles sylvicoles	Echelle territoire: Distrib. des règles	Favoriser la complexité
Baseline	S-Baseline	L-Baseline	Non
Intensification	SI	LI	Non
Extensification	SE	LE	Non
Trade-off 1	SE	LI	Non
Trade-off 2	SI	LE	Non
Baseline	S-Baseline-C	L-Baseline-C	Oui
Intensification	SI-C	LI-C	Oui
Extensification	SE-C	LE-C	Oui
Trade-off 1	SE-C	LI-C	Oui
Trade-off 2	SI-C	LE-C	Oui

*Tableau 3 : Plan d'échantillonnage générique, appliqué sur les trois sites par les modèles réalisant les simulations.
« SI » et « SE » signifient « Stand Intensification ou Stand Extensification »
« LI » et « LE » signifient « Landscape Intensification ou Landscape Extensification »*

Le scénario Baseline est le scénario de tendanciel. Tous les autres scénarios sont des versions alternatives de ce scénario.

5.3.2. Description du scénario « Baseline »

La déclinaison du scénario « Baseline » pour les trois sites est assez complexe. Elle a été réalisée en s'appuyant sur des projets existants (notamment le projet PROTEST en ce qui concerne le massif des Bauges), sur les connaissances des différents partenaires porteurs des cas d'étude, et sur des discussions avec les gestionnaires de terrain.

Le tableau 4 illustre les règles appliquées pour les Bauges à chaque pixels générés par la méthode indiquée dans la section 5.1 en fonction de leur catégorie (public/privé, type de gestion, type de peuplement...).

Accessible	Type de gestion	Densité	Propriété	Hêtre avec sapin ou épicéa	Feuillus	Sapin ou Epicéa	Sapin ou Epicéa avec feuillus
Non	-	-	Privé	-	-	-	-
	-	-	Public	-	-	-	-
Oui	Taillis	-	Privé	-	Récolte si Dg>=20	-	-
	Coupe finale	-	Privé	Récolte si Dg>=30 pour hêtre or Dg>=40 pour épicéa+sapin	Récolte si Dg>=30	Récolte si Dg>=40cm	Récolte si Dg>=30 pour feuillus ou Dg>=40 pour résineux
			Public	Récolte si Dg>=30 pour hêtre or Dg>=40 pour épicéa+sapin	Récolte si Dg>=30	Récolte si Dg>=40cm	Récolte si Dg>=30 pour feuillus ou Dg>=40 pour résineux
	Haute	-	Privé	RDI_après = 0.65 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 40cm	RDI_après = 0.65 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 35 cm	RDI_après = 0.65 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 40 cm	RDI_après = 0.65 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 40cm
			Public	RDI_après = 0.65 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 40cm pour hêtre or Dg>=50cm pour épicéa+sapin	RDI_après = 0.65 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 35 cm	RDI_après = 0.65 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 50 cm	RDI_après = 0.65 (Kg = 0.9) Coupe finale quand Dg d'esp dom. atteint seuil Dg >= 35cm pour feuillus Dg >= 50 épicéa+sapin Dg >= 40 pins Dg >= 55 mélèze
	Régulier	-	Privé	RDI_après = 0.55 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 40cm	RDI_après = 0.55 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 35 cm	RDI_après = 0.55 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 40 cm	RDI_après = 0.55 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 40cm
			Public	RDI_après = 0.55 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 40cm pour hêtre or Dg>=50cm pour épicéa+sapin	RDI_après = 0.55 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 35 cm	RDI_après = 0.55 (Kg = 0.9) Coupe finale à Dg >= 50 cm	RDI_après = 0.55 (Kg = 0.9) Coupe finale quand Dg d'esp dom. atteint seuil Dg >= 35cm pour feuillus Dg >= 50 épicéa+sapin Dg >= 40 pins Dg >= 55 mélèze
	Moyenne	-	Privé	BA_après= 30m ² ha-1 Dharv=45 pour hêtre et Dharv=55 pour épicéa/sapin	BA_après= 25m ² ha-1 Dharv=40	BA_après= 35m ² ha-1 Dharv=55	BA_après= 30m ² ha-1 Dharv=40 pour feuillus Dharv=55 pour épicéa/sapin Dharv=45 pour pin Dharv=60 pour mélèze
			Public	BA_après= 30m ² ha-1 Dharv=45 pour hêtre et Dharv=55 pour épicéa/sapin	BA_après= 25m ² ha-1 Dharv=40	BA_après= 35m ² ha-1 Dharv=55	BA_après= 30m ² ha-1 Dharv=40 pour feuillus Dharv=55 pour épicéa/sapin Dharv=45 pour pin Dharv=60 pour mélèze
	Irrégulier	-	Privé	BA_après= 25m ² ha-1 Dharv=45 pour hêtre et Dharv=55 pour épicéa/sapin	BA_après= 20m ² ha-1 Dharv=40	BA_après= 30m ² ha-1 Dharv=55	BA_après= 25m ² ha-1 Dharv=40 pour feuillus Dharv=55 pour épicéa/sapin Dharv=45 pour pin Dharv=60 pour mélèze
			Public	BA_après= 25m ² ha-1 Dharv=45 pour hêtre et Dharv=55 pour épicéa/sapin	BA_après= 20m ² ha-1 Dharv=40	BA_après= 30m ² ha-1 Dharv=55	BA_après= 25m ² ha-1 Dharv=40 pour feuillus Dharv=55 pour épicéa/sapin Dharv=45 pour pin Dharv=60 pour mélèze
	Basse	-	Privé	BA_après= 20m ² ha-1 Dharv=45 pour hêtre et Dharv=55 pour épicéa/sapin	BA_après= 15m ² ha-1 Dharv=40	BA_après= 25m ² ha-1 Dharv=55	BA_après= 20m ² ha-1 Dharv=40 pour feuillus Dharv=55 pour épicéa/sapin Dharv=45 pour pin Dharv=60 pour mélèze
Public			BA_après= 20m ² ha-1 Dharv=45 pour hêtre et Dharv=55 pour épicéa/sapin	BA_après= 15m ² ha-1 Dharv=40	BA_après= 25m ² ha-1 Dharv=55	BA_après= 20m ² ha-1 Dharv=40 pour feuillus Dharv=55 pour épicéa/sapin Dharv=45 pour pin Dharv=60 pour mélèze	

Tableau 4 : Détail des règles sylvicoles du scénarios « Baseline » pour le massif des Bauges

Les règles de gestion appliquées aux sites de Milicz et de Sneznik ne sont pas détaillées dans ce rapport, mais ont été définies selon le même principe.

L'étape suivante consiste à affecter pour chaque pixel du territoire le type de gestion à lui appliquer. Les pixels ont d'abord été regroupés cellules d'un hectare (= 16 pixels de 25x25m² définis dans la section 5.1), ce qui correspond à la taille des unités de gestion.

Ensuite, pour chaque cellule d'un hectare, l'affectation à l'une des règles du tableau 4 se fait en utilisant i) la topographie et la desserte pour définir l'accessibilité, ii) les couches d'information géographiques pour la propriété (public ou privé), iii) les essences des parcelles, iv) les caractéristiques dendrométriques des parcelles pour définir le type de gestion, notamment l'indice de Gini pour distinguer les peuplements réguliers et irréguliers, et la surface terrière pour définir la densité.

Au final, la répartition des 51 500 ha de forêts simulées dans les Bauges selon les types de gestion est décrite dans la figure 10.

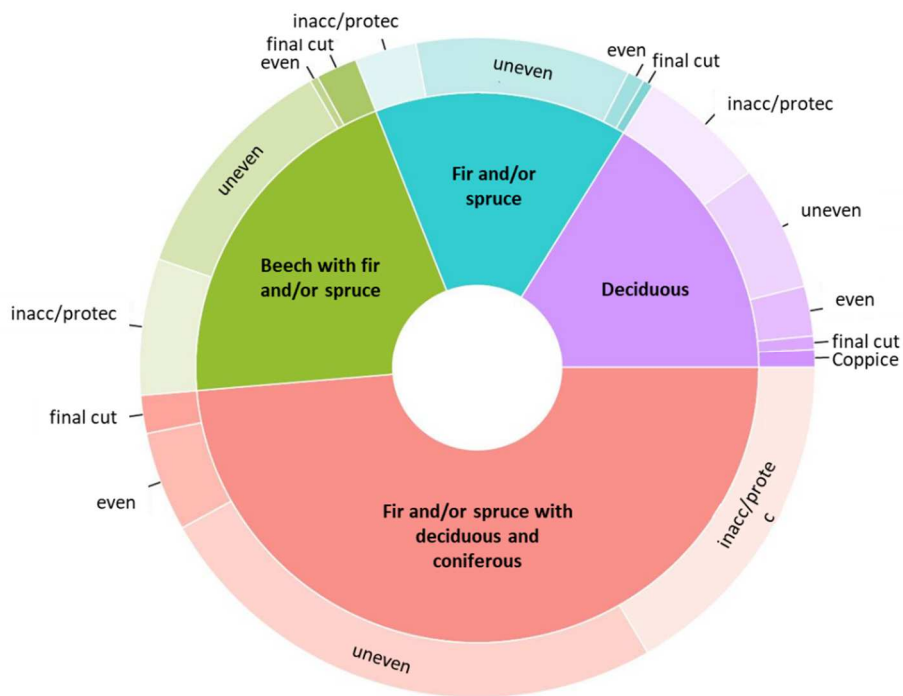


Figure 10 : Répartition des parcelles simulées dans le 51 500 hectares de forêt des Bauges

5.3.3. Définition des scénarios alternatifs

Les scénarios d'extensification, d'intensification, les deux scénarios trade-off, ainsi que les mesures de complexification sont construits à partir du scénario baseline. La description est détaillée dans le tableau 5. Les déclinaisons peuvent varier légèrement par site et selon les modèles, en raison de leurs fonctionnements différents.

Il est à noter que les règles à l'échelle du territoire pour l'intensification et l'extensification varient entre les sites. Pour Milicz et Sneznik, le scénario Baseline, basé sur la réalité actuelle de ces deux sites, a une mise en gestion quasiment complète du territoire (très peu de peuplements non gérés). Il n'est alors guère possible d'intensifier davantage à ce niveau. Nous avons alors fortement différencié le scénario d'extensification avec 20% de peuplements non gérés. Dans les Bauges, où près de la moitié des peuplements sont actuellement non gérés, nous avons appliqué des pourcentages symétriques entre l'intensification (+8% de peuplements gérés) et l'extensification (-8% de peuplements gérés).

		SITE D'ETUDE		
		Bauges	Milicz	Sneznik
Règles sylvicoles	Intensification	Diminuer les diamètres d'exploitabilité ou les rotations Augmenter l'intensité des éclaircies		
	Extensification	Augmenter les diamètres d'exploitabilité ou les rotations Diminuer l'intensité des éclaircies		
	Complexification	Augmenter l'équilibre des mélanges Favoriser les espèces peu représentées Différencier les diamètres de récolte		
Echelle territoire	Intensification	+ 8% de peuplements gérés	+ 0% de peuplements gérés	+ 0% de peuplements gérés
	Extensification	- 8% de peuplements gérés	- 20% de peuplements gérés	-20% de peuplements gérés
	Complexification	Augmenter l'équilibre des types de gestion (régulier/irrégulier)	Gérer les peuplements de chênes et hêtre en irrégulier	Augmenter l'équilibre des types de gestion (régulier/irrégulier)

Tableau 5 : Règles des scénarios alternatifs pour les trois massifs

5.3.4. Bilan au niveau du territoire de la répartition des types de gestion

L'état initial dendrométrique des peuplements est le même pour toutes les simulations. En revanche, les règles présentées ci-dessus modifient le mode de gestion appliqué aux parcelles. Les tableaux ci-dessous synthétisent les pourcentages de mode de gestion appliqués en fonction des règles de niveau territoire (correspondant au « Baseline », « Landscape extensification » ou « Landscape Intensification » du tableau 3).

Les tableaux suivant indiquent les pourcentages en surface de peuplements suivants les différents modes de gestion pour les Bauges (tableau 6), Milicz (tableau 7), et Sneznik (tableau 8). Ces tableaux illustrent bien les objectifs des règles de niveau territoire :

- La diminution des surfaces gérées pour les scénarios d'extensification et l'augmentation des surfaces gérées pour les Bauges (alors qu'à Milicz et Sneznik l'intensification n'est quasiment pas possible, tous les peuplements étant déjà gérés)
- L'équilibrage entre modes de gestion, notamment entre les modes « futaie régulière » et « futaie irrégulière » dans les scénarios de complexification des Bauges et de Sneznik
- La gestion en futaie irrégulière des peuplements de hêtre et de chêne à Milicz.

5.3.4.1. Massif des Bauges

COMPOSITION		MODE DE GESTION	POURCENTAGE DU SCENARIO (EN % DU TERRITOIRE)					
Type	En % du territoire		Baseline	Baseline	L. Extens.	L. Extens.	L. Intens.	L. Intens.
				Complex.		Complex.		Complex.
Hêtre avec du sapin et/ou épicéa	25.5%	Coupe finale	0.7	0.7	0.5	0.5	0.9	0.9
		Futaie irrégulière	14.8	12.1	12.4	10.1	17.3	14.2
		Futaie régulière	0.3	3.0	0.2	2.5	0.3	3.5
		Non géré	9.8	9.8	12.4	12.4	6.9	6.9
Feuillus	17.9%	Coupe finale	0.5	0.6	0.3	0.4	0.6	0.7
		Futaie irrégulière	3.6	1.1	3.3	1.1	3.8	1.2
		Futaie régulière	2.2	3.9	1.9	3.5	2.4	4.2
		Taillis	1.7	2.4	1.5	2.1	1.8	2.6
		Non géré	9.9	9.9	10.9	10.9	9.3	9.3
Sapin et/ou épicéa	11.1%	Coupe finale	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
		Futaie irrégulière	6.9	5.0	5.8	4.2	8.1	6.1
		Futaie régulière	0.3	2.2	0.3	1.9	0.4	2.4
		Non géré	3.8	3.8	4.9	4.9	2.5	2.5
Sapin et/ou épicéa avec des feuillus	45.5%	Coupe finale	0.7	1.0	0.5	0.7	0.9	1.4
		Futaie irrégulière	21.5	11.9	18.3	10.2	24.7	13.9
		Futaie régulière	3.3	12.6	2.7	10.6	3.8	14.3
		Non géré	20.0	20.0	24.0	24.0	16.0	16.0
ENSEMBLE	100%	Coupe finale	2.0	2.4	1.4	1.7	2.6	3.1
		Futaie irrégulière	46.7	30.1	39.8	25.6	54.0	35.3
		Futaie régulière	6.1	21.6	5.1	18.4	6.9	24.3
		Non géré	43.5	43.5	52.2	52.2	34.7	34.7
		Taillis	1.7	2.4	1.5	2.1	1.8	2.6

Tableau 6 : Répartition des modes de gestion en fonction des règles de niveau territoire pour les Bauges

5.3.4.2. Milicz

COMPOSITION		MODE DE GESTION	POURCENTAGE DU SCENARIO (EN % DU TERRITOIRE)					
Type	En % du territoire		Baseline	Baseline	Extens.	Extens.	Intens.	Intens.
				Complex.		Complex.		Complex.
Alnus glutinosa	1.2%	Futaie régulière	1.1	1.1	0.8	0.8	1.2	1.2
		Non géré	0.1	0.1	0.4	0.4	-	-
Betula sp	0.7%	Futaie régulière	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7
		Non géré	-	-	0.1	0.1	-	-
Fagus sylvatica	4.9%	Futaie régulière	4.5	-	3.0	-	4.9	-
		Futaie irrégulière	-	4.5	-	3.0	-	4.9
		Non géré	0.4	0.4	1.9	1.9	-	-
Larix decidua	0.03%	Futaie régulière	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Non géré	-	-	0.0	0.0	-	-
Picea abies	0.1%	Futaie régulière	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
		Non géré	-	-	0.0	0.0	-	-
Pinus sylvestris	78.8%	Futaie régulière	78.4	78.4	68.1	68.1	78.8	78.8
		Non géré	0.4	0.4	10.7	10.7	-	-
Quercus sp	13.9%	Futaie régulière	13.3	-	8.3	-	13.9	-
		Futaie irrégulière	-	13.3	-	8.3	-	13.9
		Non géré	0.6	0.6	5.6	5.6	-	-
Other sp	0.3%	Non géré	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
ENSEMBLE	100%	Futaie régulière	98.2	80.4	80.9	69.6	99.7	80.8
		Futaie irrégulière	-	17.8	-	11.3	-	18.9
		Non géré	1.8	1.8	19.1	19.1	0.3	0.3

Tableau 7 : Répartition des modes de gestion en fonction des règles de niveau territoire pour Milicz

5.3.4.3. Sneznik

COMPOSITION		MODE DE GESTION	POURCENTAGE DU SCENARIO (EN % DU TERRITOIRE)					
Type	En % du territoire		Baseline	Baseline Complex.	Extens.	Extens. Complex.	Intens.	Intens. Complex.
Hêtre dominant Basse altitude	17.0%	Futaie régulière	16.8	14.0	14.7	10.9	17.0	14.2
		Futaie irrégulière	-	2.8	-	3.8	-	2.8
		Non géré	0.2	0.2	2.3	2.3	-	-
Hêtre dominant Haute altitude	10.7%	Futaie régulière	10.2	7.3	3.1	2.4	10.7	7.7
		Futaie irrégulière	-	2.9	-	0.7	-	3.1
		Non géré	0.6	0.6	7.6	7.6	-	-
Mélangé	7.4%	Futaie régulière	6.4	1.5	6.1	1.1	6.4	1.5
		Futaie irrégulière	1.0	5.8	0.9	5.9	1.0	5.8
		Non géré	-	-	0.4	0.4	-	-
Sapin ou épicéa dominants	64.9%	Futaie régulière	52.0	26.3	44.6	18.1	52.2	26.6
		Futaie irrégulière	12.7	38.3	10.8	37.2	12.7	38.4
		Non géré	0.3	0.3	9.6	9.6	-	-
ENSEMBLE	100%	Futaie régulière	85.3	49.1	68.5	32.5	86.3	49.9
		Futaie irrégulière	13.6	49.8	11.7	47.7	13.7	50.1
		Non géré	1.0	1.0	19.8	19.8	-	-

Tableau 8 : Répartition des modes de gestion en fonction des règles de niveau territoire pour Sneznik

5.4. Simulations

Parmi les quatre modèles utilisés dans le projet I-Maestro, tous ne peuvent pas simuler l'échelle territoire. En effet, le volume de simulation n'est pas compatible avec les modèles très complexes, qui nécessitent des temps de calculs importants. Pour le Bauges par exemple, nous travaillons sur un ensemble de 825 020 pixels, répartis dans 65 499 unités de gestion. Ainsi, le modèle Samsara2 n'a pas été utilisé pour cette phase d'I-Maestro. Le laboratoire PIK en Allemagne est en cours de réalisation des simulations avec le modèle 4C, mais sa complexité n'a pour l'instant pas permis d'aboutir dans le temps imparti du projet. La puissance informatique nécessaire reste trop importante, même en utilisant des clusters d'ordinateurs. Ces simulations pourront néanmoins être utilisées ultérieurement.

En revanche, les modèles LandClim et Salem ont pu aller au bout de l'ensemble de ces simulations. A titre d'information, pour le modèle Salem qui est un modèle simple, ces simulations nécessitent plus d'un mois en calcul parallélisé sur un serveur de calcul, et les sorties représentent environ 120 Go de données.

Comme les survols des massifs pour l'acquisition des données LiDAR ont été réalisés entre 2014 et 2018. Nous avons synchronisé le début des simulations à 2015 pour les trois sites. Nous avons ensuite simulé les 10 modalités sylvicoles du plan de simulation décrites dans le tableau 3 jusqu'en 2100.

Le modèle LandClim a pour contrainte de ne pouvoir générer des interventions sylvicoles qu'à un intervalle fixe de 10 ans. Pour éviter les biais liés à cette contrainte, nous avons analysé les résultats sur une période multiple de 10 ans, donc de 2015 à 2094 pour les indicateurs cumulatifs au cours du temps (volume récolté, volume de chablis), et de 2075 à 2094 pour les indicateurs d'état auquel on aboutit en fin de simulation (volume sur pied, indicateurs de biodiversité).

5.5. Résultats

5.5.1. Compromis entre la diversité à l'échelle du peuplement et du paysage

Réaliser des simulations à l'échelle des territoires permet d'aborder à la fois la diversité alpha et la diversité beta. La diversité alpha est la moyenne de la diversité de chaque peuplement. Elle renseigne sur la diversité moyenne de chacun des peuplements du territoire. La diversité beta représente la diversité entre les peuplements. On peut avoir par exemple une diversité alpha très élevée et une diversité beta très faible si les peuplements sont intrinsèquement très divers, mais qu'ils sont semblables dans le territoire. C'est par exemple le cas des Bauges, pour lesquels les peuplements ont une hétérogénéité des tailles importante (futaie irrégulière), mais où il n'y a quasiment que ce type de peuplement. A l'inverse, à Milicz, les peuplements sont très homogènes (futaie régulière de Pin sylvestre), mais à des stades tous différents entraînant une diversité de tailles à l'échelle du paysage, donc une diversité beta plus élevée.

Dans I-Maestro, nous avons étudié à la fois la diversité des tailles des arbres, et des espèces d'arbres.

Au niveau de la diversité des tailles, nous avons pu observer un compromis ou une synergie entre les diversités alpha et beta, en fonction du niveau initial de la diversité alpha (figure 11). Par exemple, dans les Bauges, la diversité alpha est très élevée, car le massif est constitué majoritairement de peuplement irréguliers, mais ceux-ci sont semblables les uns aux autres, résultant en une diversité beta faible. Augmenter la diversité beta passe par l'installation de peuplements réguliers, de diversité alpha plus faible. Augmenter beta fait donc diminuer alpha, d'où une situation de compromis. A l'inverse, dans les plaines de Milicz, couvertes de peuplements réguliers de pins sylvestres où la diversité alpha est donc faible, augmenter beta se fait en installant des peuplements irréguliers, ce qui augmente la moyenne des diversités alpha, d'où la situation de synergie.

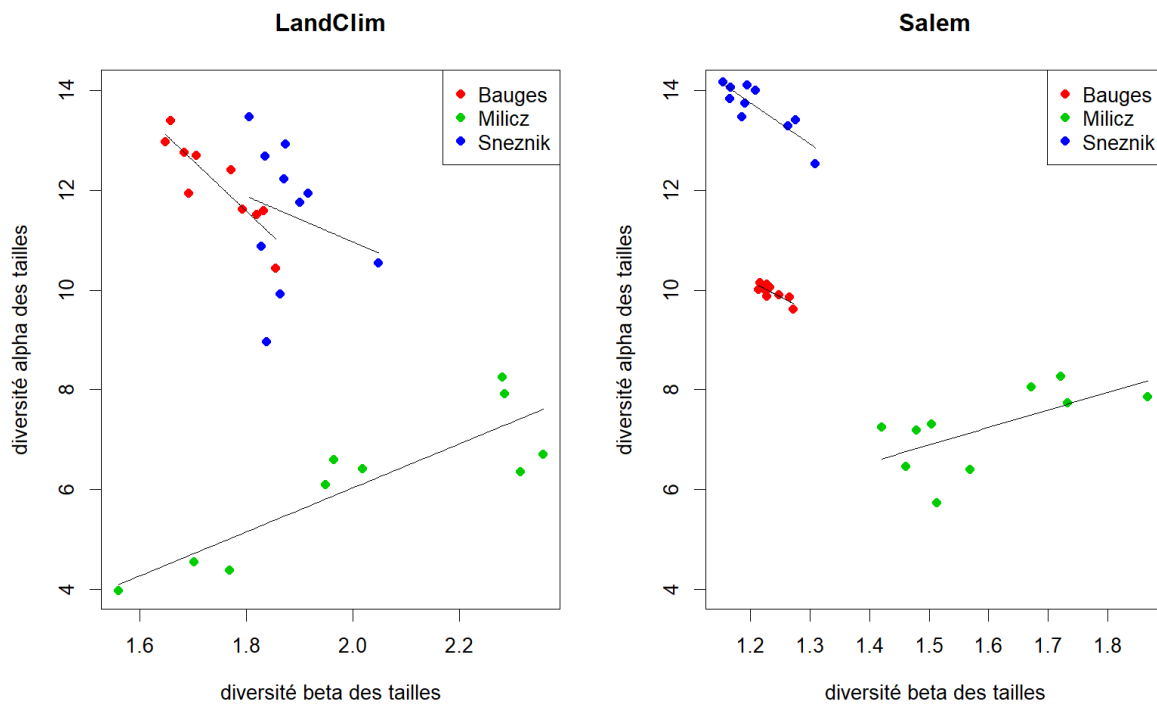


Figure 11 : Compromis ou synergie entre les diversités des tailles alpha et beta pour chacun des trois sites avec les deux modèles utilisés

Des effets de compromis ou synergie entre alpha et beta pour la diversité des espèces ont également été identifiés par site et par modèle dans les simulations, mais ils sont moins généralisables. Ils sont pour beaucoup liés à la manière dont les modèles ont intégré la régénération dans les scénarios.

5.5.2. Effet de la complexité sur les services écosystémiques

Nous avons simulé l'évolution des forêts de 2015 à 2100 selon les 10 scénarios de gestions décrits dans le tableau 3 pour chacun des trois sites d'étude (Bauges, Milicz, Sneznik), en intégrant les scénarios de tempêtes. Cette section présente les différents indicateurs issus de ces simulations.

5.5.2.1. Evolution du volume au cours du temps

La figure 12 illustre l'évolution du volume sur pied moyen par hectare selon les différents scénarios du tableau 3 pour les trois cas d'étude.

On note tout d'abord **une différence de forme « haute fréquence » entre les simulations issues du modèle LandClim et du modèle Salem**. La raison est technique, et vient de la synchronisation des coupes tous les 10 ans pour LandClim. Ainsi, toutes les parcelles forestières subissant une coupe (ou une tempête) au cours d'une décennie ont leur coupe simulée la même année, d'où ces variations de court terme très fortes. A l'inverse, le modèle Salem a la capacité de générer des coupes quelle que soit l'année, et la répartition des coupes à l'échelle du paysage lisse l'évolution du volume. Les sauts observés dans les simulations issues de Salem correspondent aux effets des tempêtes. Par exemple, pour les Bauges, on observe bien l'effet des trois plus importantes tempêtes de 2038, 2070 et 2080.

En ce qui concerne l'évolution séculaire, la **cohérence des résultats entre les deux modèles** est plus ou moins marquée. C'est le cas pour les Bauges où les deux modèles indiquent une augmentation du volume sur pied avec le temps, assez régulière. Pour Milicz, les deux modèles indiquent d'abord une augmentation, puis une phase de diminution du volume jusqu'à un minimum au cours du siècle, puis une nouvelle augmentation. Le minimum est atteint plus tôt avec LandClim qu'avec Salem. Enfin, pour Sneznik, le schéma est assez similaire qu'à Milicz : une première phase (courte) d'augmentation, puis une diminution jusqu'à un minimum, et une nouvelle phase d'augmentation. Le décalage du minimum entre les modèles est plus marqué qu'à Milicz. Ce minimum survient peu avant la fin de la période de simulation avec Salem. Ces fluctuations de moyen terme sont liées aux équilibres des âges lors de l'état initial du peuplement. A Milicz par exemple, les peuplements initiaux ont pour beaucoup un diamètre assez proche du diamètre d'exploitabilité, d'où une augmentation des volumes puis une diminution rapide lorsque les peuplements murs sont exploités. Dans les Bauges, où une large proportion des peuplements ne sont pas gérés (43.5% dans le scénario Baseline), l'augmentation du volume est forte en raison de l'absence de coupes dans cette partie du territoire.

Les cinq grands types de scénarios suivent globalement les schémas attendus. Avec une augmentation de l'intensité des coupes et une plus grande part de peuplements mis en gestion, les scénarios d'intensification réduisent les volumes sur pied par rapport au scénario tendanciel. Les scénarios d'extensification ont l'effet inverse : moins de coupes dans les peuplements et une diminution de la part de peuplements mis en gestion augmentent le volume sur pied. Les scénarios Trade-off 1 et Trade-off 2, qui combinent extensification peuplement / intensification massif (T1) et intensification peuplement / extensification massif (T2), sont très proches du scénario Baseline dans les Bauges. Il y a une compensation entre les actions aux deux échelles. Pour Milicz et Sneznik, les ordres entre ces scénarios restent conservés, mais le scénario Baseline est plus proche des scénarios d'intensification. Cela est dû à la règle de niveau « territoire » : comme indiqué dans le tableau 5, il n'y a pas d'intensification additionnelle, car dans le scénario Baseline, l'ensemble des peuplements sont déjà gérés.

La forme des scénarios de complexification (en pointillés) est semblable à celle de leurs contreparties non complexifiées. Les niveaux moyens sont en revanche différents, ce qui est détaillé dans la section suivante.

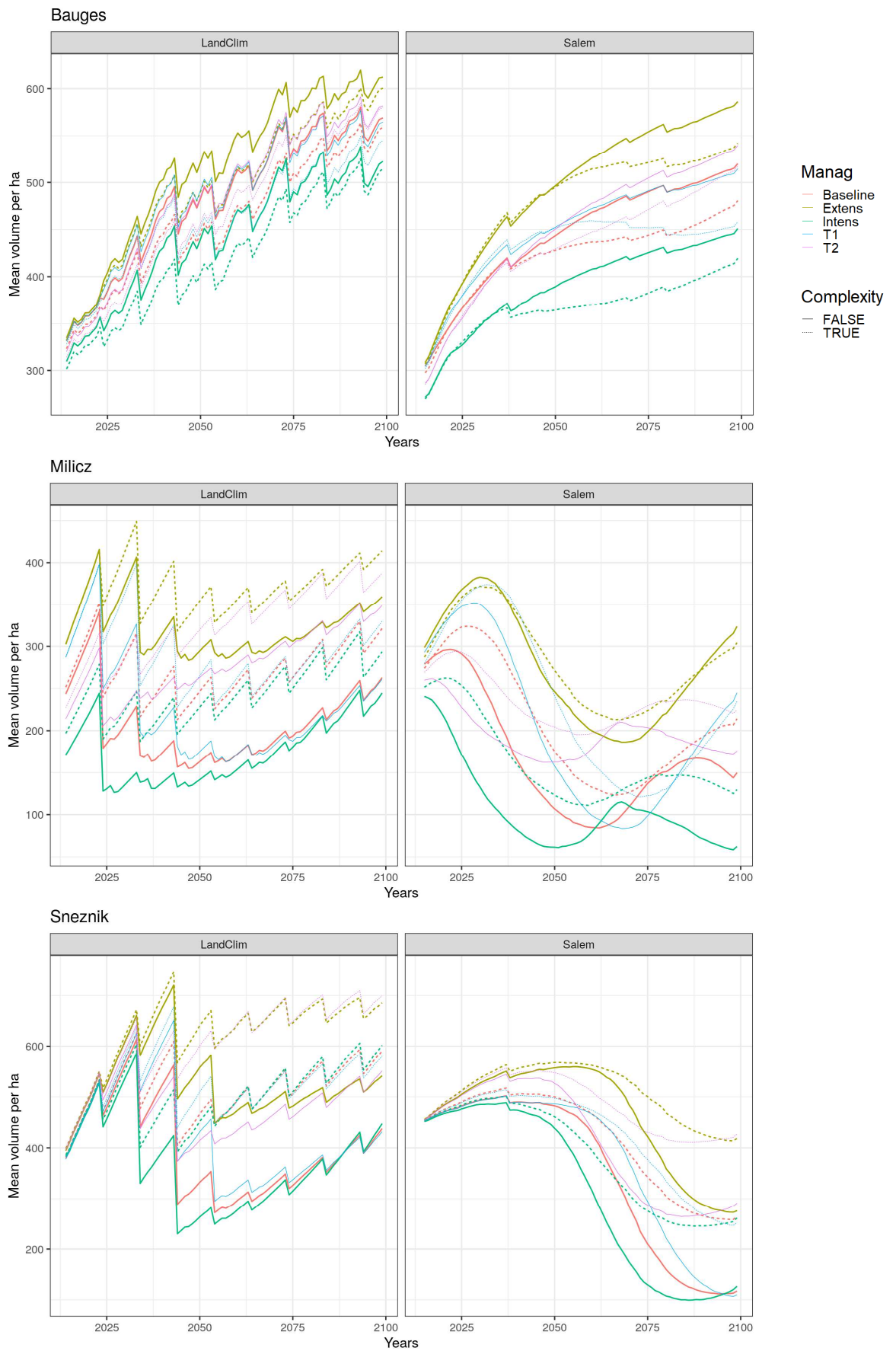


Figure 12 : Evolution du volume de bois sur pied dans les trois sites selon les différents scénarios de gestion. Les couleurs représentent les différents types de scénarios (Baseline, Extensification, intensification, T1 et T2). Les courbes en pointillés sont avec les mesures de complexité.

5.5.2.2. Volume sur pied moyen en fin de période

La figure 13 présente le volume moyen par hectare en fin de période (20 ans, de 2075 à 2094) pour les différents sites et pour les deux modèles. Cet indicateur permet d'évaluer dans quelle mesure les différents scénarios conduisent à des stocks sur pied plus ou moins importants après plusieurs décennies d'évolution.

Même si les niveaux globaux de volume sur pied diffèrent entre les modèles, on observe **une complète cohérence** entre eux **sur le rang lié aux types de scénarios** (Baseline, Intensification, etc.), et sur l'effet lié à la complexité. Le rang est indiqué par les chiffres en bas des barres. Ce rang est calculé pour le scénario sans complexité. Par exemple, pour LandClim dans les Bauges, le scénario conduisant au maximum de volume sur pied est le scénario « Extensification », suivi de « T2 », « Baseline », « T1 », puis enfin « Intensification ». Cet ordre est identique pour Salem. Ces ordres sont identiques entre LandClim et Salem pour Milicz et Sneznik également. De plus, **l'effet de la complexité** (barre bleu par rapport à la barre orange) **est également identique entre LandClim et Salem dans tous les cas** : une diminution du volume sur pied avec la complexité pour tous les scénarios des Bauges, et une augmentation à Milicz et Sneznik. Cet effet est toutefois plus ou moins significatif en fonction des modalités (étoiles indiquées par modalité).

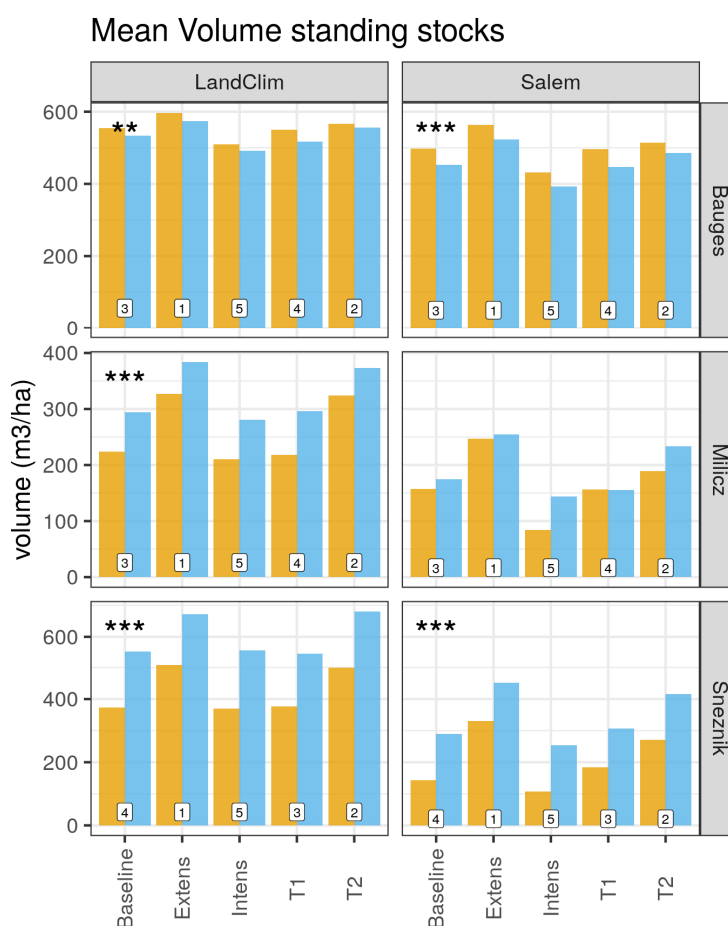


Figure 13 : Volume moyen sur pied sur la période 2075-2094 en fonction des sites et des scénarios. Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ».

De manière générale, on observe un **effet marqué du type de scénario et de la complexité sur les volumes sur pied**.

Concernant le type de scénario, les résultats observés étaient assez attendus : l'extensification, en réduisant l'intensité des coupes sur pied et en diminuant la surface de peuplements gérés, augmente le volume sur pied moyen. L'intensification montre l'effet inverse. Les scénarios « Trade-off » sont intermédiaires, et se rapprochent du scénario « Baseline », notamment dans le cas des Bauges. Pour Milicz et Sneznik, cet effet est modulé par le fait que l'intensification de niveau territoire n'était pas possible, tous les peuplements étant déjà gérés (cf. tableau 5).

L'effet de la complexité sur le volume sur pied est **négatif pour tous les scénarios des Bauges, et positif à Milicz et Sneznik**. La raison principale de ce résultat vient de **l'équilibre entre les peuplements réguliers et les peuplements irréguliers** dans les scénarios de gestion. Les peuplements réguliers ont des volumes de bois très faibles dans le jeune âge. A l'inverse, les peuplements irréguliers comportent en permanence des volumes de bois sur pied assez importants. Ainsi, en moyenne sur un massif incluant toutes les classes d'âge, les peuplements réguliers ont des volumes à l'hectare bien moindres que les peuplements irréguliers. Comme les scénarios de complexification ont pour beaucoup consisté à inclure des peuplements réguliers dans la matrice irrégulière dans les Bauges (tableau 6), et à l'inverse à inclure des peuplements irréguliers à Milicz (tableau 7) et à Sneznik (tableau 8), les différences de volumes moyens entre scénarios complexes ou non suivent ces tendances. Des différences entre les scénarios complexifiés ou non existent au sein des peuplements réguliers et des peuplements irréguliers, mais ont moins d'importance dans nos résultats.

5.5.2.3. Volume récolté au cours de la simulation

Nous avons comptabilisé le volume récolté sur l'ensemble de la période de simulation, de 2014 à 2094. Les deux modèles présentent à nouveau une complète cohérence sur l'ordre des types de scénarios pour chacun des trois sites. Dans les Bauges, les scénarios qui permettent de récolter le plus de bois sont d'abord le scénario d'intensification, puis le trade-off 1, le baseline, le trade-off 2, enfin le scénario d'extensification. On note toutefois des groupes : intensification et trade-off 1 sont proches et avec des récoltes plus élevées ; extensification et trade-off 2 sont proches avec des récoltes plus faibles ; baseline est intermédiaire. **Ce résultat est fortement lié aux actions à l'échelle du territoire**, et en particulier à la modulation de la part de parcelles mises en gestion selon les scénarios. Les actions à l'échelle de la parcelle sont de moindre importance, comme le montrent les scénarios de type trade-off : le trade-off 1 a une intensification à l'échelle territoire mais une extensification à l'échelle parcelle (cf. tableau 2), et son volume récolté est proche (bien qu'inférieur) au scénario d'intensification. Le constat est totalement symétrique avec les scénarios extensification et trade-off 2. Ainsi, les mesures au niveau de la parcelle ne sont pas suffisantes pour compenser les mesures territoire. Le résultat est similaire pour Milicz et Sneznik, à la nuance près que les mesures d'intensification de niveau territoire sont faibles, puisque toutes les parcelles étaient déjà mises en gestion (cf. tableau 2).

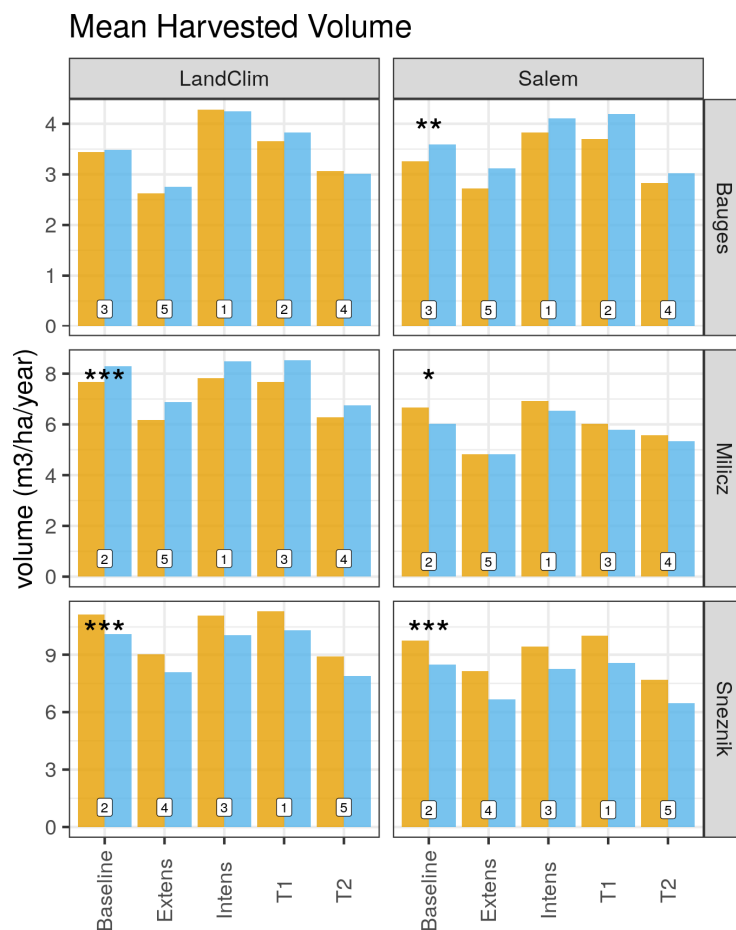


Figure 14 : Volume récolté moyen la période 2014-2094 en fonction des sites et des scénarios. Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ».

Les mesures favorisant la complexité sont quant à elles plus variées entre les sites et les modèles, et difficilement interprétables dans leur ensemble. La différence entre site est probablement liée à la différence des mesures de niveau territoire. En effet, avec des états initiaux et des scénarios tendanciellement très différents, les mesures favorisant la complexité sont très variables entre les sites. Par exemple, à Milicz, elles consistaient en bonne partie à gérer irrégulièrement les peuplements de chêne et de hêtre. Dans les Bauges, il s'agissait d'équilibrer la part de peuplements réguliers et irréguliers en augmentant la part de peuplements réguliers. A Sneznik, équilibrer la part de réguliers et irréguliers se faisait en mettant à l'inverse plus de peuplements irréguliers. Pour tous les sites, nous avons également différencié les diamètres de récolte. Tous ces facteurs s'entremêlent.

5.5.2.4. Volume de chablis au cours de la simulation

La figure 15 présente le volume de chablis moyen par hectare et par an sur l'ensemble de la simulation. Ces volumes sont assez faibles, car ramenés au volume annuel et par hectare, or les tempêtes ne surviennent pas tous les ans, et les parcelles des massifs ne sont pas toutes touchées au cours d'une tempête (cf. section 5.2). Les résultats sont complètement cohérents entre modèles, mais également entre les sites pour ce qui concerne le type de scénario. Seuls les rangs des scénario trade-off1 et trade-off2 peuvent parfois s'inverser.

Les scénarios pour lesquels les volumes de chablis sont maximaux sont d'abord le scénario d'extensification, puis le trade-off1, trade-off2 (rang inversé pour Sneznik), baseline, et enfin l'intensification. **Les scénarios d'intensification raccourcissent les révolutions et diminuent le capital sur pied dans les peuplements gérés, et mettent en gestion des peuplements non gérés. Ces actions diminuent le volume sur pied et le diamètre moyen des peuplements et réduisent ainsi le volume de chablis lié aux tempêtes**, car dans les modèles de dégâts de tempête, le risque de chablis croît avec le diamètre de l'arbre (cf. section 5.2). Le principe est inversé dans **les scénarios d'extensification, qui augmentent le volume de chablis pendant les tempêtes.**

La complexification réduit le volume de chablis dans les Bauges, et l'augmente à Milicz et Sneznik. Comme dans le cas du volume sur pied, l'effet des mesures de complexification sur le volume perturbé dépend essentiellement de la répartition entre peuplements réguliers et irréguliers. **En moyenne à l'échelle du territoire, où l'ensemble des classes d'âge est observé, les peuplements réguliers sont moins sensibles aux tempêtes que les peuplements irréguliers**, qui comportent à la fois un volume moyen supérieur, et en permanence des gros arbres sensibles aux tempêtes.

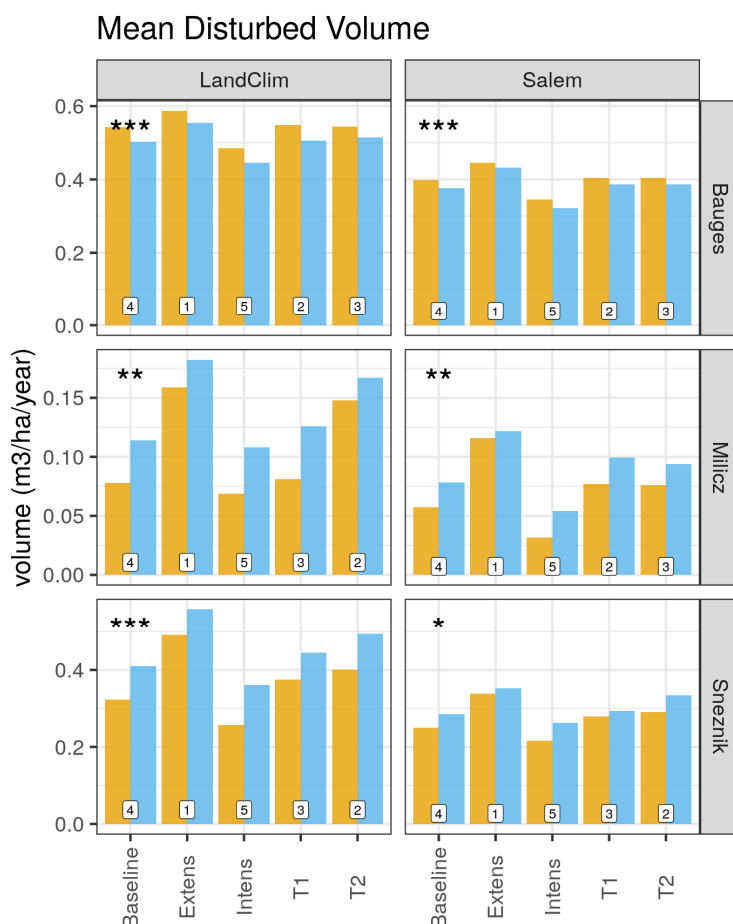


Figure 15 : Volume moyen de chablis sur la période 2014-2094 en fonction des sites et des scénarios. Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ».

5.5.2.5. Biodiversité : conservation de vieux arbres

Nous avons évalué un premier indicateur indirect de biodiversité (figure 16). Il s'agit de la proportion des placettes comportant au moins 10 arbres vétérans (gros arbres, minimum 50cm pour les feuillus, et 70cm pour les résineux) à l'hectare à l'issue des simulations (période 2075 – 2094).

L'effet principal est de niveau site : dans les simulations des Bauges, près de 75% des placettes comportent au moins 10 gros arbres à l'hectare, alors que ce nombre tombe entre 10 et 40% pour Milicz, et entre 20 et 65% à Sneznik. Ces valeurs élevées pour les Bauges sont en partie dû à l'absence de gestion sur une large part du territoire.

Par ailleurs, on observe **un effet fort des scénarios de complexification**. Cet effet est négatif dans les Bauges, et positif à Milicz et Sneznik, de manière significative dans tous les cas.

Comme pour beaucoup d'autres indicateurs, ce résultat est largement piloté par la proportion de peuplements en futaie régulière ou futaie irrégulière, et la part de forêt gérée dans le massif. La futaie irrégulière et l'absence de gestion conduisent à de plus gros arbres, augmentant ainsi la valeur de cet indicateur.

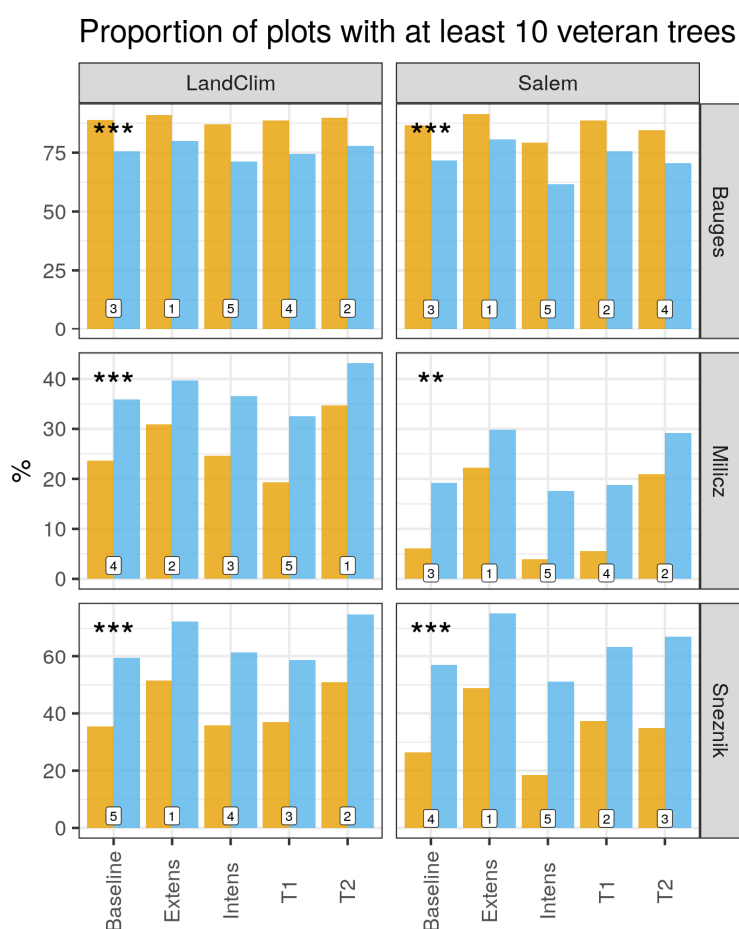


Figure 16 : Proportion de placettes ayant au moins 10 arbres vétérans à l'hectare sur la période 2075-2094 en fonction des sites et des scénarios.

Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ».

5.5.2.6. Biodiversité : variance du taux de couvert forestier

La biodiversité recouvre un ensemble très large d'organismes. Certains organismes sont inféodés à des stades forestiers matures (comme pour l'indicateur de la section 5.5.2.5), d'autres sont inféodés à des stades plus ouverts. Nous avons alors étudié l'écart-type du couvert forestier sur le territoire, comme indicateur de diversité des parcelles en matière de lumière au sol (figure 17). Plus cet indicateur est élevé, plus les peuplements qui composent le territoire ont des niveaux de lumière variés, permettant d'accueillir des organismes différents d'une parcelle à l'autre. Le modèle Salem fournit le taux de couvert libre du peuplement, mais pas le modèle LandClim. En revanche, LandClim fournit le LAI (Leaf Area Index), c'est-à-dire la surface totale des feuilles par unité de surface de sol. Nous avons standardisé le LAI de LandClim pour qu'il corresponde à la même gamme de valeur que Salem, et comparé les scénarios entre eux sur cette variable.

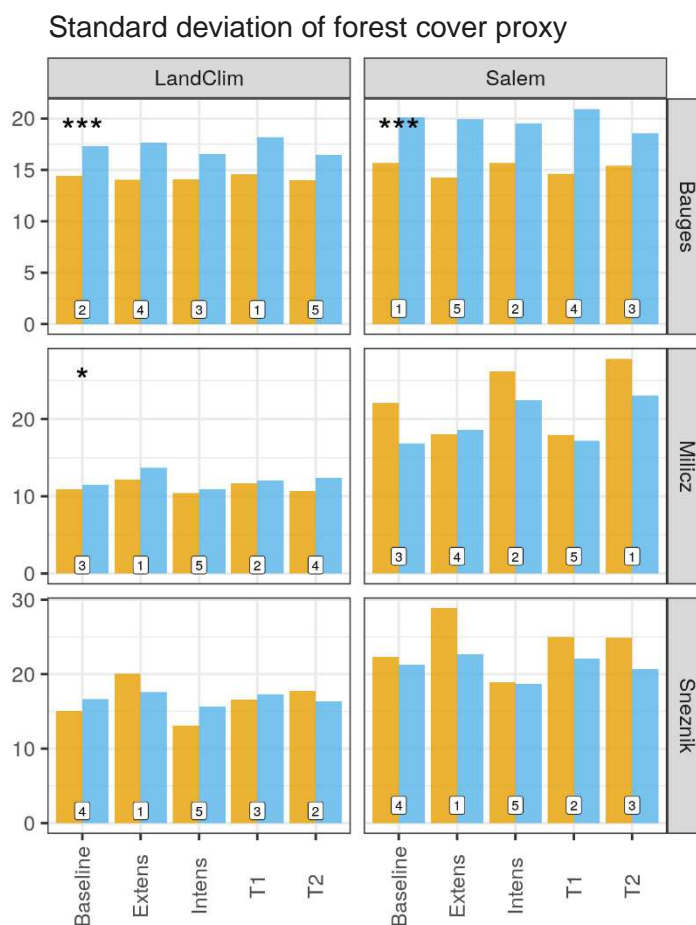


Figure 17 : Ecart-type d'un proxy du couvert forestier sur la période 2075-2094 en fonction des sites et des scénarios. Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ».

Les différences sont assez faibles entre les sites, avec des écart-types entre 10% et 20% de taux de couvert. Pour Milicz et Sneznik, on observe peu d'effets des différents scénarios sylvicoles. Pour les Bauges, on observe un effet très significatif de la complexité, positif pour tous les modes de gestion, et similaire pour les deux modèles : les scénarios de complexification ont conduit à une plus grande diversité des taux de couvert. Cet effet est une nouvelle fois lié à l'équilibrage des modes de gestion entre futaie régulière et futaie irrégulière.

5.6. Conclusion sur les services écosystémiques

De manière générale, les deux modèles utilisés produisent des résultats de nature similaire, ce qui conforte les conclusions que nous pouvons tirer de ces simulations. Le plan de simulation a été construit en croisant 5 scénarios de gestion, et 2 niveaux de complexité (cf. tableau 3). Les scénarios de gestion se traduisent par des mesures à l'échelle des parcelles (par exemple une intensité plus ou moins importante des coupes) et à l'échelle des territoires (par exemple une variation de la part de la forêt gérée/non gérée, ou la répartition entre futaie régulière et futaie irrégulière).

Les scénarios d'intensification et d'extensification produisent des résultats attendus. L'intensification réduit le capital de bois sur pied, et donc le volume et le stock de carbone, mais réduit également le volume de chablis lié aux tempêtes, en limitant la quantité de gros bois qui y sont plus sensibles. L'extensification a l'effet inverse. Dans nos scénarios, **les effets sont particulièrement sensibles aux mesures à l'échelle du territoire, notamment à proportion de la forêt mise en gestion**. Les forêts non-gérées accumulent le bois sur pied, et ont une augmentation des diamètres de coupe, jouant ainsi fortement sur les différents indicateurs présentés.

Les mesures de complexification ayant le plus d'effet sont également à l'échelle du territoire, avec notamment **la répartition entre les futaies régulières et futaies irrégulières**. Une des mesures de complexification à l'échelle du territoire consistait à équilibrer les modes de gestion de la forêt, notamment la part de futaie régulière ou irrégulière. Dans le mode de gestion en futaie régulière, les peuplements passent par des stades jeunes au cours desquels le volume sur pied est faible, et les diamètres des arbres petits. Pendant de ces stades, les arbres sont peu sensibles aux perturbations telles que les tempêtes. A l'inverse, la futaie irrégulière comporte en permanence de gros arbres sensibles aux tempêtes. Ainsi, à l'échelle du territoire, **une proportion accrue de futaie régulière va limiter les volumes de chablis**, alors qu'**une proportion supérieure de futaie irrégulière va permettre d'augmenter le capital sur pied**, et donc le stockage de carbone, mais aussi augmenter le volume de chablis. Ainsi, dans le massif des Bauges, initialement principalement géré en futaie irrégulière, la complexification augmente la part de futaie régulière, réduisant le capital sur pied et le volume de chablis. A l'inverse, à Milicz ou Sneznik, la complexification augmente la part de futaie irrégulière, avec l'effet inverse.

6. Conclusion générale

Le projet I-Maestro est un projet Européen du programme ERA-NET Cofund Action « ForestValue ». Le projet implique 5 partenaires européens : PIK (Potsdam Institute for Climate Impact Research), l'EFI de Bohn, l'Université de Ljubljana, l'Université d'Agriculture de Cracovie, et INRAE (UR LESSEM).

La question principale est la suivante : « **Augmenter la complexité des forêts est-elle une stratégie pertinente pour améliorer la résilience des services écosystémiques face aux perturbations ?** ». Nous avons abordé la complexité d'une part à l'échelle de la parcelle (mélange d'essences, diversité des tailles des arbres), et d'autre part à l'échelle du territoire forestier (diversité entre les parcelles). Ce projet comporte à la fois des questionnements scientifiques, comme le lien entre complexité et dynamique forestière, et des problématiques sociétales comme la sécurisation de la fourniture des services écosystémiques.

Le temps forestier est un temps long. Il n'est pas envisageable d'aborder de manière expérimentale un grand nombre de scénarios de gestion pour mesurer leur lien avec les perturbations, qui sont par ailleurs par nature très aléatoires. Nous avons alors eu une approche par simulation, en utilisant 4 modèles déjà établis et disponibles dans notre équipe ou auprès de nos partenaires du projet.

Ce projet a produit **plusieurs résultats intermédiaires**, comme un package d'analyse de la diversité (cf. section 3.4), l'établissement de méthodes pour initialiser l'état dendrométrique de toutes les parcelles d'un territoire forestier (cf. section 5.1), des scénarios de tempête pour le futur (cf. section 5.2), la rationalisation de scénarios de gestion à l'échelle d'un territoire (cf. section 5.3), et de manière générale l'amélioration de nos méthodes de simulations massives pour répondre à un questionnement scientifique (cf. section 5.4).

De manière synthétique, en utilisant les 4 modèles de simulation forestière, nous avons montré par une approche **à l'échelle du peuplement forestier que les mesures de complexification ont peu d'effet sur la résistance et la résilience des peuplements face aux tempêtes** (cf. chapitre 4). La résilience est plus sensible notamment au diamètre moyen du peuplement. Ce résultat est en cohérence avec ceux des approches à l'échelle du territoire, pour lesquels nous avons montré que les mesures de niveau territoire (part de forêt gérée/non gérée, équilibre entre futaie régulière/irrégulière) ont une incidence prépondérante sur les services écosystémiques, plutôt que les mesures au niveau de la parcelle. Ainsi, **on identifie un effet de la complexité principalement lorsqu'il modifie les équilibres à l'échelle du territoire**. Notamment, la complexité diminue le volume de chablis dans les Bauges, dans la mesure où la complexification tendait à inclure des peuplements réguliers dans le massif actuellement très majoritairement géré en irrégulier. En moyenne à l'échelle du territoire, les peuplements réguliers ont un volume de bois sur pied moindre que les peuplements irréguliers, d'où un volume de chablis inférieur. A l'inverse, à Milicz ou Sneznik, en augmentant la part de futaie irrégulière, la complexité augmentait le volume de bois sur pied, mais aussi le volume de chablis.

Enfin, en général, **l'effet de la complexité était inférieur (parfois équivalent) aux mesures liées à l'intensité de la gestion** (intensification ou extensification).

BILAN DES LIVRABLES DU PROJET

Livrable	Nom	W P	Statut
D1.1	Données sur le climat, le sol et les peuplements (à partir de placettes permanentes de l'IFN, etc.) préparées pour les simulations selon les normes de la base de données PROFOUND et pour les simulations au niveau des paysages et des pays.	1	Réalisé. Données disponibles sur le serveur FTP du projet
D1.2	Rapport synthétisant les définitions des éléments clés de la complexité structurale, de la résilience et de la perturbation, et présentant les paramètres retenus pour la résilience	1	Réalisé. Annexe A
D2.bis*	Rapport de stage de M2 sur le recouvrement après avalanche	2	Réalisé. Annexe B
D3.bis*	Rapport de stage de M2 sur les modèles de recrutement	3	Réalisé. Annexe C
D3.ter*	Rapport de stage de M2 sur la modélisation de la gestion et des perturbations	3	Réalisé. Annexe D
D3.2	Package R permettant le calcul de métriques de complexité structurale à partir de sorties de modèles	3	Réalisé. Disponible sur gitlab: https://gitlab.com/arnaud.guyennon/forestdiversity
D3.3	Rapport sur les scénarios de gestion forestière avec des descriptifs et des recommandations de mise en œuvre au niveau des peuplements, des paysages et des pays	3	Réalisé. Description dans ce rapport + Article scientifique en préparation
D3.4	Manuscrit pour publication scientifique analysant les résultats des simulations en vue de l'évaluation des modèles	3	Réalisé. Annexe 3.4 + Article scientifique Mahnken et al. 2022.
D4.2a	Manuscrit pour publication scientifique sur l'effet de la gestion sur la résilience à court terme des services écosystémiques	4	Travail fini (cf. section 4), article en préparation.
D4.2b	Manuscrit pour une publication scientifique sur l'effet de la gestion forestière et de la complexité structurale sur la fourniture de services écosystémiques dans le contexte du changement climatique et des perturbations	4	Travail fini (cf. section 5), article en préparation
D5.1a*	Rapport intermédiaire synthétique en français	5	Réalisé. Rendu à l'ADEME
D5.1b*	Rapport final synthétique en français	5	Réalisé, ce rapport.

Tableau 9 : Bilan des livrables à l'ADEME

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : Rapport synthétisant les définitions des éléments clés de la complexité structurale, de la résilience et de la perturbation, et présentant les paramètres retenus pour la résilience (Livrable D1.2)

ANNEXE B : Rapport de stage de Master 2 de Maude Cavalière (livrable D2.bis)

ANNEXE C : Rapport de stage de Master 2 de Louis Cordonnier (livrable D3.bis)

ANNEXE D : Rapport de stage de Master 2 de Nathéo Beauchamp (livrable D3.ter)

ANNEXE E : Rapport sur l'évaluation des modèles (Livrable D3.4)

ARTICLES SCIENTIFIQUES DU PROJET

Liste des articles scientifiques mentionnant explicitement le projet I-Maestro en financeur (incluant tous les partenaires du projet). Plusieurs autres articles sont en préparation.

- Socha J., Tyminska-Czabanska L., 2019. A Method for the development of Dynamic Site Index Models Using Height-Age Data from Temporal Sample Plots. *Forests* 2019, 10 (7), 542.
- Socha J., Tyminska-Czabanska L., Grabska E., Orzel S., 2020. Site Index Models for Main Forest-Forming Tree Species in Poland", *Forests* 2020, 11(3), 301.
- Grabska E., Hawryło P., Socha J., 2020. Continuous Detection of Small-Scale Changes in Scots Pine Dominated Stands Using Dense Sentinel-2 Time Series. *Remote Sensing* 2020, 12(8), 1298.
- Keren S., Svoboda M., Janda P., Nagel T.A., 2020. Relationships between Structural Indices and Conventional Stand Attributes in an Old-Growth Forest in Southeast Europe. *Forests* 2020, 11(1), 4.
- Socha, J., Hawryło, P., Stereńczak, K., Miścicki, S., Tymieńska-Czabańska, L., Młoczek, W., & Gruba, P. (2020). Assessing the sensitivity of site index models developed using bi-temporal airborne laser scanning data to different top height estimates and grid cell sizes. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 91(January), 102129.
- Keren S. (2020). Modeling Tree Species Count Data in the Understorey and Canopy Layer of Two Mixed Old-Growth Forests in the Dinaric Region. *Forests* 2020, 11(5), 531.
- Reyer C.P.O. et al., 2020. The PROFOUND Database for evaluating vegetation models and simulating climate impacts on European forests. *Earth System Science Data*, 12, 1295-1320, 2020.
- Hawryło, P., Francini, S., Chirici, G., Giannetti, F., Parkitna, K., Krok, G., Mitelsztedt, K., Lisańczuk, M., Stereńczak, K., Ciesielski, M., Wężyk, P., Socha, J., 2020. The use of remotely sensed data and polish NFI plots for prediction of growing stock volume using different predictive methods. *Remote Sens.* 12, 1–20.
- Lasch-Born Petra et al. (2020): Description and evaluation of the process-based forest model 4C v2.2 at four European forest sites. *Geoscientific Model Development*, 13, 5311–5343, 2020.
- Socha, J., Solberg, S., Tymieńska-Czabańska, L., Tompalski, P., Vallet, P., 2021. Height growth rate of Scots pine in Central Europe increased by 29% between 1900 and 2000 due to changes in site productivity. *Forest Ecology and Management* 490, 119102.
- Grabska E., Socha J., 2021, Evaluating the effect of stand properties and site conditions on the forest reflectance from Sentinel-2 time series, *PLoS One* 16, 1–23.
- Aussenac Raphaël, Thomas Pérot, Mathieu Fortin, François de Coligny, Jean-Matthieu Monnet, Patrick Vallet, 2021. The Salem simulator version 2.0: a tool for predicting the productivity of pure and mixed stands and simulating management operations. *Open Research Europe*.
- Tymieńska-Czabańska, L.; Socha, J.; Maj, M.; Cywicka, D.; Hoang Duong, X.V, 2021. Environmental drivers and âge trends in site productivity for oak in Southern Poland. *Forests* 2021, 12, 209.
- Socha, J., Tymieńska-Czabańska, L., Bronisz, K., Zięba, S., Hawryło, P., 2021. Regional height growth models for scots pine in Poland. *Scientific Reports*. 11, 1–15.
- Hlásny Tomáš, Louis König, Paal Krokene, Marcus Lindner, Claire Montagné-Huck, Jörg Müller, Hua Qin, Kenneth F. Raffa, Mart-Jan Schelhaas, Miroslav Svoboda, Heli Viiri, Rupert Seidl, 2021. Bark beetle outbreaks in Europe: state of knowledge and ways. *Forward for Management. Current Forestry Reports*.
- Tymieńska-Czabańska Luiza, Jarosław Socha, Paweł Hawryło, Radomir Bałazy, Mariusz Ciesielski, Ewa Grabska-Szwagrzyk, Paweł Netzel, 2021. Weather-sensitive height growth modelling of Norway spruce using repeated airborne laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology*, Volumes 308–309, 2021, 108568, ISSN 0168-1923.
- Tymieńska-Czabańska Luiza, Paweł Hawryło, Jarosław Socha, 2022. Assessment of the effect of stand density on the height growth of Scots pine using repeated ALS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 108, April 2022.
- Cerioni, M., Fidej, G., Diaci, J. et al., 2022. Dynamics and drivers of post-windthrow recovery in managed mixed mountain forests of Slovenia. *Eur J Forest Res* (2022).
- Mahnken, M., Cailleret, M., Collalti, A., Trotta, C., Biondo, C., D'Andrea, E., Dalmonech, D., Marano, G., Mäkelä, A., Minunno, F., Peltoniemi, M., Trotsiuk, V., Nadal-Sala, D., Sabaté, S., Vallet, P., Aussenac, R., Cameron, D. R., Bohn, F. J., Grote, R. ... Reyer, C. P. O. (2022). Accuracy, realism and general applicability of European forest models. *Global Change Biology*, 00, 1–23.
- Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M.E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., Hauf, Y., Jasinevičius, G., Labonne, S., Linkevičius, E., Mahnken, M., Milanovic, S., Nabuurs, G.-J., Nagel, T.A., Nikinmaa, L., Panyatov, M., Bercak, R., Seidl, R., Sever, M.Z.O., Socha, J., Thom, D., Vuletic, D., Zudin, S., Schelhaas, M.-J. (in revision) Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*.
- Nikinmaa, L., de Koning, J.H.C., Derks, J., Grabska-Szwagrzyk, E., Konczal, A.A., Lindner, M., Socha, J., Muys, B. (submitted) Perceptions of forest professionals on managing forest disturbance to enhance forest resilience. *Forest Policy and Economics*.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : indicateurs utilisés pour évaluer les services rendus par les écosystèmes forestiers. _____	13
Tableau 2 : Modalités de l'expérimentation virtuelle. _____	15
Tableau 3 : Plan d'échantillonnage générique, appliqué sur les trois sites par les modèles réalisant les simulations. « SI » et « SE » signifient « Stand Intensification ou Stand Extensification » « LI » et « LE » signifient « Landscape Intensification ou Landscape Extensification » _____	24
Tableau 4 : Détail des règles sylvicoles du scénarios « Baseline » pour le massif des Bauges _____	25
Tableau 5 : Règles des scénarios alternatifs pour les trois massifs _____	27
Tableau 6 : Répartition des modes de gestion en fonction des règles de niveau territoire pour les Bauges _____	28
Tableau 7 : Répartition des modes de gestion en fonction des règles de niveau territoire pour Milicz _____	28
Tableau 8 : Répartition des modes de gestion en fonction des règles de niveau territoire pour Sneznik _____	29
Tableau 9 : Bilan des livrables à l'ADEME _____	41

FIGURES

Figure 1 : Schéma illustrant les principaux éléments du projet I-Maestro _____	10
Figure 2 : Importance des facteurs de l'expérimentation virtuelle pour expliquer la résilience de la surface terrière du peuplement à une perturbation de type tempête. Des diagrammes à barres plus élevés signifient une plus grande importance des variables. _____	17
Figure 3 : Effet de la vitesse du vent (WS), du diamètre quadratique moyen (Dg), du module et de la diversité des tailles (gini) sur la sensibilité, la récupération et la résilience des peuplements (croix noires, calculées comme la somme de la sensibilité et de la récupération). Les quatre barre d'un même groupe correspondent à une diversité des tailles croissantes (gini, niveaux de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6) _____	17
Figure 4 : Effet de la vitesse du vent (WS), du diamètre quadratique moyen (Dg), du module et de la richesse en espèce (Richness) sur la sensibilité, la récupération et la résilience des peuplements (croix noires, calculées comme la somme de la sensibilité et de la récupération). Les quatre barre d'un même groupe correspondent à une richesse en espèce croissantes (Richness, niveaux de 1 à 4 espèces) _____	18
Figure 5 : Etapes de réalisation des simulations à l'échelle du paysage _____	19
Figure 6 : Chaîne de traitement pour reconstruire les caractéristiques des arbres pour de grands territoires _____	20
Figure 7 : Exemple du massif des Bauges. Comparaison de la hauteur dominante issue du LiDAR (en abscisses), avec la hauteur dominante calculée par l'algorithme (en ordonnées). L'histogramme au-dessus du graphe indique le nombre de pixels de chaque hauteur dominante. _____	21
Figure 8 : Dégâts à l'échelle du paysage (en m3 par hectare) en fonction de la sévérité d'une tempête. En noir les observations de la base de données, en couleur les dégâts simulés sur chacun des sites après calibration. _____	22
Figure 9 : Scénarios de tempêtes simulés dans I-Maestro _____	22
Figure 10 : Répartition des parcelles simulées dans le 51 500 hectares de forêt des Bauges _____	26
Figure 11 : Compromis ou synergie entre les diversités des tailles alpha et beta pour chacun des trois sites avec les deux modèles utilisés _____	30
Figure 12 : Evolution du volume de bois sur pied dans les trois sites selon les différents scénarios de gestion. Les couleurs représentent les différents types de scénarios (Baseline, Extensification, intensification, T1 et T2). Les courbes en pointillés sont avec les mesures de complexité. _____	32
Figure 13 : Volume moyen sur pied sur la période 2075-2094 en fonction des sites et des scénarios. Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ». _____	33
Figure 14 : Volume récolté moyen la période 2014-2094 en fonction des sites et des scénarios. Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ». _____	35
Figure 15 : Volume moyen de chablis sur la période 2014-2094 en fonction des sites et des scénarios. Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ». _____	36
Figure 16 : Proportion de placettes ayant au moins 10 arbres vétérans à l'hectare sur la période 2075-2094 en fonction des sites et des scénarios. Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ». _____	37
Figure 17 : Ecart-type d'un proxy du couvert forestier sur la période 2075-2094 en fonction des sites et des scénarios. Les étoiles indiquent la significativité de l'effet de la complexité par modalité « modèle x site ». Le chiffre dans les barres indique le rang du scénario dans la modalité, en se basant sur la modalité « non complexifié ». _____	38

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



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.



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.



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.

I-MAESTRO : Complexité et résilience des forêts

Le changement climatique va modifier la structure et la dynamique des forêts et affecter la production de bois ainsi que d'autres services écosystémiques comme le stockage du carbone et la biodiversité. Les perturbations peuvent moduler les effets du changement climatique sur les fonctions essentielles des écosystèmes comme la productivité soit en augmentant les effets négatifs, soit en facilitant l'adaptation.

Dans I-MAESTRO, un projet ERA-NET du programme européen ForestValue 2017, nous avons étudié le lien entre les choix sylvicoles et la résilience des forêts aux perturbations, notamment les tempêtes. Nous avons en particulier évalué l'influence des stratégies de complexification de la forêt sur la résilience des services écosystémiques, en prenant en compte les stratégies de complexification sont à l'échelle de la parcelle forestière (mélanges d'essences, diversité des tailles des arbres), et à l'échelle du massif forestier (diversité des types de gestion, diversité des essences objectif), avec la question principale suivante : « la complexité des forêts est-elle une stratégie pertinente pour la résilience des services écosystémiques ? ».

Pour répondre à ces questions, nous avons comparé les résultats de simulations à l'échelle de la parcelle de quatre modèles de la dynamique forestière : LandClim, Salem, Samsara, et 4C. Avec les deux premiers modèles, nous avons également simulé l'évolution de 3 massifs forestiers entiers (les Bauges en France, Milicz en Pologne, et Sneznik en Slovénie) selon différents scénarios de gestion sylvicole.

Nous montrons qu'à l'échelle de la parcelle, la complexité a peu d'incidence sur la résilience de la production de bois. La résilience est par contre sensible à l'intensité de la tempête et au diamètre moyen du peuplement. En revanche, complexifier la forêt à l'échelle du territoire (diversité des types de gestion) peut avoir un effet sur les volumes de chablis, positif ou négatif selon les conditions initiales du territoire. En moyenne à l'échelle du territoire, les futaies irrégulières contiennent des volumes de bois sur pied plus importants que les futaies régulières, qui passent par des stades juvéniles avec peu de volume. Les diamètres moyens sont également plus élevés. En conséquence, l'augmentation de la part de futaie irrégulière dans le territoire augmente proportionnellement le volume de chablis. Avec des diamètres moyens plus importants, la futaie irrégulière augmente aussi les indicateurs de biodiversité liés aux gros bois.

