

Rôle de la complexité dans les forêts : que nous disent les modèles ?

Xavier Morin, Joannès Guillemot, Maude Toïgo, Patrick Vallet

Etudier l'effet de la complexité en forêt

Quelle complexité ?

Diversité interspécifique/intraspécifique

Structure

Interactions

...

Effet sur quoi ?

Fonctionnement

Biodiversité associée

Réaction à la gestion

Etat

Résilience

Etudier l'effet de la complexité en forêt

Quelle complexité ?

Diversité interspécifique/intraspécifique

Structure

Interactions

...

Effet sur quoi ?

Fonctionnement

Biodiversité associée

Réaction à la gestion

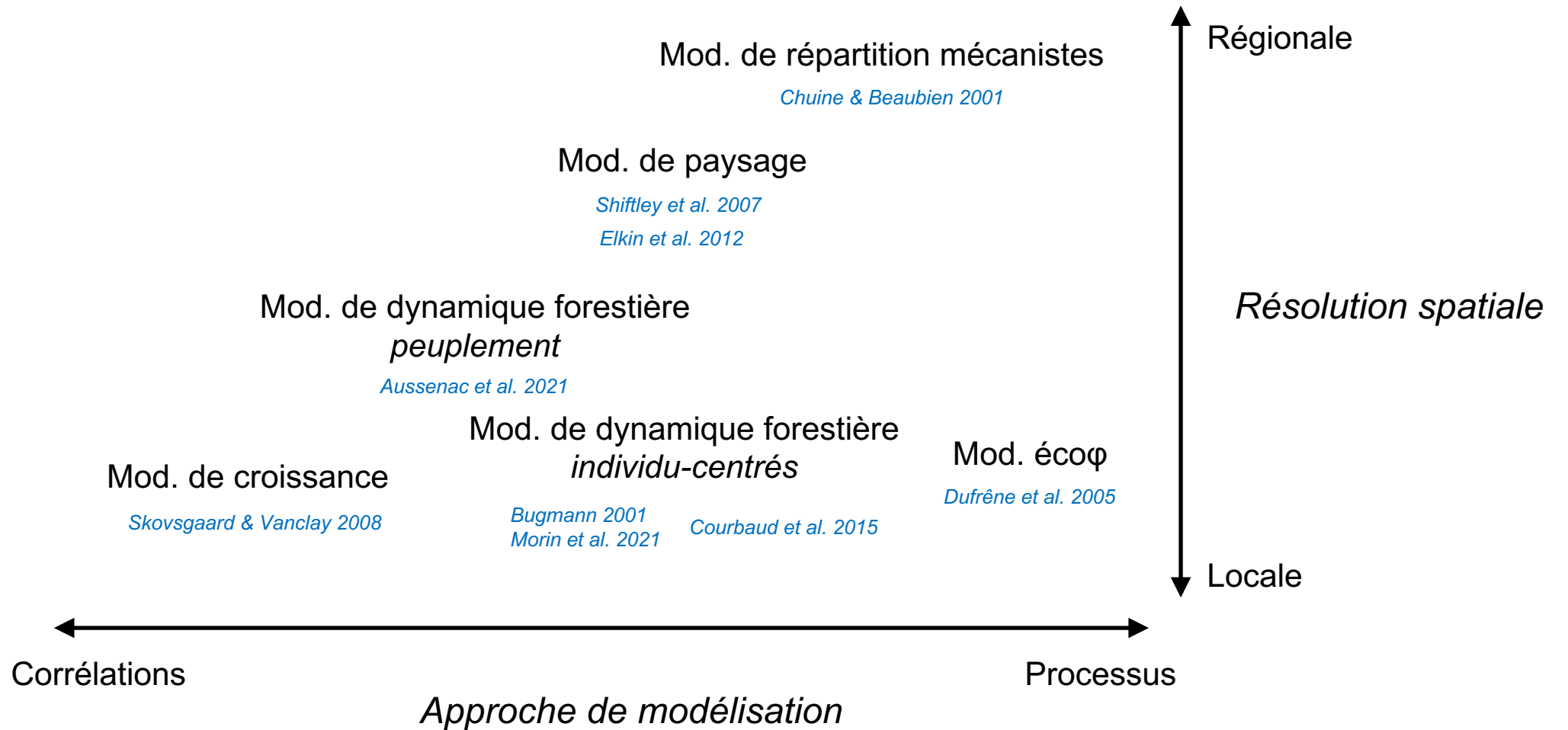
Etat

Résilience

Pourquoi utiliser des modèles ?

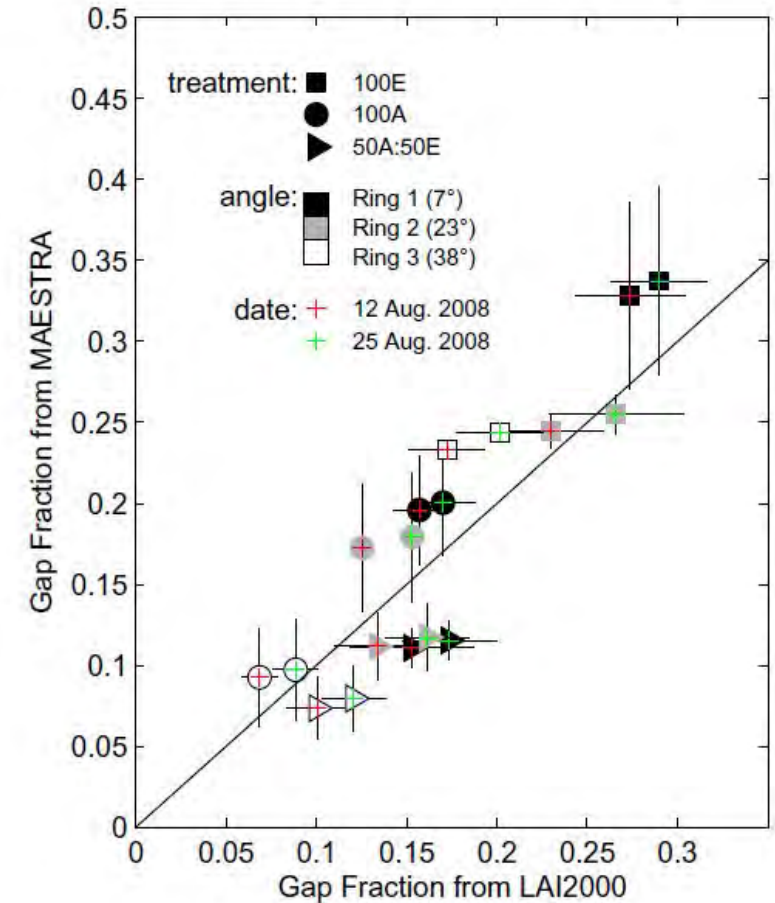
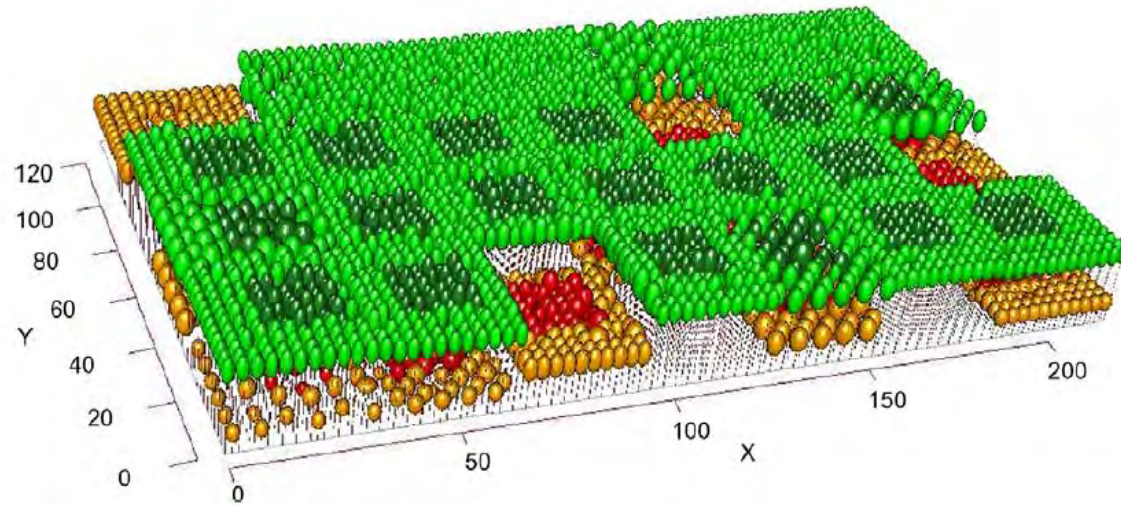
- Valider la compréhension d'un mécanisme par comparaison avec des observations
- Prédire des variables dans des conditions nouvelles (climat, gestion)
- Etablir de nouvelles hypothèses

Modèles « forestiers »



Interception de la lumière entre forêts complexes vs. monostrates

MAESTRA is a 3D single-tree-based model that calculates light interception and distribution within tree crowns and uses a leaf physiology model to estimate photosynthesis, respiration and transpiration.



Reproduire la structure d'un peuplement à partir de la physiologie

Structure et productivité

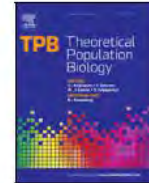
Theoretical Population Biology 130 (2019) 83–93



Contents lists available at ScienceDirect

Theoretical Population Biology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/tpb



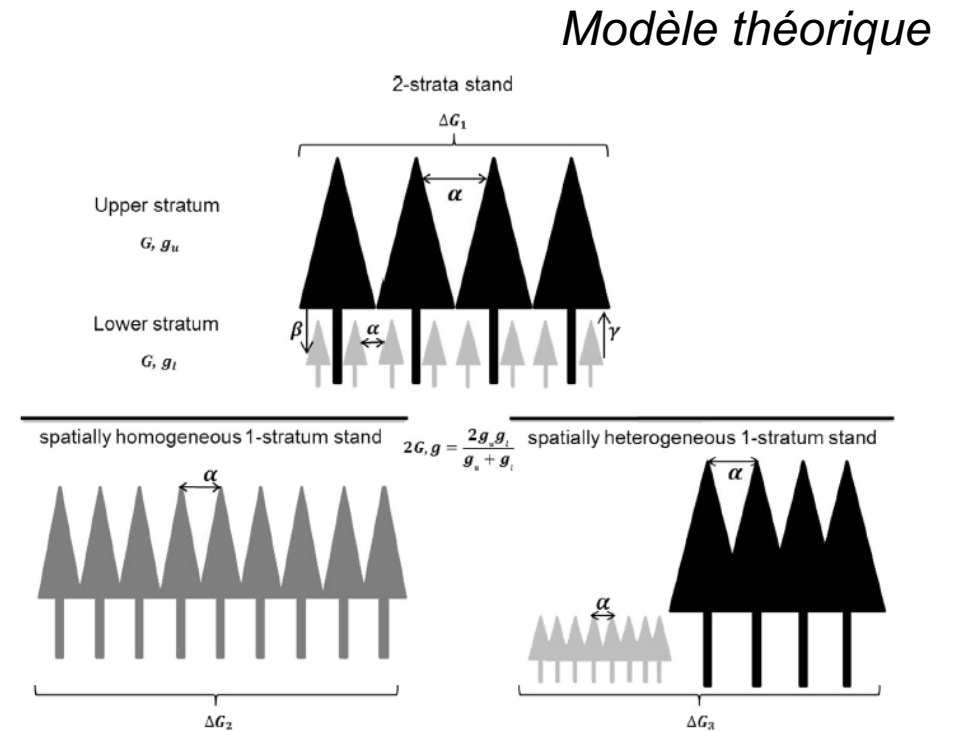
Asymmetric competition, ontogenetic growth and size inequality drive the difference in productivity between two-strata and one-stratum forest stands



Thomas Cordonnier^{a,*}, Charline Smadi^{b,c}, Georges Kunstler^a, Benoît Courbaud^a

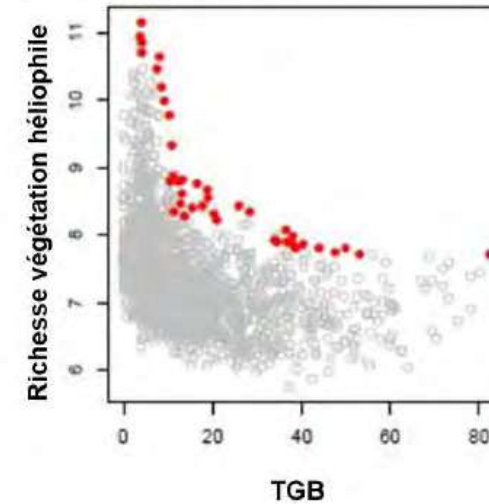
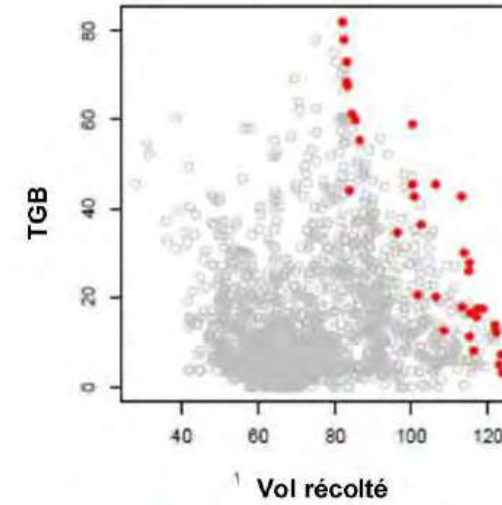
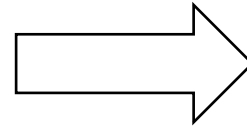
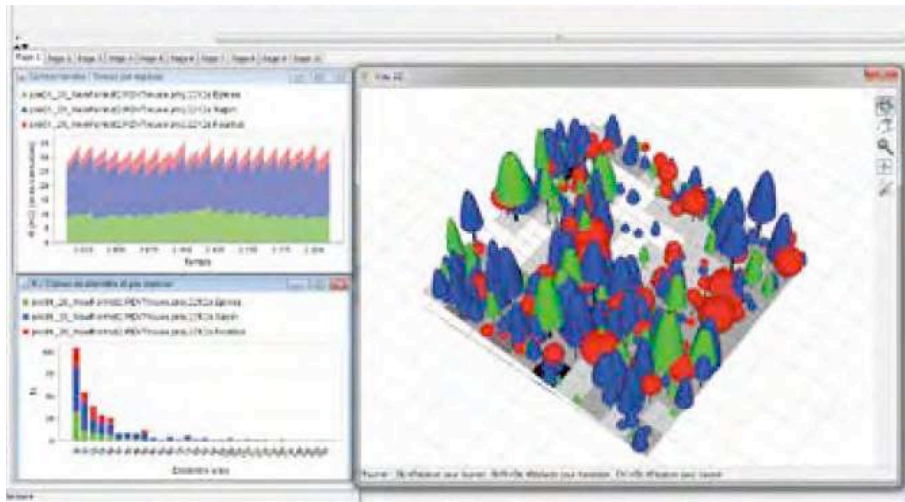
Tester l'effet de l'hétérogénéité de structure sur la productivité des peuplements

⇒ **Variabilité des résultats en partie due au rôle de la croissance ontogénique**



Rôle de la structure forestière sur les services écosystémiques

Modèle Samsara



⇒ Mise en évidence de synergie et/ou de compromis entre différents services

Rôle de la structure forestière dans la résilience aux tempêtes

Stand scale

Alpha diversity



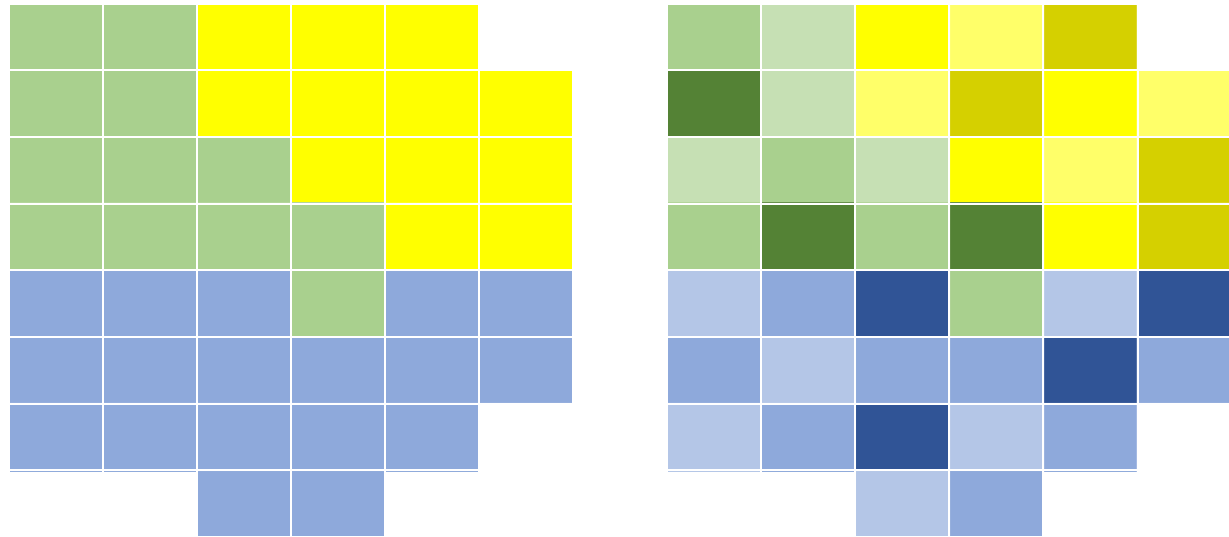
Few species
Simple diameter
structure



Many species
Complex diameter
structure

Landscape scale

Beta diversity



Low variety
of stands



High variety
of stands

Rôle de la structure forestière dans la résilience aux tempêtes

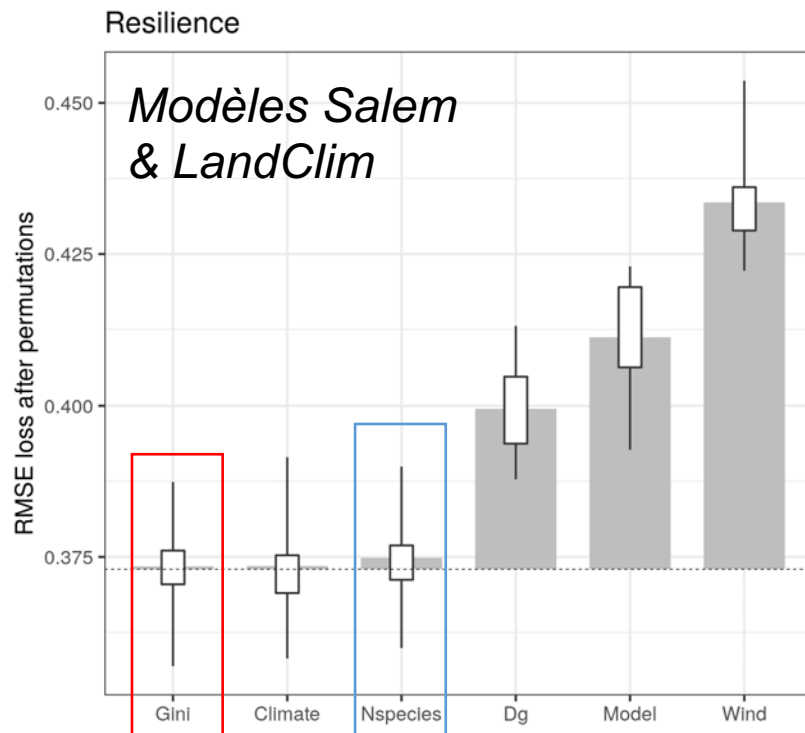
Stand scale

Alpha diversity



Virtual experiment

1. Generate virtual stand, with varying species diversity, and diameter structure
2. Apply 3 levels of storms
3. Simulate growth using 4 forest dynamics models
4. Analyze resistance, recovery and resilience



Key messages on Complexity – Resilience :

Tree size diversity (Gini) : small effect on resilience

Species richness (Nspecies) : limited effect on resilience

Main effects: the strength of the storm, the model used, and the developmental stage.

Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

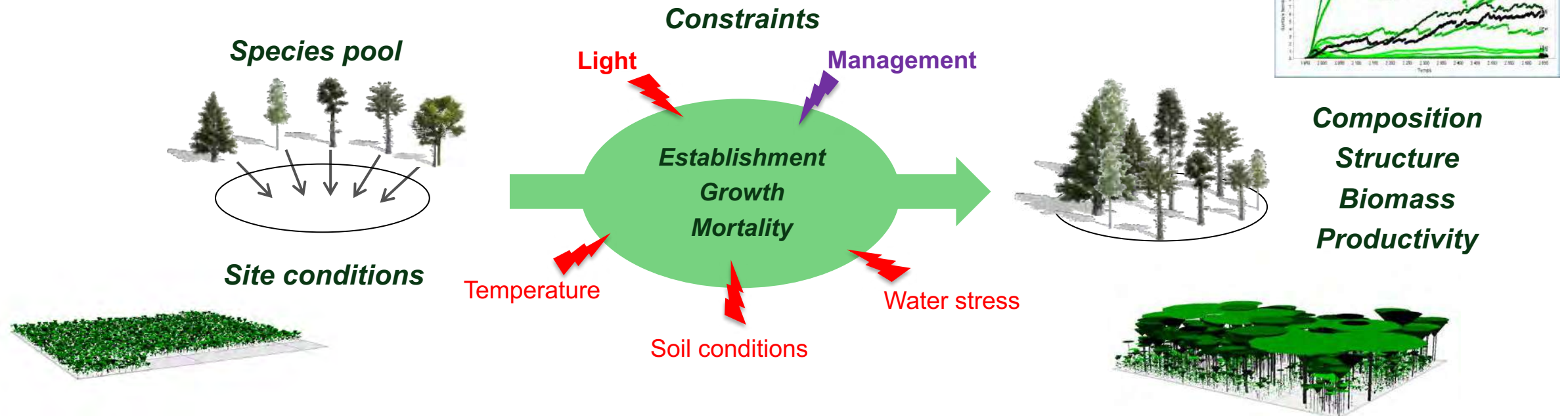
Simulations avec des modèles de dynamique

Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

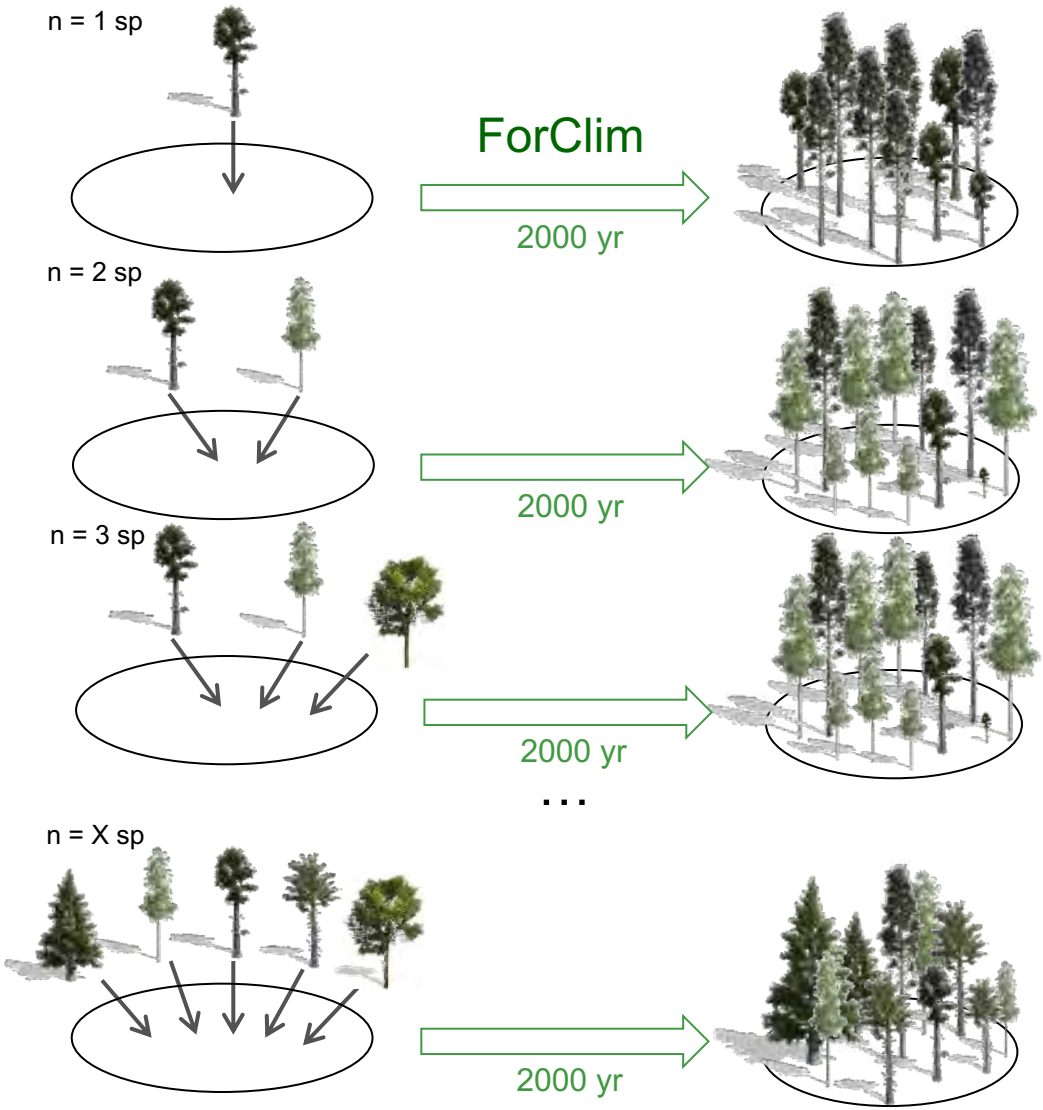
Simulations avec des modèles de dynamique

Schéma 'classique' des modèle de dynamique

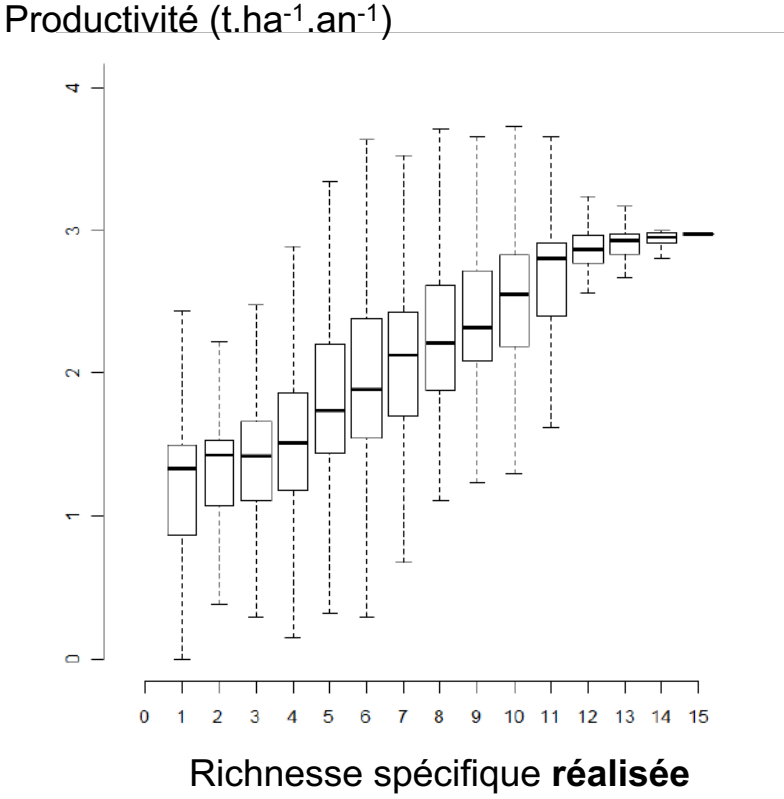
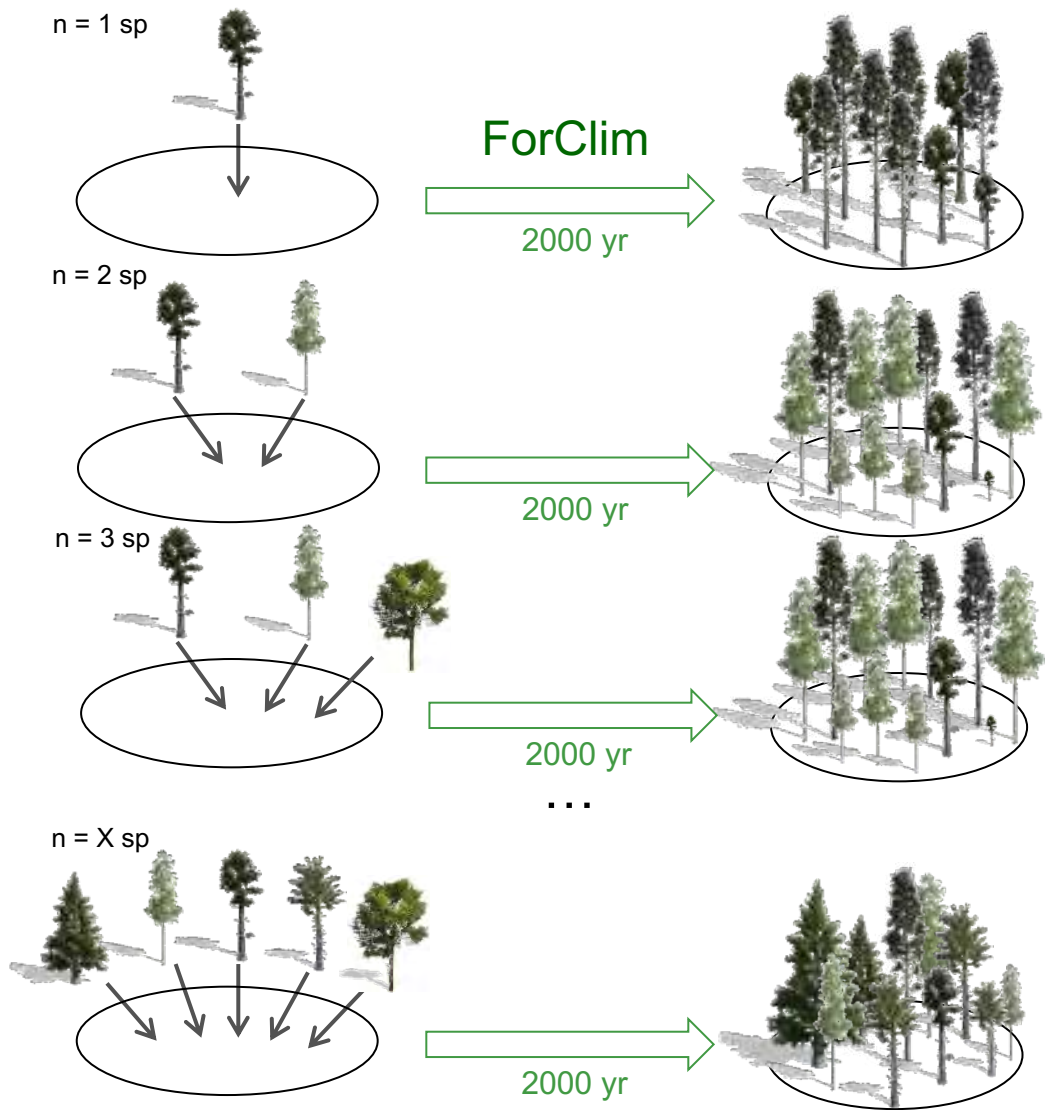
- Description quantitative des dynamiques de populations d'arbres, en réponse à des contraintes
- Sur de petites placettes ('patches') indépendantes
- Individu- ou cohorte-centrés
- **Compromis empirique-processus variable selon les modèles !**



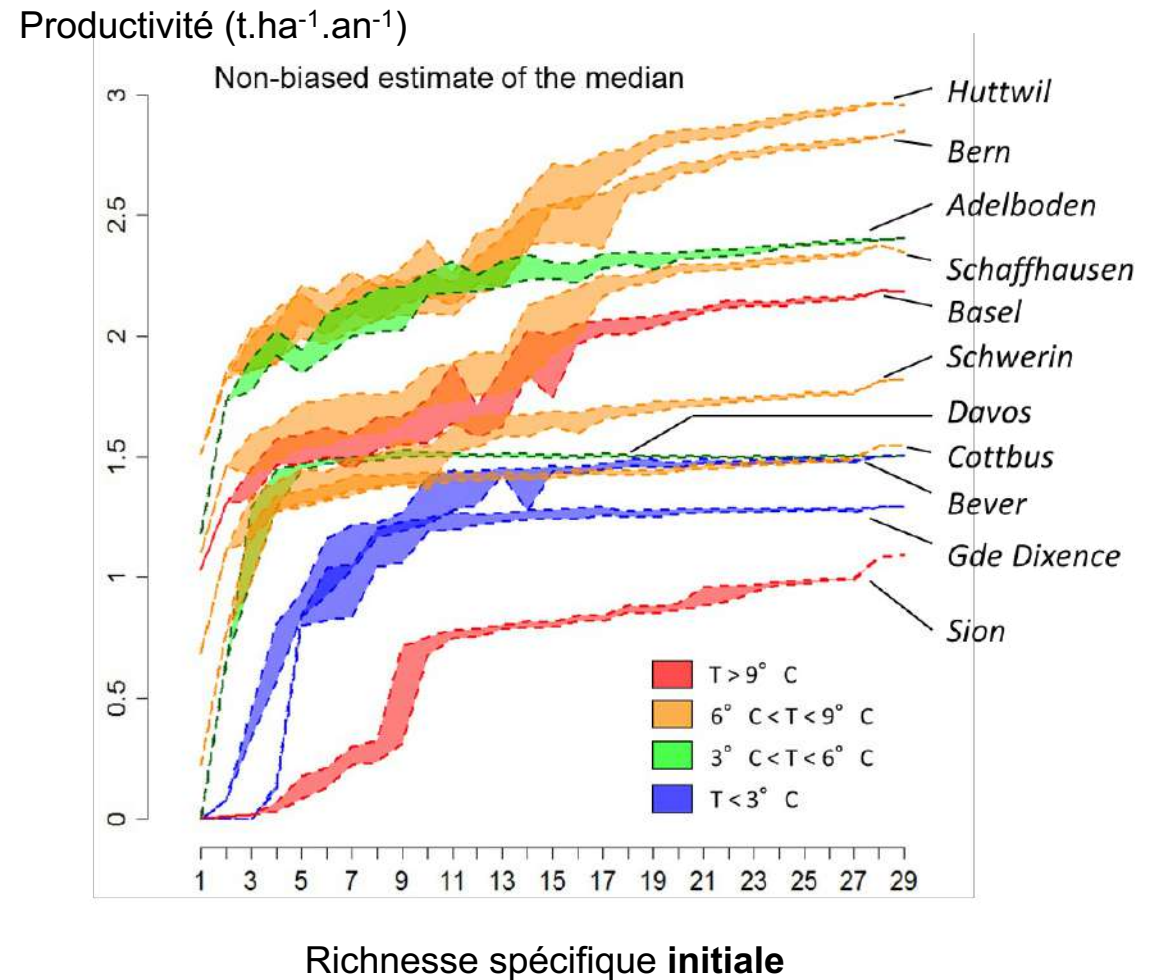
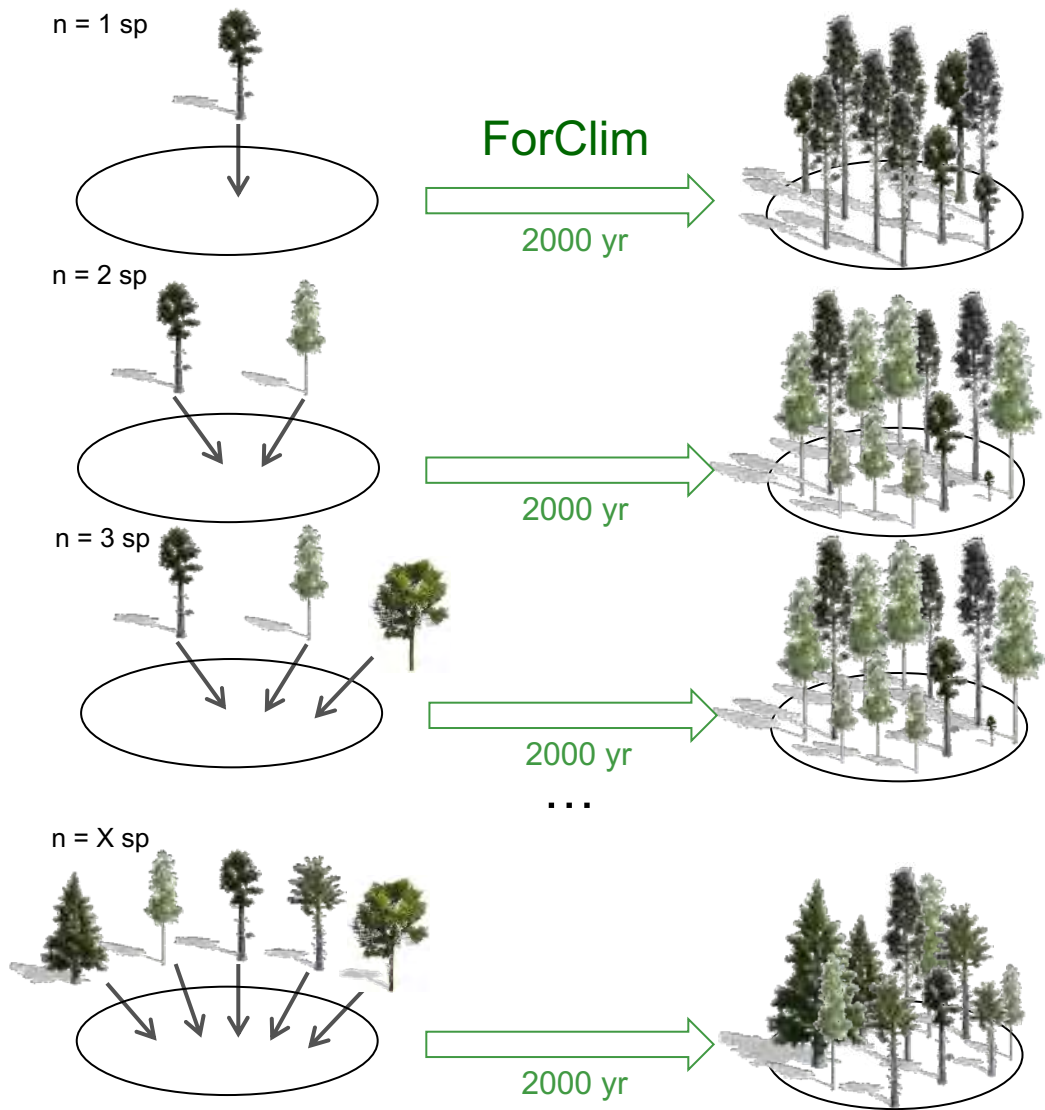
Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement



Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

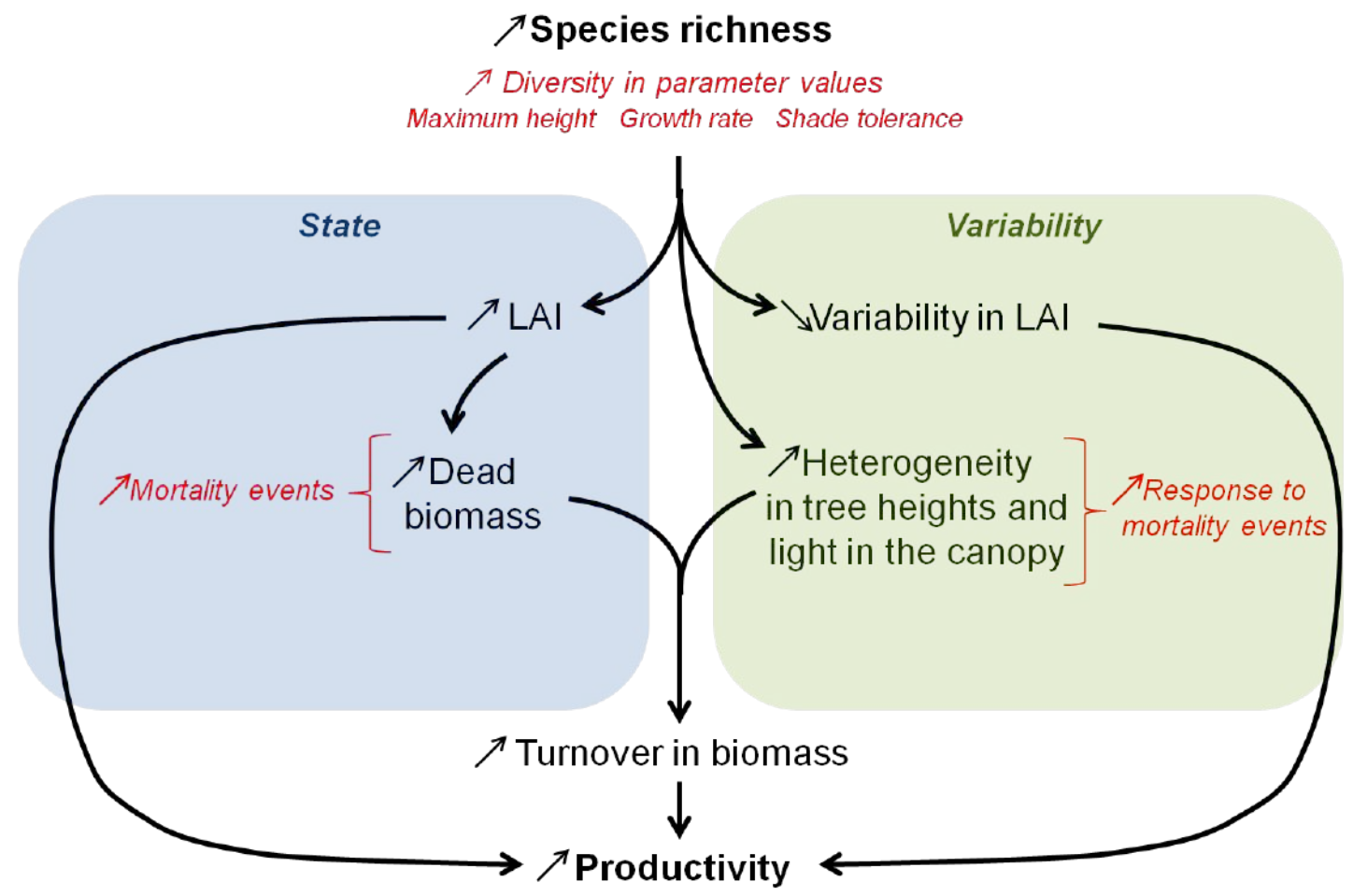


Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

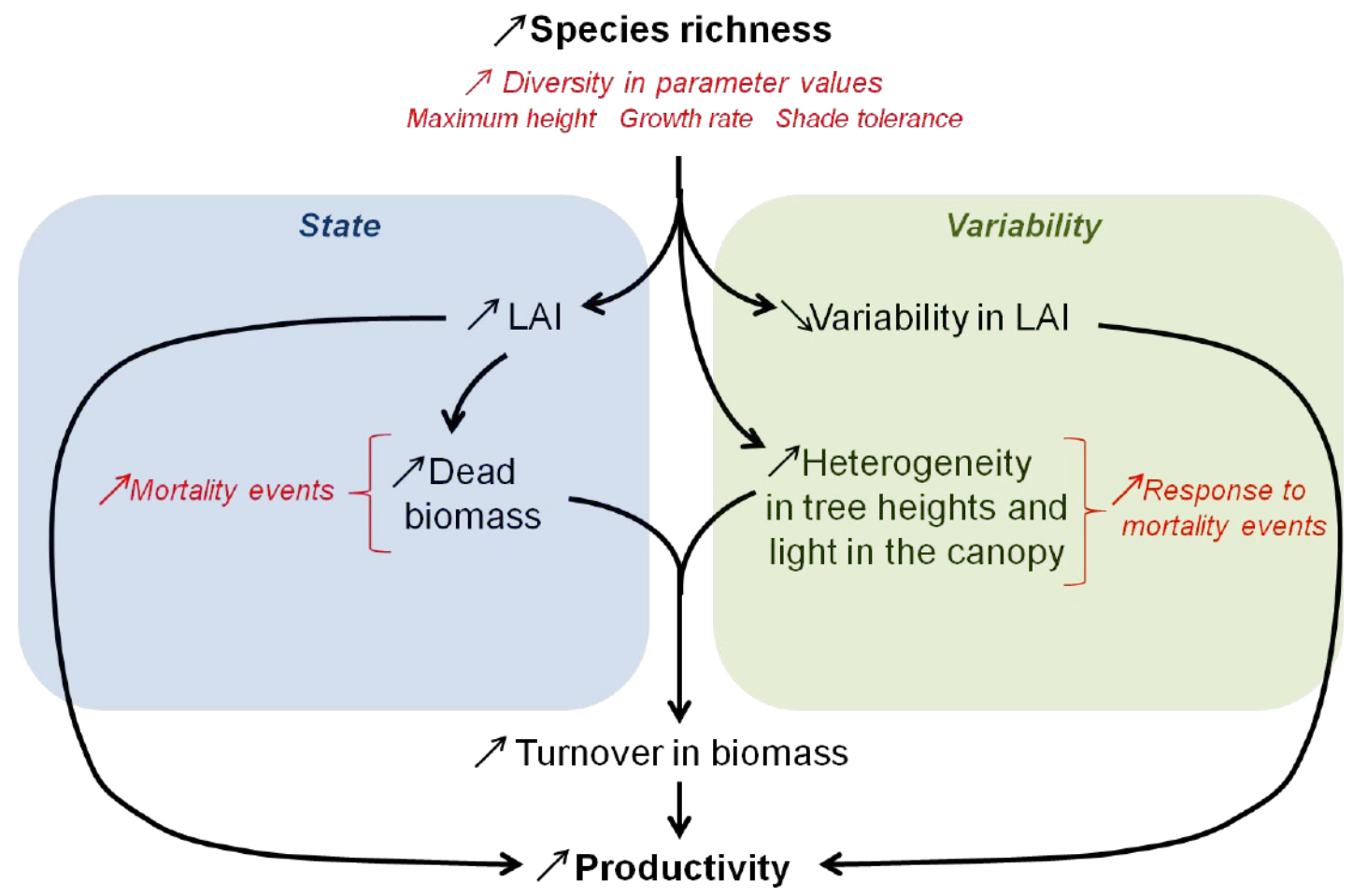
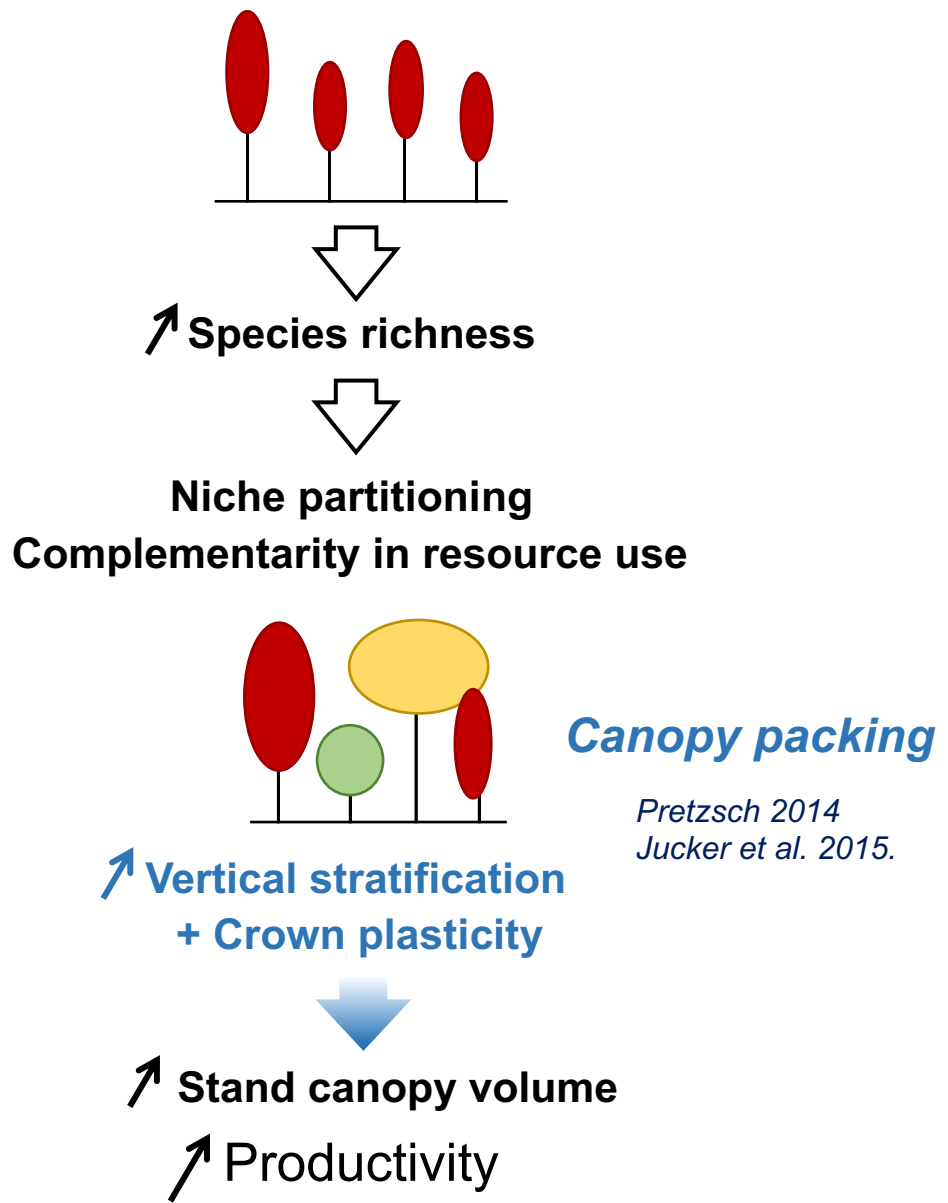


✓ **Conforme aux attendus à l'échelle peuplement**

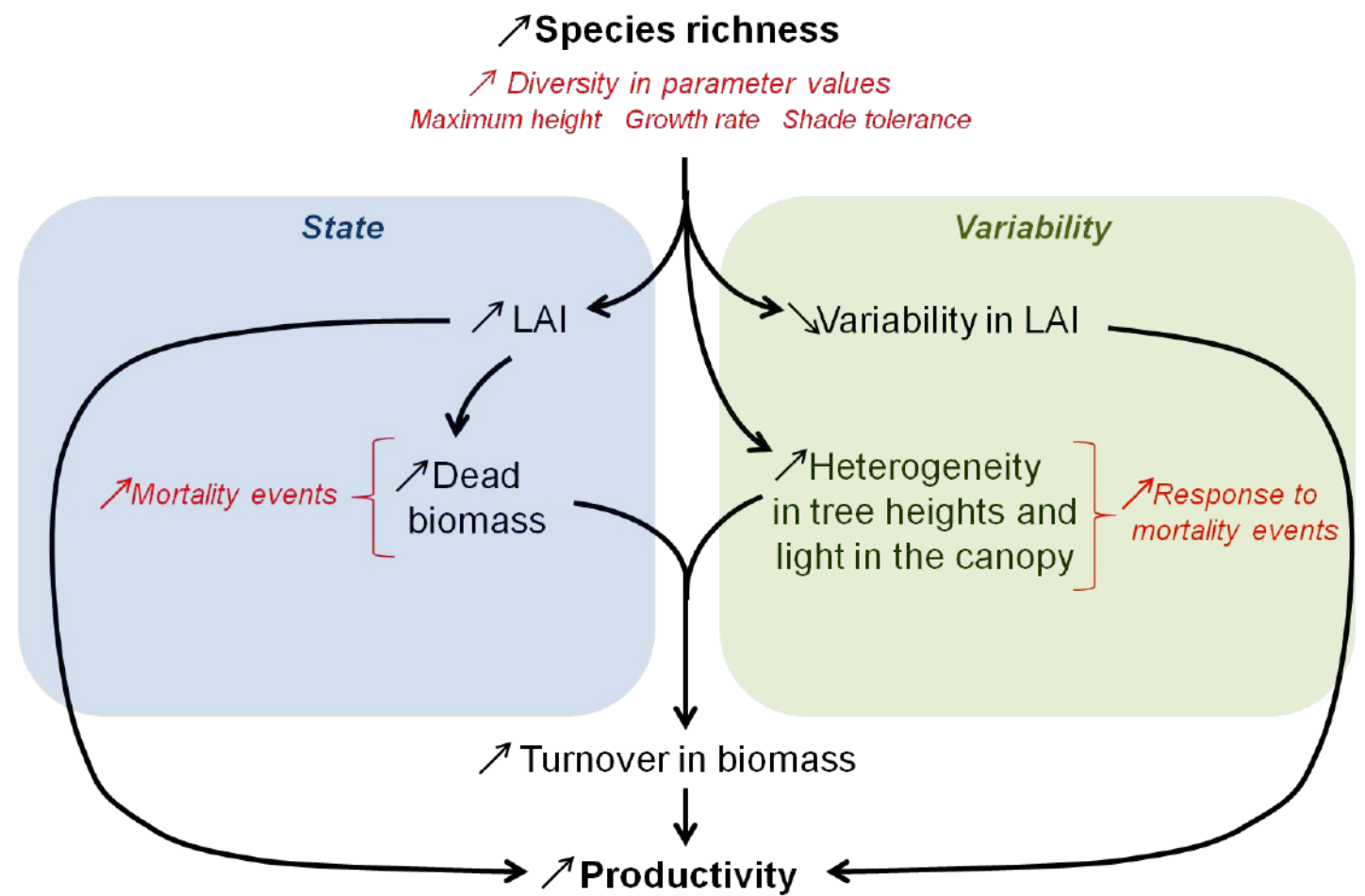
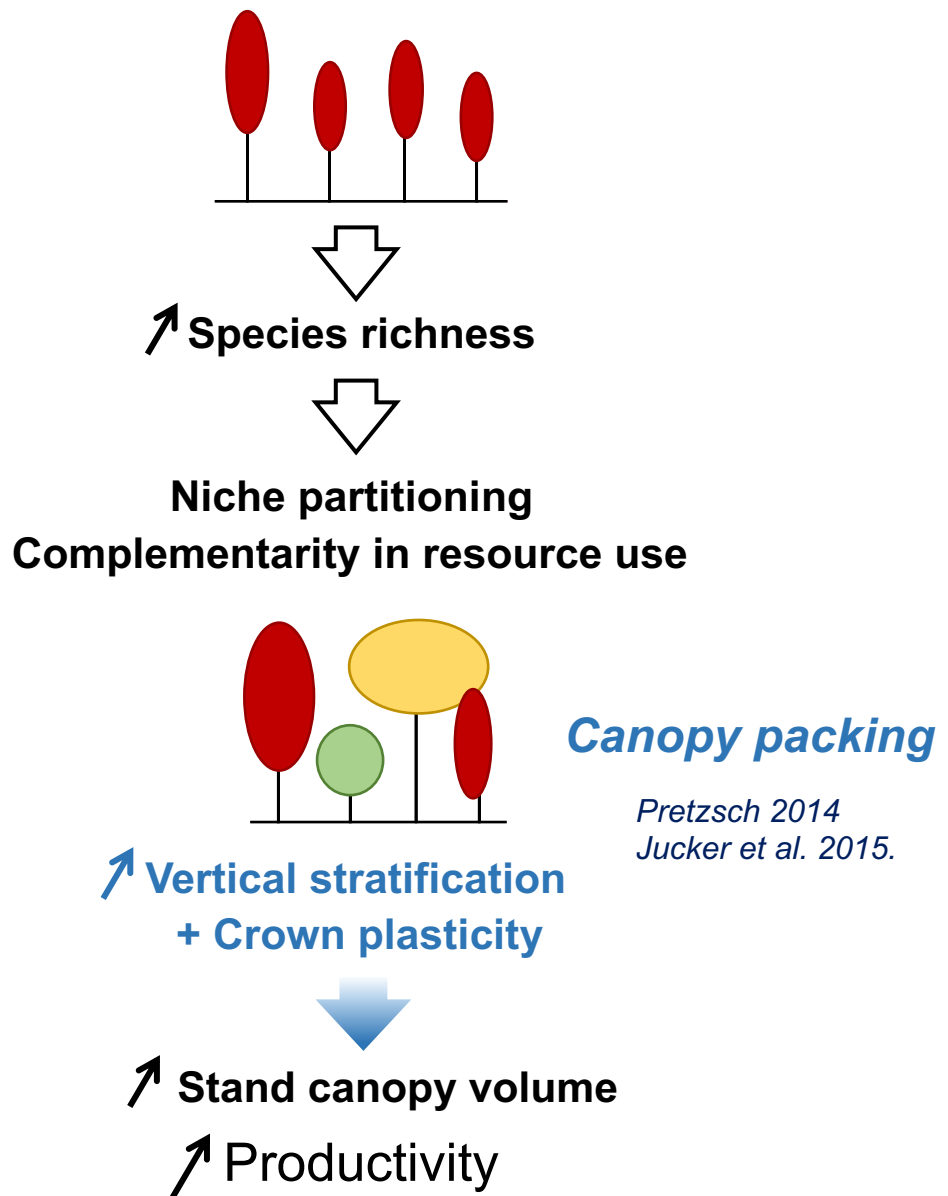
Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement



Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

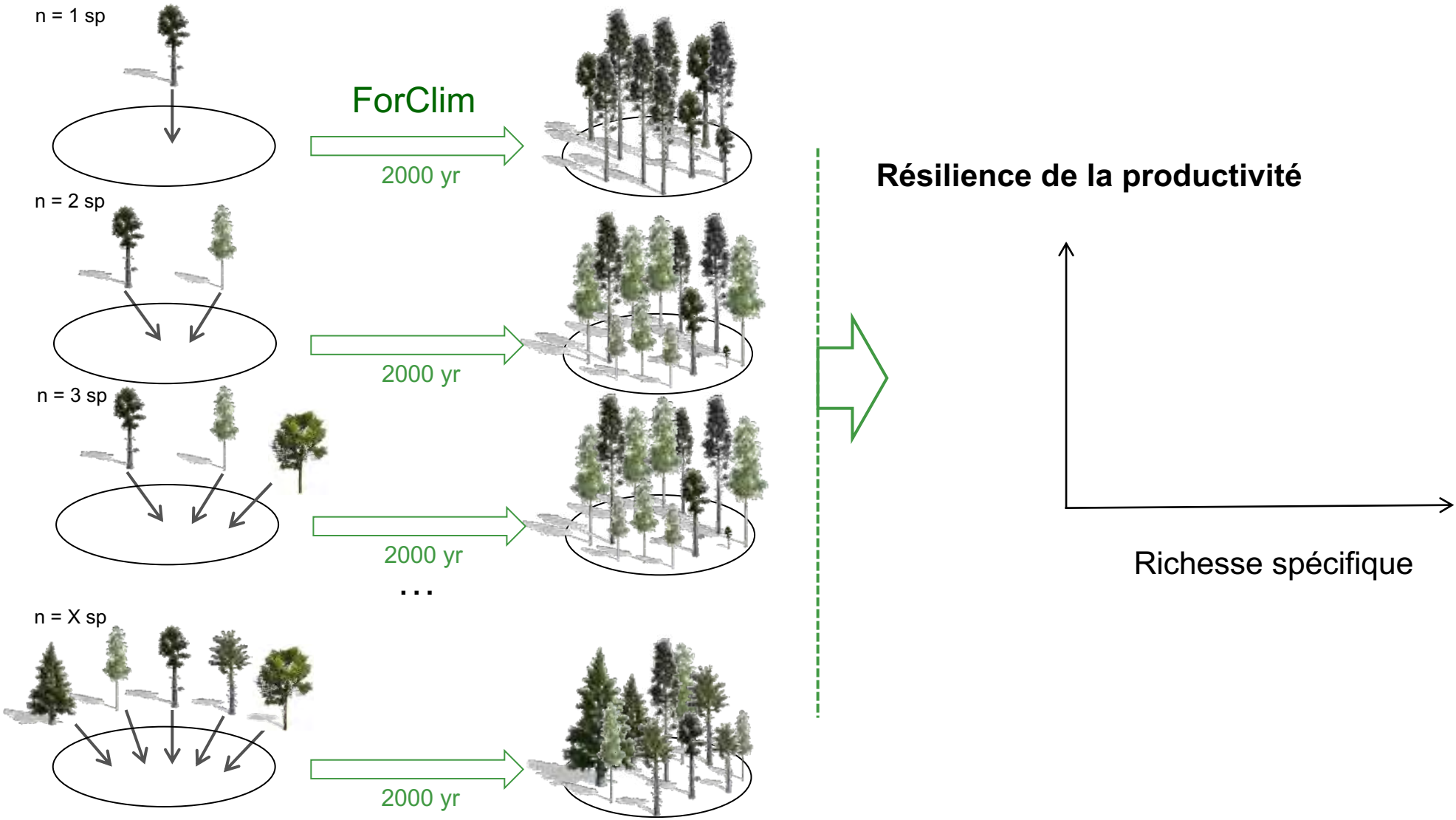


Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

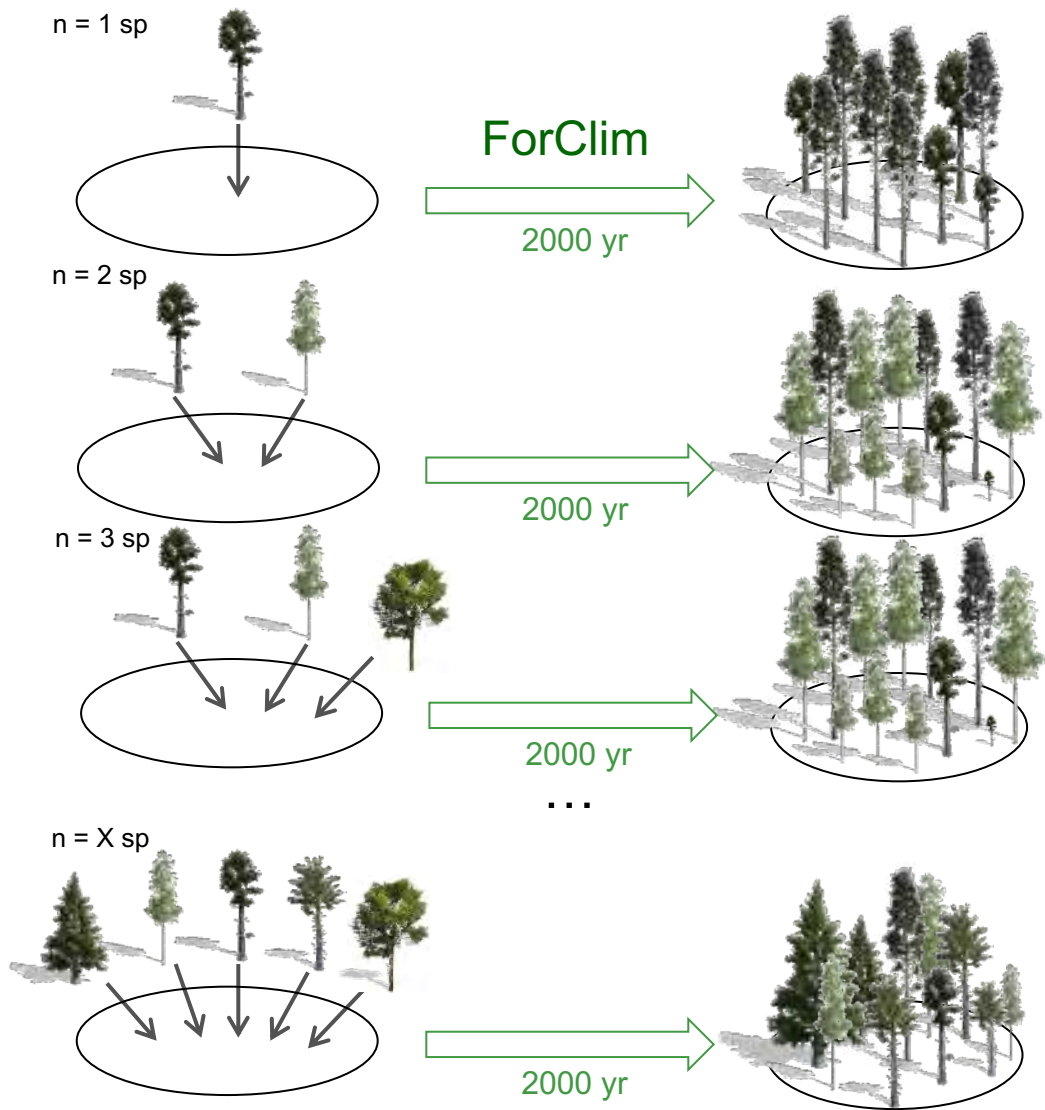


⇒ **Lien diversité en essences et en structure**

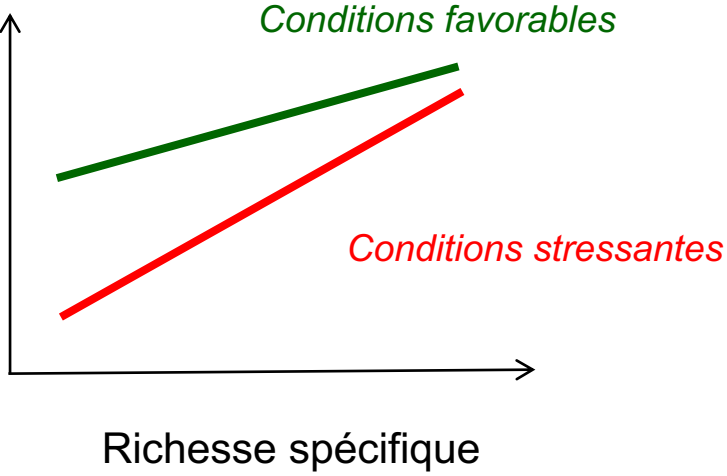
Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement



Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

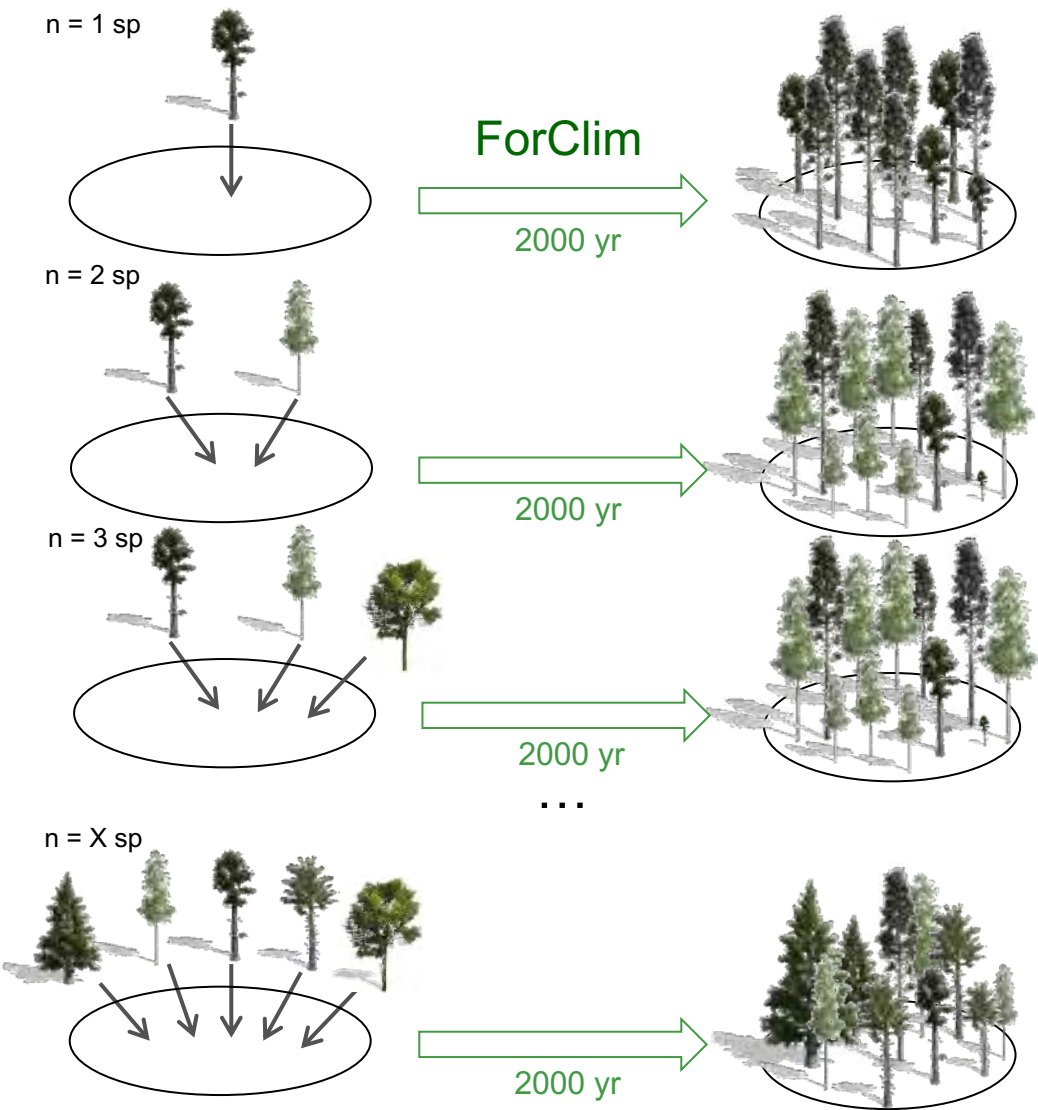


Résilience de la productivité



- ➡ Effet positif de diversité sur la résilience
- ➡ Effet plus fort en conditions stressantes

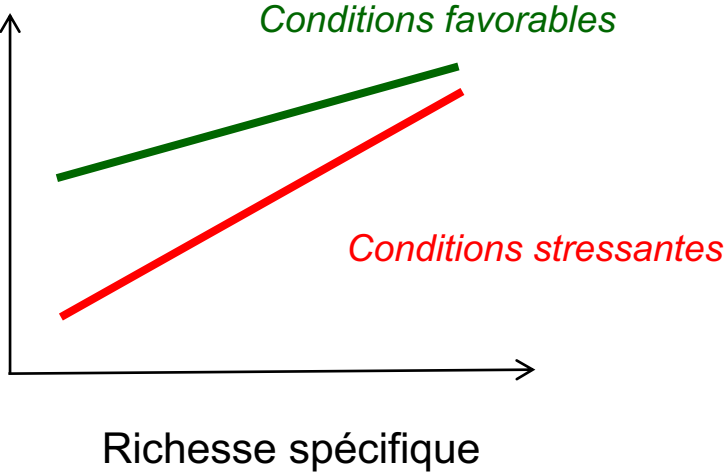
Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement



Mécanisme : asynchronie de réponse entre espèces aux petites perturbations

+ confirmation in-situ (Jourdan et al. 2020)

Résilience de la productivité

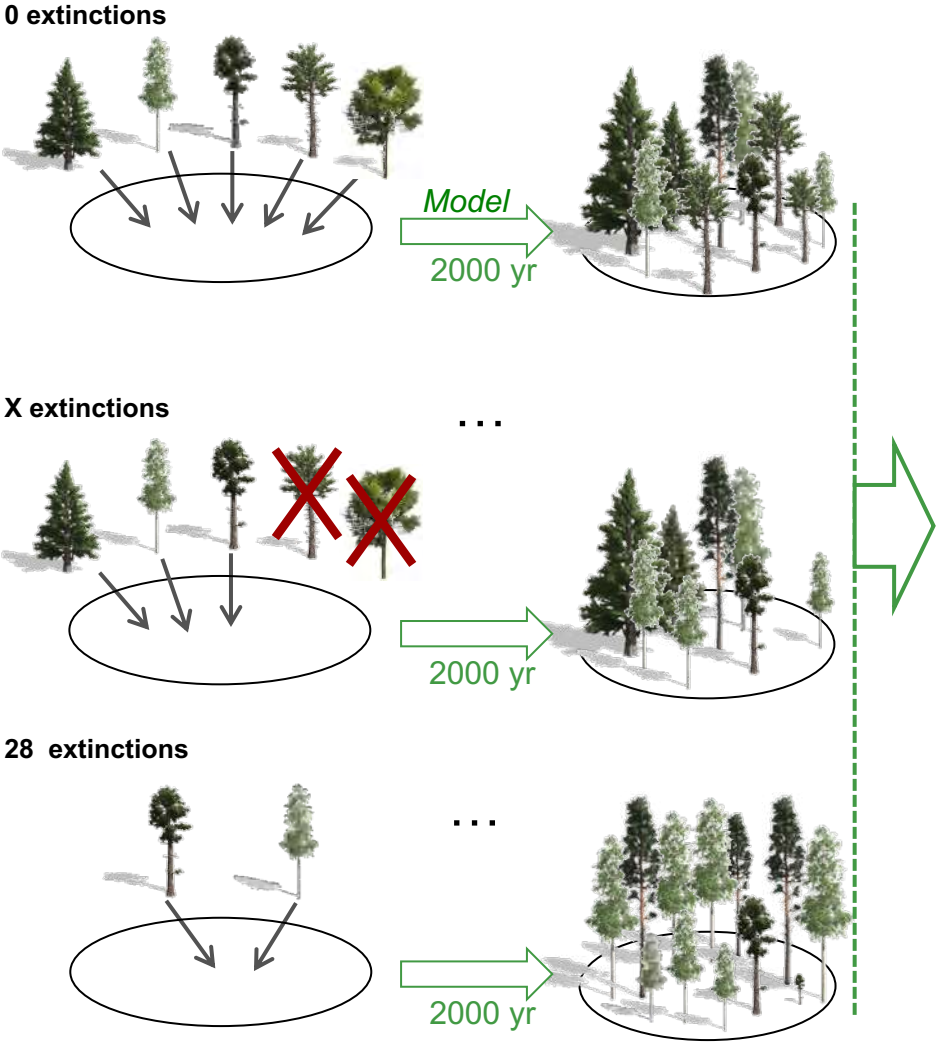


➡ Effet positif de diversité sur la résilience

➡ Effet plus fort en conditions stressantes

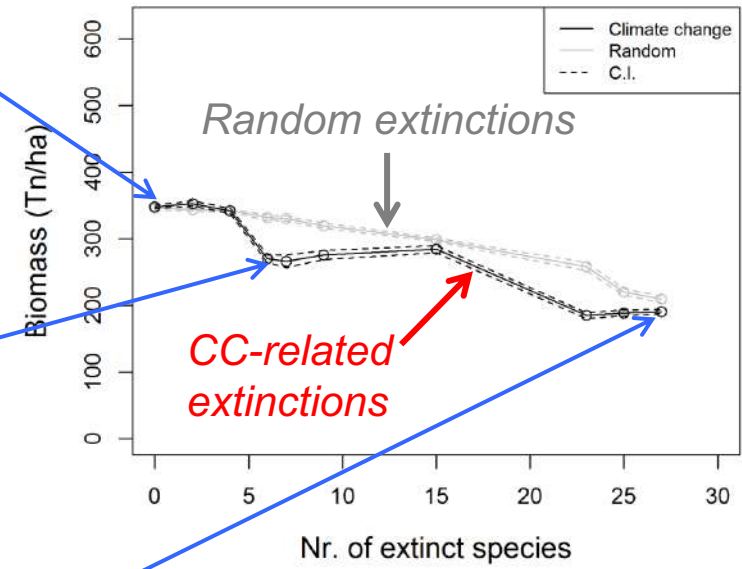
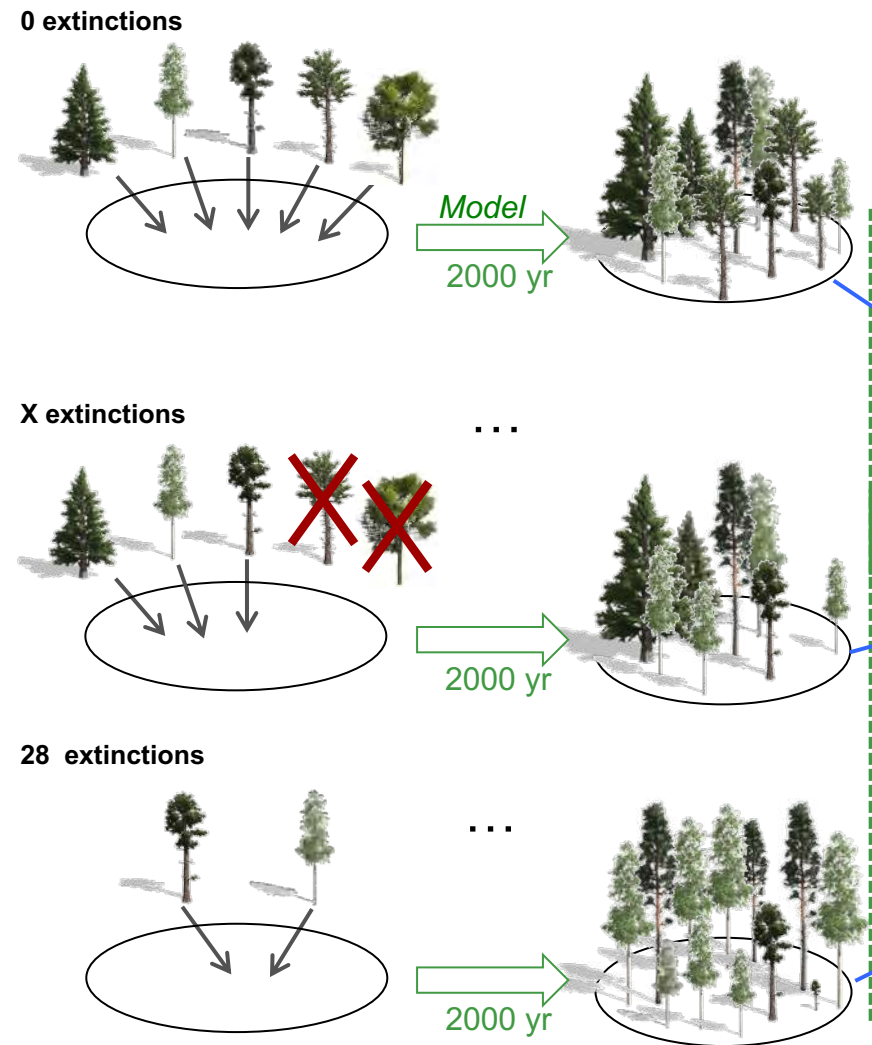
Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

Removing species progressively *randomly*
according to their drought sensitivity



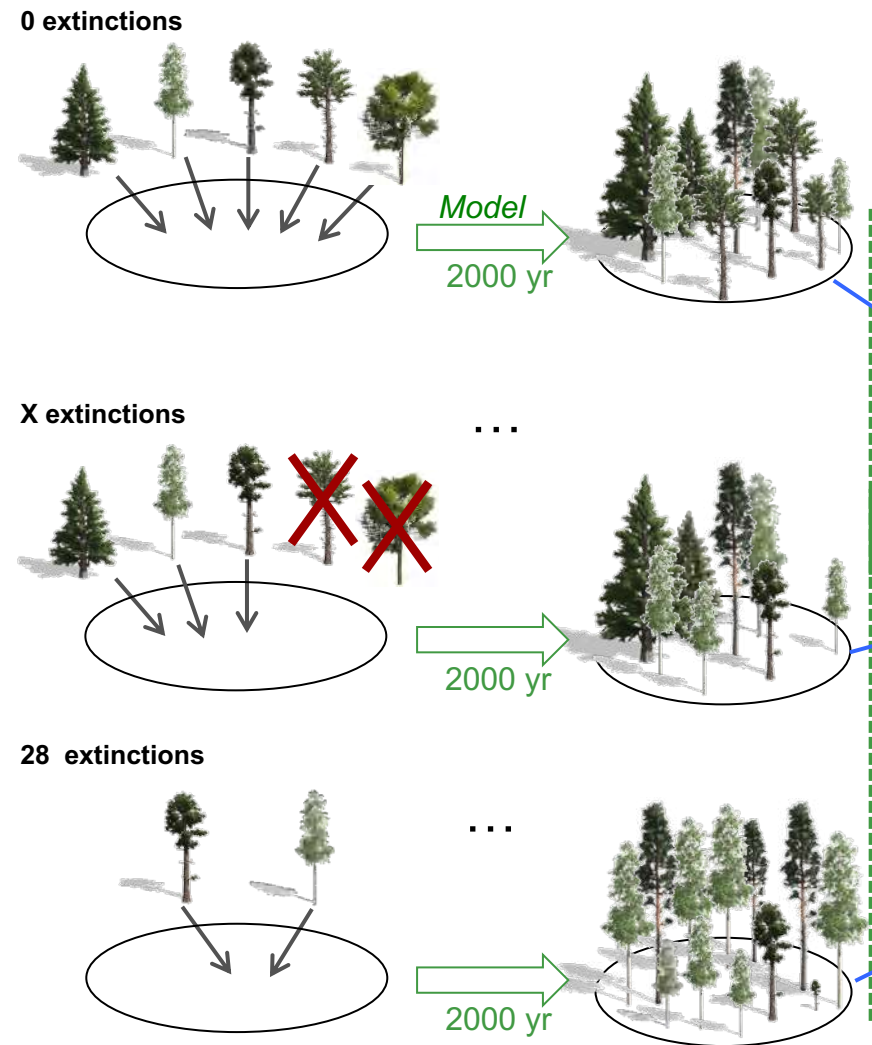
Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

Removing species progressively $\begin{cases} \rightarrow \textit{randomly} \\ \rightarrow \textit{according to their drought sensitivity} \end{cases}$

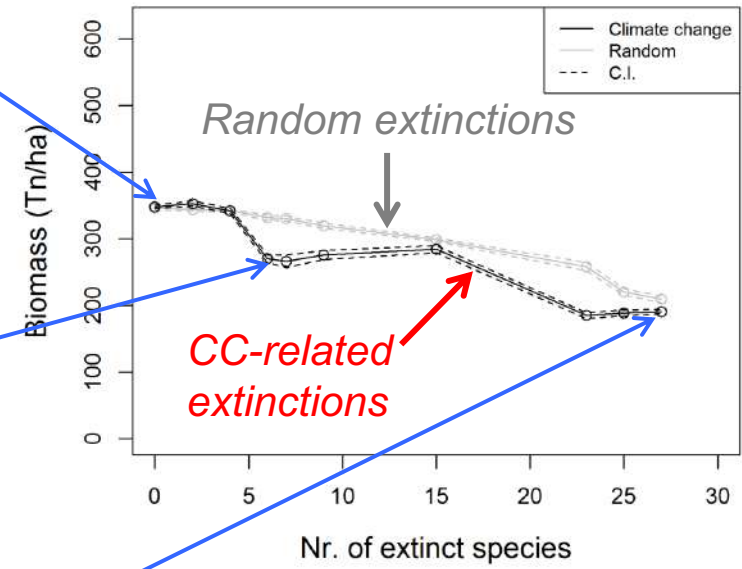


Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement

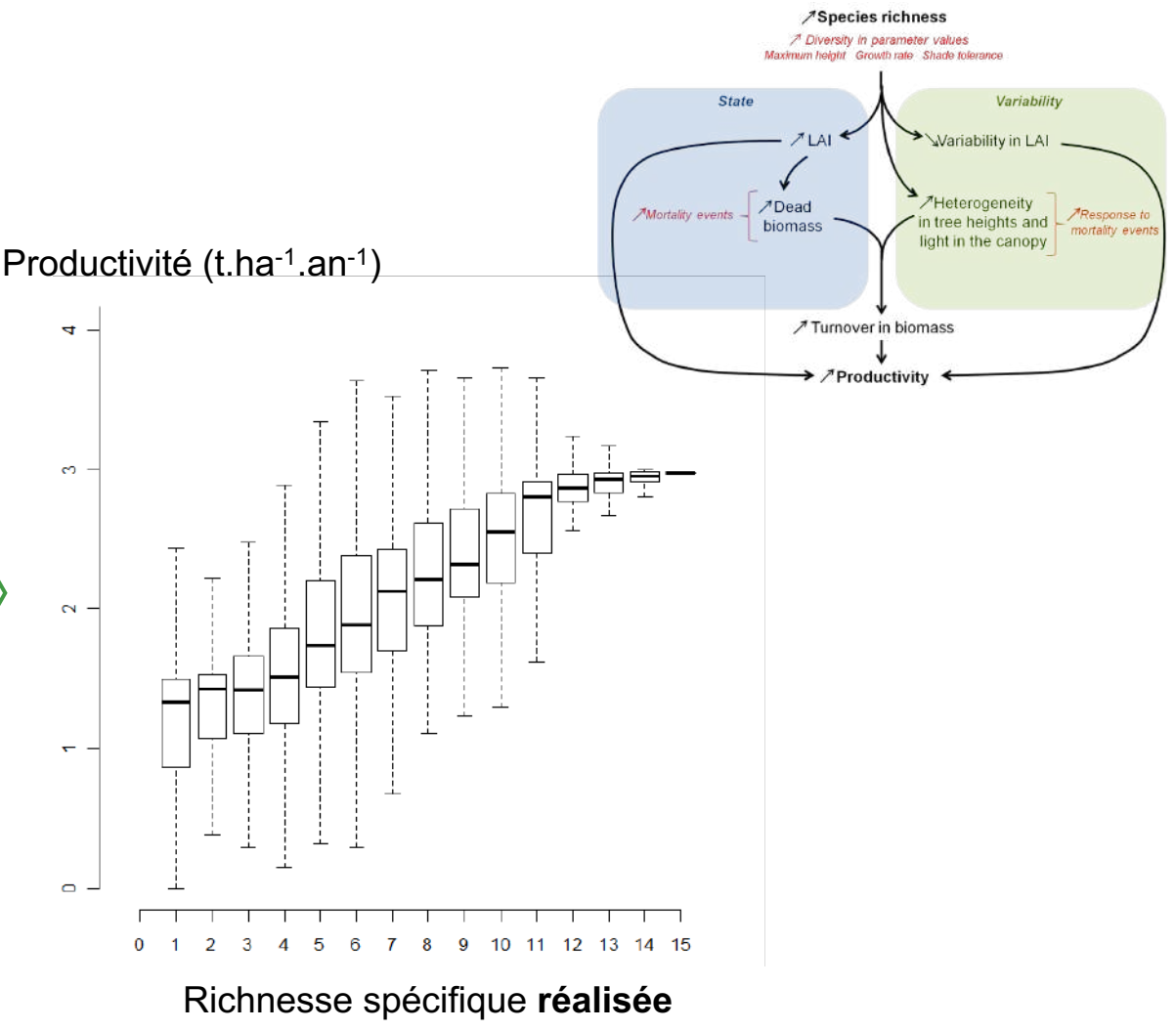
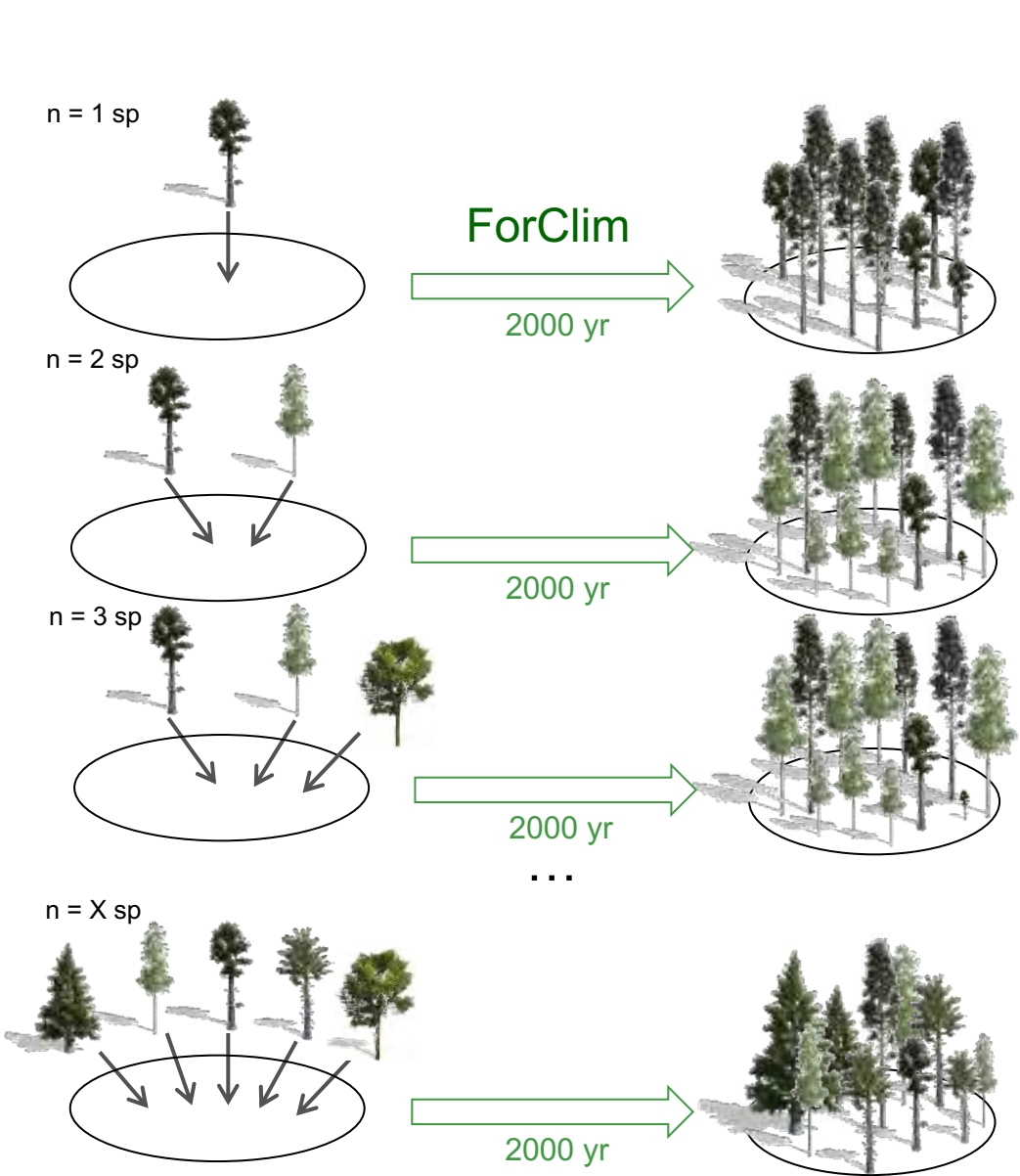
Removing species progressively *randomly*
according to their drought sensitivity



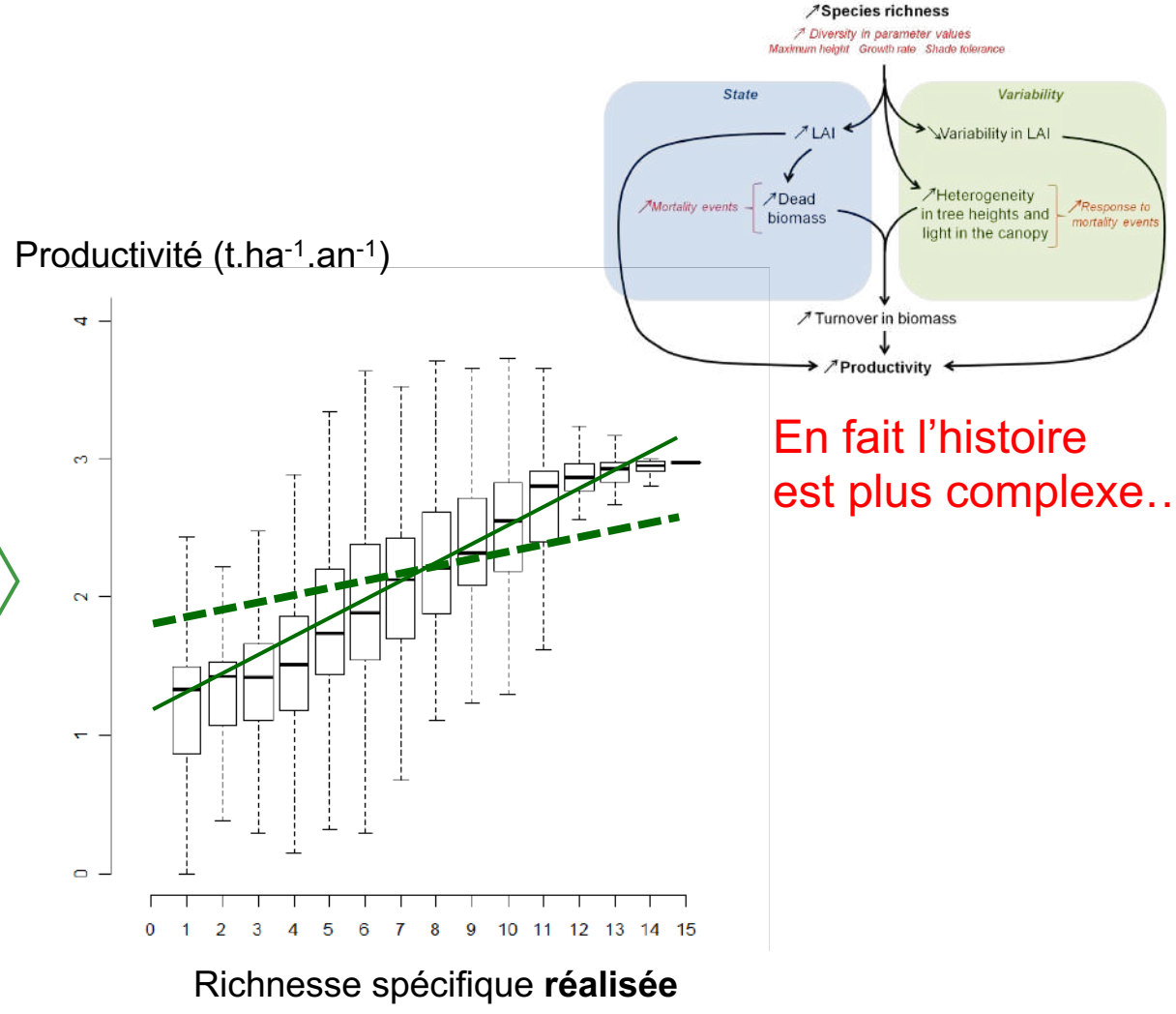
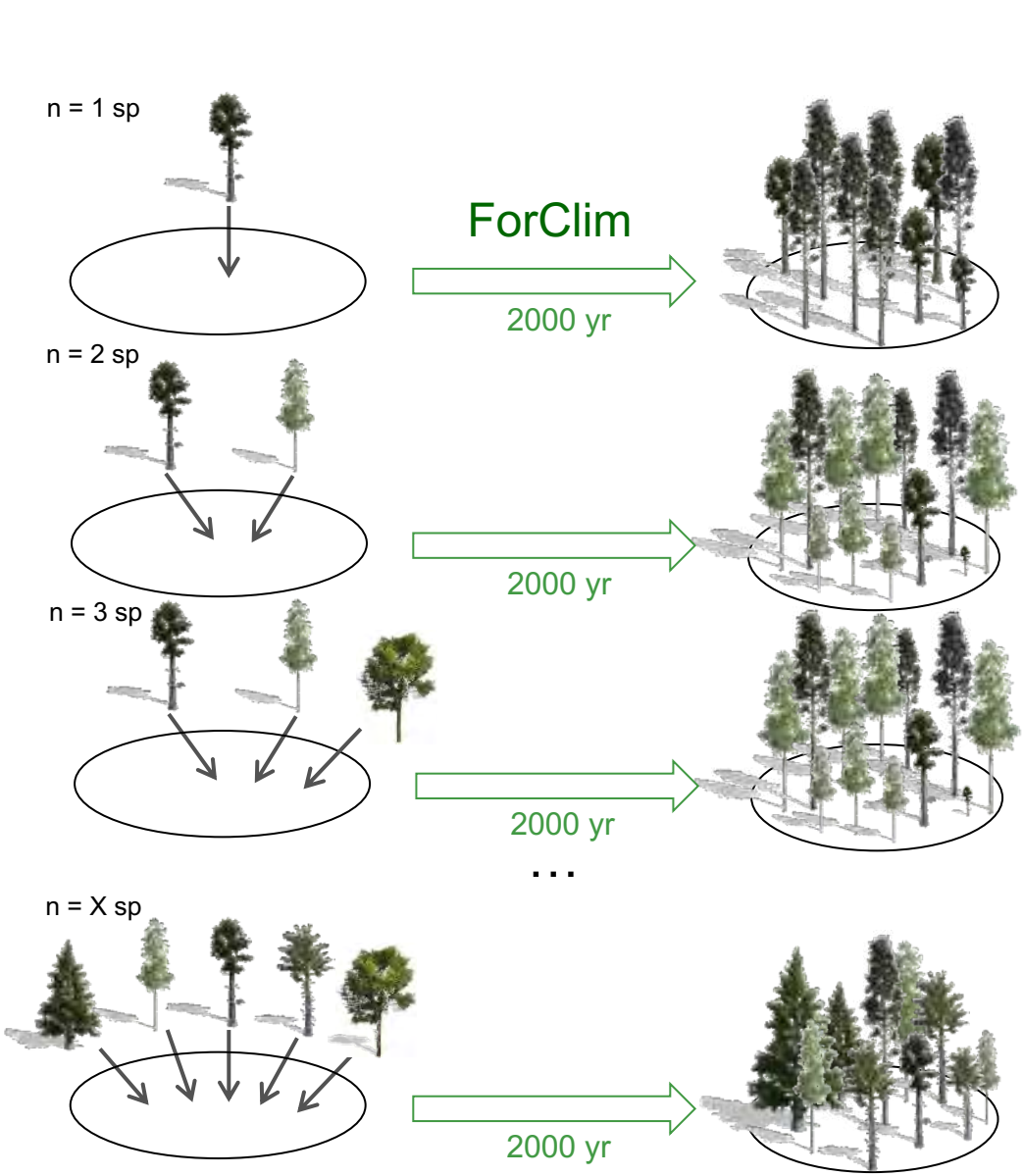
Importance du rôle fonctionnel des espèces dans la communauté



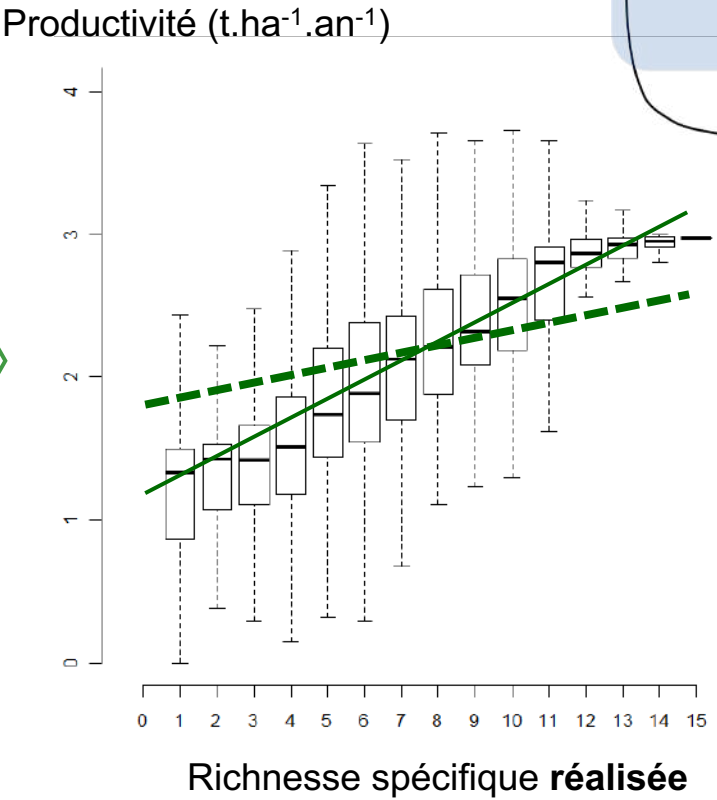
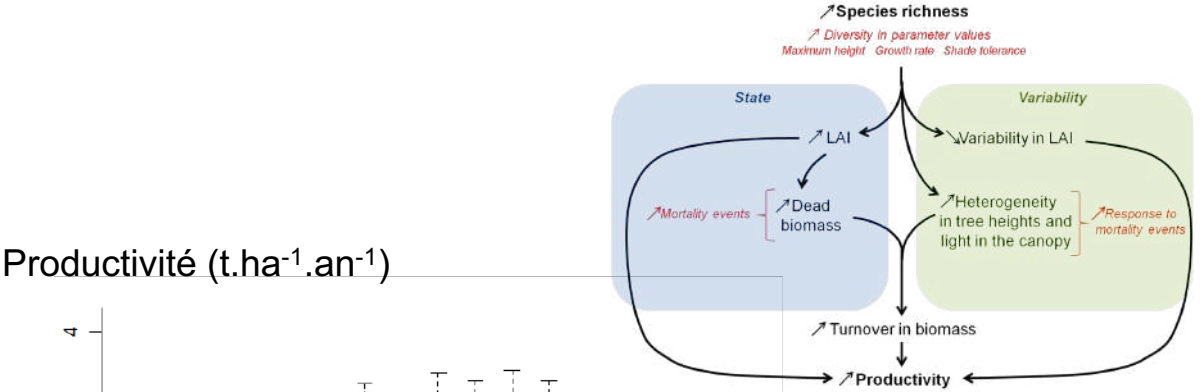
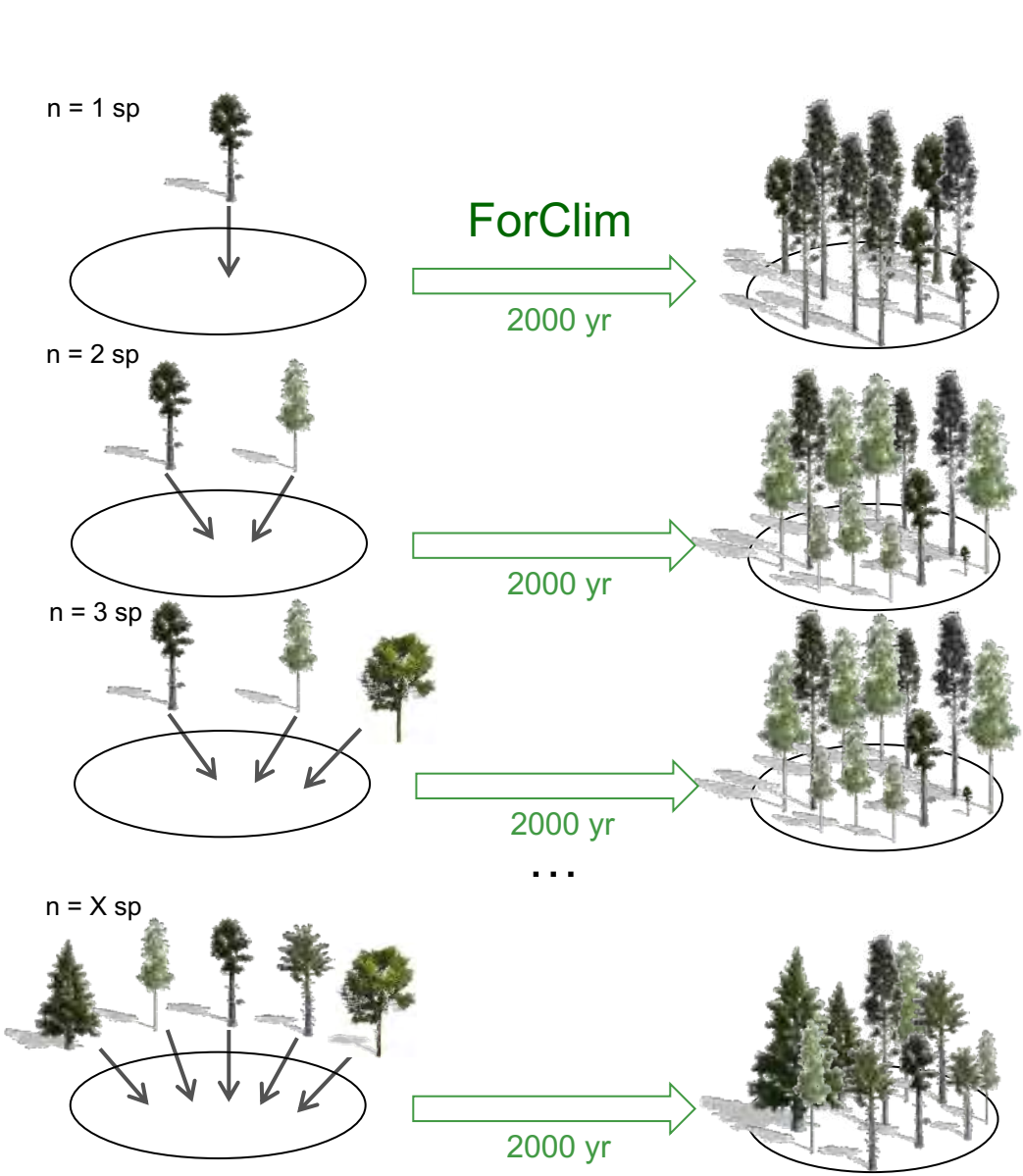
Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement



Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement



Effet de la diversité en espèces sur le fonctionnement



En fait l'histoire est plus complexe...

= l'effet à l'échelle peuplement est aussi lié au + grand nombre d'arbres en mélange

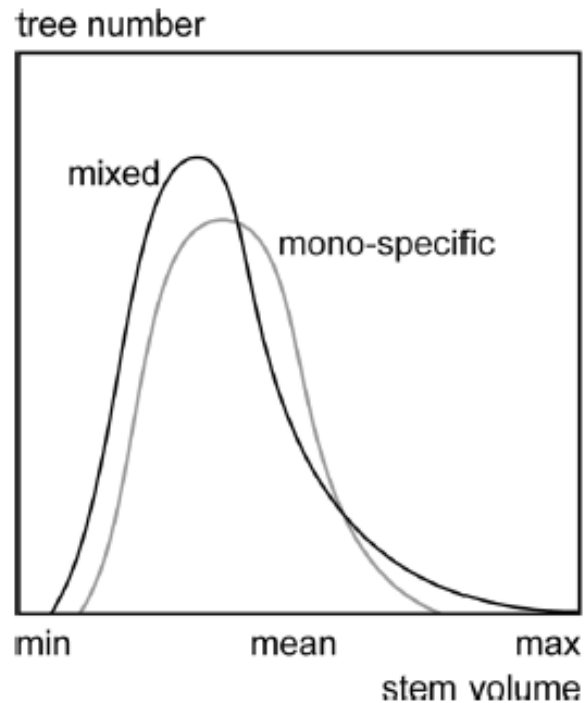
Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

**Densité max des peuplements mélangés + forte que les peuplements monosp. ?
Et si oui comment cela impacte la productivité ?**

Pretzsch & Schütze 2016 *Eur. J. For. Res.*

Pretzsch & Biber 2016 *Can. J. of For. Res.*



Question très peu explorée...

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

1. Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte que les peuplements monosp. ?

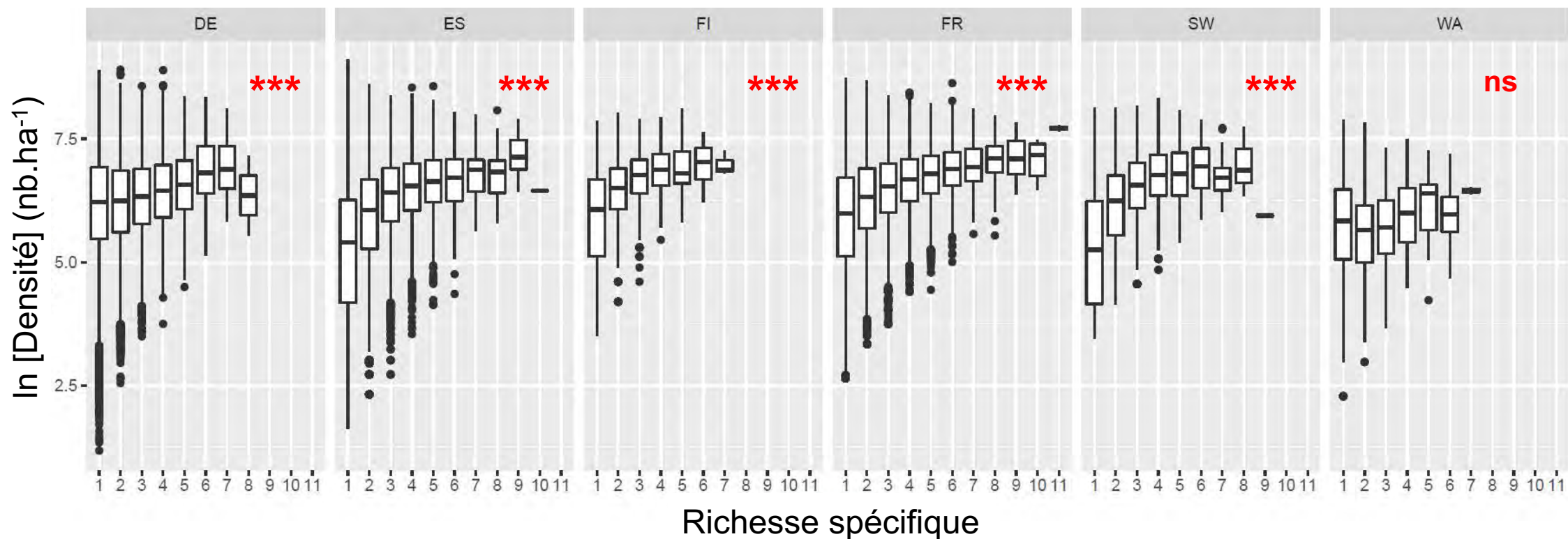
190,335 plots

2,367,776 arbres

Données FunDivEU

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

1. Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte que les peuplements monosp. ?



190,335 plots

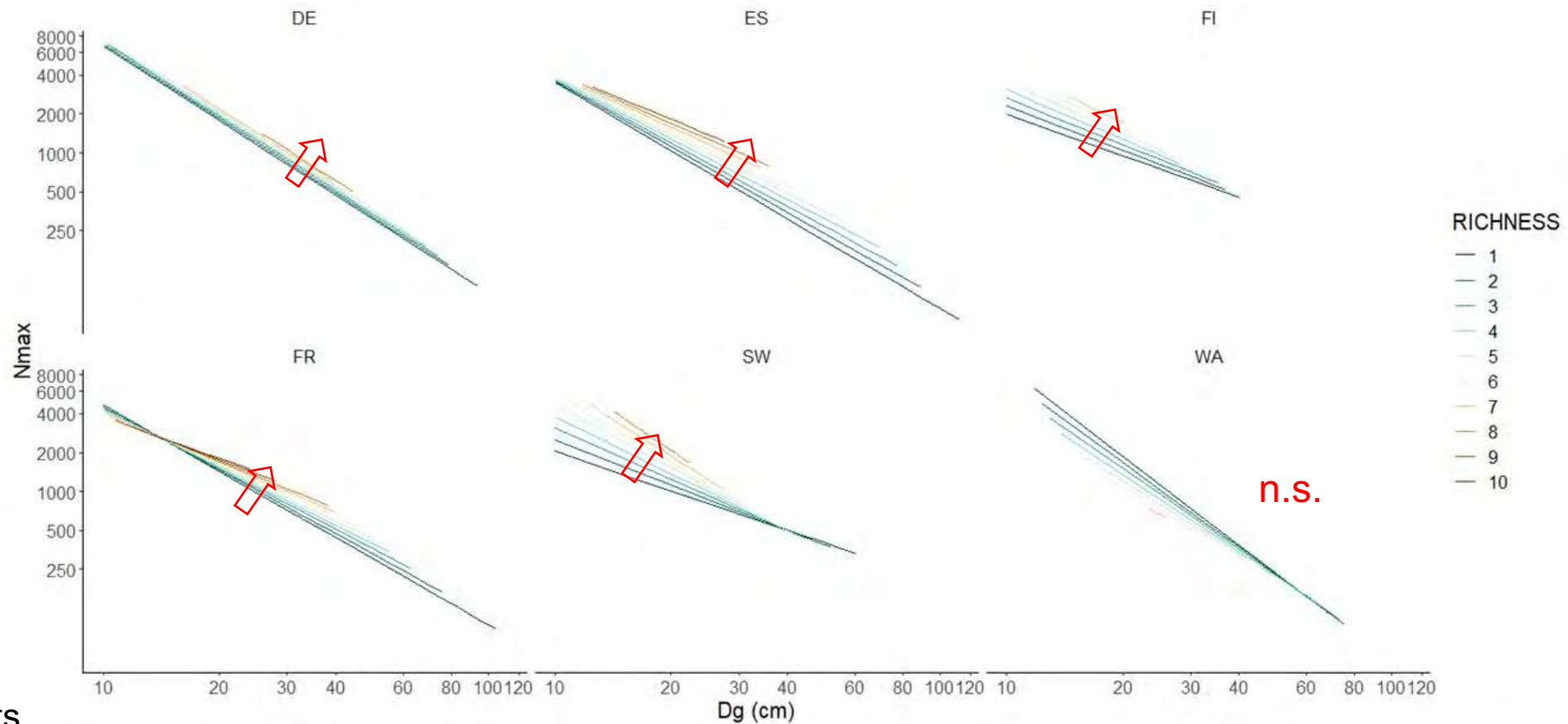
2,367,776 arbres

DE+ES+FI+FR+SW > 98% des données

Données FunDivEU

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

1. Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte que les peuplements monosp. ?



190,335 plots

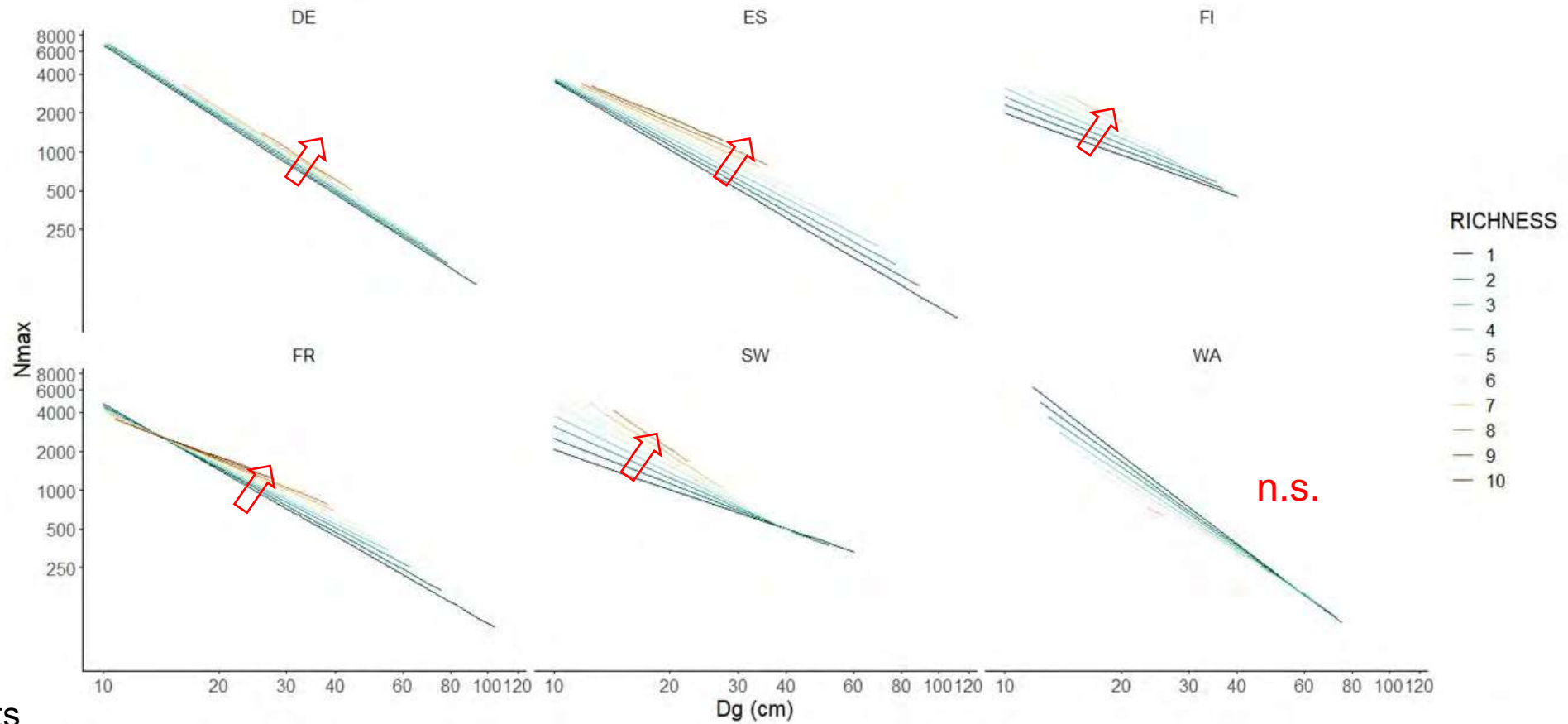
2,367,776 arbres

DE+ES+FI+FR+SW > 98% des données

Données FunDivEU

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

1. Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte que les peuplements monosp. ?



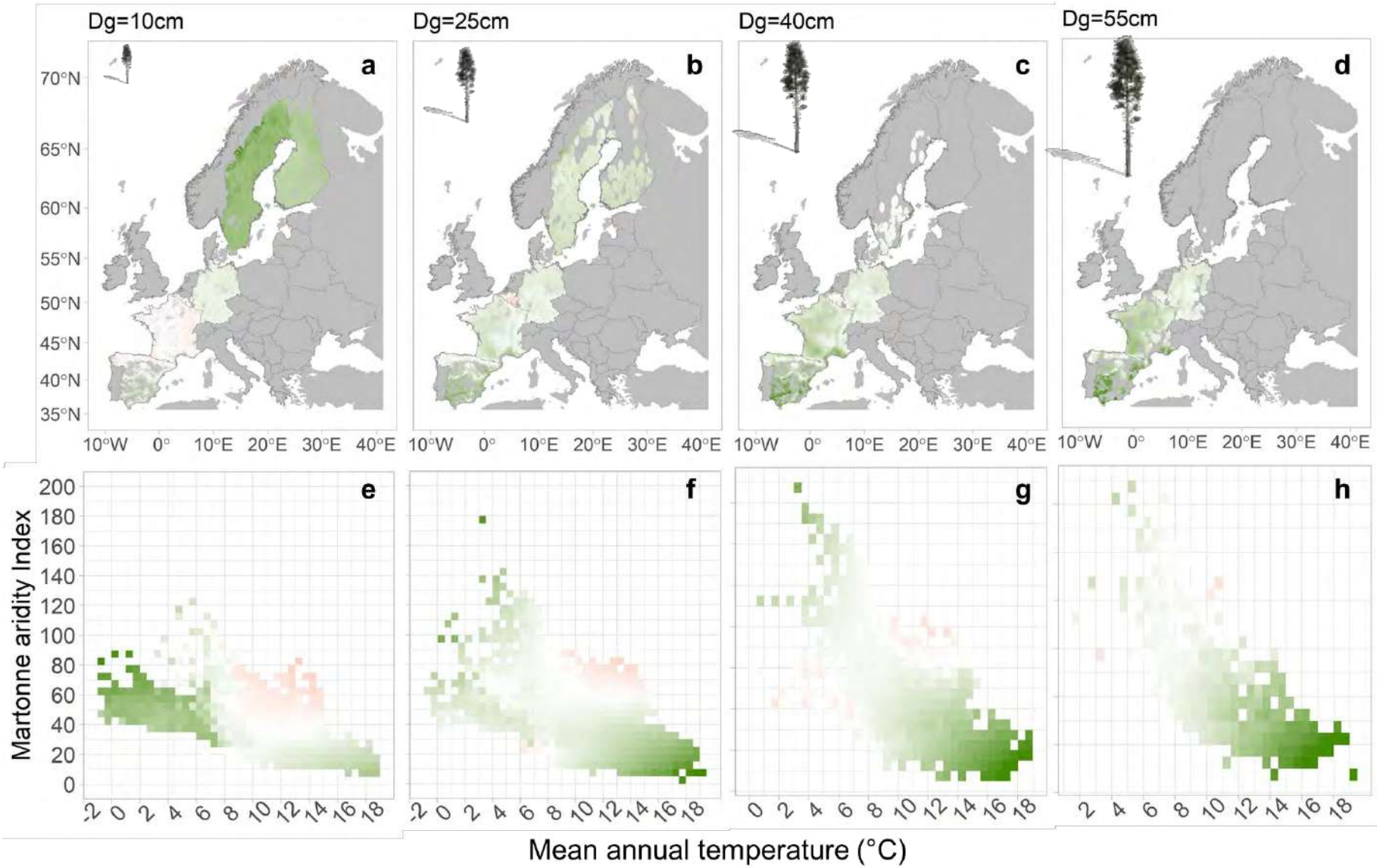
190,335 plots

2,367,776 arbres

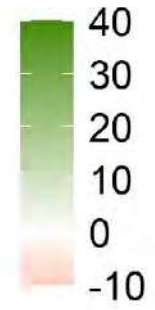
DE+ES+FI+FR+SW > 98% des données

Données FunDivEU

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

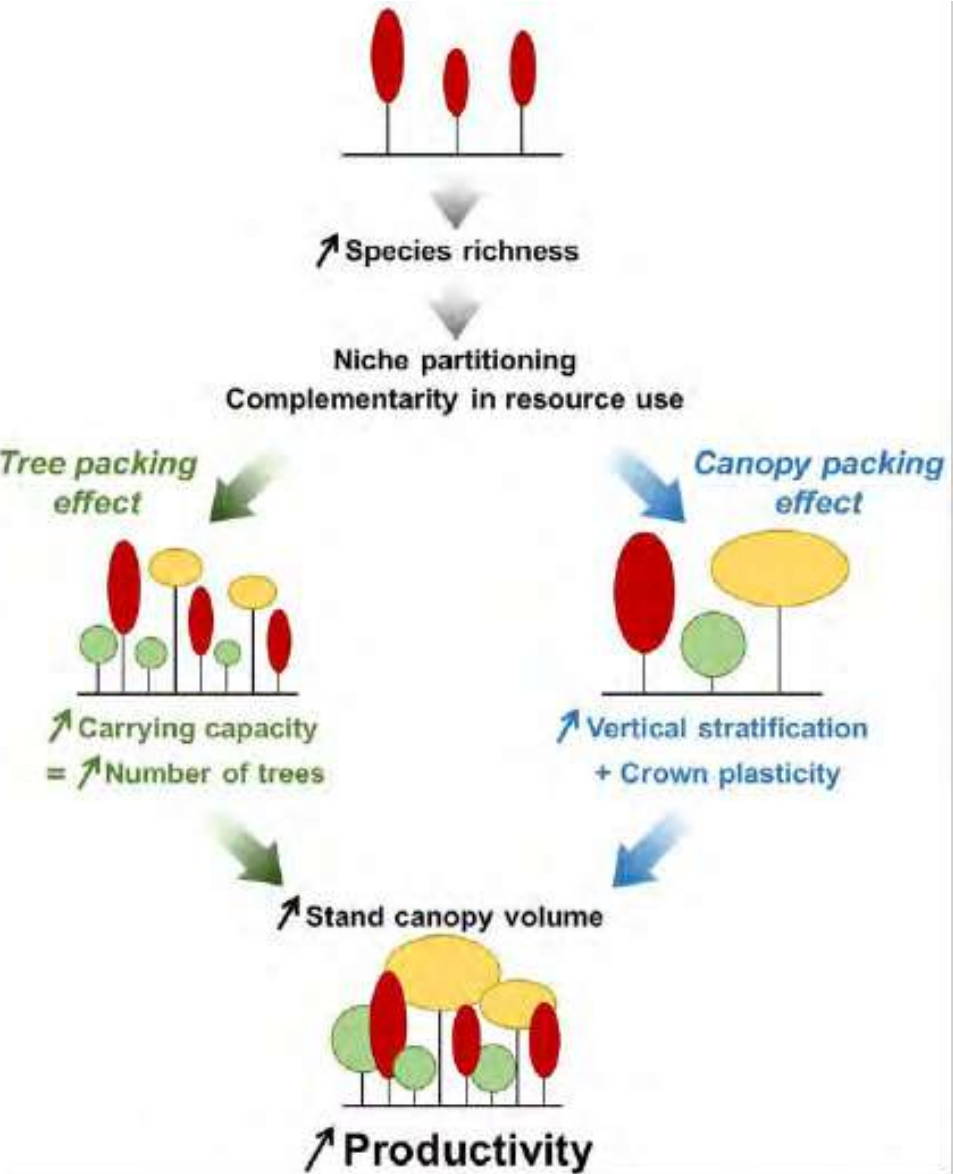


Mean effect of the addition of one species on max. stand density (in %)



Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

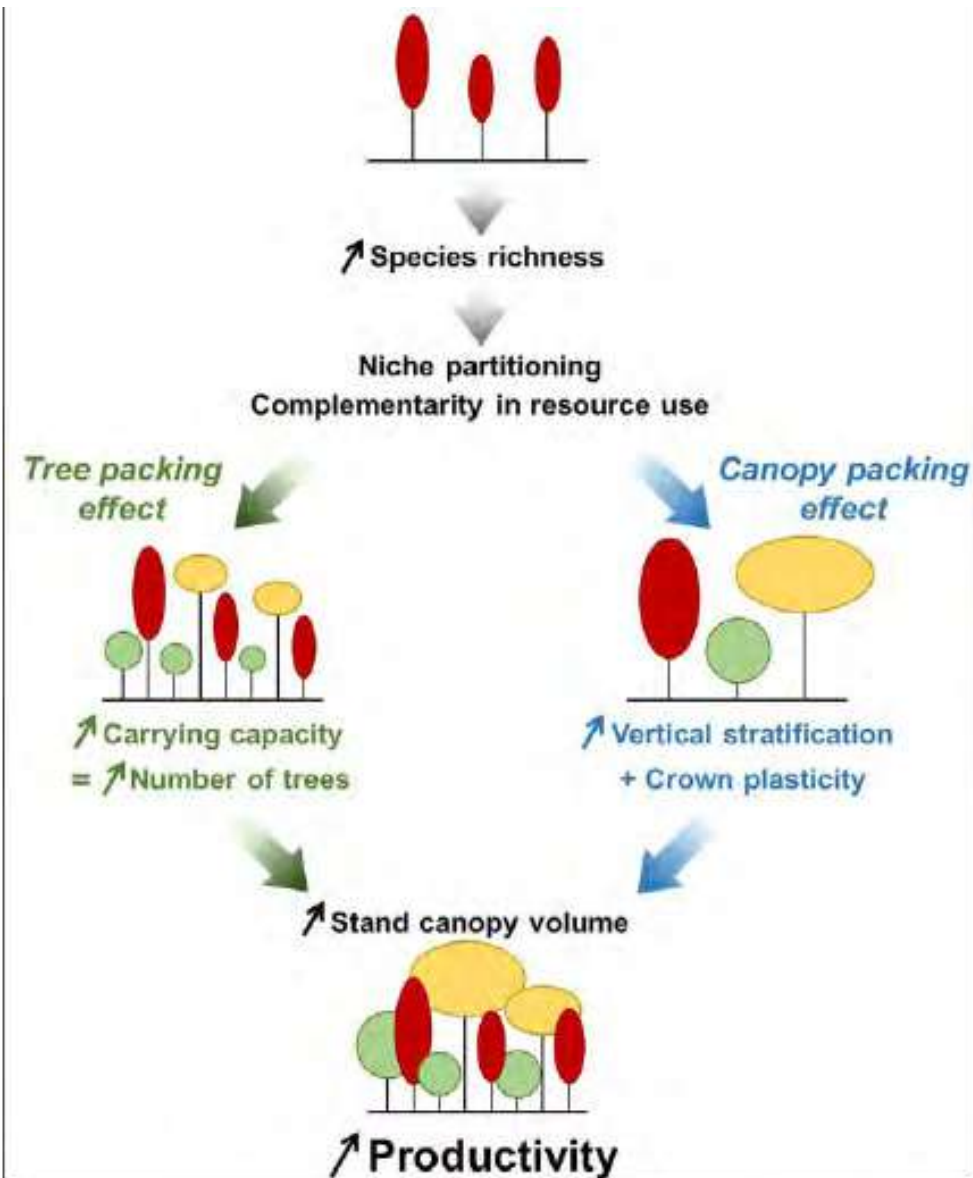
2. Est-ce que le 'tree packing' influence la productivité du peuplement ?

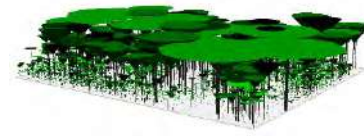


Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

2. Est-ce que le 'tree packing' influence la productivité du peuplement ?

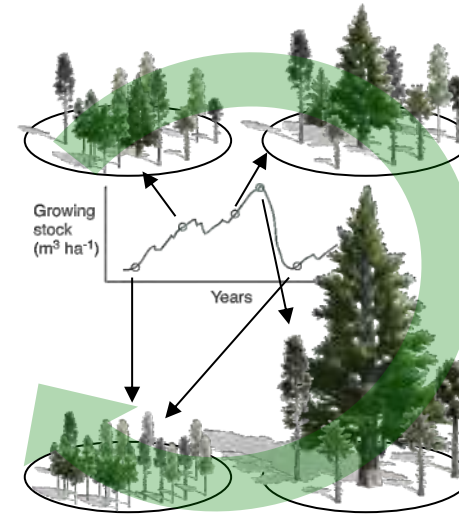
- Trop de facteurs confondants dans les données de terrain...
= *intérêt de l'approche par simulations*
- Mais les modèles de dynamique 'classiques' ont des limites
(cf Morin et al. 2011)
= *Besoin d'un modèle où la densité peut être contrôlée*





- **ForCEEPS : un modèle de trouées classique...**

- Dérivé de ForCLIM (Bugmann 1994, 1996)
- *Recrutement / Croissance / Mortalité*
- Croissance optimale limitée par réducteurs
Climat / Sol / Competition / Gestion



Morin et al.
http://capsis.cirad.fr/capsis/help_en/forceeps



Projet initié en 2013
avec François de Coligny

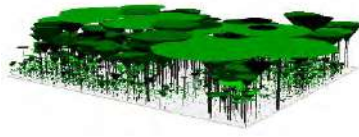
- **...mais où la densité peut être contrôlée**



- ✓ **Validé pour les principaux types de forêts EU**

- = 35 esp et des climats variés
- = Composition ET fonctionnement
- = Peuplements monospécifiques et mélangés

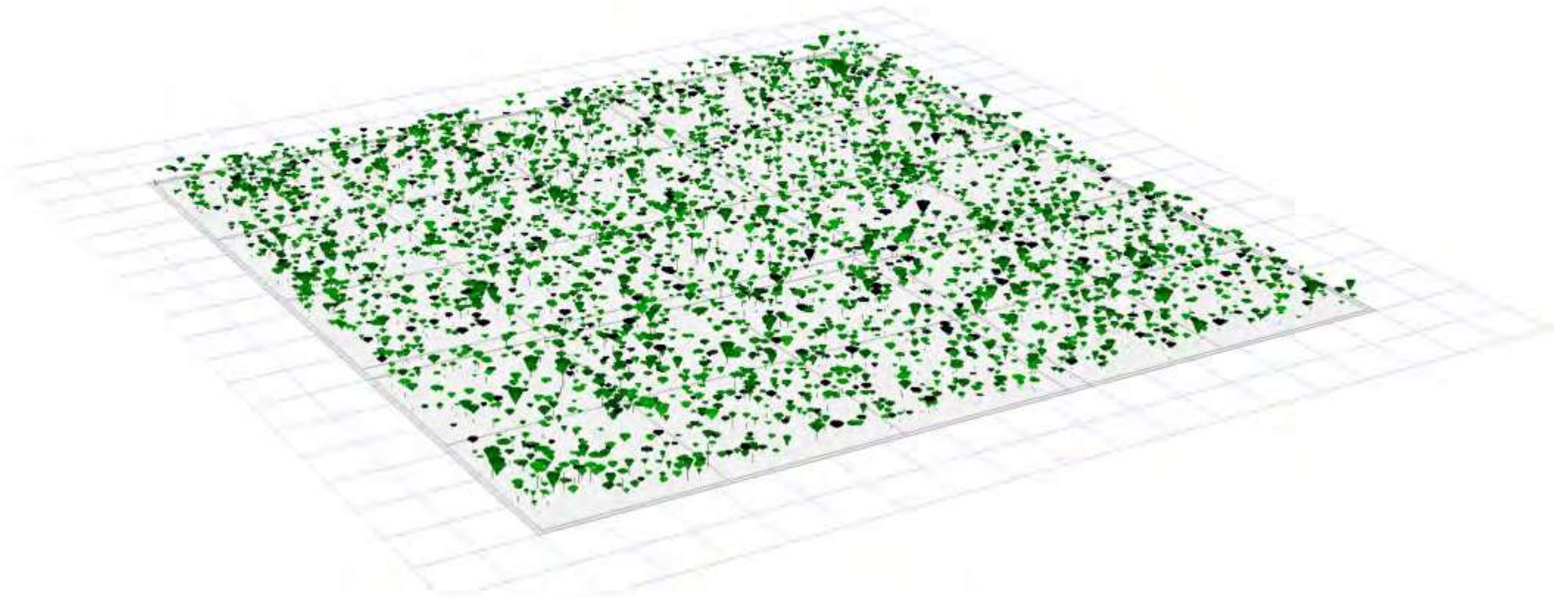
FORest Community Ecology and Ecosystem Processes model



Morin et al.

http://copsis.cirad.fr/copsis/help_en/forceps

eg. simulation sur 1000 years

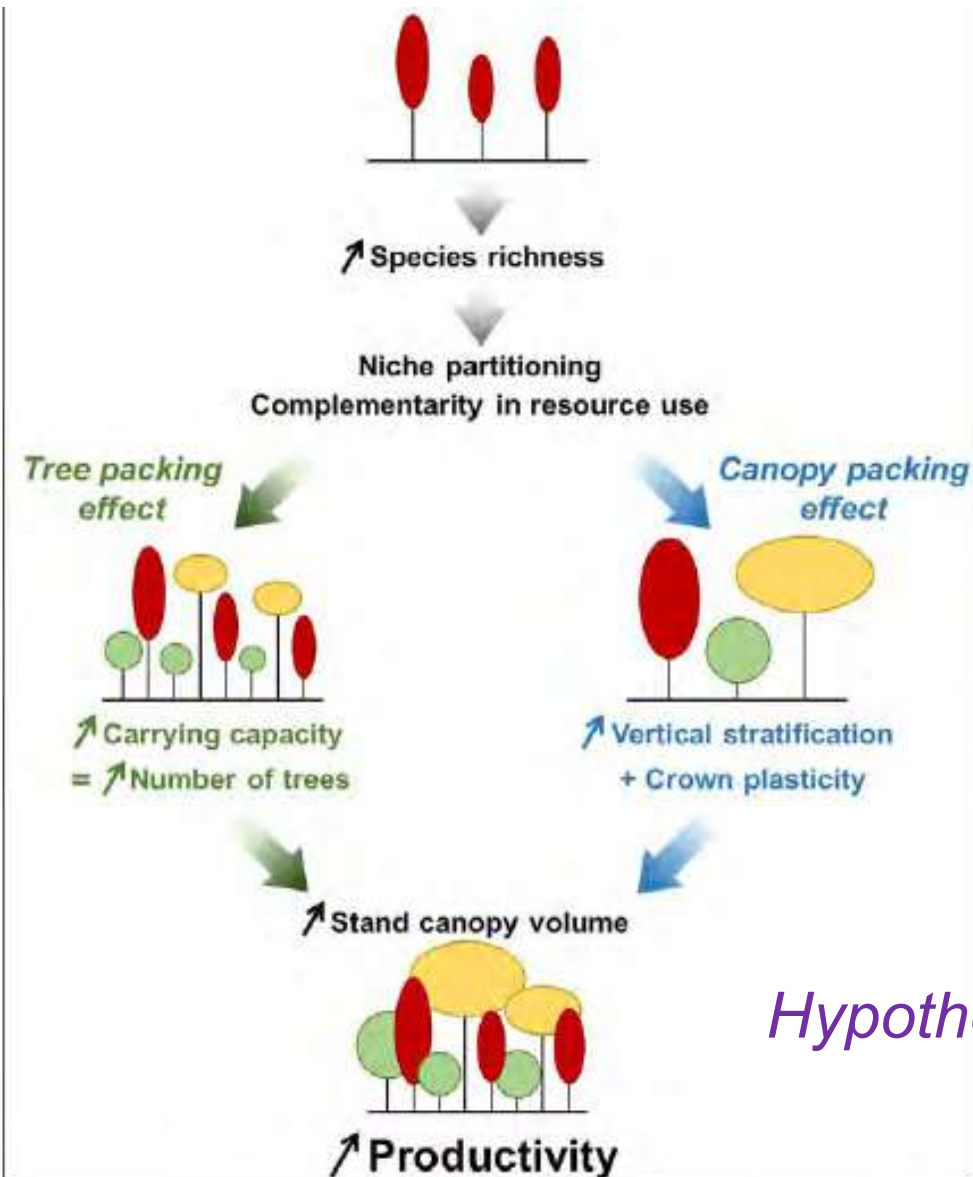


Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

2. Est-ce que le 'tree packing' influence la productivité du peuplement ?

- Trop de facteurs confondants dans les données de terrain...
= *intérêt de l'approche par simulations*
- Mais les modèles de dynamique 'classiques' ont des limites
(cf Morin et al. 2011)
= *Besoin d'un modèle où la densité peut être contrôlée*

Hypothèse : effet diversité – fort quand la densité est contrôlée



Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

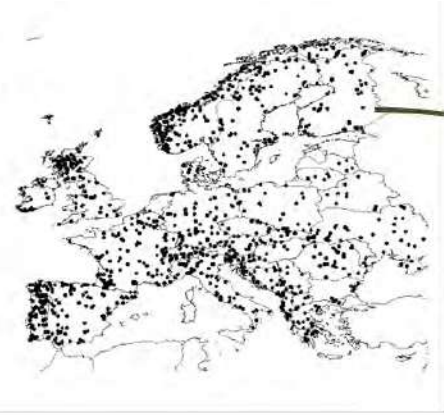
Tester l'effet du 'tree packing' via des simulations

= Simuler la relation SR-Prod en contrôlant ou pas pour la densité

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

Tester l'effet du 'tree packing' via des simulations

= Simuler la relation SR-Prod en contrôlant ou pas pour la densité



for each site

1015 sites

2,307 combinaisons par site

Forced stand density to 500 trees.ha⁻¹

Forced stand density to 1500 trees.ha⁻¹

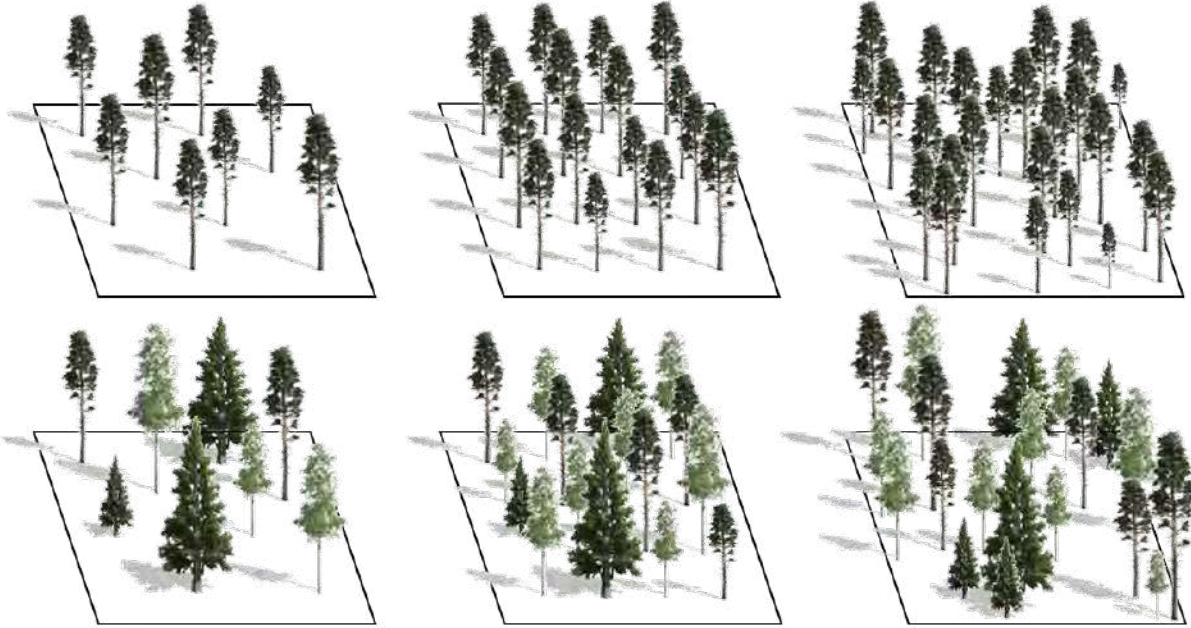
Not-controlled stand density

$N_{species} = 1$

$N_{species} = 2$

...

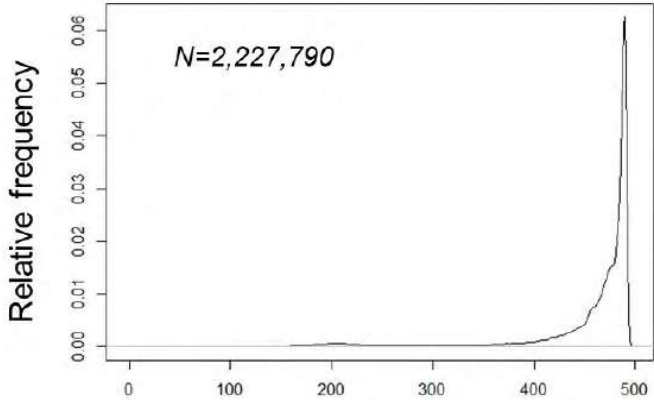
$N_{species} = 22$



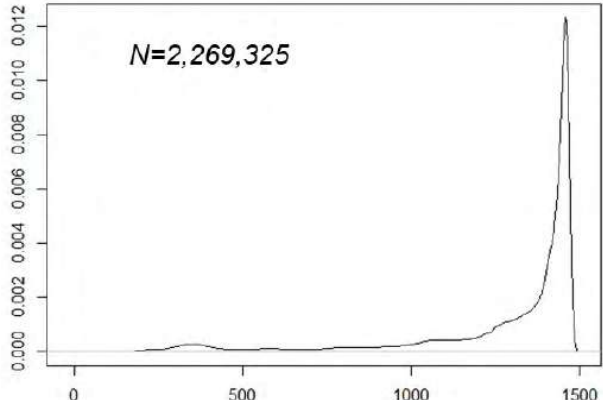
= 7,024,815 simulations

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

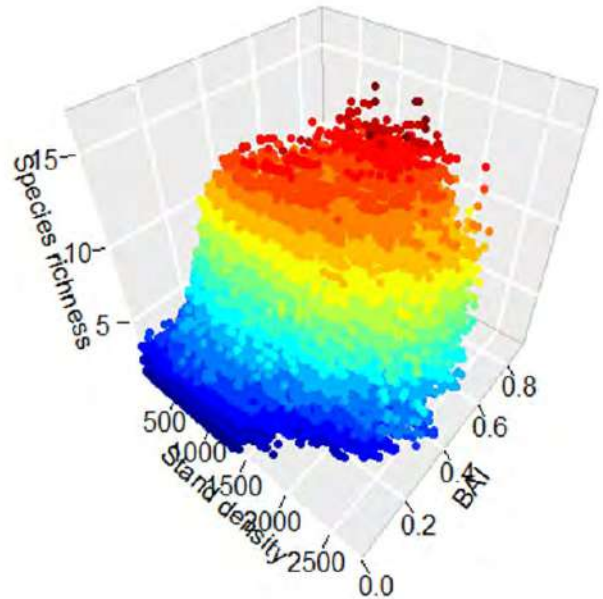
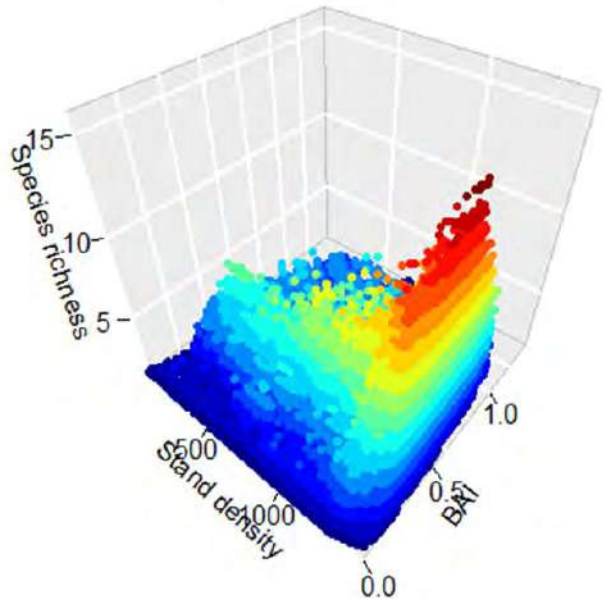
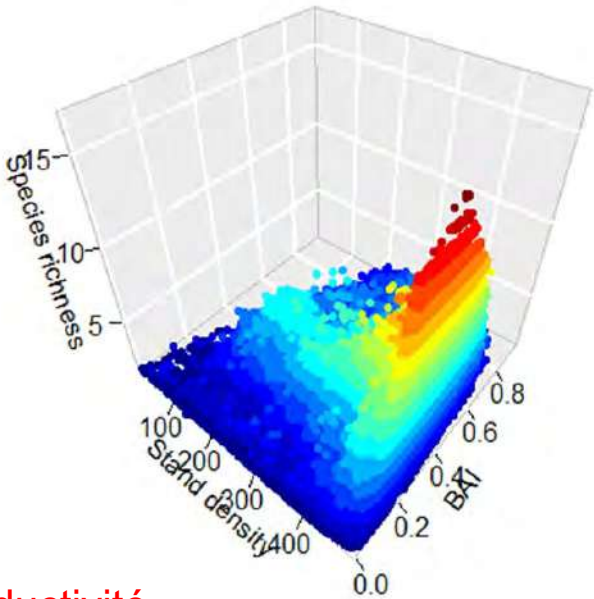
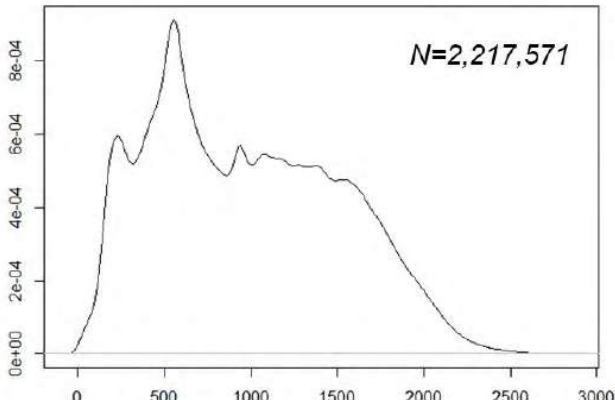
Densité forcée à 500 trees.ha⁻¹



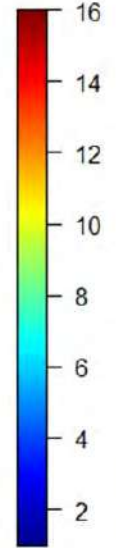
Densité forcée à 1500 trees.ha⁻¹



Densité libre



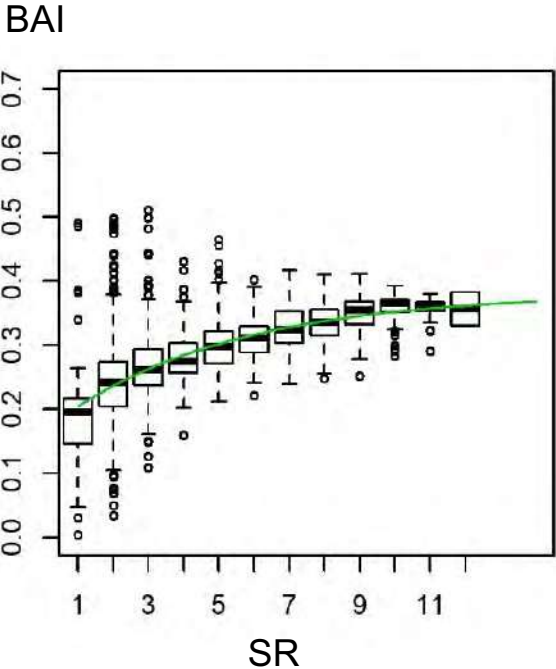
Species Richness



BAI \approx Productivité

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

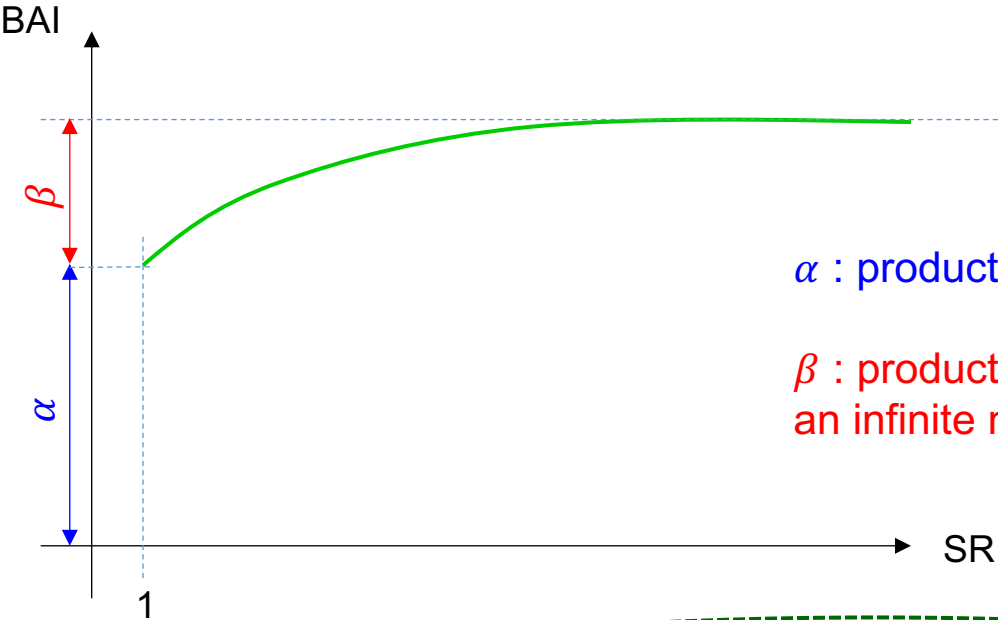
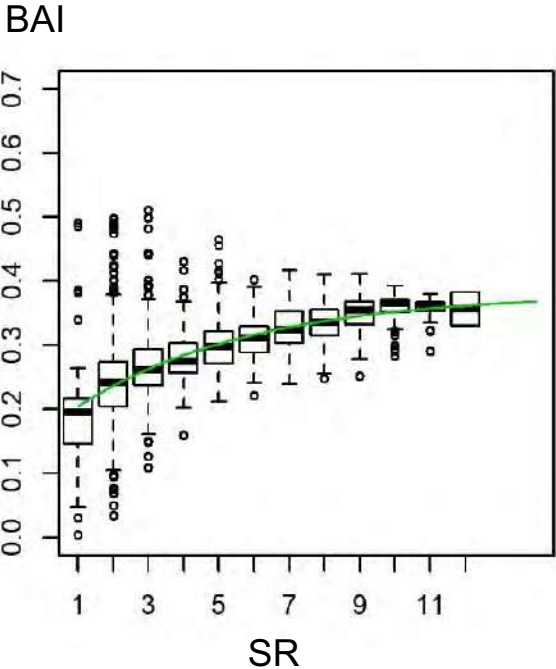
Métrique pour quantifier et comparer facilement les relations SR-Prod



Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

Métrique pour quantifier et comparer facilement les relations SR-Prod

$$BAI = \alpha \times \left(1 - \beta \times \exp^{\ln\left(\frac{1}{2}\right) \times \frac{(SR-1)}{(\gamma-1)}} \right)$$

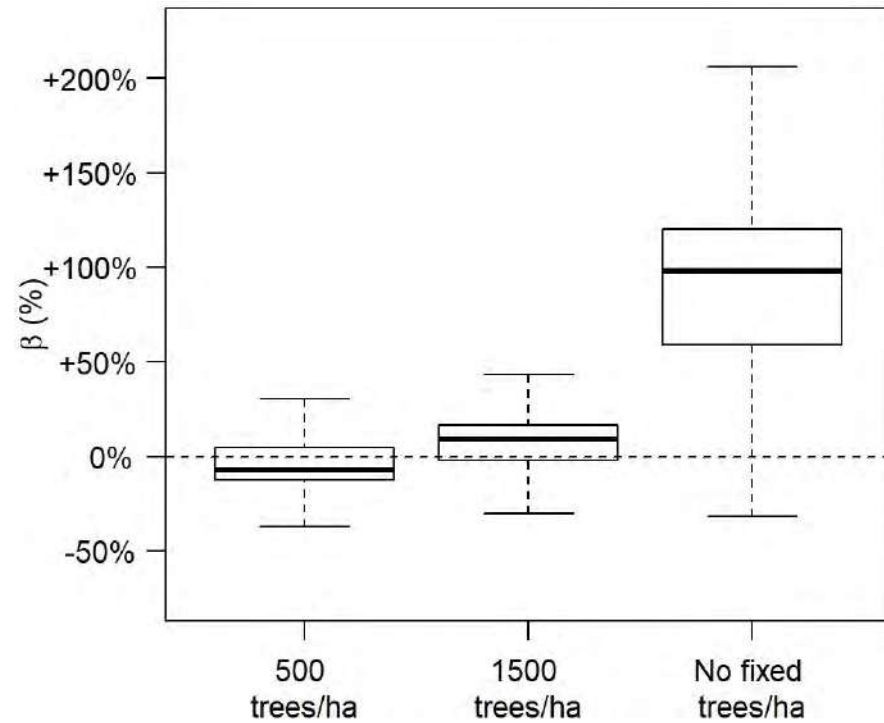


α : productivity value for monocultures

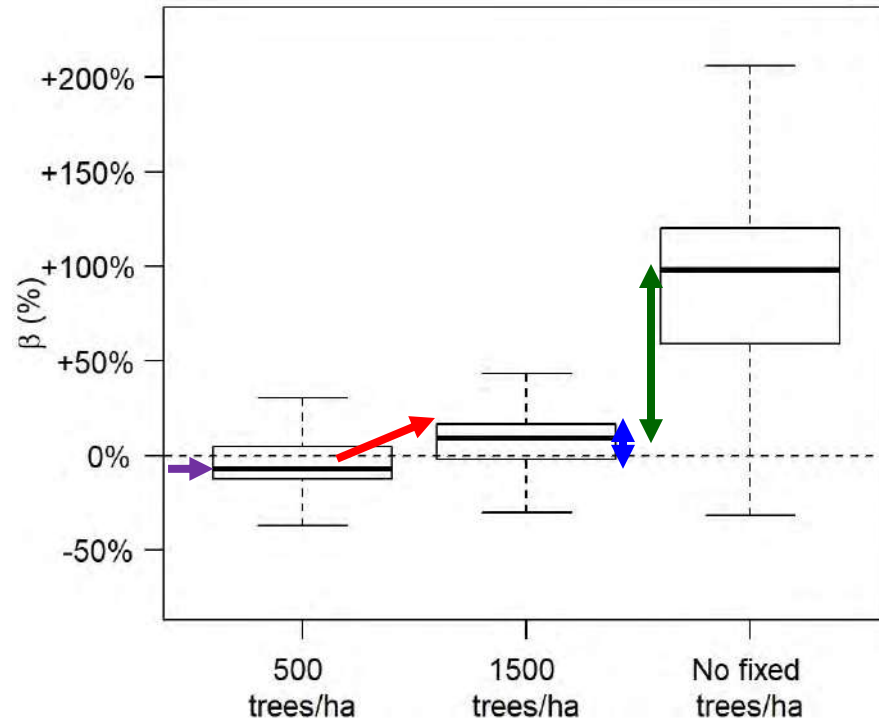
β : productivity benefit or disadvantage of having an infinite nb. of species compared to monocultures

Si $\beta > 0 \Rightarrow$ Relation SR-Prod est positive
Comparer les valeurs de β entre scénarios de densité

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement



Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement



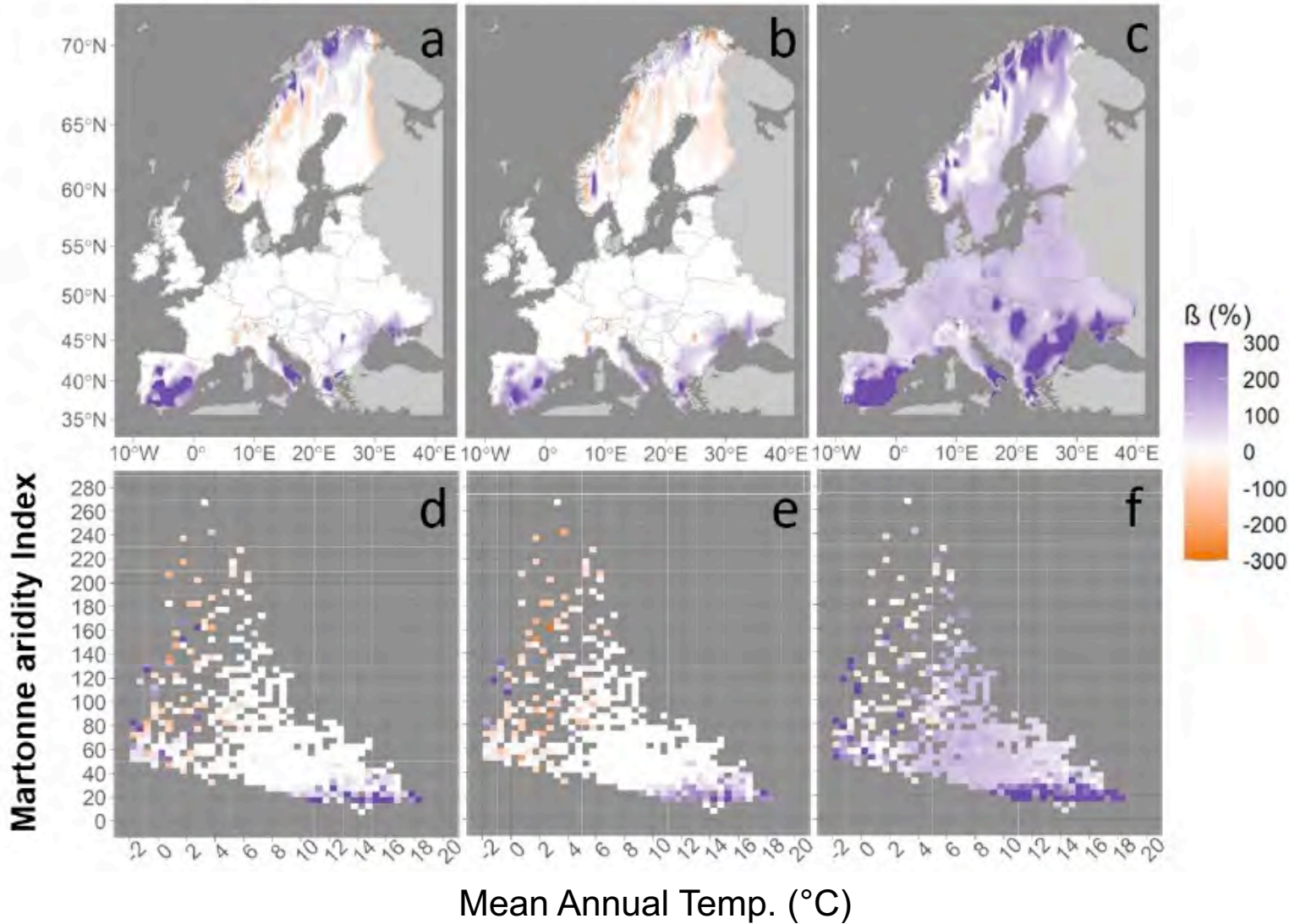
- Faible effet de SR quand la densité est faible (= peu d'interactions entre les arbres)
- Effet SR augmente avec la densité
- Taille d'effet cohérente avec celle observée en moyenne dans les expérimentations = 'canopy packing'
- Effet du 'tree packing' est fort sur le lien entre SR et productivité

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

Forced stand density to 500 trees.ha⁻¹

Forced stand density to 1500 trees.ha⁻¹

Not-controlled stand density



- Effet du 'canopy packing' + fort dans les environnements difficiles
- Importance de l'effet du 'tree packing'
- Effet + fort dans les env. difficiles

Effet de la diversité + structure sur le fonctionnement

L'effet du 'tree packing' = un rôle négligé de l'effet de la richesse spécifique sur la productivité en forêt ?

Reconsidérer les résultats des expérimentations ?
= où la densité est quasiment toujours contrôlée




...mais aussi les études BEF empiriques
= où la densité est le plus souvent une covariable pour standardiser les comparaisons entre placettes

Reconsidérer le rôle des processus de coexistence dans les relations BEF

cf Cordonnier et al. 2018 *Ann. For. Sci.*

Autres co-bénéfices du mélange liés au 'tree packing' = complexité de structure
impact sur la biodiversité associée (?)

Perspectives

- Aller plus loin dans les interactions entre diversité en espèces et structure des peuplements
...en particulier pour développer des pistes de gestion
- Simuler l'adaptation au changement climatique en lien avec les effets diversité et structure
Thèse Louis Devresse
- Améliorer et tester les modèles avec les données Lidar
Thèse Camille Rouet
- Couplage de modèles pour tester l'effet de scénarios de gestion sur la provision de services en contexte de CC
...en particulier l'échelle pertinente du mélange (pied à pied vs. massif)
Thèse Tanguy Postic + projet FISSA 

Conclusions

Valider la compréhension d'un mécanisme

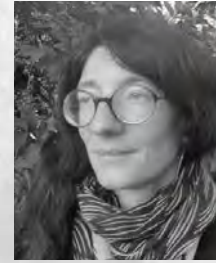
Prédire des variables dans des conditions nouvelles

Etablir de nouvelles hypothèses

**Les modèles sont des outils-clés pour tester des questions en écologie forestière
et explorer des solutions pour les défis en cours et à venir**



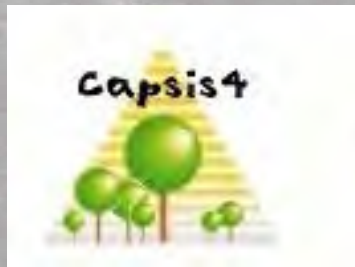
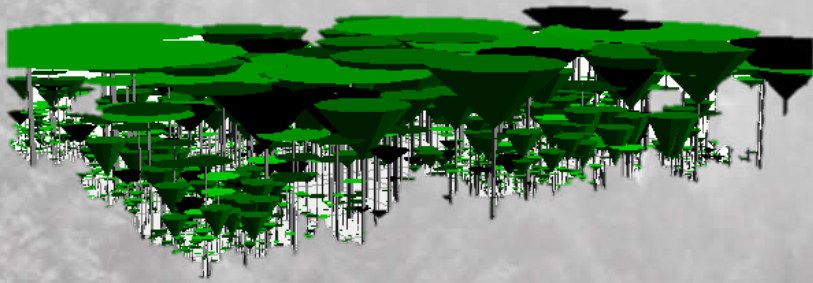
Patrick Vallet



Maude Toigo



Joannès Guillemot



Merci !

Hervé Jactel
Lorenz Fahse
Harald Bugmann
Mickaël Chauvet
Marion Jourdan
Raül Garcia-Valdés
Marianne Bernard

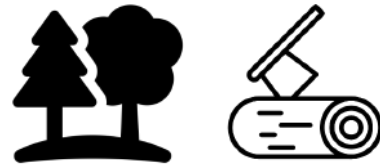
François de Coligny

La forêt entre vulnérabilité et rôle d'atténuation du CC

Forêts fortement impactées



Forêts = puits de carbone ⇒ levier d'action pour l'atténuation

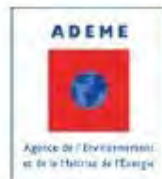


Intense débat sur les mesures d'adaptation

BILAN CARBONE DE LA RESSOURCE FORESTIERE FRANCAISE

Projections du puits de carbone de la filière forêt-bois française et incertitude sur ses déterminants

Rapport final
Projet BiCaFF



Rapport Valade et al. 2017

ACTUALITÉ

LA FORÊT ET LE BOIS, UN ENJEU MAJEUR POUR ATTÉNUER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Plusieurs programmes de recherche de l'ADEME ont contribué à développer des connaissances sur l'impact climatique des stratégies de gestion forestière et du développement des usages du bois en substitution aux ressources fossiles.

Intensifier la gestion ?

= ↗ coupes + plantations

OU

Miser sur la résilience ?

**= mélanges d'espèces
+ laisser vieillir**

QUEL RÔLE POUR LES FORÊTS ET LA FILIÈRE FORÊT-BOIS FRANÇAISES
DANS L'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

UNE ÉTUDE DES FREINS ET LEVIERS FORESTIERS À L'HORIZON 2050

RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR L'INRA ET L'IGN
POUR LE MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION - JUIN 2017

Rapport Le Roux et al. 2017

**LAISSER VIEILLIR
LES ARBRES :**
UNE STRATÉGIE
EFFICACE POUR LE CLIMAT

SYNTHÈSE DU RAPPORT

"GESTION FORESTIÈRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE :
UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA STRATÉGIE NATIONALE D'ATTÉNUATION"

Objectif principal

Estimer les impacts de **scénarios de gestion** contrastés (avec CC)
sur l'ensemble des **contributions** forestières (C mais pas seulement)

Questions - *Hypothèses*

Quelle stratégie de gestion permet de maximiser la résilience au CC,
la séquestration de C et les autres services ?

Compromis entre services ? **Importance SHS**

Importance de la diversité pour maximiser la multifonctionnalité ?

Land sparing vs. land sharing?

Importance de l'échelle ? Nationale vs. territoires

Originalité méthodologiques du projet

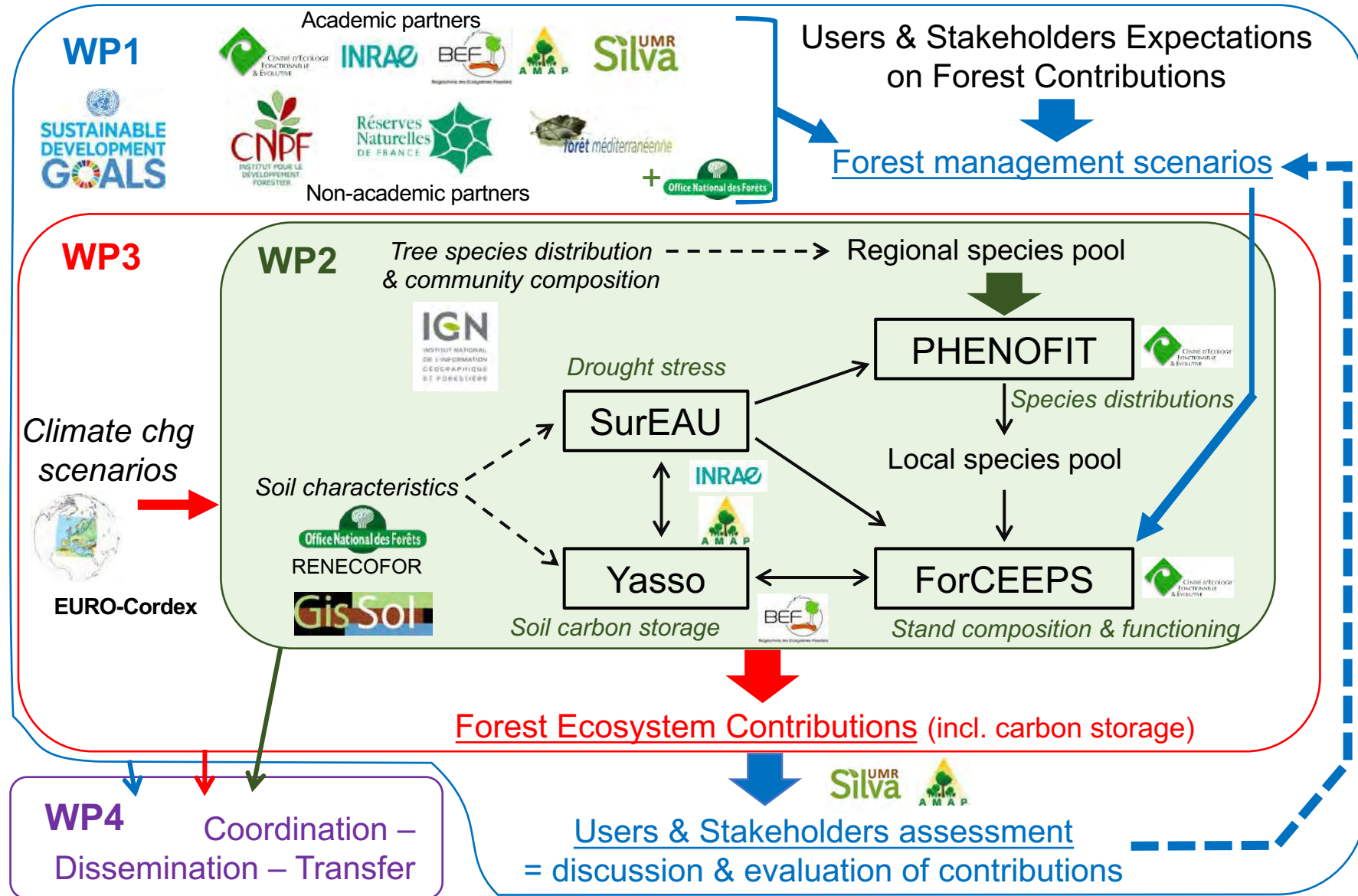
Pas d'outil prédictif générique

= besoin de développer un outil intégratif (+ compartiment sol !)

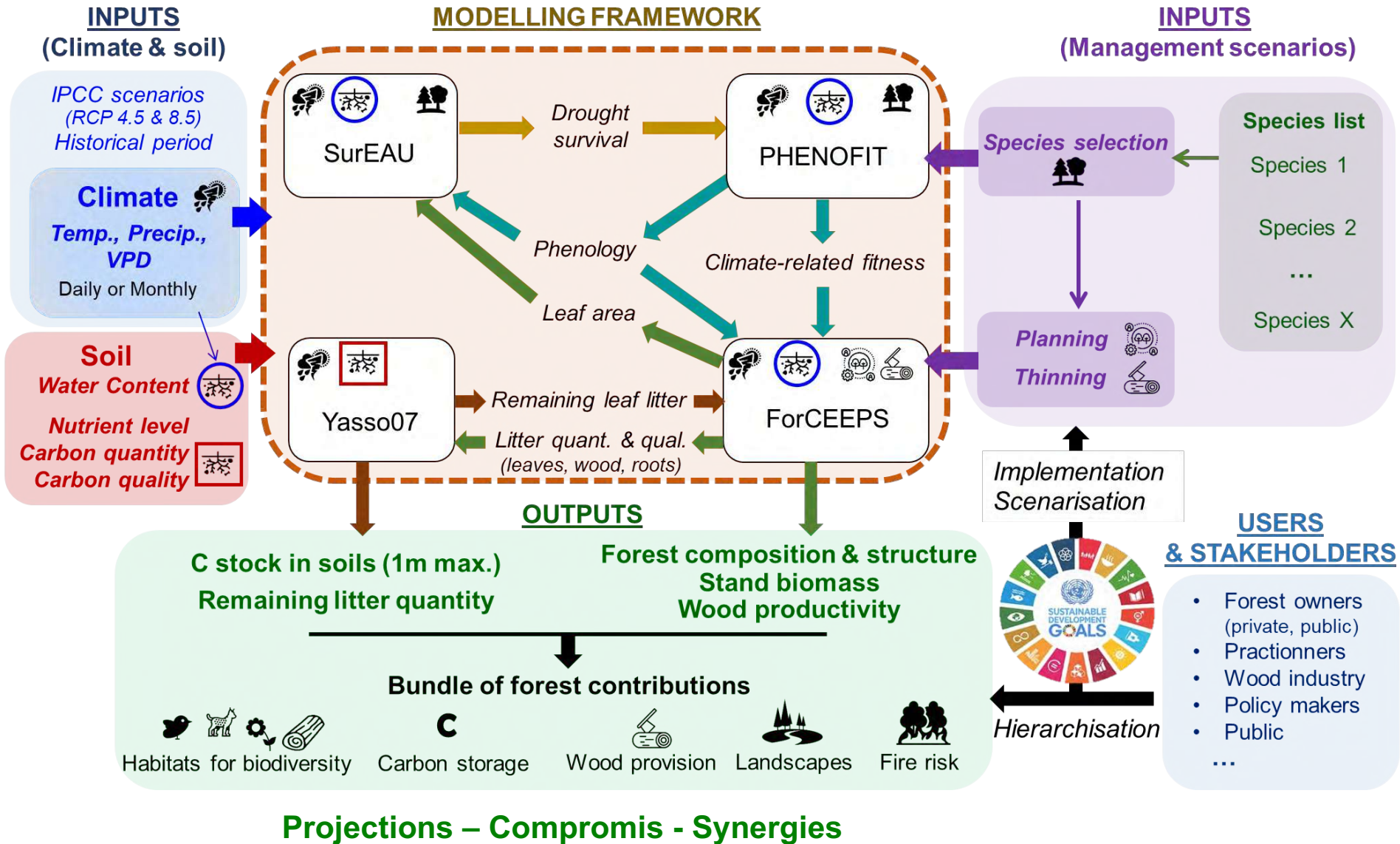
Diversité des contributions (ODD)

= besoin d'une approche multi- et trans-disciplinaire

FISSA



FISSA



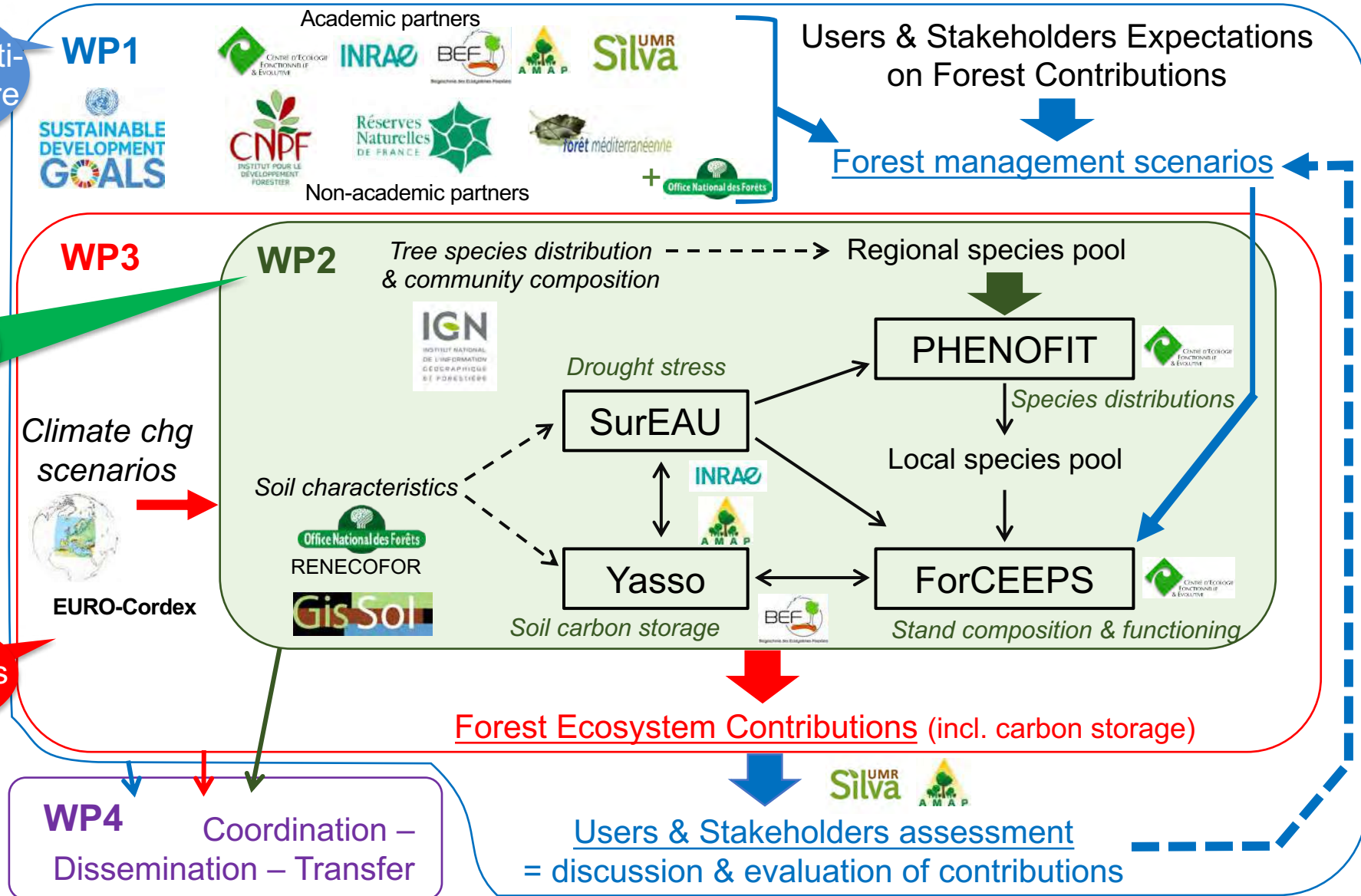
Projections – Compromis - Synergies

FISSA

Une approche multi-et trans-disciplinaire

Un outil intégratif et mécaniste

3 échelles spatiales



FISSA = 3 échelles spatiales complémentaires

Echelle nationale

Données IGN ~ 70000 placettes



Test de l'effet de politiques publiques sur les contributions

Echelle 'territoire'

3 sites
Morvan – Luberon – Ariège



Simuler différents scénarios de gestion à fine échelle pour considérer enjeux régionaux en interaction avec acteurs locaux

Echelle massif

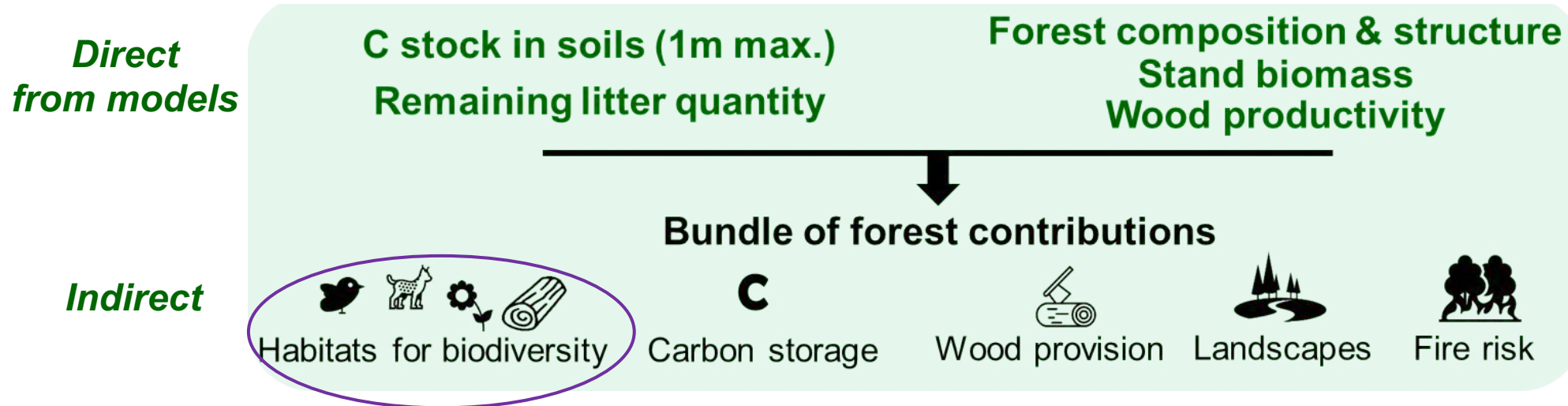
~10 massifs



Simuler différents scénarios de gestion et climat

Analyses SHS

Quelles contributions pourront être simulées ?



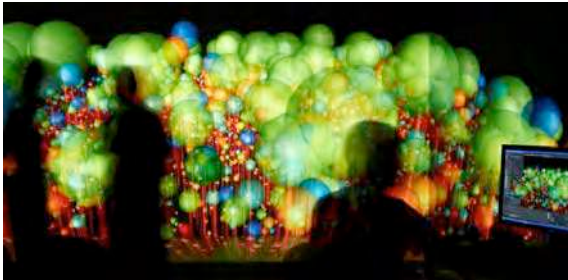
Inférer des niveaux de biodiversité (au moins pour certains groupes)
=> collab. F. Laroche & M. Roy

Plus généralement, nécessité de bien évaluer quelles contributions sont accessibles ou extrapolables, et celles qui ne le sont pas

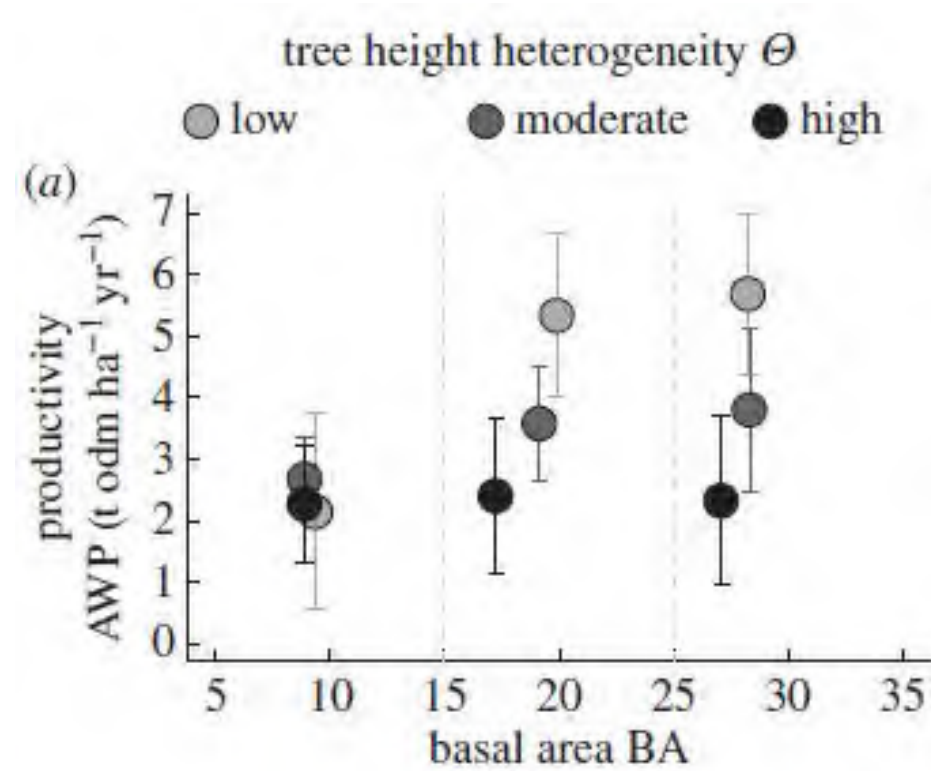
Réflexion/mise en oeuvre en 2024

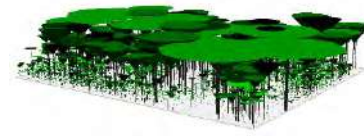
Effet de la diversité sur le fonctionnement

Diversité en structure



ForMind model



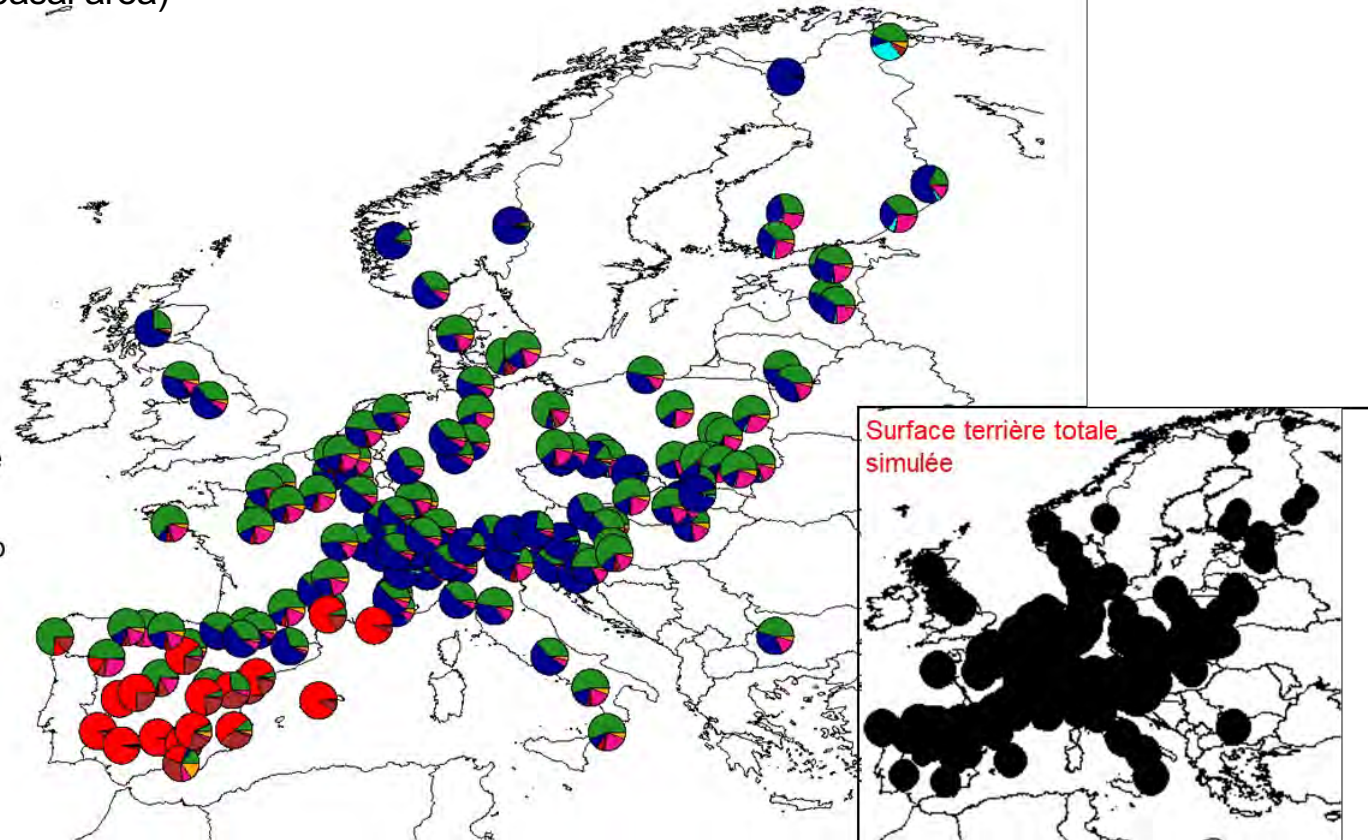


Validation *via* la végétation naturelle potentielle = validation qualitative

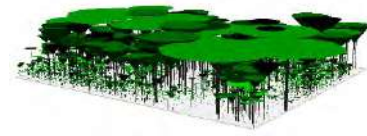


Simulations après 2000 ans
(in % of basal area)

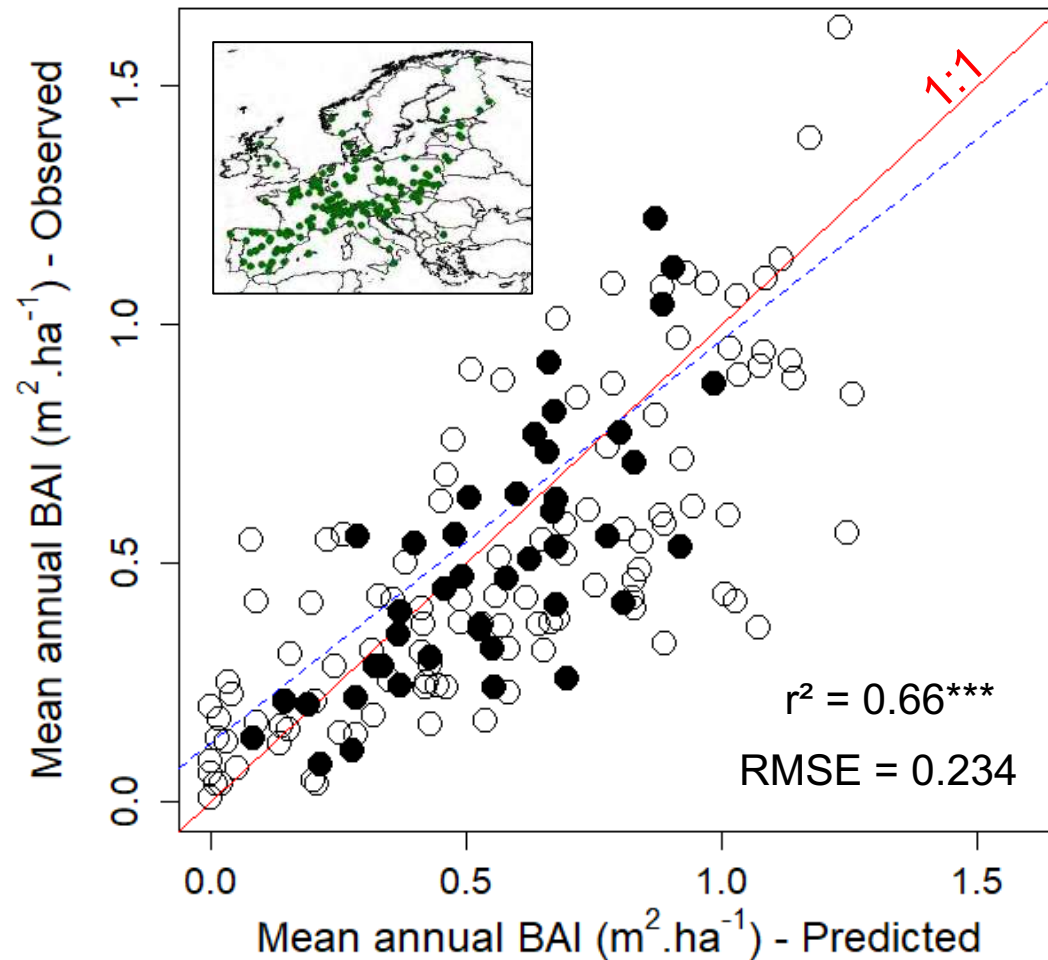
- Feuillus Dominants
- Sapin + Epicéa
- Pins
- Feuillus de montagne
- Conifères de montagne
- Chêne vert + Pin d'Alep
- Tilleuls



148 ICP sites + Puéchabon + Font Blanche



Validation *via* productivité annuelle = validation **quantitative**



- Peuplements mélangés
- Peuplements monospécifiques

✓ **Validé pour les principaux types de forêts EU**

- = 35 esp et des climats variés
- = Composition ET fonctionnement
- = Peuplements monospécifiques et mélangés



2. 'Tree packing' et productivité du peuplement

Mieux quantifier les rôles relatifs du 'canopy packing' et du 'tree packing'

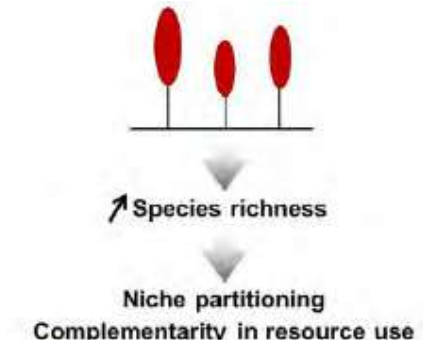
SEM avec simulations avec densité libre

2. 'Tree packing' et productivité du peuplement

Mieux quantifier les rôles relatifs du 'canopy packing' et du 'tree packing'

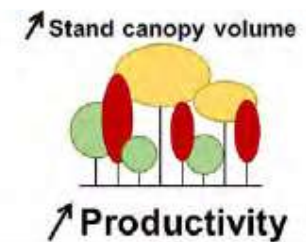
SEM avec simulations avec densité libre

SR initial
0.71 ↓
SR realized



$n = 2,217,571$

LAI
0.39 ↓
BAI



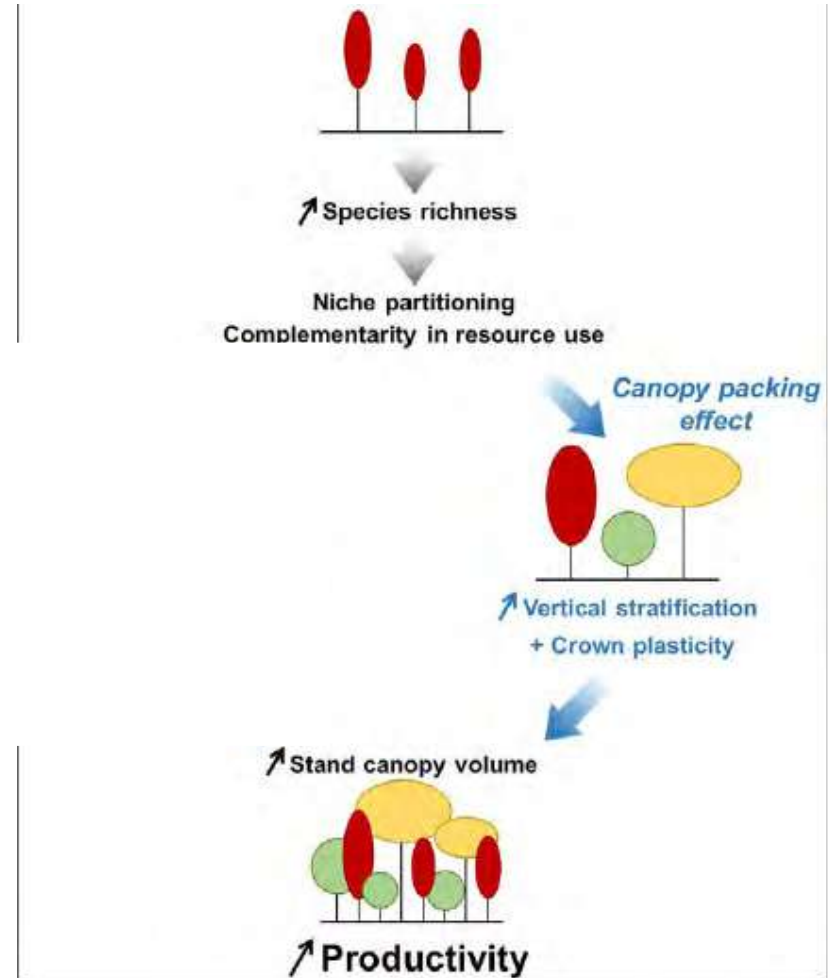
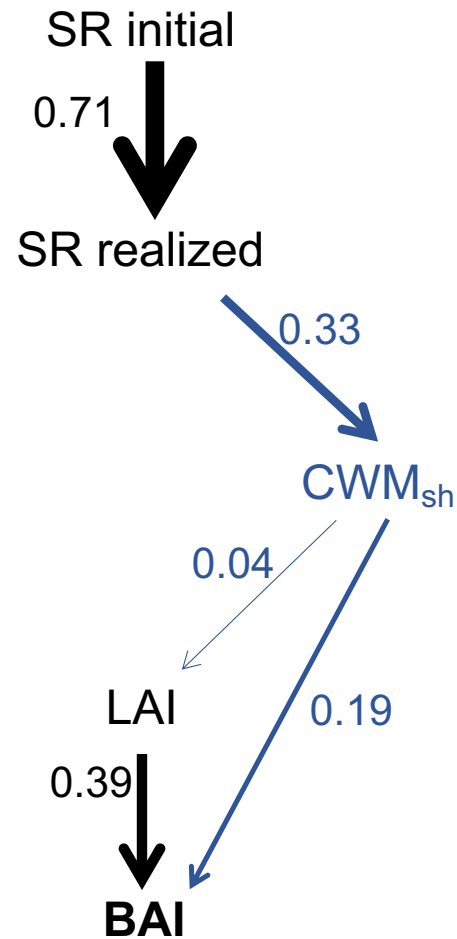
2. 'Tree packing' et productivité du peuplement

Mieux quantifier les rôles relatifs du 'canopy packing' et du 'tree packing'

SEM avec simulations avec densité libre

$n = 2,217,571$
CFI = 0.923
SRMR = 0.062

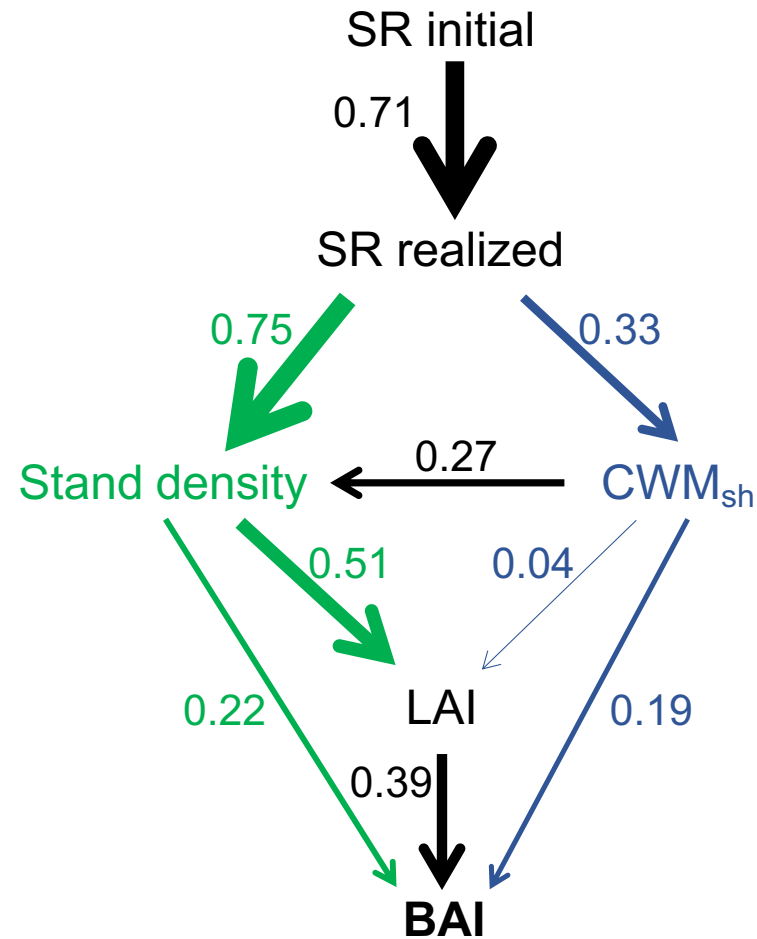
== CPE = 0.005



2. 'Tree packing' et productivité du peuplement

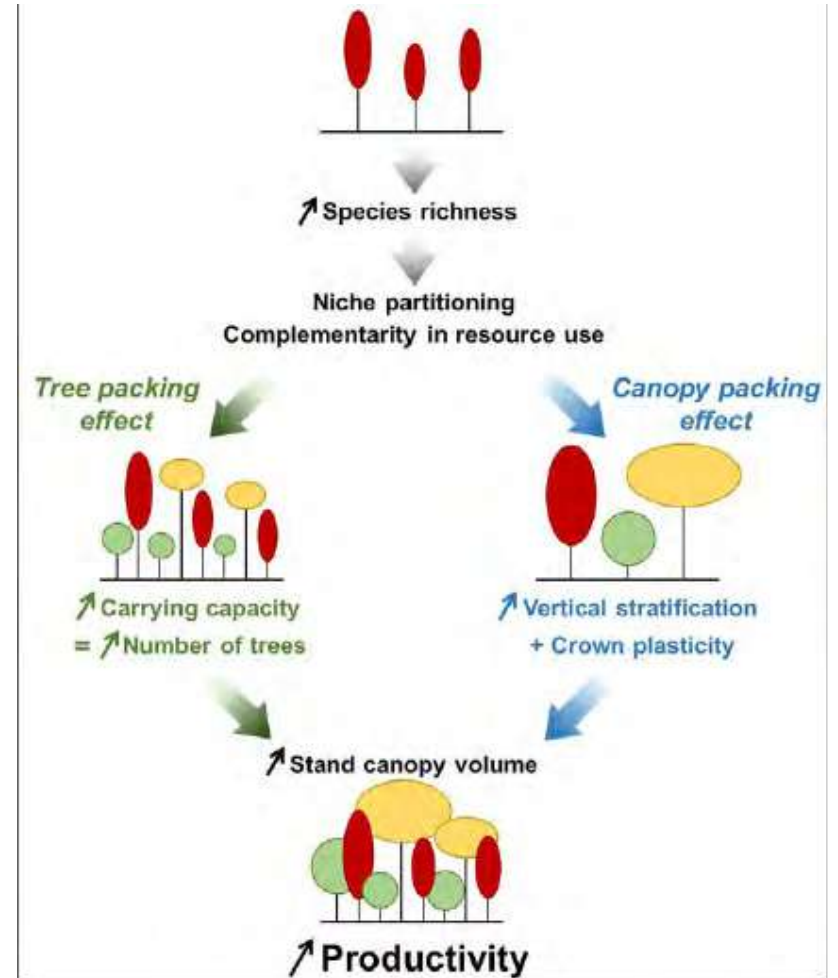
Mieux quantifier les rôles relatifs du 'canopy packing' et du 'tree packing'

SEM avec simulations avec densité libre



$n = 2,217,571$
CFI = 0.923
SRMR = 0.062

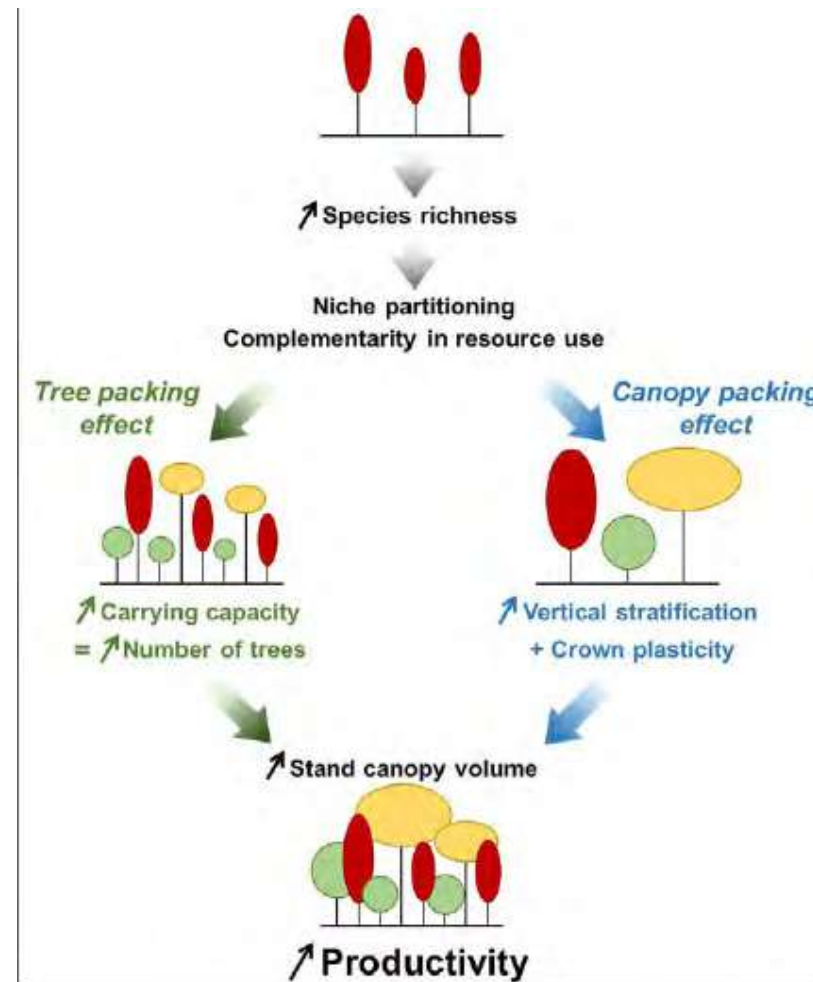
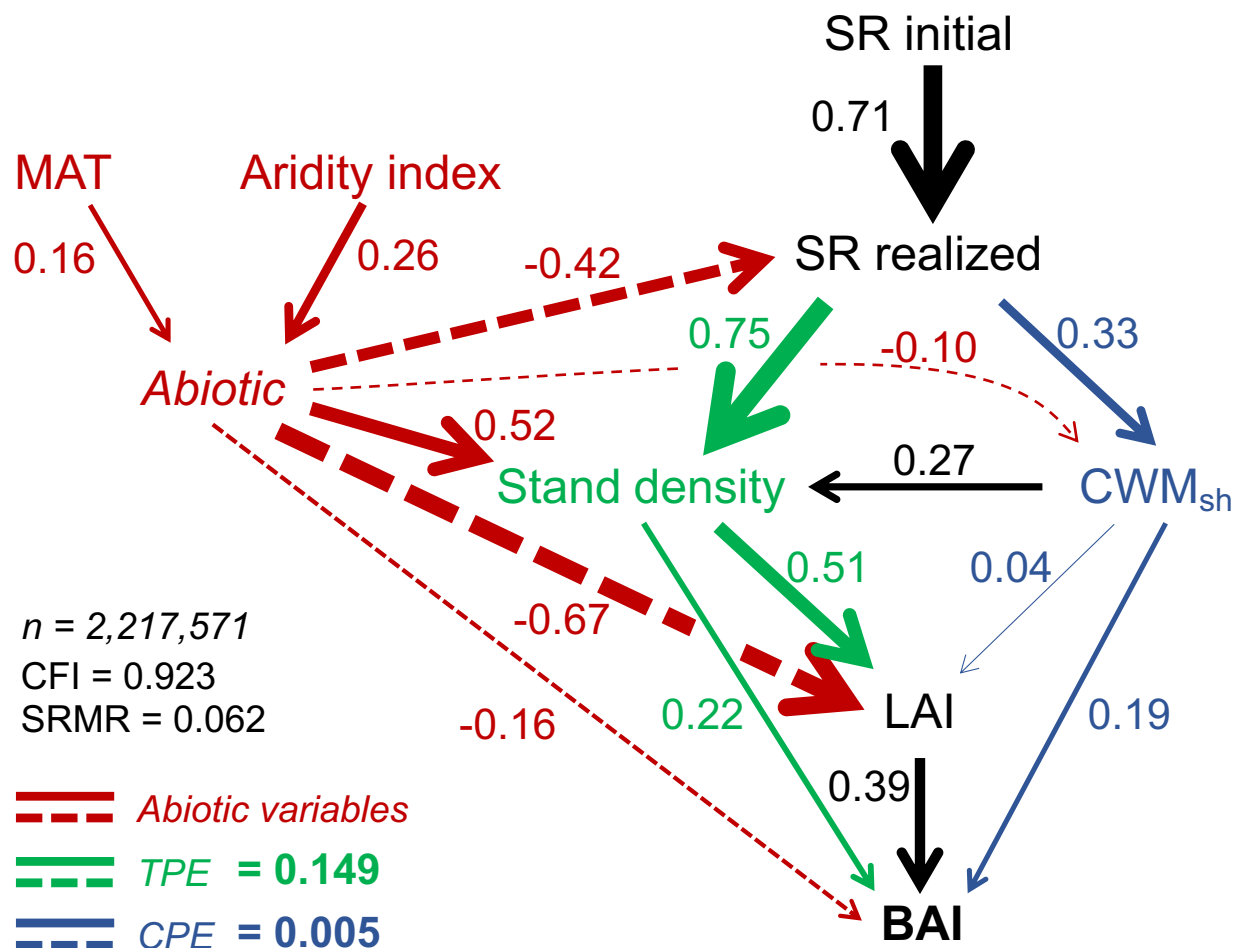
==== TPE = 0.149
---- CPE = 0.005



2. 'Tree packing' et productivité du peuplement

Mieux quantifier les rôles relatifs du 'canopy packing' et du 'tree packing'

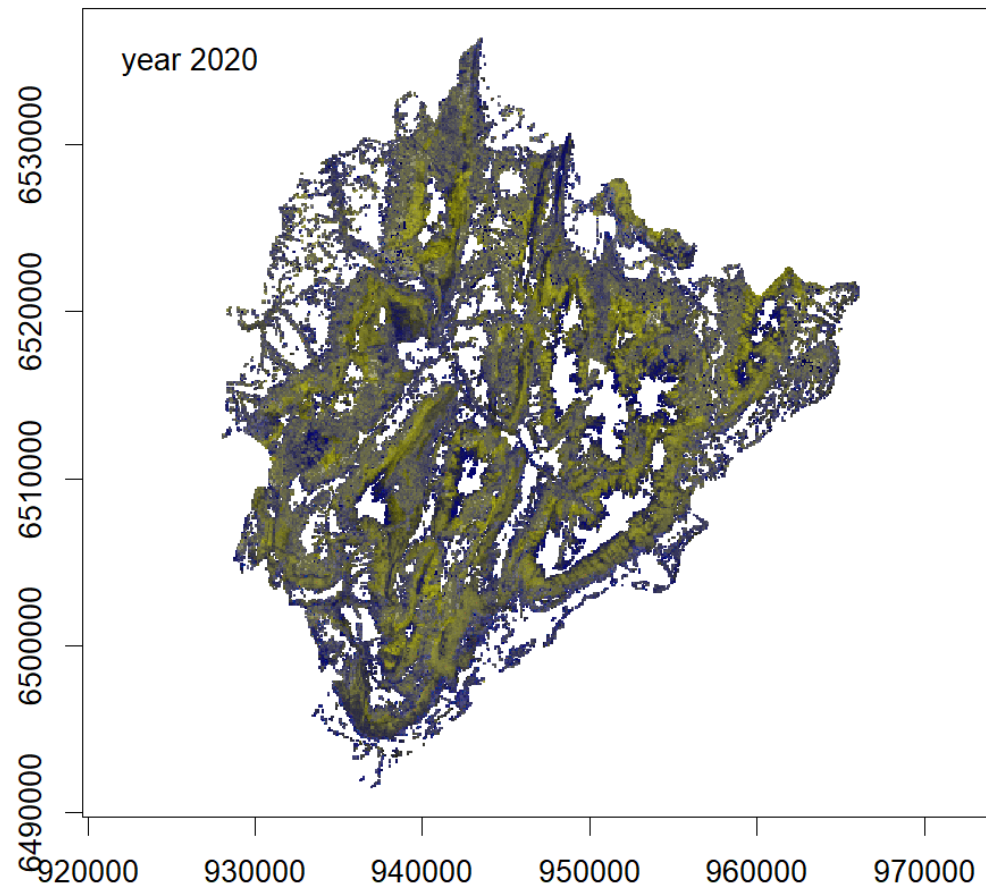
SEM avec simulations avec densité libre



Simulations à l'échelle des territoires

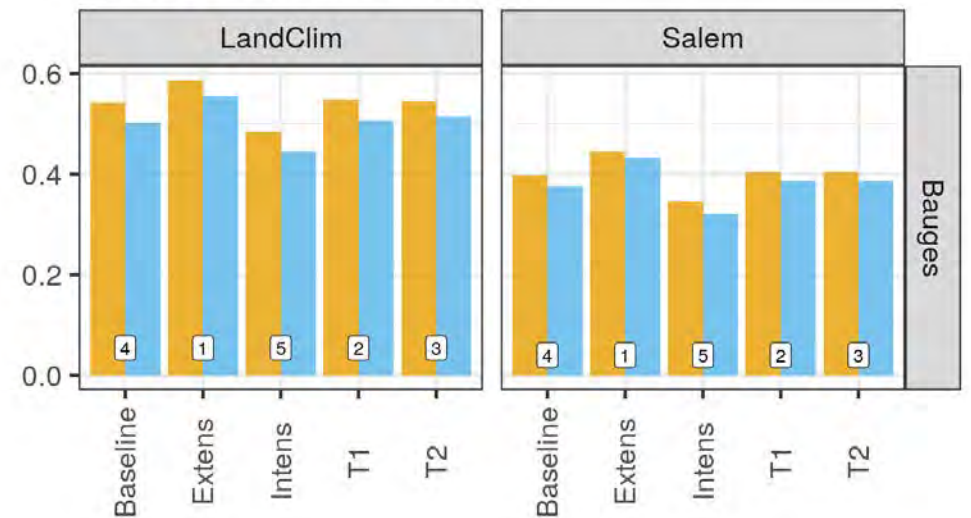
Echelle de la stratégie d'aménagement

- Des forêts plus complexes sont-elles plus résilientes aux perturbations ?



Evolution des Bauges, modèle Salem

Volume de chablis suite aux tempêtes



Pour les Bauges :

- Diminution du volume de chablis dans les forêts plus complexes
- Effet complexité inférieur à celui de l'intensification ou de l'extensification

Effet opposé dans d'autres territoires

1. “Tree packing” : richesse spécifique (SR) et densité du peuplement

Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte
que les peuplements monosp. ?

Dans les expérimentations



= Densité contrôlée



1. "Tree packing" : richesse spécifique (SR) et densité du peuplement

Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte que les peuplements monosp. ?

Dans les expérimentations



= Densité contrôlée



Dispositif expérimental *ORPHEE*



List of the 32 plots corresponding to the 31 combinations

1	Bp	Betula pendula			
2	Cr	Quercus robur			
3	Op	Quercus pyrenaica			
4	Ql	Quercus ilex			
5	Pp	Pinus pinaster			
6	Bp	Cr			
7	Bp	Op			
8	Bp	Ql			
9	Bp	Pp			
10	Cr	Op			
11	Cr	Ql			
12	Cr	Pp			
13	Op	Ql			
14	Op	Pp			
15	Ql	Pp			
16	Bp	Cr	Op		
17	Bp	Cr	Ql		
18	Pp	Cr	Bp		
19	Ql	Op	Bp		
20	Op	Pp	Bp		
21	Pp	Bp	Ql		
22	Cr	Op	Ql		
23	Cr	Pp	Op		
24	Ql	Cr	Pp		
25	Op	Ql	Pp		
26	Bp	Cr	Ql	Op	
27	Cr	Pp	Bp	Op	
28	Pp	Cr	Bp	Ql	
29	Pp	Op	Ql	Bp	
30	Op	Pp	Ql	Cr	
31	Bp	Pp	Op	Ql	Cr
32	Bp	Pp	Op	Ql	Cr



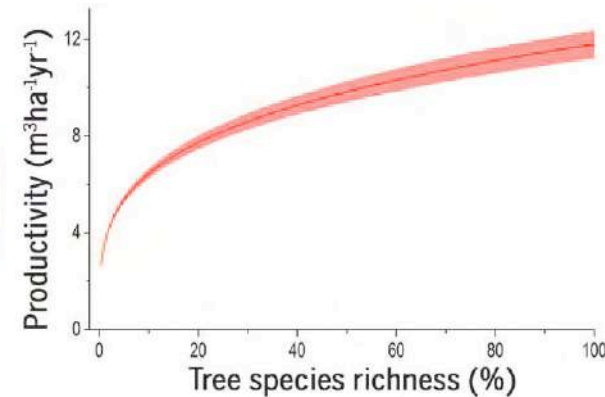
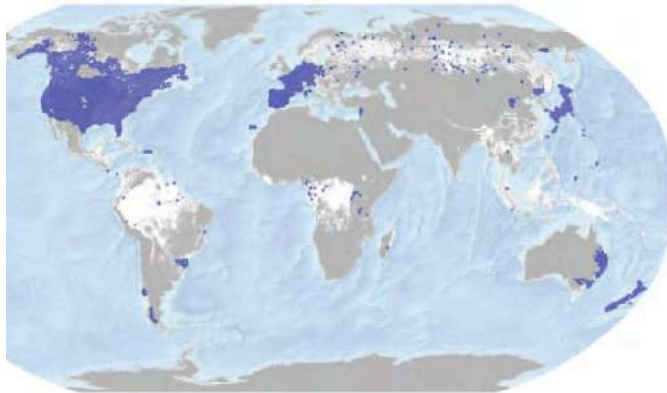
1. "Tree packing" : richesse spécifique (SR) et densité du peuplement

Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte
que les peuplements monosp. ?

Dans les observations

Données d'inventaires

Liang et al. 2016 *Nature*



= correction pour la densité

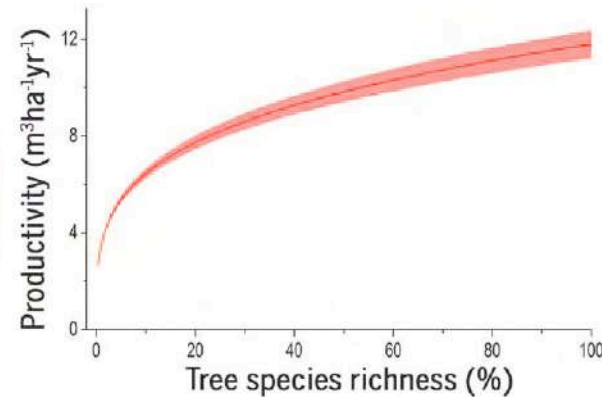
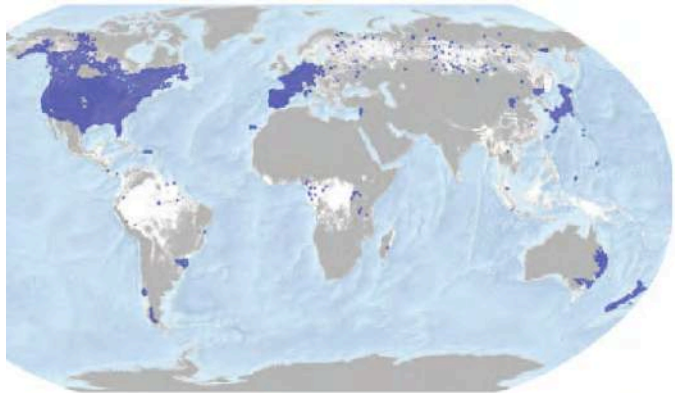
1. "Tree packing" : richesse spécifique (SR) et densité du peuplement

Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte que les peuplements monosp. ?

Dans les observations

Données d'inventaires

Liang et al. 2016 *Nature*

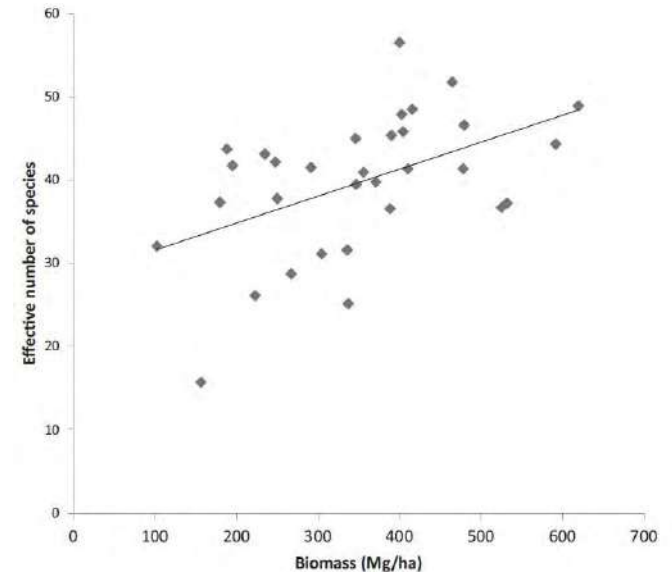


= correction pour la densité

Relationships between tree species diversity and above-ground biomass in Central African rainforests: implications for REDD

MICHAEL DAY^{1*}, CRISTINA BALDAUF², ERVAN RUTISHAUSER¹ AND TERRY C. H. SUNDERLAND¹

Environmental Conservation 41 (1): 64–72 2013

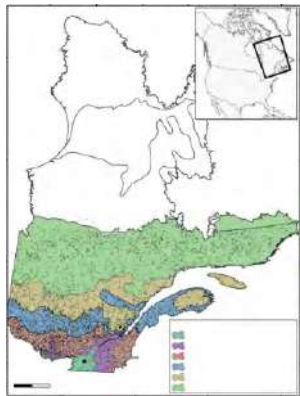


1. "Tree packing" : richesse spécifique (SR) et densité du peuplement

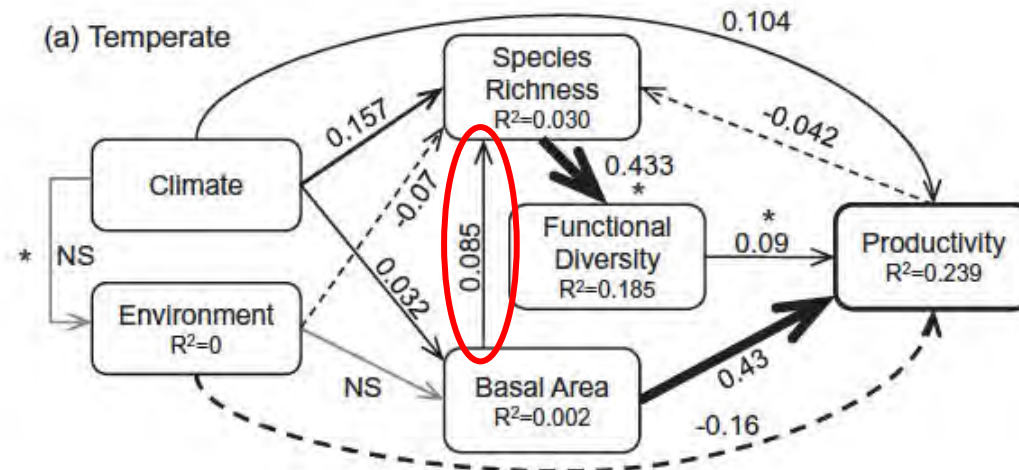
Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte
que les peuplements monosp. ?

Dans les observations

Données d'inventaires



Forêts du Québec

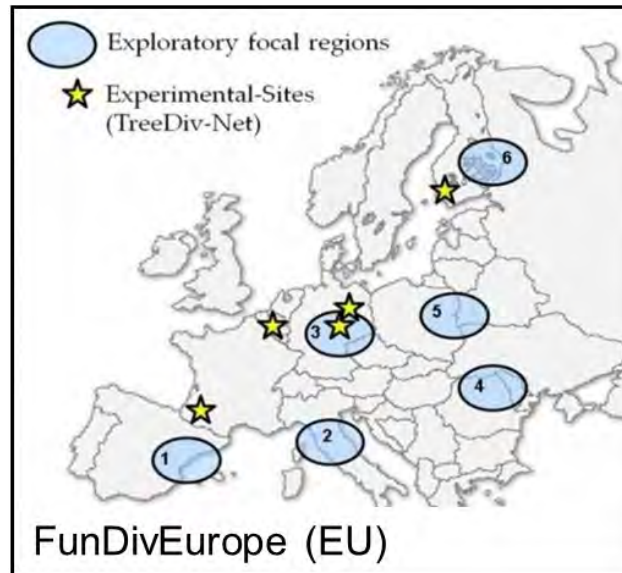


1. "Tree packing" : richesse spécifique (SR) et densité du peuplement

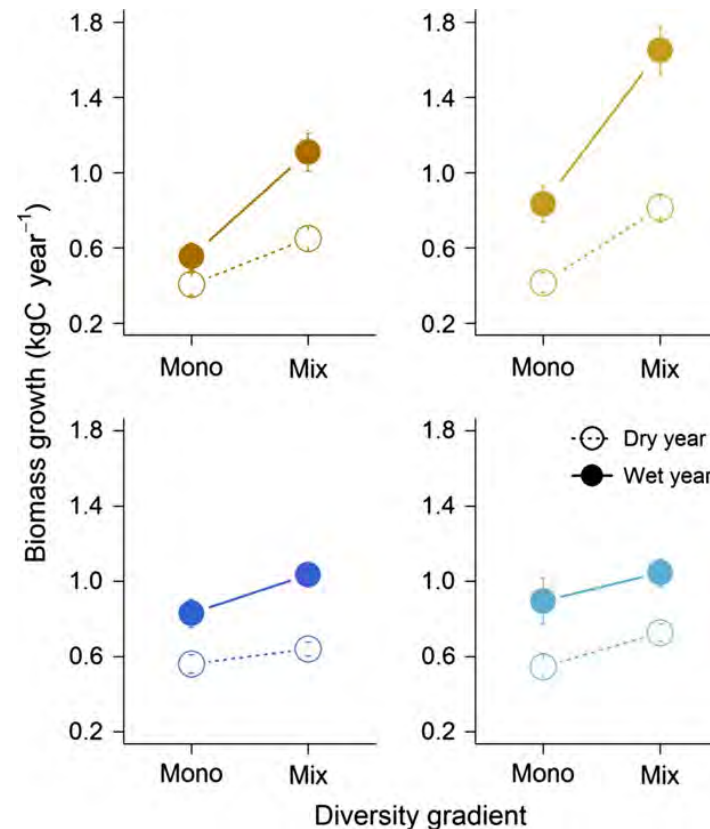
Densité max *in natura* des peuplements mélangés + forte que les peuplements monosp. ?

Dans les observations

Approches semi-expérimentales



Jucker et al. 2014 *J. Ecol.*



= contrôle pour la densité ou surface terrière