



➤ Modélisation de la dynamique des forêts, Simulation des massifs

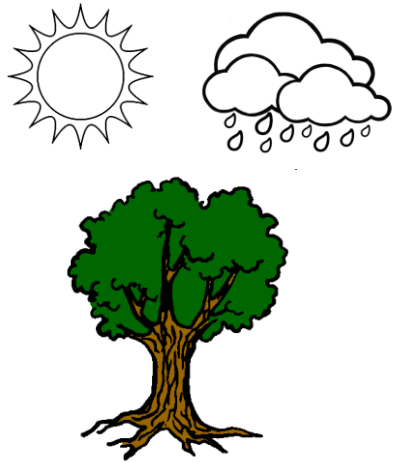
Patrick Vallet

Habilitation à Diriger les Recherches

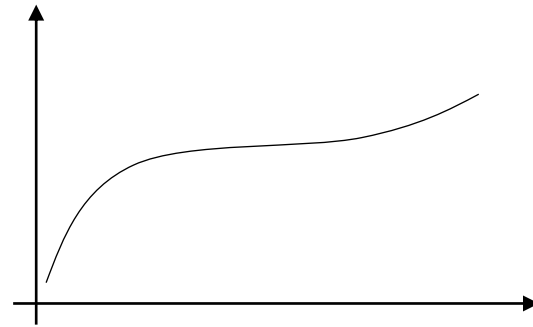
26 juin 2023



➤ Qu'est ce que la modélisation ? La simulation ?

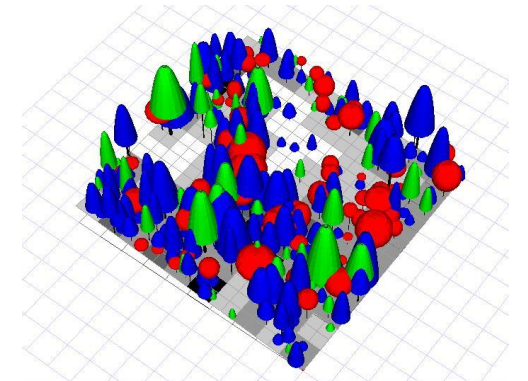


Modélisation



- Représentation schématique
- Système d'équations mathématiques

Simulation



Modèle Samsara sous Capsis

➤ Intérêt de chacune de ces deux étapes ?

➤ La modélisation pour étudier la dynamique forestière

- Nombreux facteurs à prendre en compte
 - Age, densité, sylviculture, fertilité, climat
 - Permet de prendre en compte simultanément différents facteurs
 - Permet d'isoler le ou les facteurs d'intérêt
- Temps de réponse pluriannuel

Premières placette permanentes fin XIX^e



Oudin 1930

GIS Coopérative de données, débuts en 1994



Seynave et al. 2018

- Des modèles pour étudier l'écologie forestière
 - Interactions entre les espèces
 - Impacts du changement climatique
 - Sylviculture et services écosystémiques / biodiversité

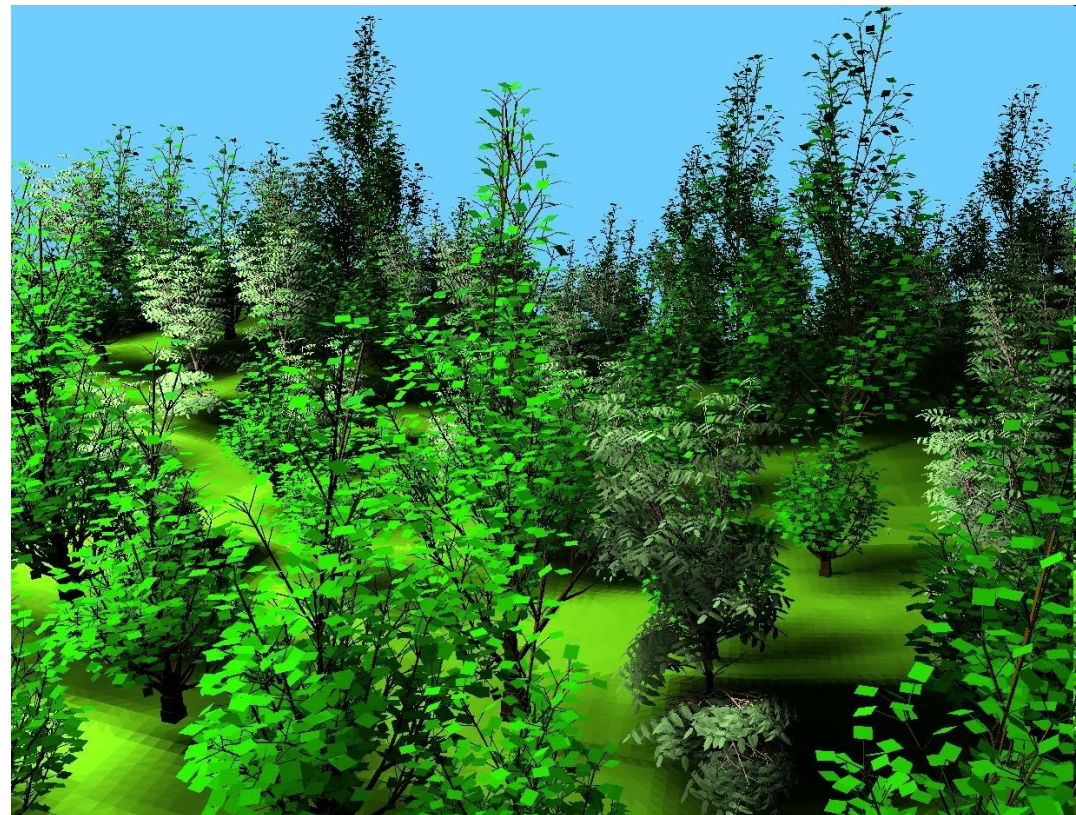
➤ Intérêts de la simulation

Avec les modèles prédictifs

- Evaluer des stratégies de gestion
 - Quel stockage de carbone d'une forêt donnée en fonction de la gestion ?
 - Quelles essences choisir en climat futur ?
- Compresser le temps

- Ecologie forestière :
obtenir des propriétés émergentes

Soler et al. 2003



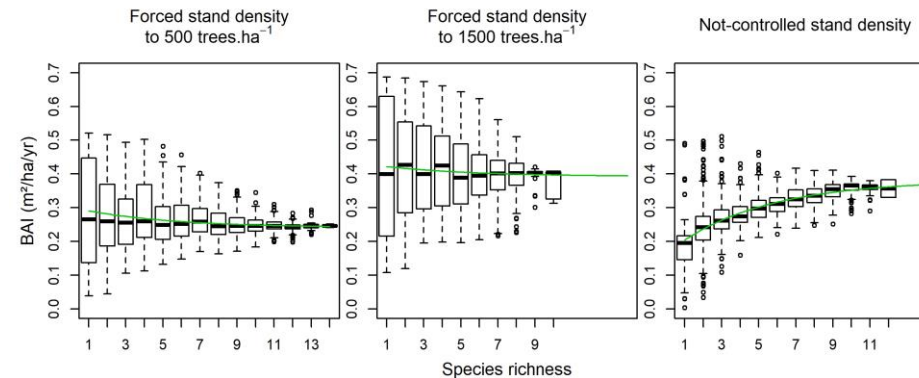
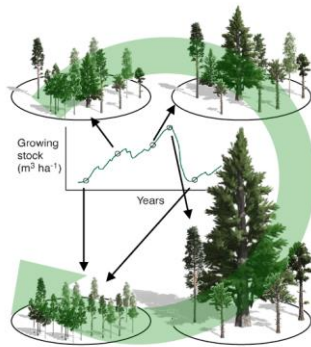
➤ Intérêts de la simulation

Avec les modèles prédictifs

- Compresser le temps, mais les résultats sont dépendants du modèle

- Exemple :

- Evaluer un nouveau concept dans la relation « diversité – productivité »
- Des peuplements mono-spécifiques aux peuplements à plus de 10 espèces d'arbres, partout en Europe.



Morin et al., submitted

- Importance de la phase de validation/évaluation
- Parfois la possibilité d'utiliser plusieurs modèles indépendants
- Certaines questions ne peuvent pas être abordées autrement

➤ « Tous les modèles sont faux... mais certains sont utiles » (G. Box, 1979)

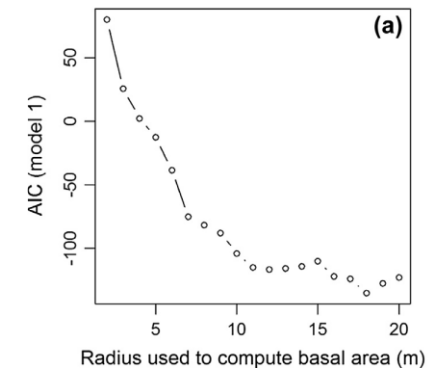
➤ Le choix de l'échelle, un choix fondamental

Le choix dépend de la question posée



Peuplement de pins sylvestres en forêt d'Orléans

- Modélisation de la lumière arrivant au sol ?
 - Meilleur modèle : rayon équivalent à la hauteur des arbres (Pérot et al. 2017)

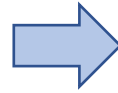


Pérot et al., 2017

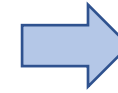
- Stratégies sylvicoles pour optimiser le stockage de carbone en forêt d'Orléans (70 000 ha) ?
 - Modèles à l'échelle du peuplement

➤ Objectifs de mes travaux

Modélisation de la dynamique forestière



Développement de simulateurs



Simulation à l'échelle des massifs forestiers

- Dynamique des peuplements mélangés :
 - Croissance radiale essentiellement
 - Mais aussi
 - Croissance en hauteur
 - Régénération

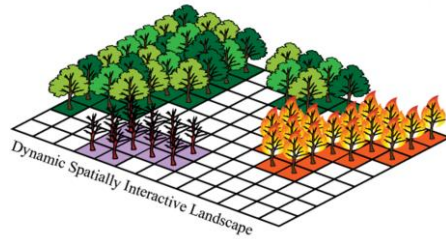
- Etude de compromis :
 - Atténuation / adaptation au changement climatique
 - Productivité / biodiversité
- Résilience de la production suite aux tempêtes



➤ Choix de l'échelle

Echelle de modélisation

Massif



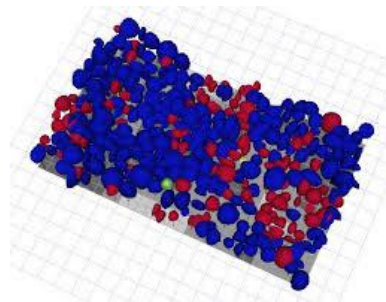
Modèle territoire
Ex: LANDIS
Cellules et processus spatiaux

Parcelle



Modèle peuplement
Ex: SALEM
Variables : G, Dg, N,...

Arbre



Modèle Arbre
Ex: SAMSARA
Variables : circ, htot,...

Intérêt pour la gestion

Stratégique
(Aménagement)

Upscaling

Stratégique

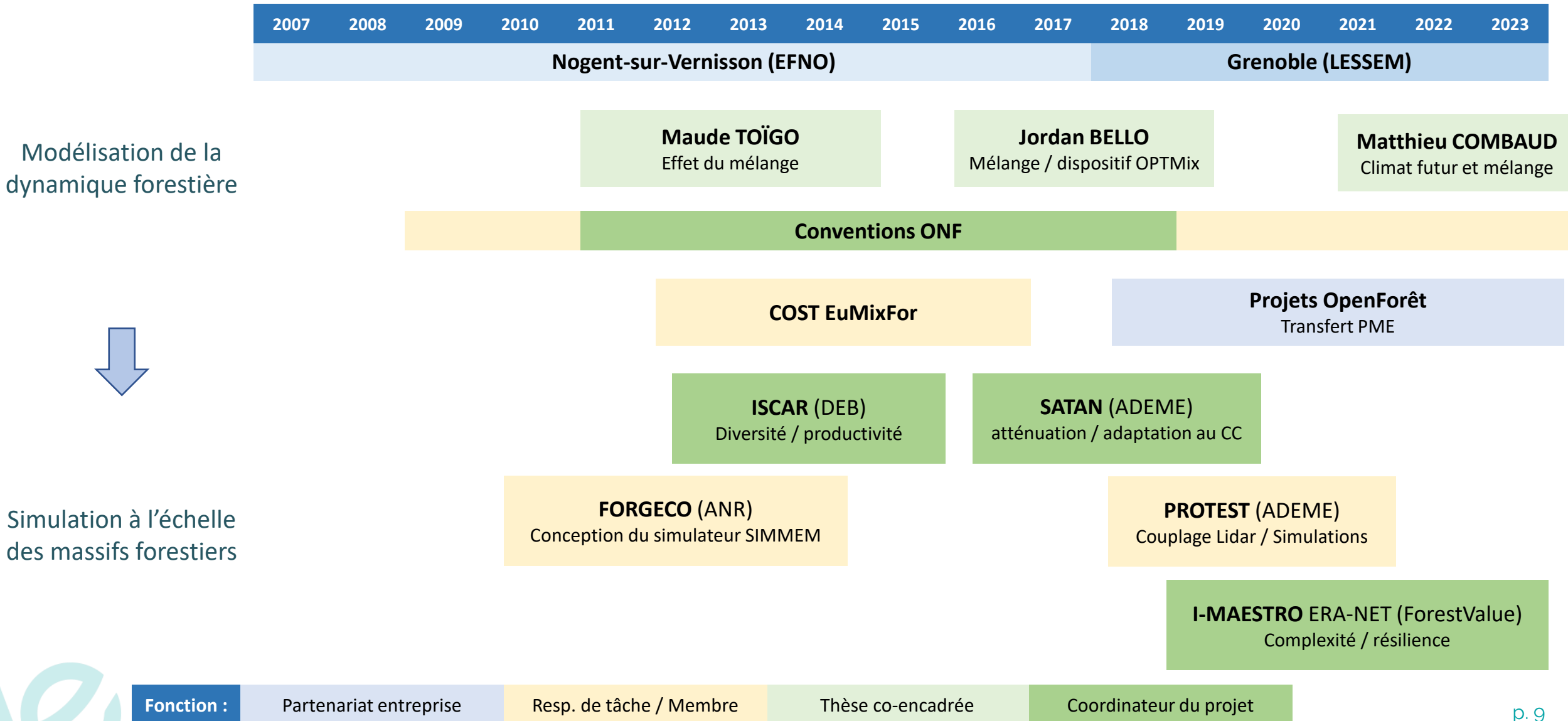
Tactique

Downscaling

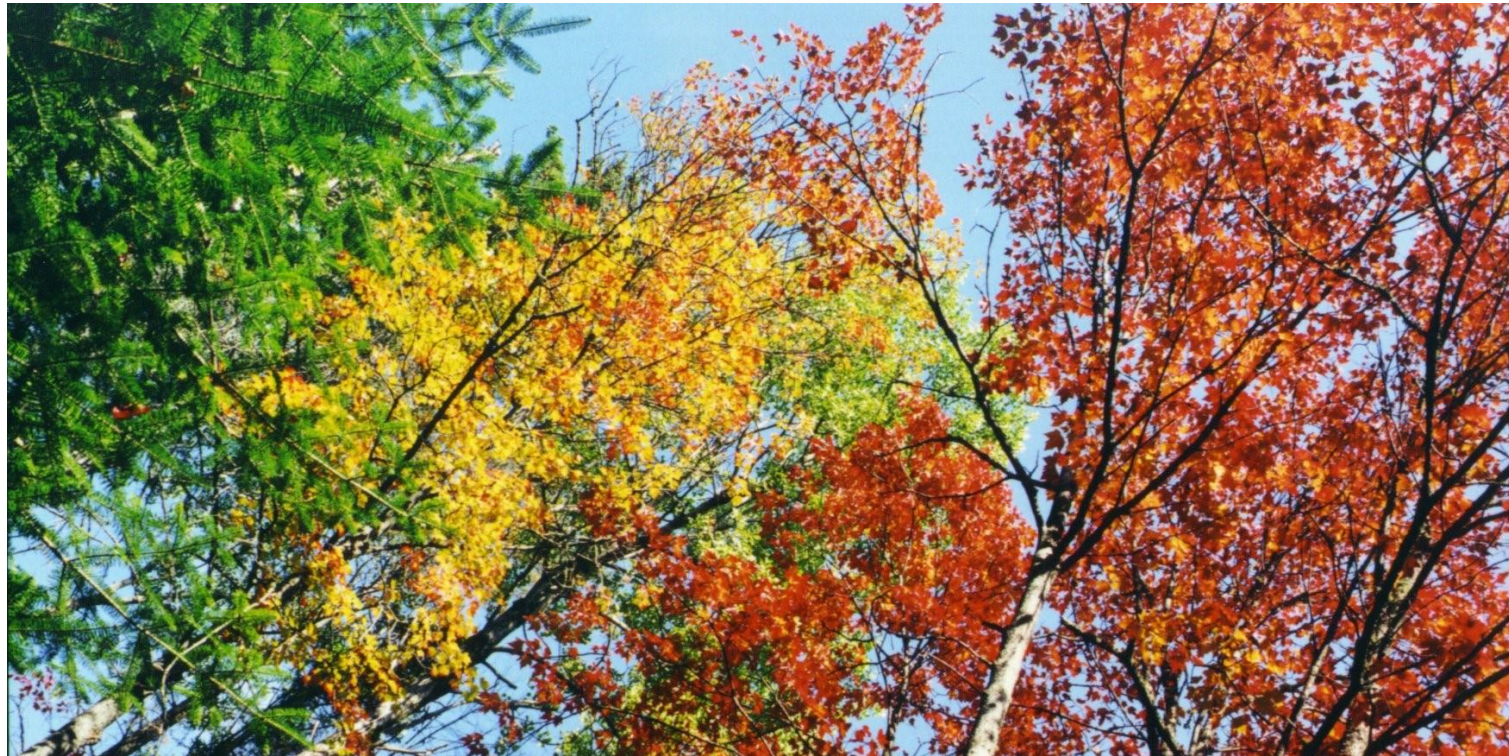
Tactique
(Sylviculture)



➤ Projets les plus structurants de mon parcours



Les peuplements mélangés



> Les peuplements mélangés

Les dix questions principales des gestionnaires

Coll et al., 2018

Peuplements
mélangés ?

Changements globaux
et perturbations ?

Intérêt par rapport
aux monocultures ?

Sylviculture

Mécanismes

2. Résistance / résilience au CC et perturbations naturelles
1. Quelles compositions pour la résistance / résilience ?
8. Plus de flexibilité d'adaptation ?
9. Plus de services écosystémiques ?
6. Quels effets positifs et négatifs sur les fonctions ?
7. Coûts et bénéfices entre pur et mélange
4. Quels mélanges pour différents objectifs ?
3. Quelle sylviculture pour maintenir le mélange ?
5. Quels mécanismes sur la production ?
10. Efficience d'utilisation des ressources ?

➤ Les peuplements mélangés

Les dix questions principales des gestionnaires

Coll et al., 2018

Peuplements
mélangés ?

Changements globaux
et perturbations ?

2. Résistance / résilience au CC et perturbations naturelles
1. Quelles compositions pour résistance / résilience ?
8. Plus de flexibilité d'adaptation ?

Intérêt par rapport
aux monocultures ?

9. Plus de services écosystémiques ?
6. Quels effets positifs et négatifs sur les fonctions ?
7. Coûts et bénéfices entre pur et mélange

Sylviculture

4. Quels mélanges pour différents objectifs ?
3. Quelle sylviculture pour maintenir le mélange ?

Mécanismes

5. Quels mécanismes sur la production ?
10. Efficience d'utilisation des ressources ?

➤ Comment modéliser la dynamique des mélanges

Expérimentation – Ex ORPHEE (Biogeco)



Castagneyrol et al. 2013

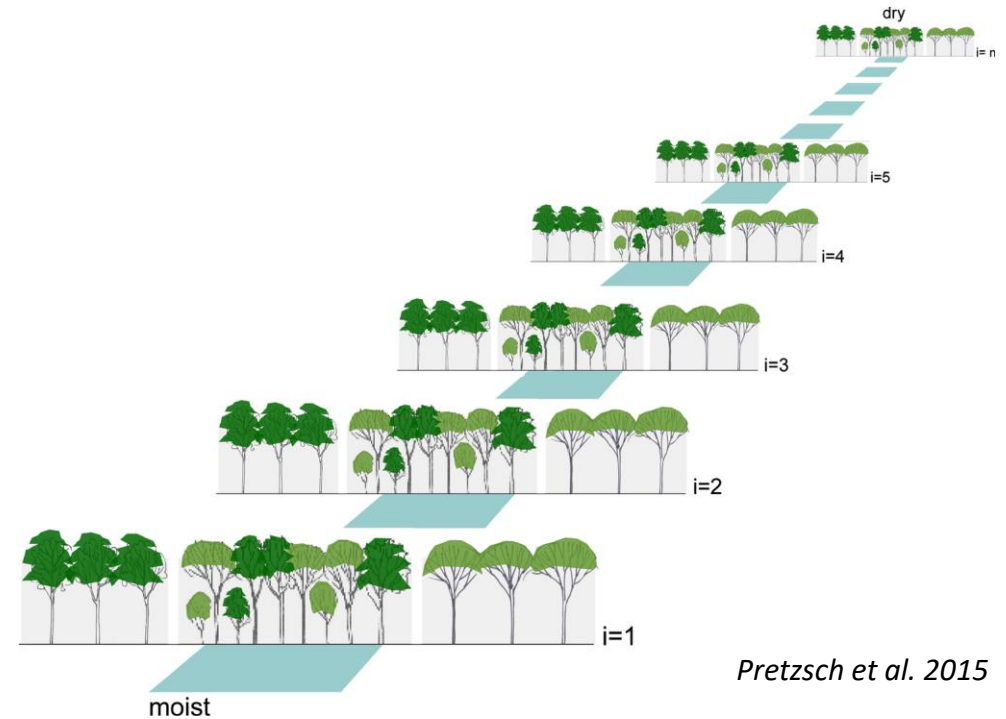
➤ Comment modéliser la dynamique des mélanges

Réseau d'observation de triplets



OPTMix
Oak Pine Tree Mixture

Korboulevsky et al. 2015



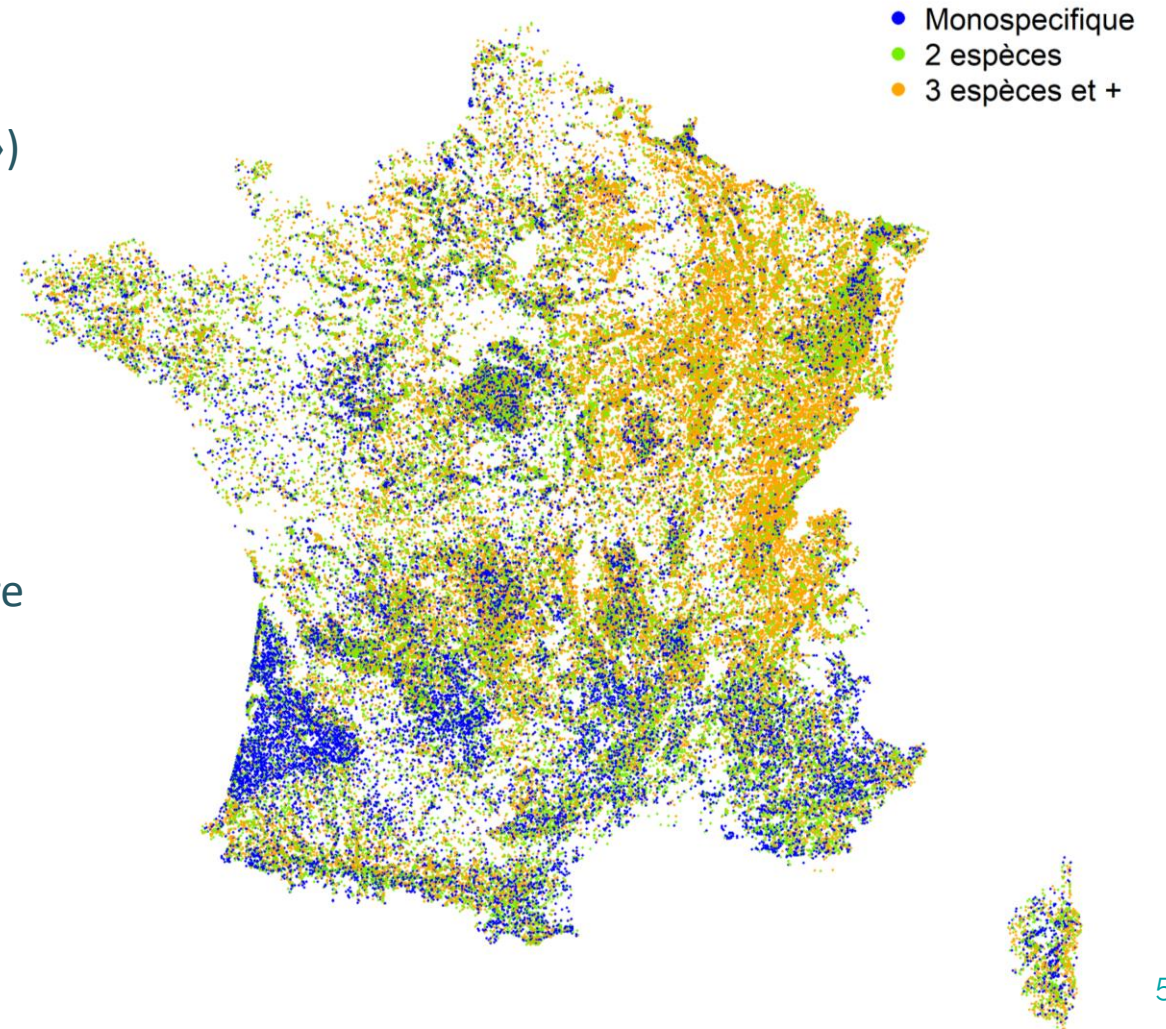
Pretzsch et al. 2015

➤ Comment modéliser la dynamique des mélanges

Les données d'observation

L'Inventaire Forestier National :

- De 2005 à 2021 (données « nouvelle méthode »)
 - plus de 100 000 placettes mesurées
 - 1,3 millions d'arbres mesurés
- Une véritable mine d'or pour l'écologie forestière
(un grand merci aux collègues de l'IFN)



➤ Méthodologie spécifique aux données d'observation

- Étape 1 : Sélection de sous-jeux de données
 - Sélection de placettes en peuplements purs
 - Sélection de placettes en peuplements mélangés

- Étape 2 : Modélisation de la dynamique en peuplement pur

- Intégration des variables influençant la dynamique (par ex. la productivité)

Productivité = f(variables climatiques et édaphiques, stade de dev., sylviculture)

- Étape 3 : Calcul de l'effet du mélange

- Modèle pur appliqué en peuplement mélangé → rôle de témoin, valeur attendue si on était en pur

$$\text{Effet du mélange} = \frac{\text{Productivité}_{\text{observée}} - \text{Productivité}_{\text{attendue}}}{\text{Productivité}_{\text{attendue}}}$$

- Etape 4 : Analyse de l'effet du mélange

- Modélisation en fonction des hypothèses à tester :
 - Effet moyen
 - Variation avec le milieu
 - Variation avec les traits des espèces



➤ Modélisation de l'effet du mélange

- Sur la croissance radiale
 - Mise en place de la méthode, étude du mélange sapin – épicéa (Vallet & Pérot. 2011)
 - Hypothèse du gradient de stress, 5 couples d'espèces (Toïgo et al. 2015)
 - Trait de l'espèce accompagnatrice (Toïgo et al. 2018)
 - Croissance en période de sécheresse (Bello et al. 2019a, Bello et al. 2019b)
 - Déploiement pour le simulateur Salem : 12 espèces en pur, 24 couples d'espèces (Aussenac et al. 2021)
- Sur la croissance en hauteur
 - Effet dépendant des ontogénies respectives (Vallet & Pérot. 2016)
 - Intégration du climat dans la dynamique de croissance en hauteur
 - Modélisation des peuplements pur (Combaud et al. Soumis à GCB)
 - Effet mélange en démarrage
- Sur la régénération
 - Influence de la tolérance à l'ombrage de l'essence accompagnatrice (Borderieux et al. 2020)
- Sur la mortalité ?
 - Des essais réalisés, à l'époque trop peu d'observations dans les données IFN.



➤ Croissance radiale

Compositions modélisées, en futaie régulière

12 essences en peuplements purs

| Essence | Nombre de placettes |
|---------------------|---------------------|
| Chêne pédonculé | 489 |
| Chêne sessile | 612 |
| Chêne pubescent | 229 |
| Hêtre | 553 |
| Pin maritime | 1150 |
| Pin sylvestre | 615 |
| Pin laricio | 225 |
| Pin noir d'Autriche | 157 |
| Pin d'Alep | 162 |
| Sapin pectiné | 262 |
| Epicéa commun | 526 |
| Douglas | 542 |

24 couples d'essences en mélange

| | Chêne pédonculé | Chêne sessile | Chêne pubescent | Hêtre | Pin maritime | Pin sylvestre | Pin laricio de Corse | Pin noir d'Autriche | Pin d'Alep | Sapin pectiné | Epicéa commun |
|----------------------|-----------------|---------------|-----------------|------------|--------------|---------------|----------------------|---------------------|------------|---------------|---------------|
| Chêne pédonculé | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Chêne sessile | 185 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Chêne pubescent | 61 | 15 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Hêtre | 174 | 561 | 6 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Pin maritime | 106 | 15 | 6 | 0 | - | - | - | - | - | - | - |
| Pin sylvestre | 79 | 86 | 81 | 150 | 3 | - | - | - | - | - | - |
| Pin laricio de corse | 14 | 11 | 2 | 7 | 25 | 23 | - | - | - | - | - |
| Pin noir d'Autriche | 5 | 7 | 11 | 9 | 0 | 77 | 0 | - | - | - | - |
| Pin d'Alep | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | - | - | - |
| Sapin pectiné | 3 | 24 | 0 | 289 | 0 | 56 | 0 | 1 | 0 | - | - |
| Epicéa commun | 29 | 19 | 0 | 126 | 0 | 79 | 2 | 6 | 0 | 278 | - |
| Douglas | 23 | 24 | 1 | 15 | 0 | 35 | 3 | 1 | 0 | 68 | 66 |

➤ Croissance radiale

Modèle en peuplements purs

- Modèle de type potentiel x réducteurs

$$\frac{\Delta G}{\Delta t} \sim f_1 \left(\begin{array}{c} \text{Facteurs} \\ \text{abiotiques} \end{array} \right) \times f_2 \left(\begin{array}{c} \text{Densité} \\ \text{peuplement} \end{array} \right) \times f_3 \left(\begin{array}{c} \text{Stade de} \\ \text{développement} \end{array} \right)$$

Accroissement en surface terrière
m²/ha/5 ans

Indice de fertilité
m²/ha/5 ans

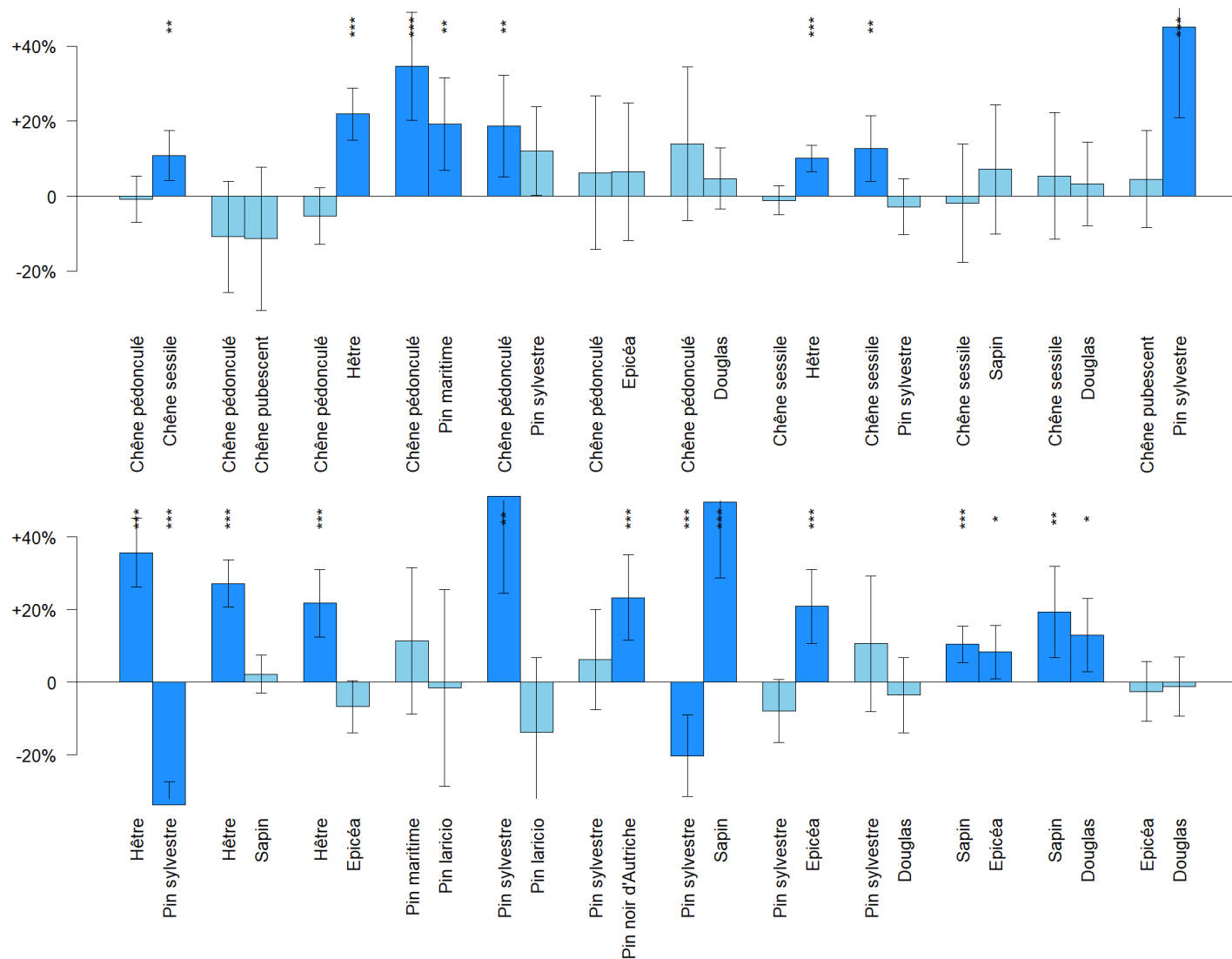
Réducteurs
[0:1]

➤ Importance d'intégrer les facteurs environnementaux

- Pour éviter les effets confondants
- Pour permettre la prédiction sur les peuplements mélangés



➤ Effet moyen du mélange



■ Effet significatif
■ Effet non significatif

BILAN

➤ À l'échelle de l'espèce

- 22 espèces avec des effets significatifs
 - 19 avec effet positif
 - 2 avec des effets négatifs

➤ À l'échelle du mélange

- 3 couples « gagnant – gagnant »
- 2 couples « gagnant – perdant »
- 11 couples « gagnant – neutre »

➤ Influence de la productivité de la station

- Stress gradient hypothesis (Bertness & Callaway 1994, Maestre et al. 2009)

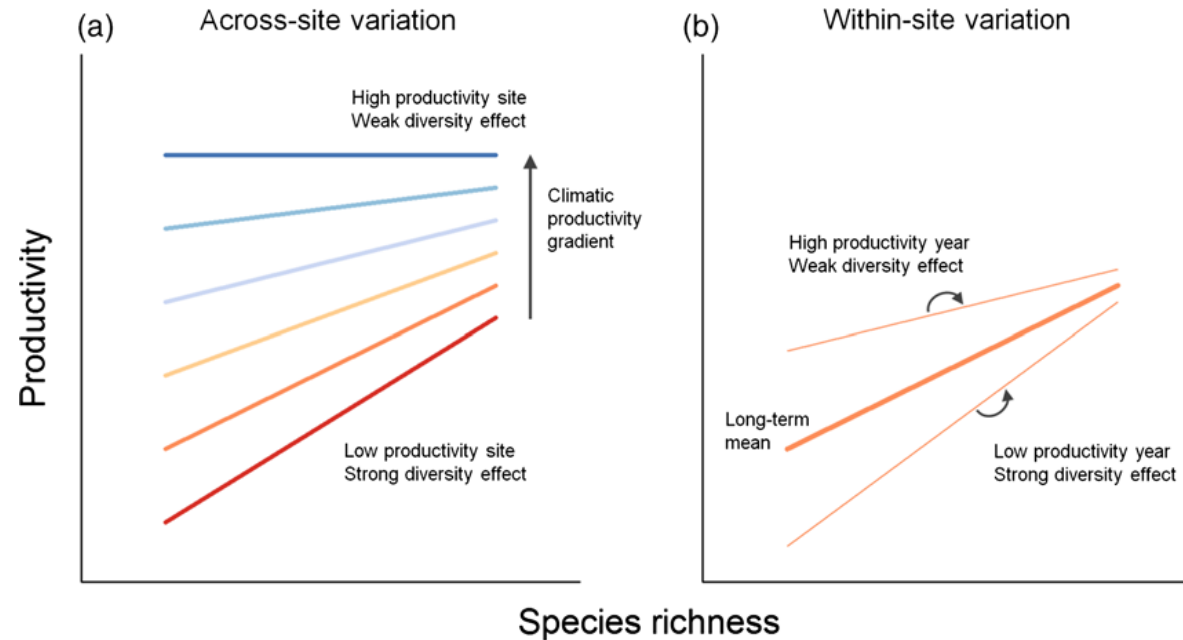
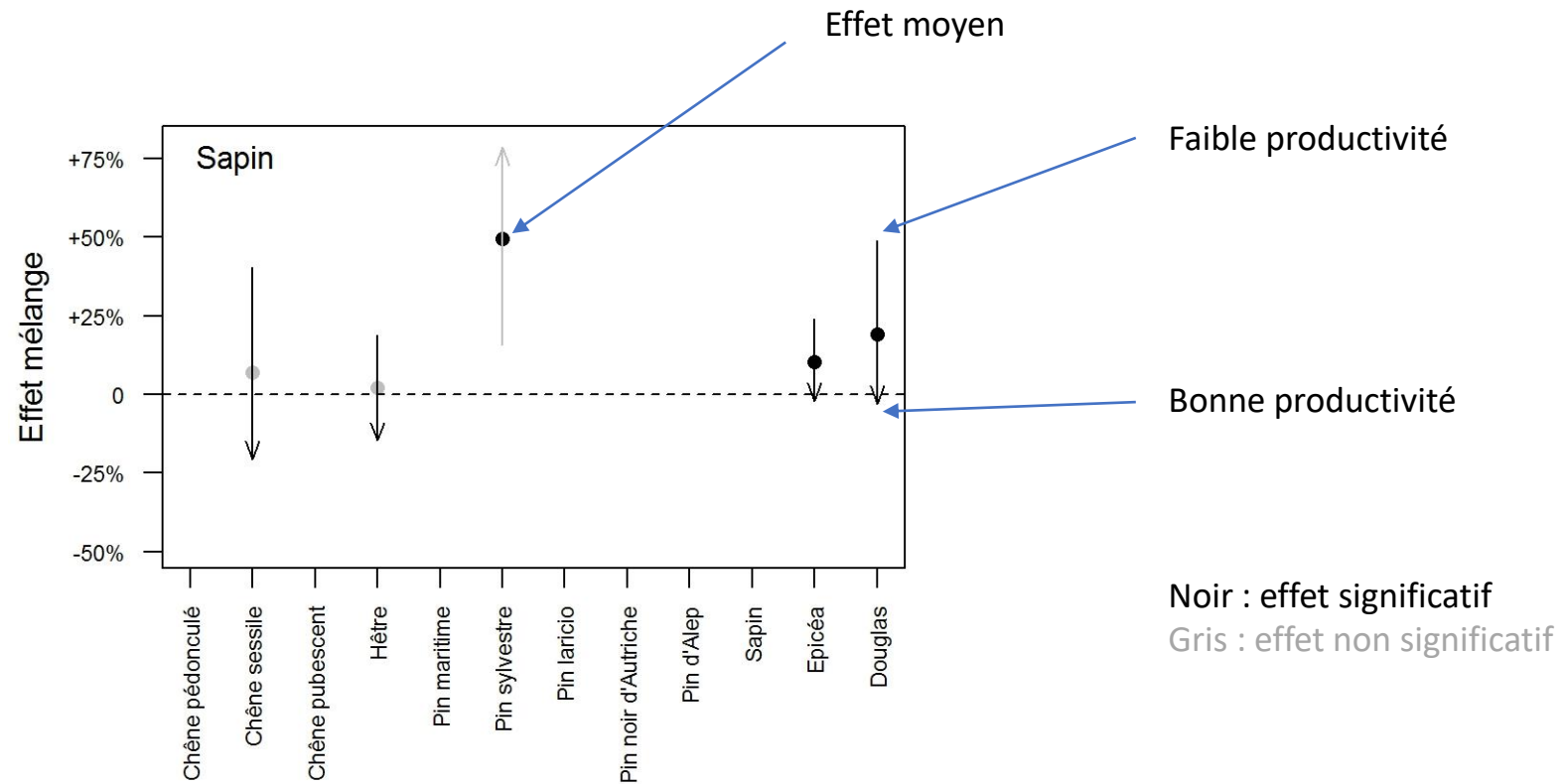


Schéma extrait de Jucker et al. 2016



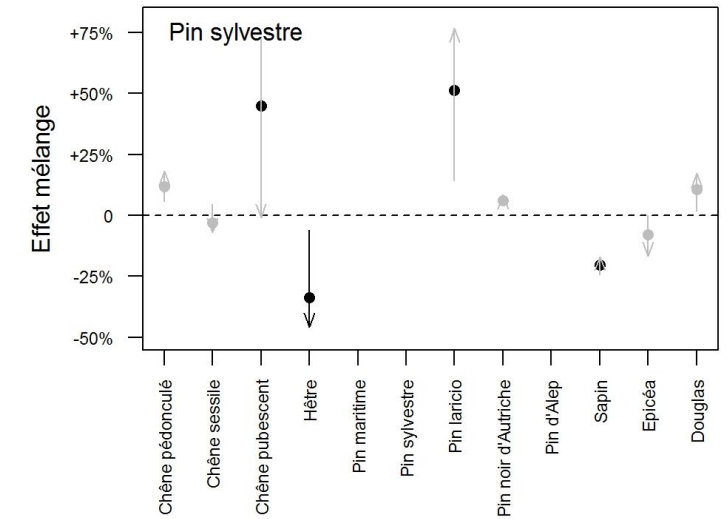
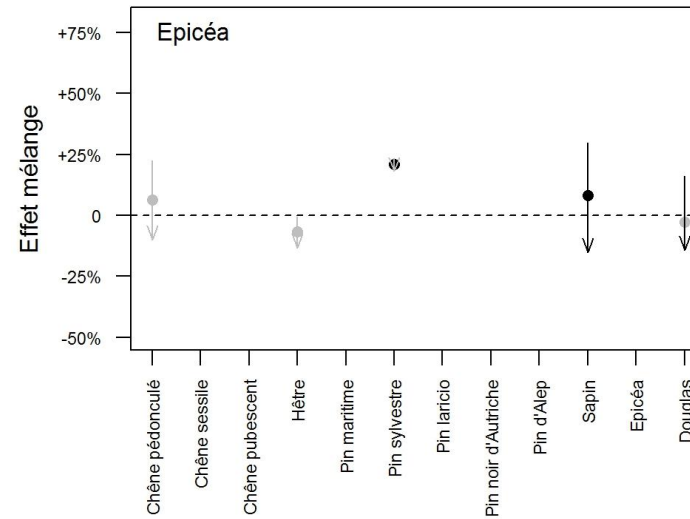
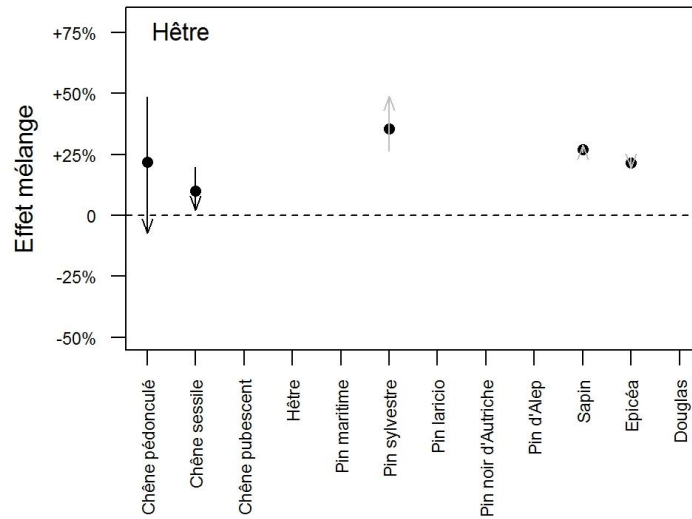
➤ Influence de la productivité de la station

- Test de la « Stress Gradient Hypothesis » (Toigo et al. 2015, Aussenac et al. 2021)



➤ Influence de la productivité de la station

Exemples du hêtre, de l'épicéa, du pin sylvestre



• BILAN GLOBAL

➤ Sur 48 espèces en mélange

- 12 effets significatifs de la productivité
- Tous indiquent une diminution de l'effet du mélange quand la productivité augmente

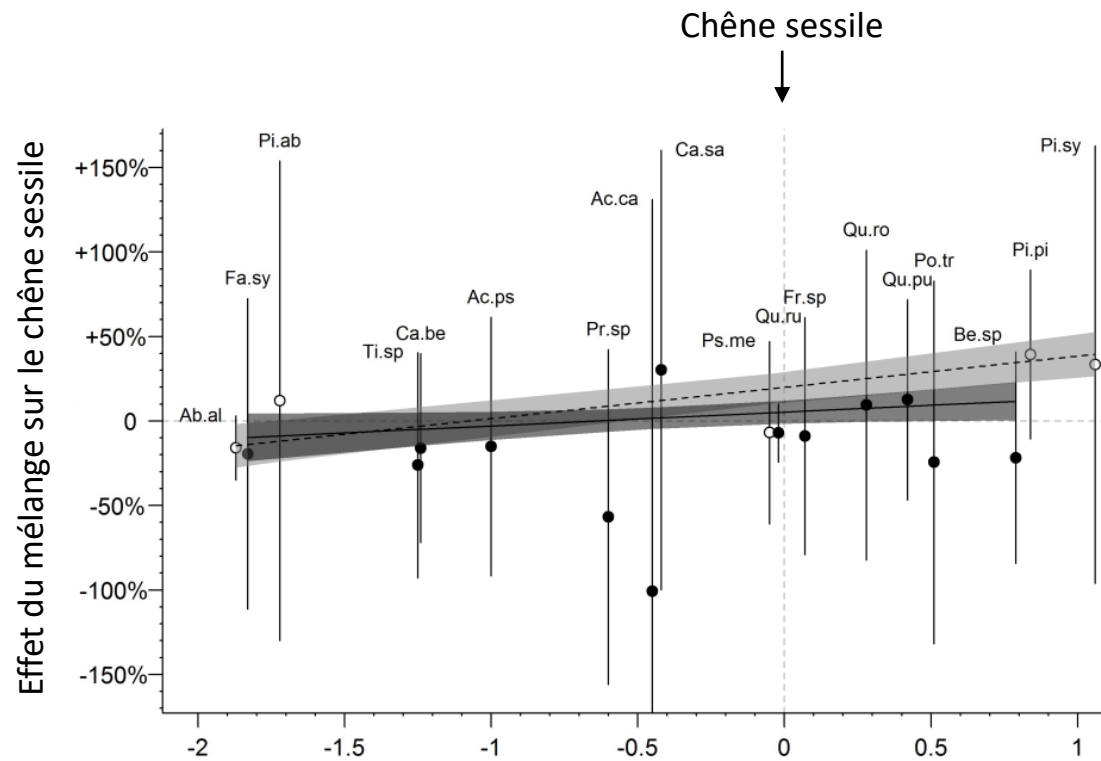
➤ Résultats conformes à la « Stress Gradient Hypothesis »



➤ Approches génériques

Influence des traits des espèces

- Variation de l'effet du mélange sur avec la tolérance à l'ombrage de l'espèce associée (Toïgo et al. 2018)



- L'effet de complémentarité augmente quand l'espèce associée est moins tolérante
→ Complémentarité pour la lumière

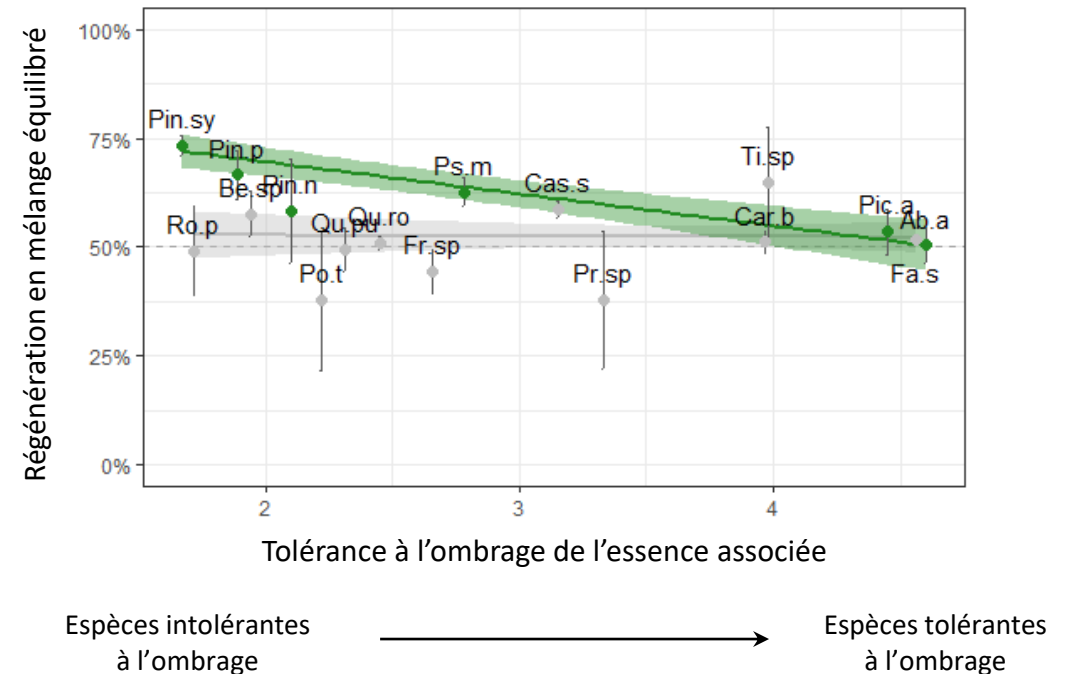
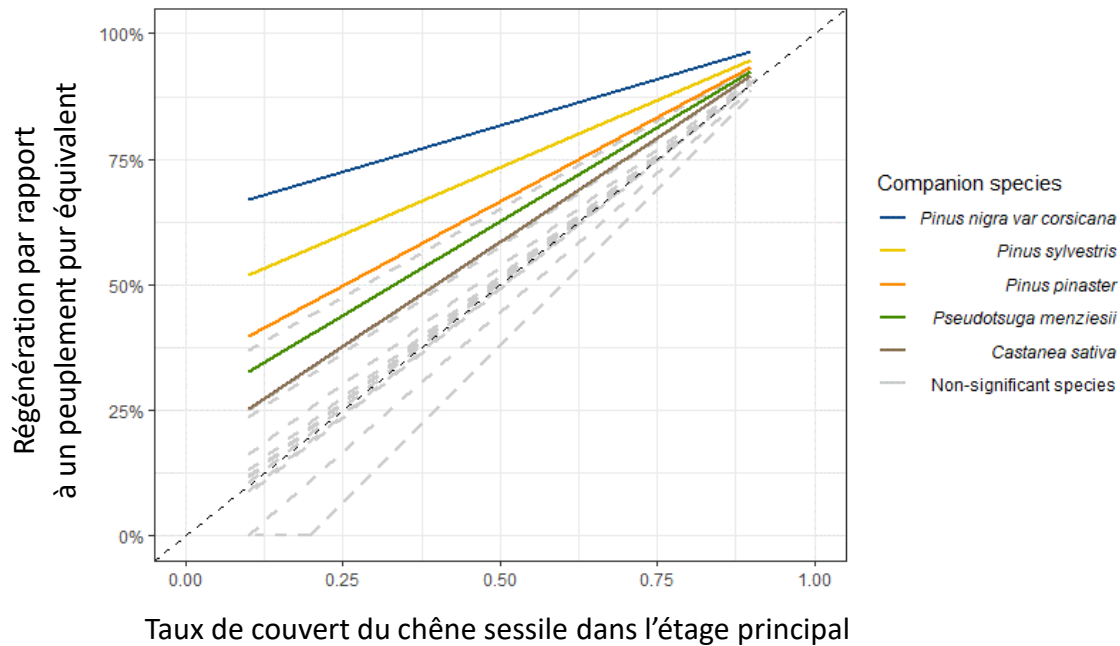
Espèces plus tolérantes
que le chêne sessile

Espèces moins tolérantes
que le chêne sessile

➤ Effet du mélange sur la régénération forestière

Influence des traits des espèces

- Cas d'étude, le chêne sessile (Borderieux et al. 2020)



➤ Approche avec les traits des espèces

- Importance de la tolérance à l'ombrage :
 - Traduit l'importance de la compétition pour la lumière sur différents aspects de la dynamique
 - Mais l'effet peut être modulé par la compétition pour l'eau (Jucker et al. 2014)

- Données d'Inventaire :
 - Données d'observation → les facteurs ne sont pas contrôlés
 - Mais l'utilisation des gradients (fertilité, climat, sol...) ou des traits des espèces (tolérance à l'ombrage, à la sécheresse, à l'engorgement...) permettent d'élaborer des hypothèses sur le fonctionnement des mélanges



Construction de simulateurs



➤ SALEM : StAnd LEvel Model

Implémentation dans la plateforme CAPSIS



Salem : Initialisation

COMPOSITION DU PEUPEMENT

Choix de l'espèce 1

- Chêne pédonculé
- Chêne sessile
- Chêne pubescent
- Hêtre
- Pin Maritime
- Pin Sylvestre
- Pin laricio
- Pin noir d'Autriche
- Pin d'Alep
- Sapin
- Epicéa
- Douglas

Choix de l'espèce 2

- Aucune
- Chêne pédonculé
- Chêne sessile
- Chêne pubescent
- Hêtre
- Pin Maritime
- Pin Sylvestre
- Pin laricio
- Pin noir d'Autriche
- Pin d'Alep
- Sapin
- Epicéa
- Douglas

SCENARIO CLIMATIQUE

Pas de variation avec le climat

Choix du lieu...

- Forêt d'Orléans

Variation avec le climat

... et de la trajectoire climatique

- CNRM - RCP 2.6
- CNRM - RCP 4.5
- CNRM - RCP 8.5

DATE DE DEBUT DE SIMULATION

2000

Paramètres de simulation avancés

Modifier les paramètres avancés

Ok Annuler Aide

➤ Les 12 essences en peuplements purs

➤ Les 24 couples d'essences

- Diffusion

- Licence libre LGPL

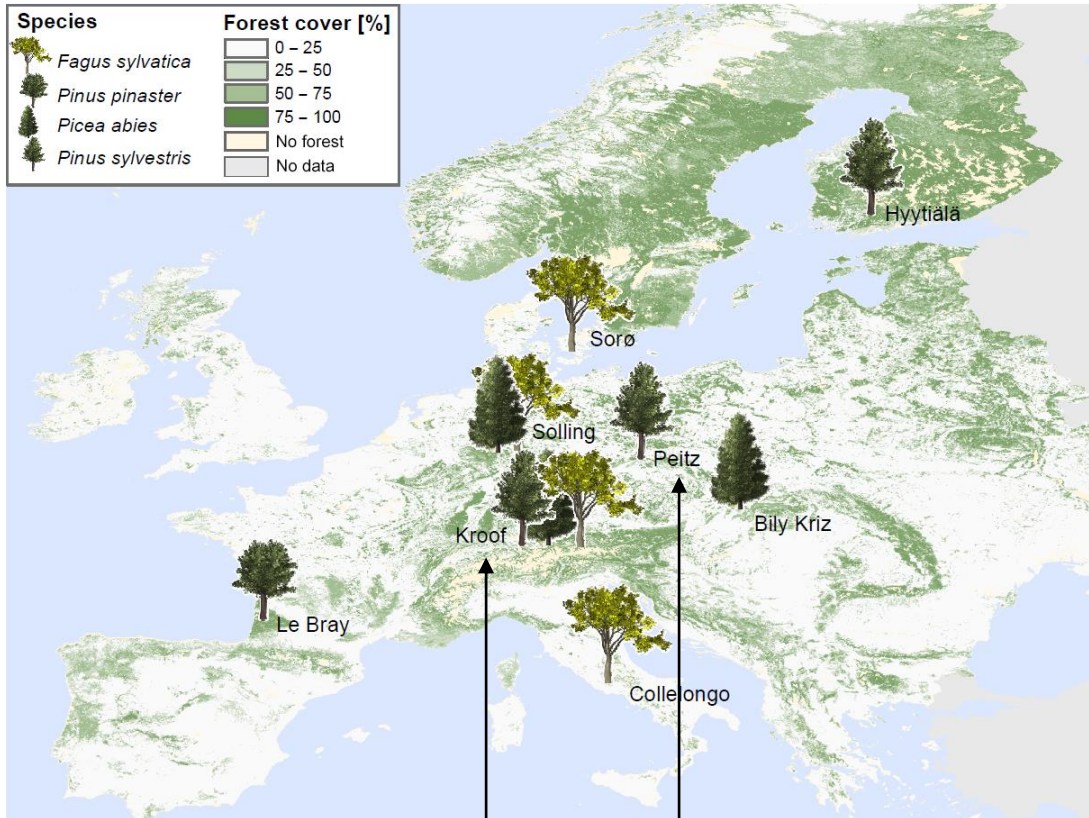
- Via la plateforme CAPSIS

- Version 2.0 stable déposée sur Zenodo
(Vallet et al. 2021, Aussenac et al. 2021)

➤ Validation / évaluation de SALEM

Dans le cadre du projet ISIMIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project)

- Les données PROFOUND (Reyer et al. 2020)



Série la plus courte : 1997 - 2010

Série la plus longue : 1948 - 2011

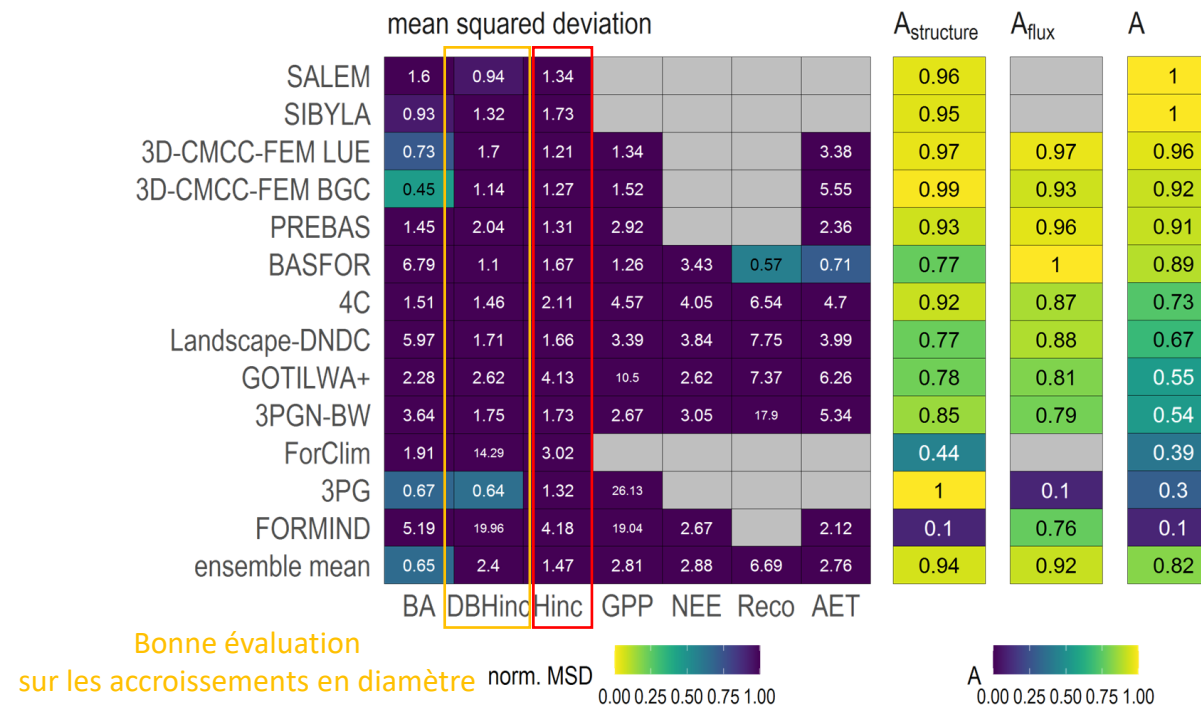
➤ Evaluation sur 4 essences de nature contrastée

➤ Large gradient de conditions climatiques et stationnelles

➤ Validation / évaluation de SALEM

Dans le cadre du projet ISIMIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project)

- Evaluation de 13 modèles forestiers selon trois critères (Mahnken et al. 2022)
 - Précision : qualité des prédictions
 - Couverture à l'échelle européenne
 - ~~Réalisme : capacité à prédire le fonctionnement (flux)~~



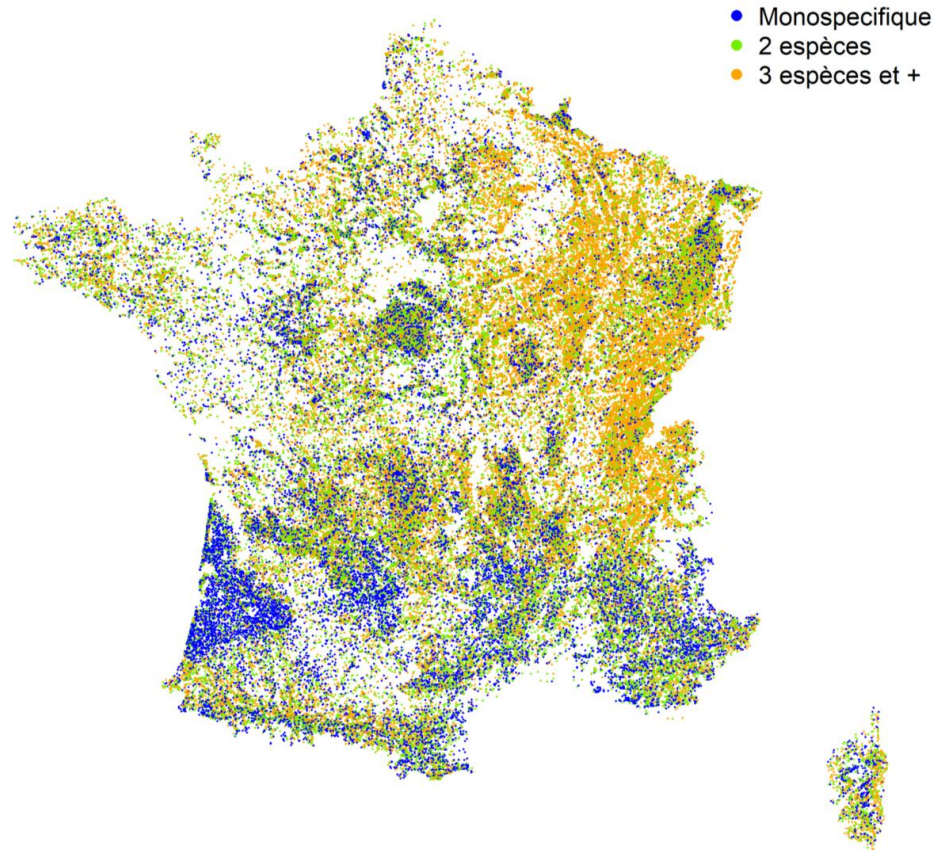
Bonne évaluation sur les accroissements en diamètre

Bonne évaluation sur les accroissements en hauteur

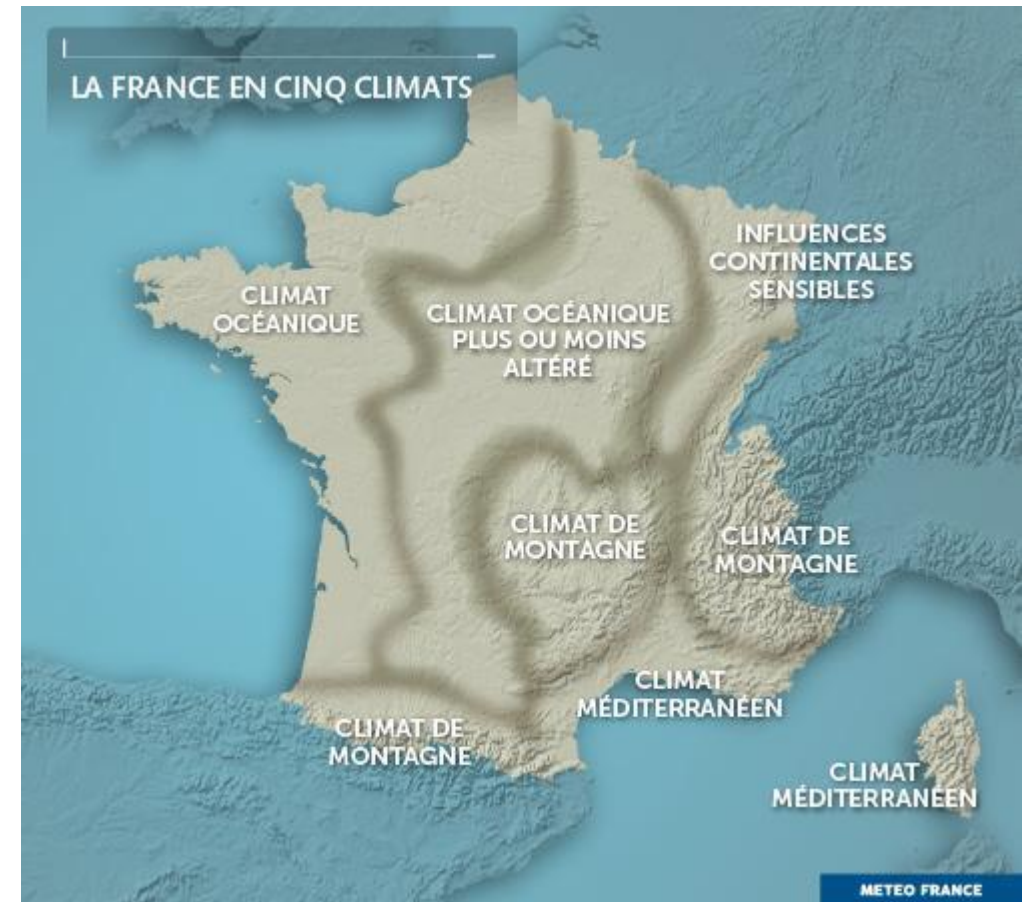


➤ La richesse des données de calibration

Un échantillonnage systématique dans un ensemble de forêts diverses



et dans des conditions très variées



➤ Illustration de la puissance des données de l'IFN

Simulations à l'échelle des massifs forestiers

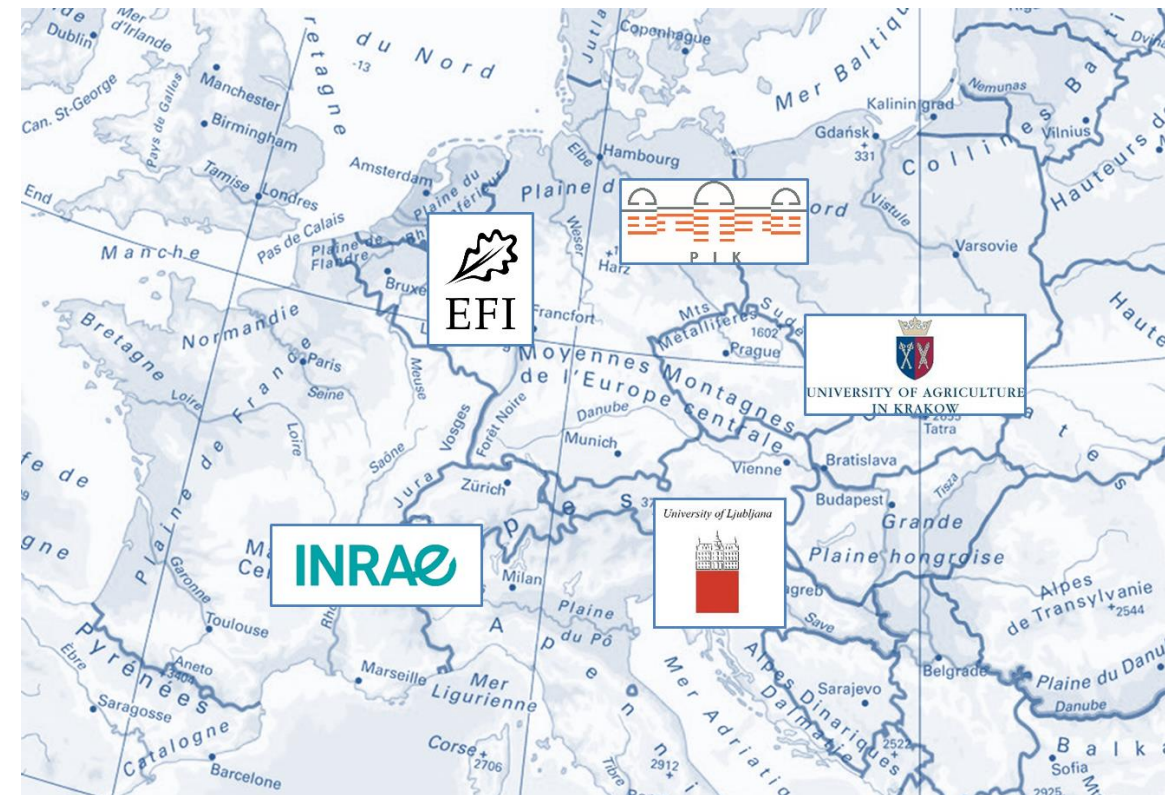


➤ Projet I-Maestro

- Perturbations en forêt :
 - Est-ce qu'augmenter la complexité structurelle est une bonne stratégie pour assurer une bonne fourniture de services écosystémiques ?



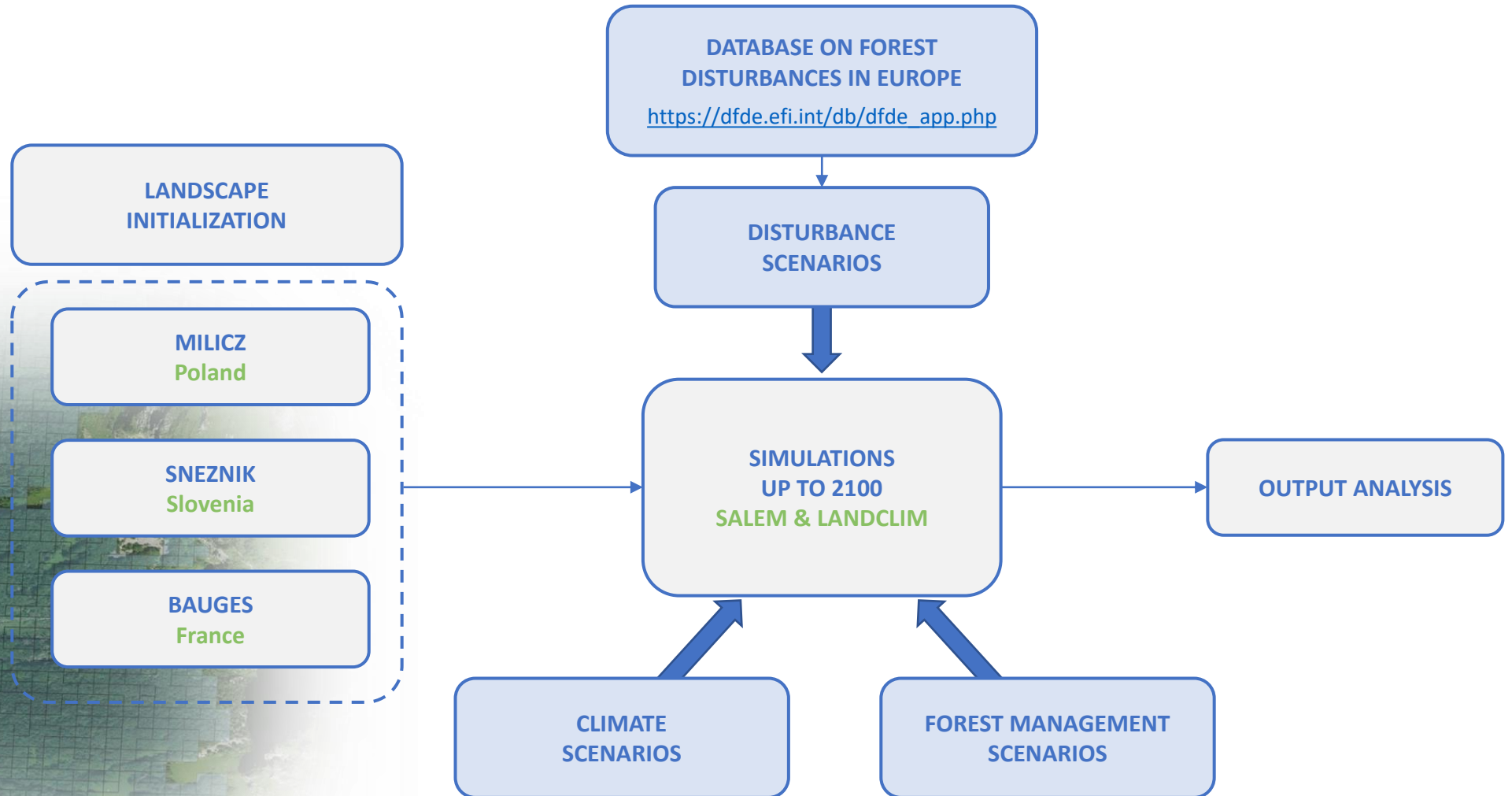
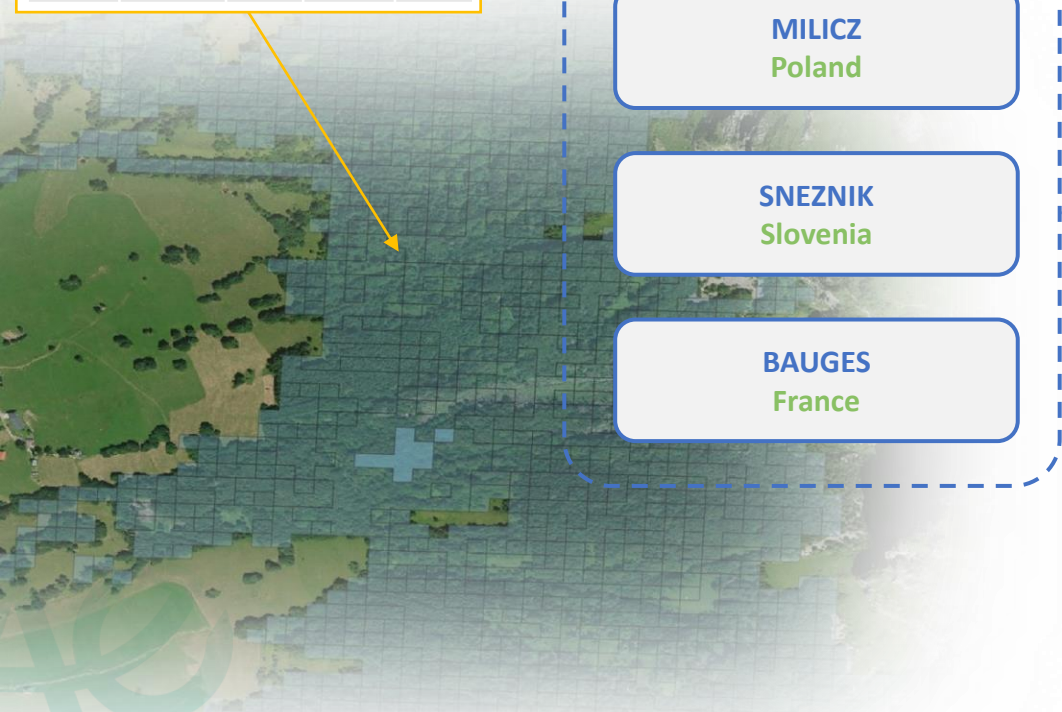
Peuplement détruit dans les « Tatras mountains » en Pologne



Consortium I-MAESTRO

➤ Simulations à l'échelle d'un massif forestier

| Cell ID | sp | n | dbh | h |
|---------|-------------|---|------|------|
| 298683 | Abies alba | 1 | 48.2 | 24.8 |
| 298683 | Abies alba | 1 | 43.5 | 24.1 |
| 298683 | Picea abies | 3 | 31.3 | 21.5 |
| 298683 | Fagus sylv. | 3 | 30.1 | 20.6 |
| 298683 | Picea abies | 5 | 17.8 | 14.2 |
| 298683 | Fraxi. ex. | 5 | 15.6 | 16.4 |
| 298683 | Fraxi. ex. | 6 | 12.8 | 14.5 |
| 298683 | Sorbus auc. | 6 | 9.4 | 9.8 |



➤ Scénarios de gestion forestière – Expérience de simulation

Plan de simulation générique

| Type de scénario | Echelle peuplement | Echelle massif | 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 |

10 modalités x 3 sites x 2 modèles
Pour LandClim : x 3 scénarios climatiques



> 10 millions de simulations pour SALEM
> 30 millions de simulations pour LandClim

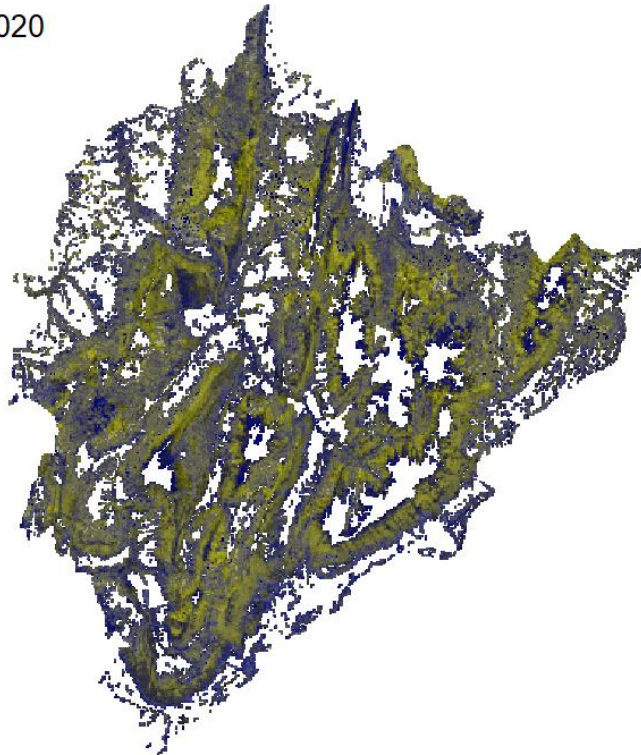


➤ Simulations à l'échelle des territoires

Echelle de la stratégie d'aménagement

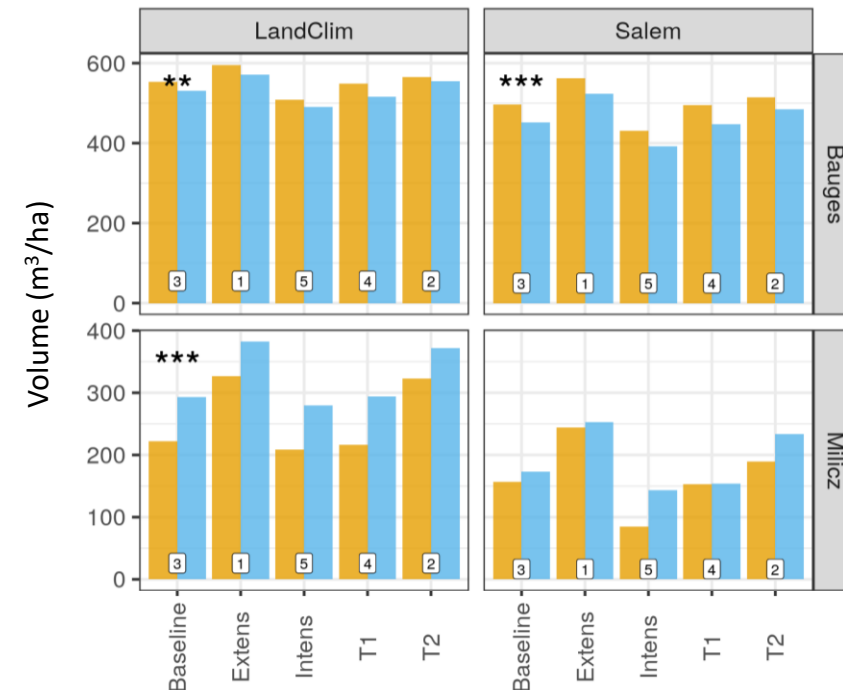
- Effet de la complexité sur différents indicateurs

year 2020



Evolution des Bauges, modèle Salem

Volume sur pied en fin de période



Pour les Bauges :

forêts complexes < forêts moins complexes

Plaines de Milicz :

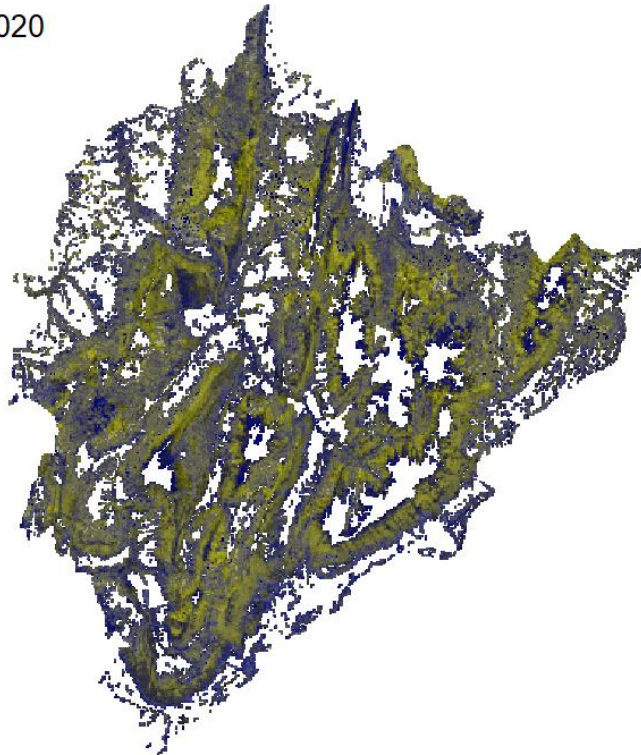
forêts complexes > forêts moins complexes

➤ Simulations à l'échelle des territoires

Echelle de la stratégie d'aménagement

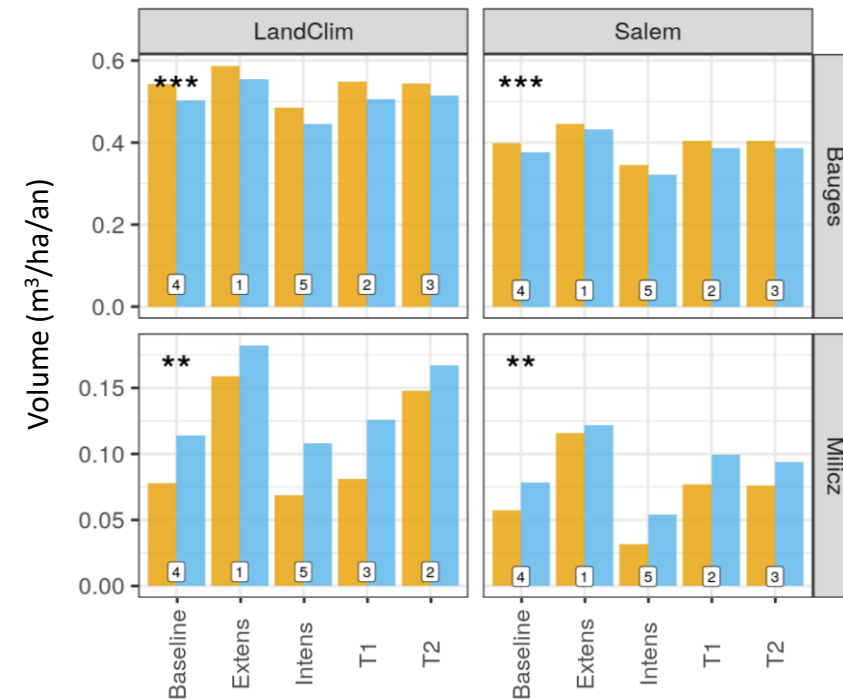
- Effet de la complexité sur différents indicateurs

year 2020



Evolution des Bauges, modèle Salem

Volume de chablis entre 2015 et 2100



Pour les Bauges :

forêts complexes < forêts moins complexes

Plaines de Milicz :

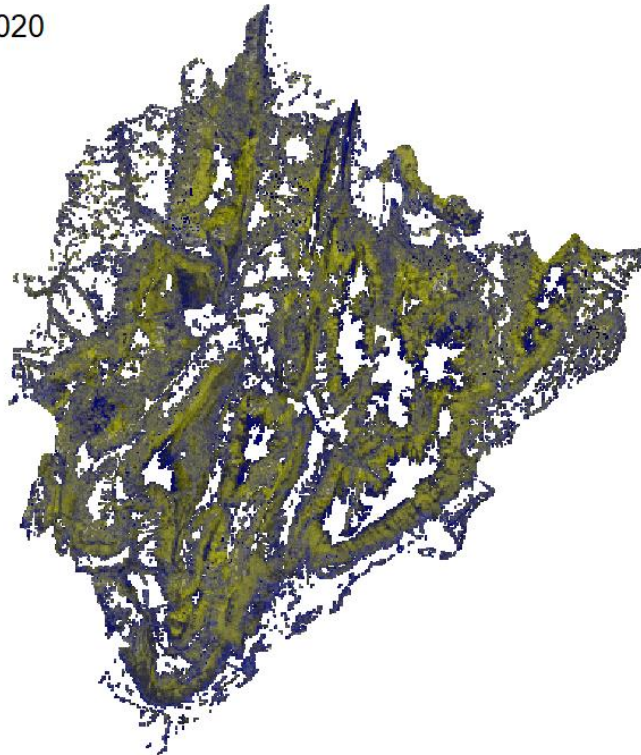
forêts complexes > forêts moins complexes

➤ Simulations à l'échelle des territoires

Echelle de la stratégie d'aménagement

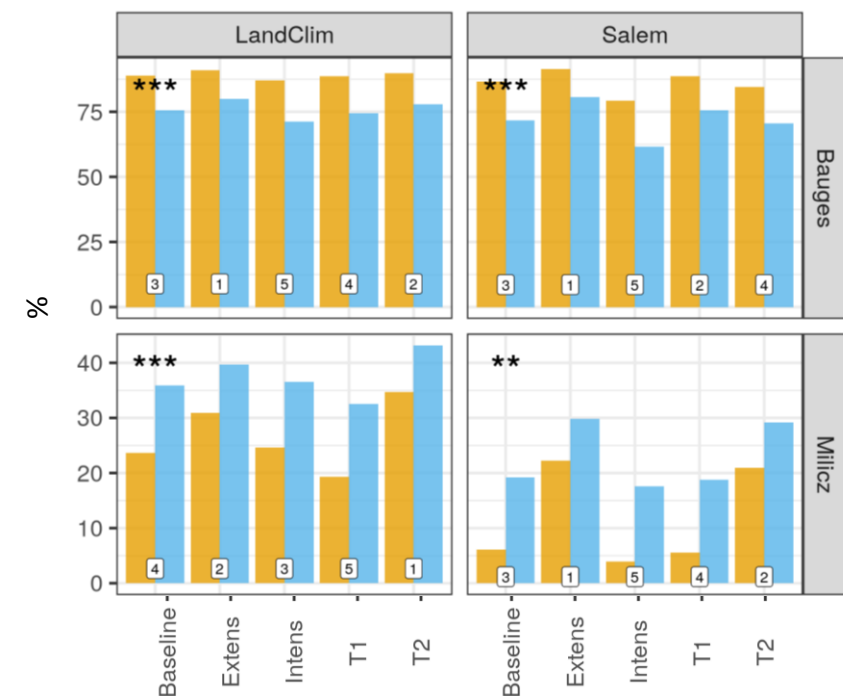
- Effet de la complexité sur différents indicateurs

year 2020



Evolution des Bauges, modèle Salem

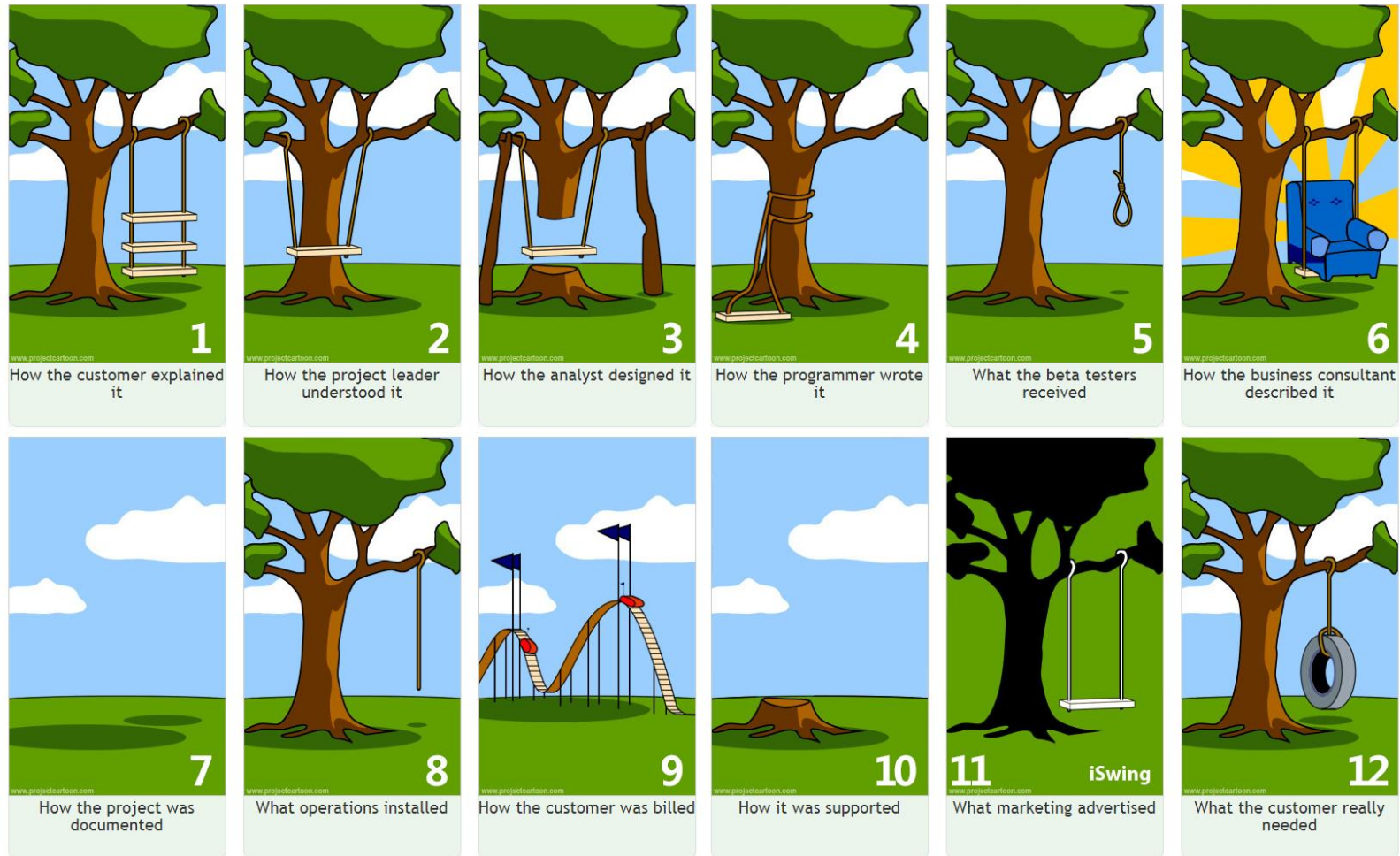
Peuplements avec au moins 10 gros arbres



Pour les Bauges : forêts complexes < forêts moins complexes
 Plaines de Milicz : forêts complexes > forêts moins complexes

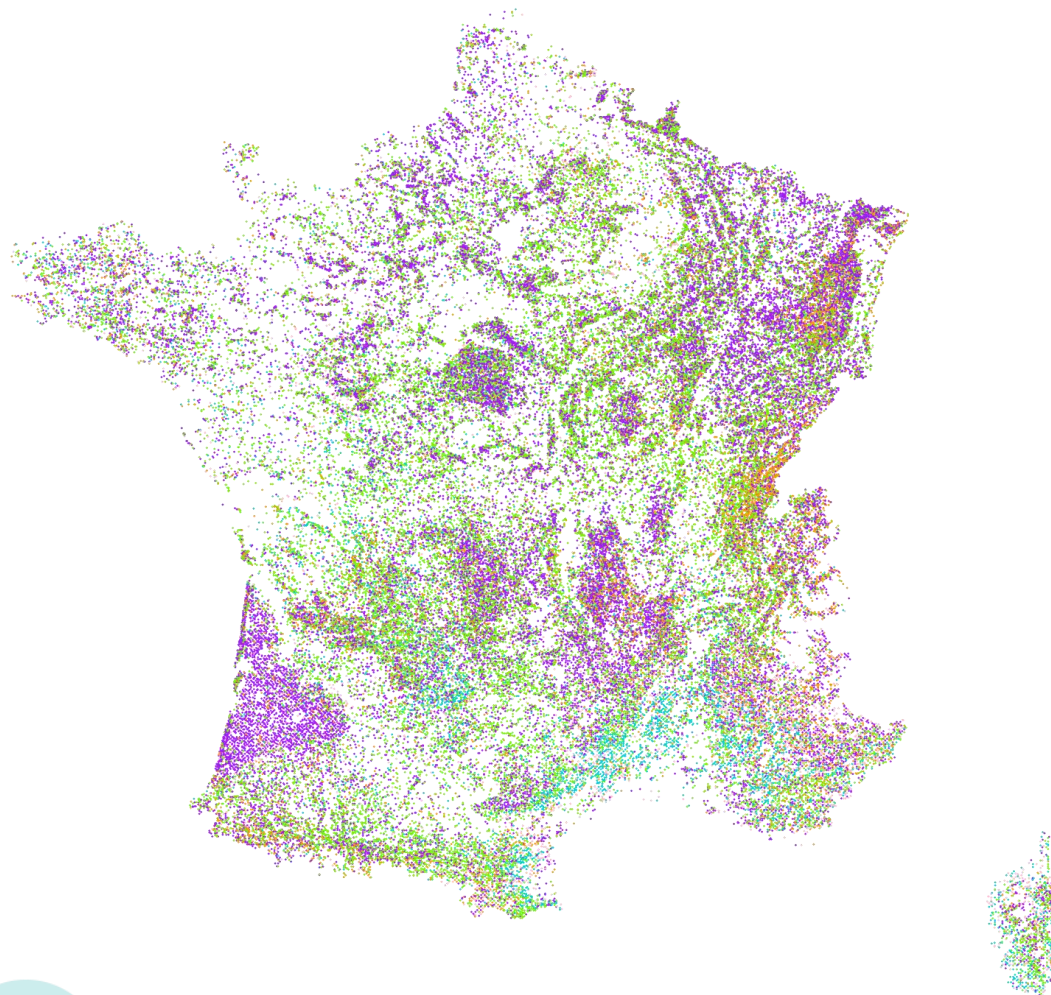
➤ Importance de la structure du territoire

Projets (potentiels) pour la suite



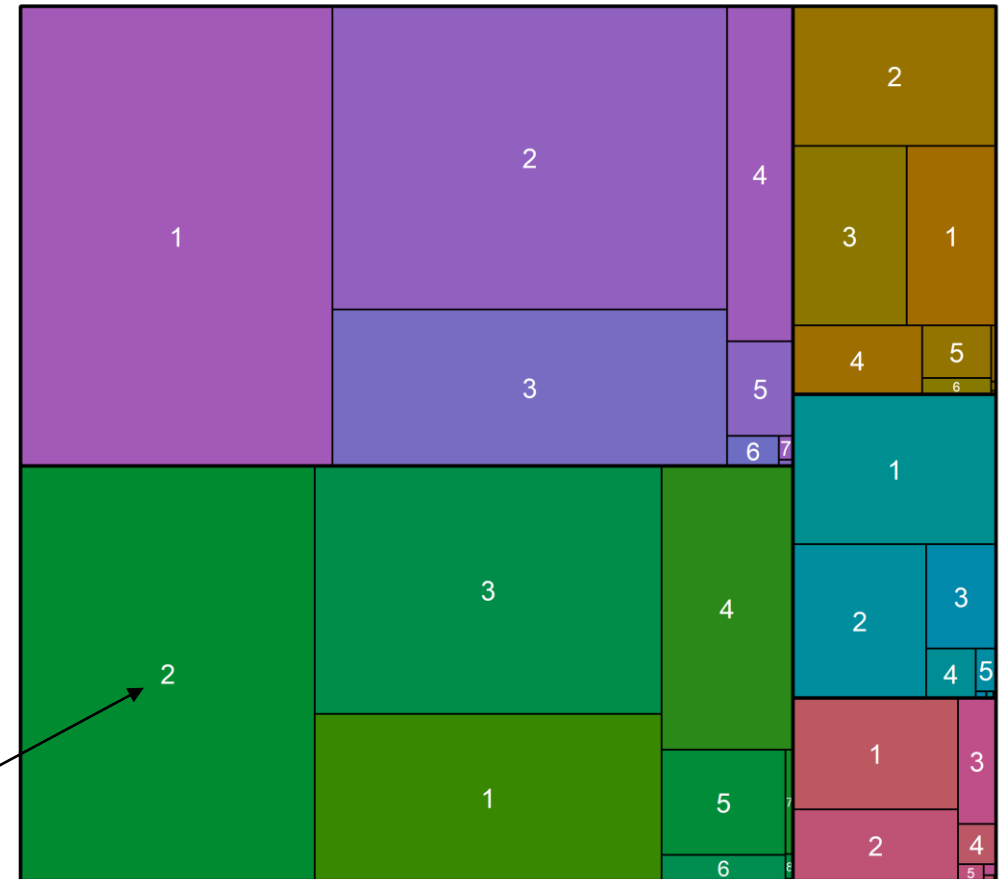
➤ La forêt française

De multiples structures – de multiples compositions



De nombreux besoins de simulation
Quelle validité des modèles en extrapolation ?

Répartition des placettes IFN
selon leur structure et le nombre d'espèces

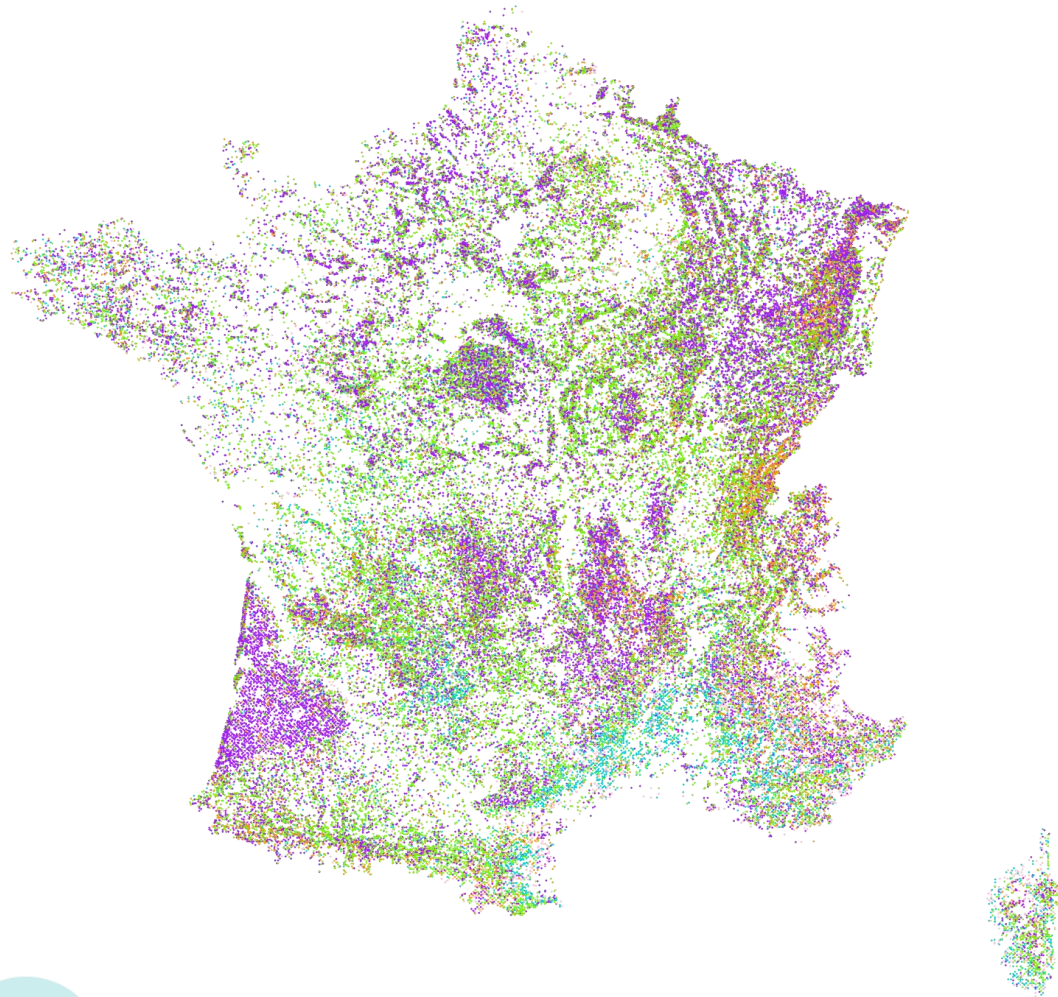


F Irrégulière F Régulière Futaie & Taillis Indéfini Taillis

Nombre d'espèces dans le peuplement

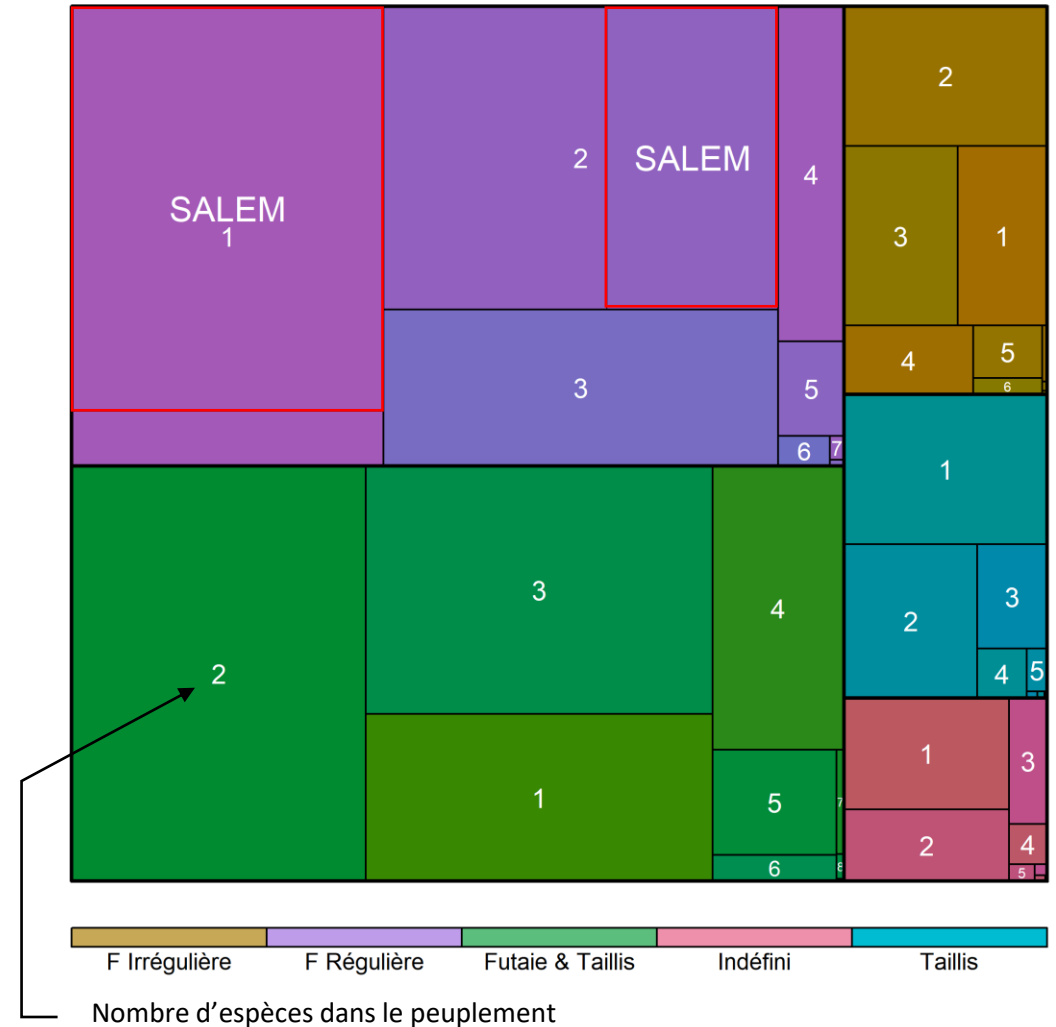
➤ La forêt française

De multiples structures – de multiples compositions



De nombreux besoins de simulation
Quelle validité des modèles en extrapolation ?

Répartition des placettes IFN
selon leur structure et le nombre d'espèces



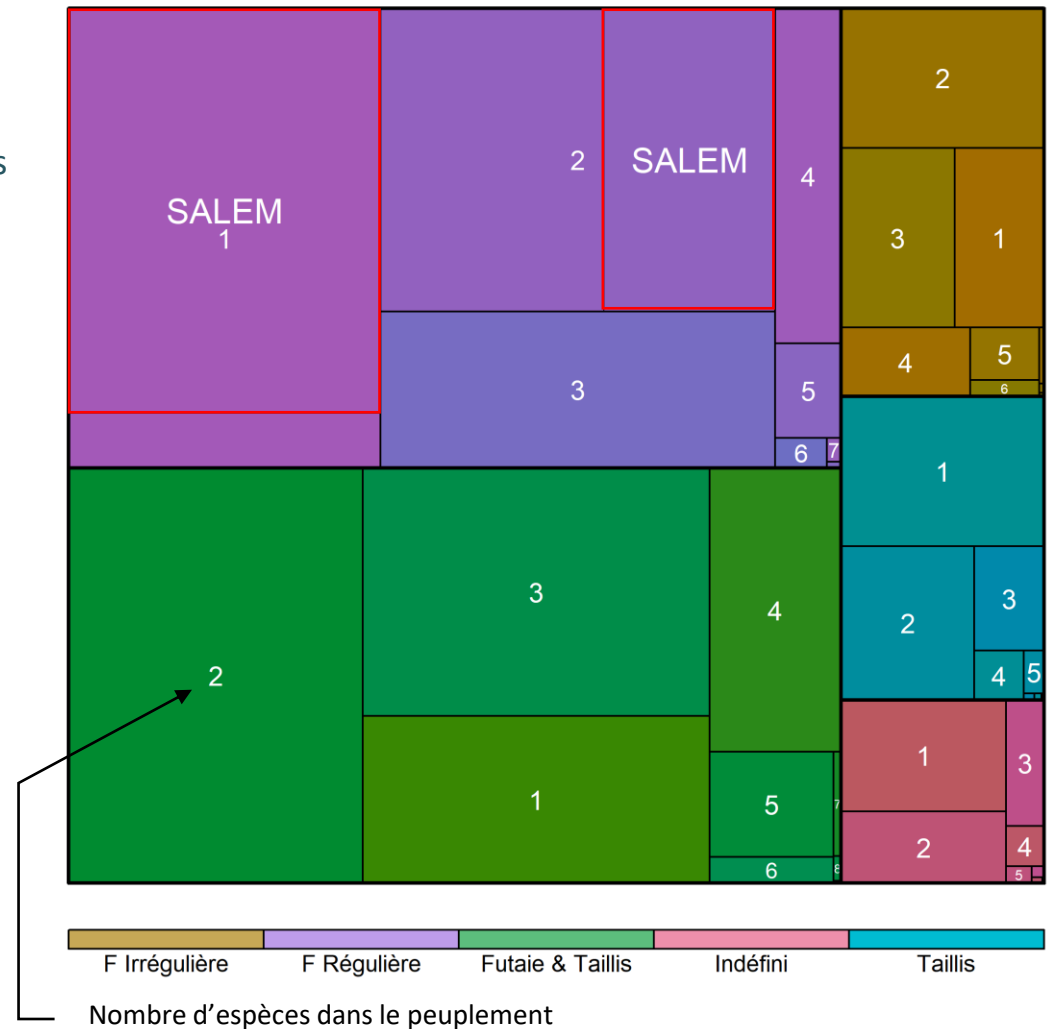
➤ Projet : tendre vers l'exhaustivité des conditions couvertes

Ecologie forestière prédictive

- Axes principaux

- Compositions forestières
 - Autres compositions en peuplements purs et bispécifiques
 - Modèles à espèces multiples
- Structures forestières
- Changement climatique
 - Effets tendanciels
 - Mortalités liées aux aléas extrêmes (sécheresses)

Répartition des placettes IFN
selon leur structure et le nombre d'espèces



➤ Choix d'une approche essentiellement empirique

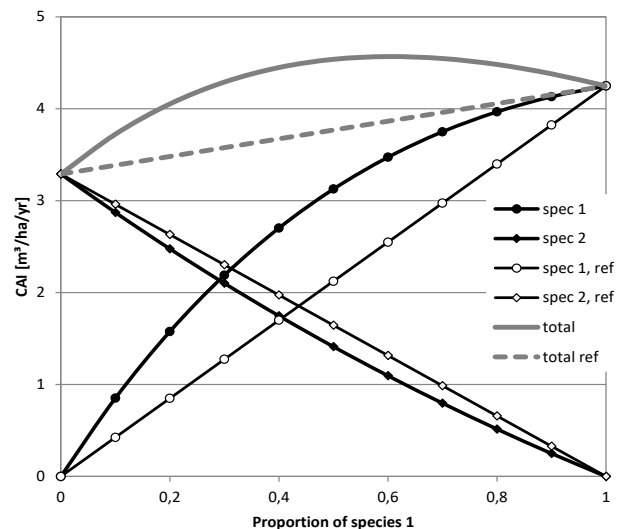
Modélisation des différentes compositions, multi-essences

- **Autres compositions pures et bispécifiques**

- Tous les ans, 5000 à 6000 nouvelles placettes IFN
 - Nouvelles essences possibles en pur (+6/8 essences), en mélange (~100) → Projet MELBAC
- Approches génériques pour les autres essences, basées sur les traits
 - Sortir de l'identité des espèces, remplacée par ses caractéristiques → tolérance à l'ombrage

- **Peuplements multi-essences**

- Généralisation des diagrammes de remplacement



- Cadre conceptuel :

- Mélange = Pur * (1 + ϵ)

- Autres approches dans la littérature (*Perot & Picard 2012*) :

- Accroissement = $\alpha + \beta * \text{Compet}_{\text{intra-spécifique}} + \gamma * \text{Compet}_{\text{inter-spécifique}}$

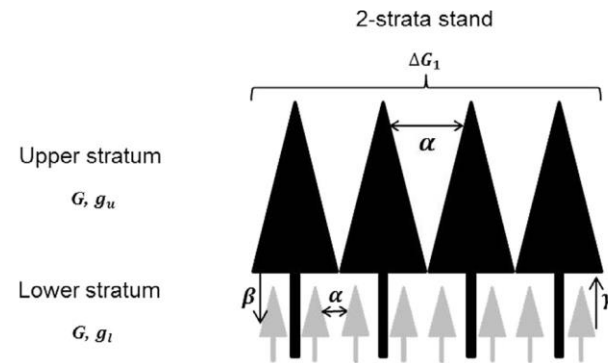
- Hypothèse à tester :

- Mélange = Pur * (1 + $\epsilon_{S1} + \epsilon_{S2} + \epsilon_{S3} + \dots + \epsilon_{Sn}$) ?
- Besoin d'ajouter des interactions $\epsilon_{Si} \times \epsilon_{Sj}$?

➤ Choix d'une approche essentiellement empirique

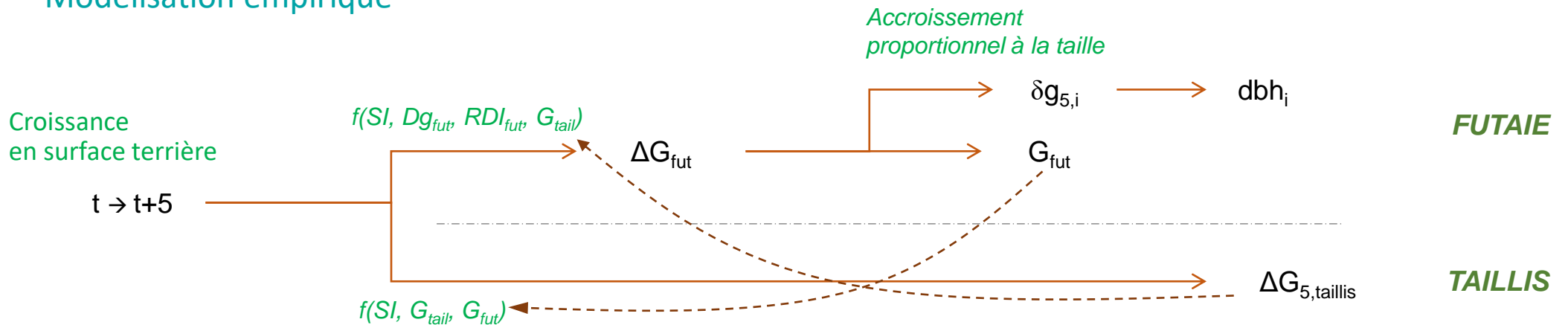
Modélisation des mélanges futaie - taillis

- Approche théorique



Cordonnier et al. 2019

- Modélisation empirique



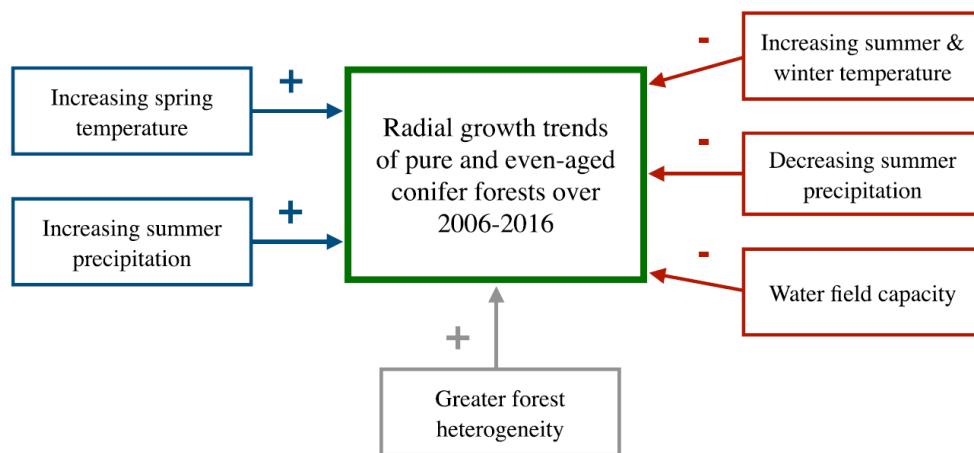
Vallet & Toïgo, 2012, Présentation à CAQ

➤ Changement climatique

Deux effets de nature différente

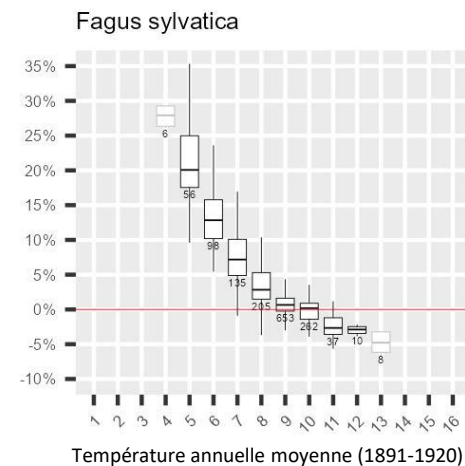
- Evolution tendancielle
 - Changement de productivité positifs ou négatifs

Evolution de la croissance radiale
sur données 2006-2016



Ols et al. 2020

Différence de croissance en hauteur dominante
entre 1900 et 1950-2020



Combaud et al. Submitted

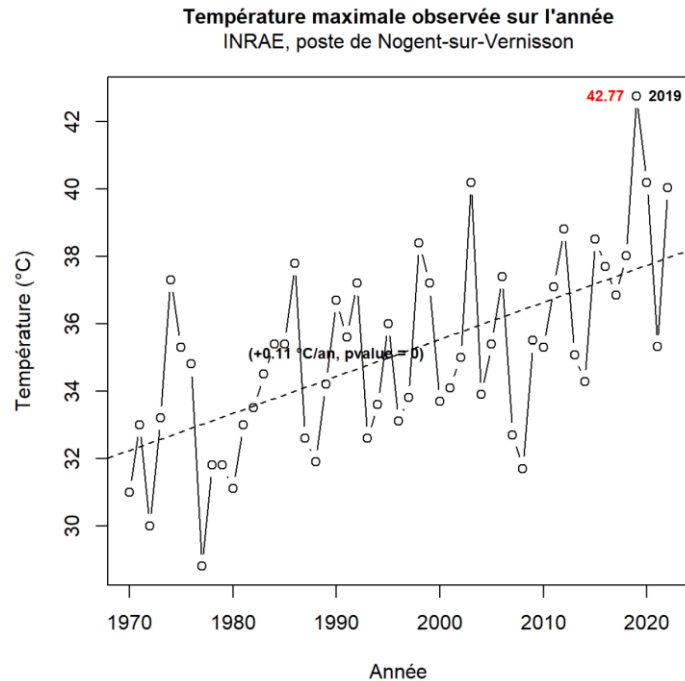
➤ Les données IFN permettent d'aborder ces évolutions tendancielles

➤ Changement climatique

Deux effets de nature différente

- Mortalités exceptionnelles

P. Balandier 2023, présentation à FOREM



Pérot 2023

- **Le constat :**

- Au-delà de 45°C, déstabilisation des membranes des feuilles
- Atteint en 2030 en région Centre

- **Le bilan**

- Besoin de modéliser la survie des écosystèmes
- Introduire des effets seuils
- Considérer les maximums de température

➤ **Modèle écophysio de mortalité / couplage de modèles**

➤ **Modèles empiriques de mortalité sur données d'inventaire**



➤ Les simulations à l'échelle du territoire : approches pluridisciplinaires

- Le simulateur SALEM est à maturité
 - Même si des améliorations seront réalisées (structure forestière, essences)
- Prêt à l'utilisation dans le cadre de projets pluridisciplinaires
- Des modèles de dynamique forestière comme outil de collaboration
 - Ecologie forestière et sylviculture
 - Economie
 - Sociologie (des propriétaires, perception du public)

➤ Une forte demande d'outil prédictifs pour l'évolution forestière

Diffusion large du modèle

- Constat :

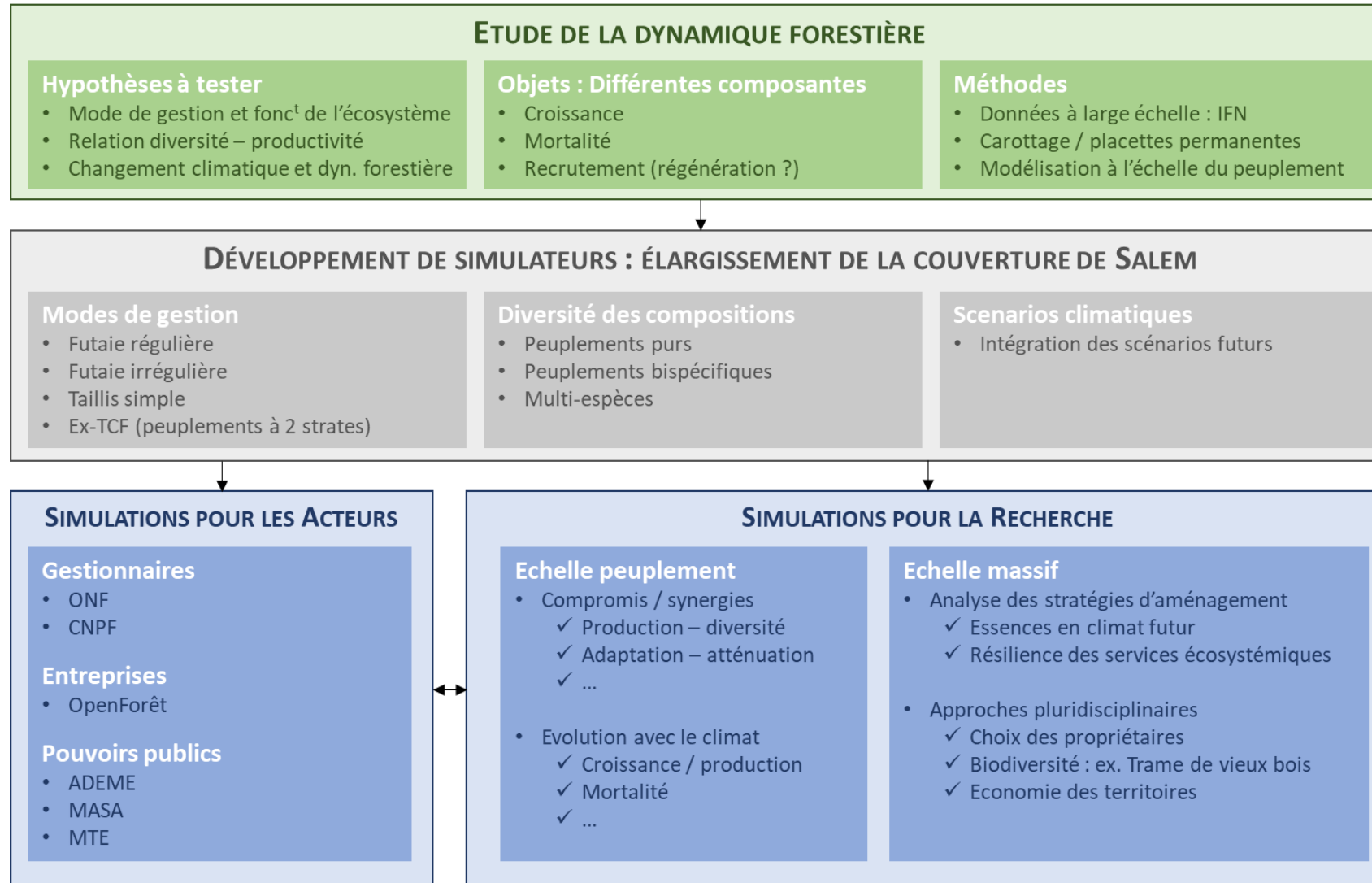
- Les modèles sont complexes à utiliser
- Mais des besoins de différents acteurs
 - Combien de carbone pour une plantation de bois ?
 - Quel production de volume dans une (ma?) parcelle ?
- Plusieurs demandes récentes
 - Collaboration avec l'entreprise OpenForêt
 - Collaboration en construction avec Treeseve (Start-Up)
 - Demande d'information de « My Forêt »

- Objectif :

- Construire un outil facile d'utilisation
- En faire un outil de référence (validé par la communauté, adopté par les pouvoirs publics ?)
 - La comptabilité carbone (projets du Label Bas Carbone)
 - La production de bois
 - Différents indicateurs (biodiversité...)



➤ Bilan du projet





Merci de votre attention

➤ Références citées

- Aussenac, R., Pérot, T., Fortin, M., de Coligny, F., Monnet, J.-M., Vallet, P., 2021. The Salem simulator version 2.0: A tool for predicting the productivity of pure and mixed forest stands and simulating management operations [version 2; peer review: 2 approved]. *Open Res. Eur.* 1. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.13671.2>
- Bello, J., Hasselquist, N.J., Vallet, P., Kahmen, A., Perot, T., Korboulewsky, N., 2019a. Complementary water uptake depth of *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in mixed stands during an extreme drought. *Plant Soil* 437, 93–115. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03951-z>
- Bello, J., Vallet, P., Perot, T., Balandier, P., Seigner, V., Perret, S., Couteau, C., Korboulewsky, N., 2019b. How do mixing tree species and stand density affect seasonal radial growth during drought events? *For. Ecol. Manag.* 432, 436–445. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.044>
- Borderieux, J., Paillet, Y., Dalmasso, M., Mârell, A., Perot, T., Vallet, P., 2021. The presence of shade-intolerant conifers facilitates the regeneration of *Quercus petraea* in mixed stands. *For. Ecol. Manag.* 491, 119189. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119189>
- Box, G.E.P., 1979. Robustness in the Strategy of Scientific Model Building, in: Launer, R.L., Wilkinson, G.N. (Eds.), *Robustness in Statistics*. Academic Press, pp. 201–236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-438150-6.50018-2>
- Castagneyrol, B., Giffard, B., Péré, C., Jactel, H., 2013. Plant apparency, an overlooked driver of associational resistance to insect herbivory. *J. Ecol.* 101, 418–429. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12055>
- Coll, L., Ameztegui, A., Collet, C., Löf, M., Mason, B., Pach, M., Verheyen, K., Abrudan, I., Barbat, A., Barreiro, S., Bielak, K., Bravo-Oviedo, A., Ferrari, B., Govedar, Z., Kulhavy, J., Lazdina, D., Metslaid, M., Mohren, F., Pereira, M., Peric, S., Rasztovits, E., Short, I., Spathelf, P., Sterba, H., Stojanovic, D., Valsta, L., Zlatanov, T., Ponette, Q., 2018. Knowledge gaps about mixed forests: What do European forest managers want to know and what answers can science provide? *For. Ecol. Manag.* 407, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.055>
- Cordonnier, T., Smadi, C., Kunstler, G., Courbaud, B., 2019. Asymmetric competition, ontogenetic growth and size inequality drive the difference in productivity between two-strata and one-stratum forest stands. *Theor. Popul. Biol.* 130, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.tpb.2019.07.001>
- del Río, M., Pretzsch, H., Alberdi, I., Bielak, K., Bravo, F., Brunner, A., Condés, S., Ducey, M.J., Fonseca, T., von Lüpke, N., Pach, M., Peric, S., Perot, T., Souidi, Z., Spathelf, P., Sterba, H., Tijardovic, M., Tomé, M., Vallet, P., Bravo-Oviedo, A., 2016. Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: review and perspectives. *Eur. J. For. Res.* 135, 23–49. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0927-6>
- Jucker, T., Avčarič, D., Bărnoaie, I., Duduman, G., Bouriaud, O., Coomes, D.A., 2016. Climate modulates the effects of tree diversity on forest productivity. *J. Ecol.* 104, 388–398. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12522>
- Jucker, T., Bouriaud, O., Avacaritei, D., Dănilă, I., Duduman, G., Valladares, F., Coomes, D.A., 2014. Competition for light and water play contrasting roles in driving diversity–productivity relationships in Iberian forests. *J. Ecol.* 102, 1202–1213. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12276>
- Korboulewsky, N., Perot, T., Balandier, P., Ballon, P., Barrier, R., Boscardin, Y., Richard, E.D., Dumas, Y., Ginisty, C., Gosselin, M., 2015. OPTMix - Dispositif expérimental de suivi à long terme du fonctionnement de la forêt mélangée. *Rendez-Vous Tech. ONF* 60.
- 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., Augustynczyk, A.L.D., Yousefpour, R., Huber, N., Bugmann, H., Merganičová, K., Merganic, J., Valent, P., Lasch-Born, P., Hartig, F., Vega del Valle, I.D., Volkholz, J., Gutsch, M., Matteucci, G., Krejza, J., Ibrom, A., Meesenburg, H., Rötzer, T., van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., Reyer, C.P.O., 2022. Accuracy, realism and general applicability of European forest models. *Glob. Change Biol.* 28, 6921–6943. <https://doi.org/10.1111/gcb.16384>
- Ols, C., Hervé, J.-C., Bontemps, J.-D., 2020. Recent growth trends of conifers across Western Europe are controlled by thermal and water constraints and favored by forest heterogeneity. *Sci. Total Environ.* 742, 140453. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140453>
- Oudin, A., 1930. Vues d'ensemble sur l'organisation en France des recherches de sylviculture et d'économie forestière. *Les méthodes. Ann. Ecole Natl. Eaux For. Stn. Rech. Exp. For.* 3, 227.
- Perot, T., Mârell, A., Korboulewsky, N., Seigner, V., Balandier, P., 2017. Modeling and predicting solar radiation transmittance in mixed forests at a within-stand scale from tree species basal area. *For. Ecol. Manag.* 390, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.023>
- Perot, T., Picard, N., 2012. Mixture enhances productivity in a two-species forest: evidence from a modeling approach. *Ecol. Res.* 27, 83–94. <https://doi.org/10.1007/s11284-011-0873-9>
- Pretzsch, H., del Río, M., Ammer, Ch., Avdagic, A., Barbeito, I., Bielak, K., Brazaitis, G., Coll, L., Dirnberger, G., Drössler, L., Fabrika, M., Forrester, D.I., Godvold, K., Heym, M., Hurt, V., Kurylyak, V., Löf, M., Lombardi, F., Matović, B., Mohren, F., Motta, R., den Ouden, J., Pach, M., Ponette, Q., Schütze, G., Schweig, J., Skrzyszewski, J., Sramek, V., Sterba, H., Stojanović, D., Svoboda, M., Vanhellefont, M., Verheyen, K., Wellhausen, K., Zlatanov, T., Bravo-Oviedo, A., 2015. Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. *Eur. J. For. Res.* 134, 927–947. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0900-4>
- Reyer, C.P.O., Silveyra Gonzalez, R., Dolos, K., Hartig, F., Hauf, Y., Noack, M., Lasch-Born, P., Rötzer, T., Pretzsch, H., Meesenburg, H., Fleck, S., Wagner, M., Bolte, A., Sanders, T.G.M., Kolari, P., Mäkelä, A., Vesala, T., Mammarella, I., Pumpanen, J., Collalti, A., Trotta, C., Matteucci, G., D'Andrea, E., Foltýnová, L., Krejza, J., Ibrom, A., Pilegaard, K., Loustau, D., Bonnefond, J.-M., Berbigier, P., Picard, D., Lafont, S., Dietze, M., Cameron, D., Vieno, M., Palacios-Orueta, A., Cicuendez, V., Recuero, L., Wiese, K., Büchner, M., Lange, S., Volkholz, J., Kim, H., Horemans, J.A., Bohn, F., Steinkamp, J., Chikalanov, A., Weedon, G.P., Sheffield, J., Babst, F., Vega del Valle, I., Suckow, F., Martel, S., Mahnken, M., Gutsch, M., Frieler, K., 2020. The PROFOUND Database for evaluating vegetation models and simulating climate impacts on European forests. *Earth Syst. Sci. Data* 12, 1295–1320. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1295-2020>
- Seynave, I., Bailly, A., Balandier, P., Bontemps, J.-D., Cailly, P., Cordonnier, T., Deleuze, C., Dhôte, J.-F., Ginisty, C., Lebourgeois, F., Merzeau, D., Paillasa, E., Perret, S., Richter, C., Meredieu, C., 2018. GIS Coop: networks of silvicultural trials for supporting forest management under changing environment. *Ann. For. Sci.* 75, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0692-z>
- Soler, C., Sillion, F.X., Blaise, F., Dereffye, P., 2003. An efficient instantiation algorithm for simulating radiant energy transfer in plant models. *ACM Trans. Graph.* 22, 204–233. <https://doi.org/10.1145/636886.636890>
- Toïgo, M., Perot, T., Courbaud, B., Castagneyrol, B., Gégout, J.-C., Longuetaud, F., Jactel, H., Vallet, P., 2018. Difference in shade tolerance drives the mixture effect on oak productivity. *J. Ecol.* 106, 1073–1082. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12811>
- Toïgo, M., Vallet, P., Perot, T., Bontemps, J.-D., Piedallu, C., Courbaud, B., 2015. Overyielding in mixed forests decreases with site productivity. *J. Ecol.* 103, 502–512. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12353>
- Vallet, P., Fortin, M., de Coligny, F., Perot, T., Aussenac, R., Monnet, J.-M., 2021. Salem simulator 2.0. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5578340>
- Vallet, P., Pérot, T., 2016. Tree diversity effect on dominant height in temperate forest. *For. Ecol. Manag.* 381, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.024>
- Vallet, P., Pérot, T., 2011. Silver fir stand productivity is enhanced when mixed with Norway spruce: evidence based on large-scale inventory data and a generic modelling approach. *J. Veg. Sci.* 22, 932–942. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01288.x>