

MODULE IMPACT DE LA MOBILISATION SUR
L'ENVIRONNEMENT

MASTER 1 FMB – UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

20/01/2022



**BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE :
ENJEUX ÉCOLOGIQUES ET RÉPONSE AUX EFFETS DE LA
MOBILISATION DES BOIS À L'ÉCHELLE DU PAYSAGE**

JÉRÉMY COURS – DOCTORANT INRAE UR EFNO – NOGENT-SUR-VERNISSON
À PARTIR DU COURS DE CHRISTOPHE BOUGET

jeremy.cours@inrae.fr

STRUCTURE DU COURS

1. Enjeux écologiques de la biodiversité forestière
2. Impacts à l'échelle du paysage de la mobilisation des bois sur la biodiversité
 - 2.1. Echelle territoire
 - 2.2. Echelle massif

1

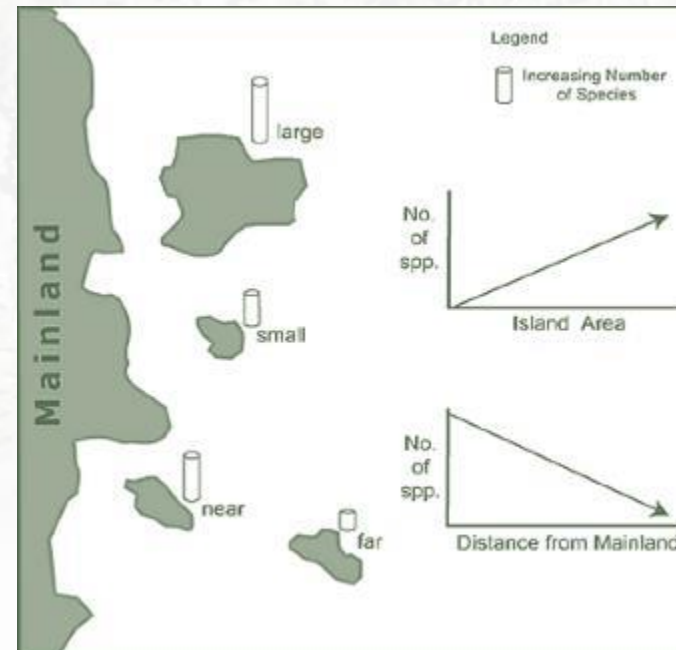
ENJEUX ÉCOLOGIQUES DE LA BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE

LA BIODIVERSITÉ, OBJET ÉCOLOGIQUE ORIGINAL POUR LES SCIENCES FORESTIÈRES

« *All science is either physics or stamp collecting* » Lord Rutherford

Les philatélistes de la biodiversité

- S'intéressent à des **objets complexes** et **dynamiques** : écosystèmes > espèces > génotypes
- Accumulent les **études de cas** pour augmenter la **statistique de la description**
- Restent **limités** par :
 - le manque de données ;
 - et l'absence de lois immuables et générales.



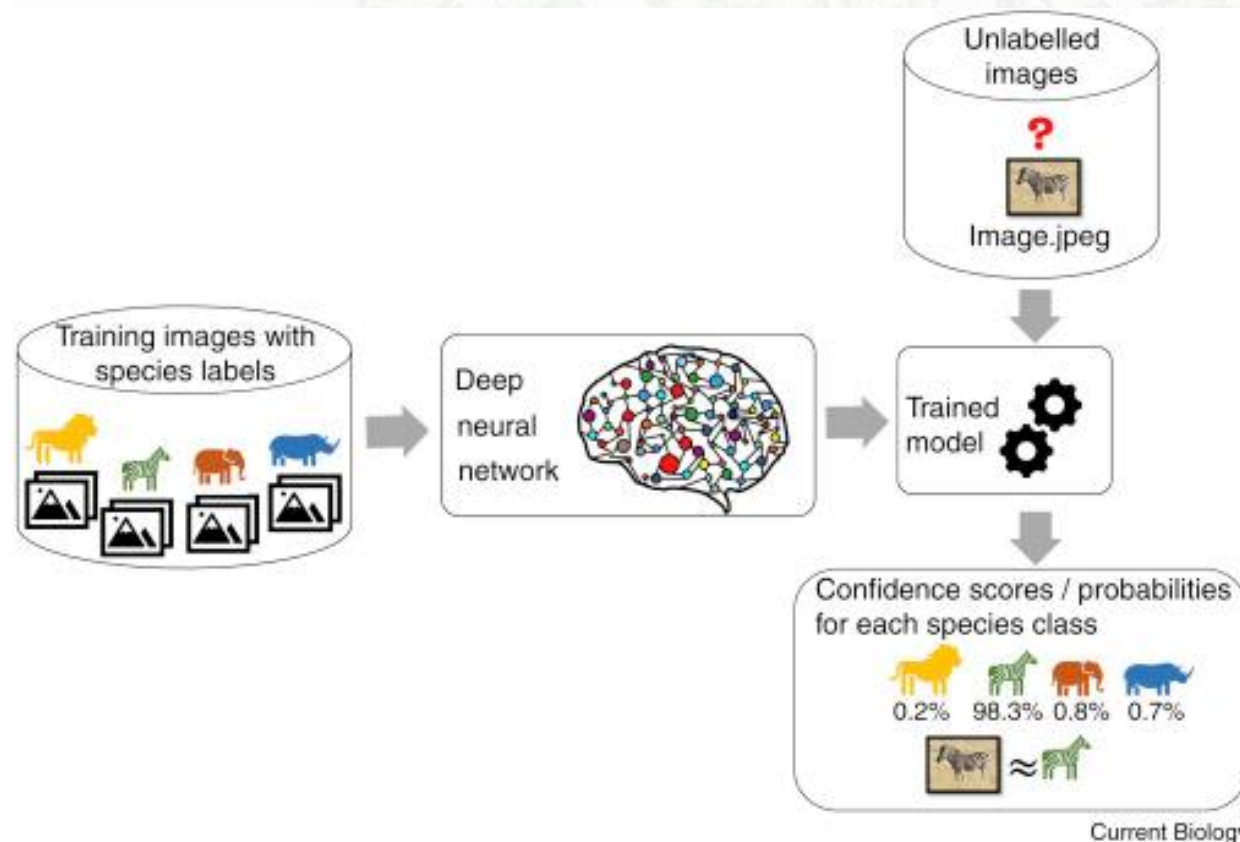
MACARTHUR R.H., WILSON E.O., 1967. *The Theory of Island Biogeography*, Princeton University Press, 226 p.

1 LA BIODIVERSITÉ, OBJET ÉCOLOGIQUE ORIGINAL POUR LES SCIENCES FORESTIÈRES

« *All science is either physics or stamp collecting* » Lord Rutherford

La biodiversité, critère « flou » d'évaluation environnementale :

- Mesure : pas d'appareils ? Pas de capteurs sophistiqués ? Pas d'unité éloquente ?



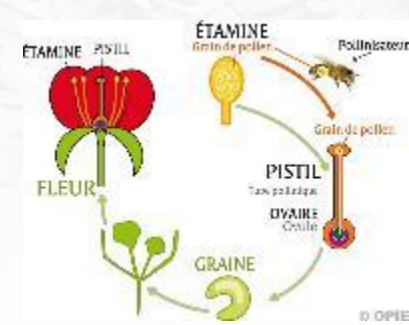
LAMBA A., CASSEY P., SEGARAN R.R., KOH L.P., 2019. Deep learning for environmental conservation, *Current Biology*, 29, 19, p. R977-R982.

1 LA BIODIVERSITÉ, OBJET ÉCOLOGIQUE ORIGINAL POUR LES SCIENCES FORESTIÈRES

« *All science is either physics or stamp collecting* » Lord Rutherford

La **biodiversité**, concept **peu opérationnel** (valeurs de la biodiversité)

- Evaluer le coût d'une perte de biodiversité locale (services écologiques, adaptabilité, risque d'extinction).



1 LA FORÊT, ÉCOSYSTÈME COMPLEXE, OFFRE UNE CONTRIBUTION SPÉCIFIQUE À LA BIODIVERSITÉ

Arbres (espèces clés de voûte) : 136 essences ligneuses en France métropolitaine. Mais aussi :

Des espèces :

Arboricoles



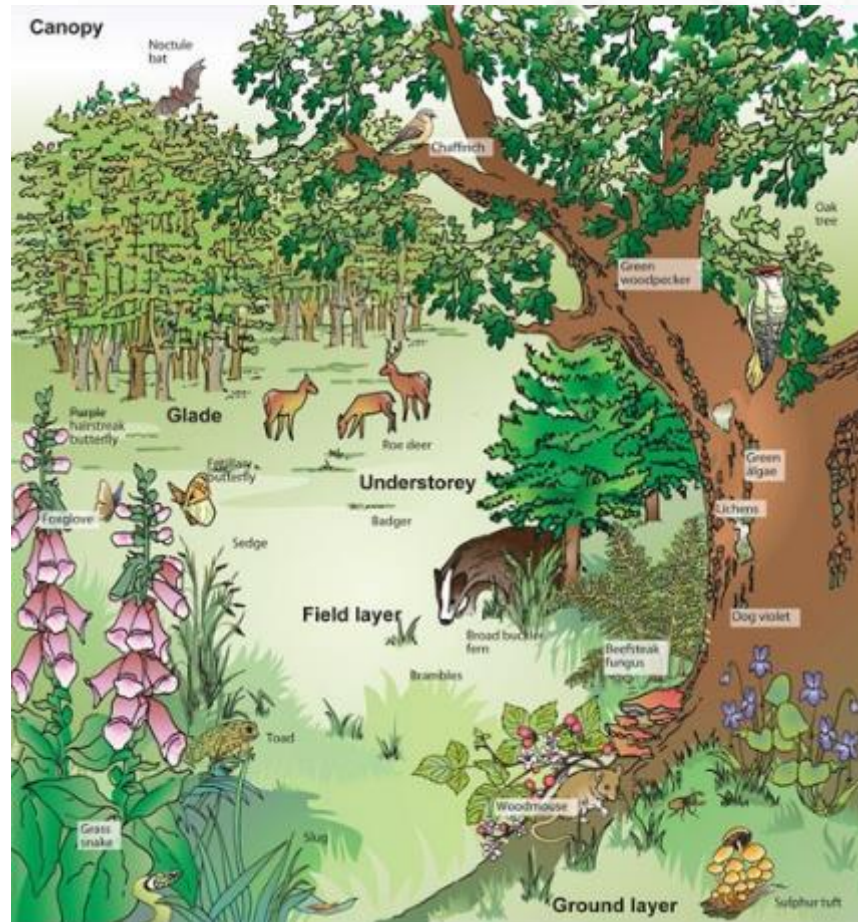
Floricoles



Aquatiques



Vision naïve



Lignicoles



Cavicoles



Sciaphiles



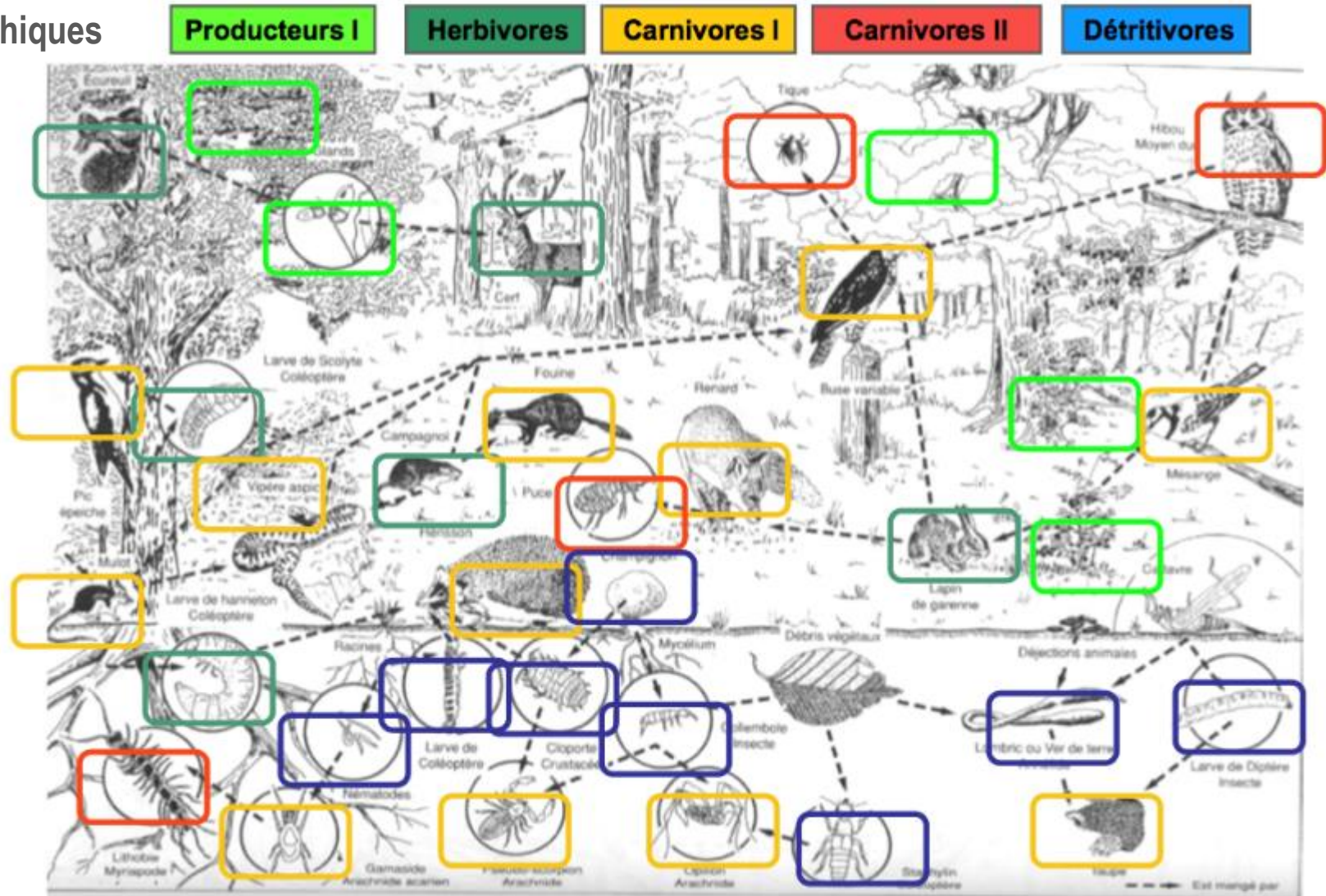
Fongicoles



Terricoles, Humicoles

1 LA FORÊT, ÉCOSYSTÈME COMPLEXE, OFFRE UNE CONTRIBUTION SPÉCIFIQUE À LA BIODIVERSITÉ

Réseaux et guildes trophiques



1 LA FORÊT, ÉCOSYSTÈME COMPLEXE, OFFRE UNE CONTRIBUTION SPÉCIFIQUE À LA BIODIVERSITÉ

Concrètement, une grande forêt (plusieurs milliers d'ha) héberge :

Plus de 10 000 espèces différentes :

- 2/3 = faune
 - 90% d'insectes
 - <3% sont des vertébrés terrestres
- 10 – 20% = flore



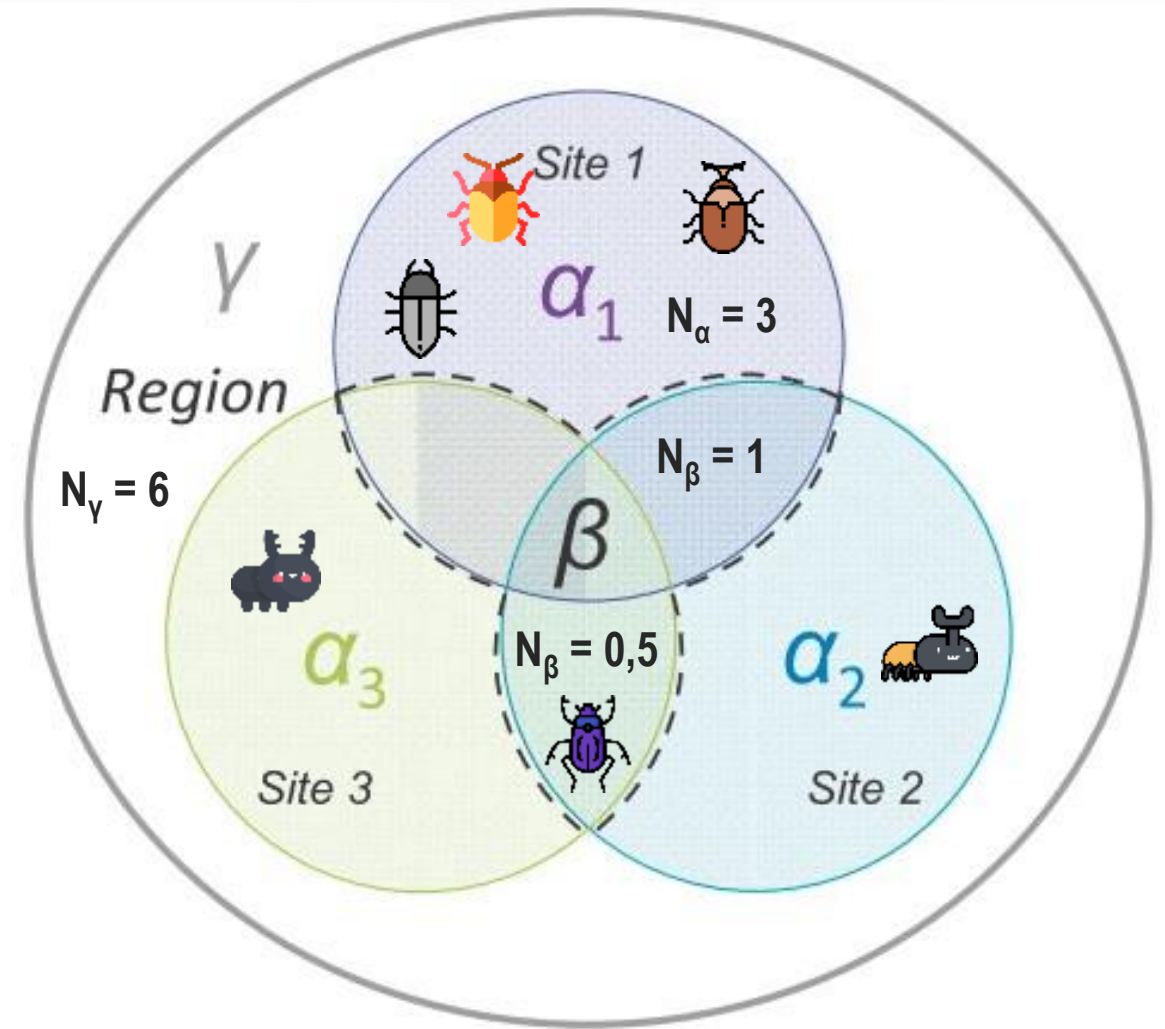
	Forêt de Bialowieza		Forêt de Fontainebleau	
Règne Animal	8 833	71 %	> 6 038	52 %
Insectes	8 500	68 %	> 5 700	49 %
Hyménoptères	3 000	24 %	-	-
Coléoptères	2 000	16 %	> 3 500	30 %
Lépidoptères	1 000	8 %	1 700	15 %
Diptères	800	6 %	-	-
Mammifères	62	< 1 %	55	< 1 %
Oiseaux	228	2 %	260	2 %
Reptiles et Amphibiens	19	< 1 %	23	< 1 %
Poissons	24	< 1 %	-	-
Règne Végétal	1 244	10 %	1 810	15 %
Plantes	990	8 %	1 350	11 %
Plantes à fleurs	953	8 %	-	-
Fougères	37	< 1 %	-	-
Mousses et hépatiques	254	2 %	460	4 %
Autres	> 2 334	19 %	3 875	33 %
Champignons	> 2 000	16 %	2 700	23 %
Lichens	334	3 %	675	6 %
Algues	-	-	500	4 %
Total des espèces	> 12 411		> 11 638	
Pourcentage		100 %		100 %

Approche **Gamma** du calcul de la **biodiversité**

1 LA FORÊT, ÉCOSYSTÈME COMPLEXE, OFFRE UNE CONTRIBUTION SPÉCIFIQUE À LA BIODIVERSITÉ

Différentes façon de prendre en compte la **biodiversité** :

- Diversité **alpha α** (en un site donné) ;
- Diversité **beta β** (taux de remplacement d'un site à l'autre) ;
- Diversité **gamma γ** (diversité à l'échelle régionale).



POURQUOI PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ DANS L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER ?

Approches **utilitaristes** (gérer), **éthique** (protéger) et **esthétique** (contempler)

Dimensions **culturelle** : esthétique, éthique et récréative (aménités)

Biens et services directs (bois, aliments, médicaments, combustibles, etc.)

Rôles fonctionnels, services écosystémiques
Production primaire, mais aussi ...



e.g. L'école de Barbizon – Jean-Baptiste Camille Corot,
Forêt de Fontainebleau (1846)

1 POURQUOI PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ DANS L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER ?

Mais aussi ...

Rôles fonctionnels, services écosystémiques – l'exemple des insectes

- **Pollinisation** de 80% des arbres et arbustes
- **Dispersion** des graines
 - Myrmécochorie pour 150 plantes forestières



1 POURQUOI PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ DANS L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER ?

Mais aussi ...

Rôles fonctionnels, services écosystémiques – l'exemple des insectes

- **Recyclage** des éléments et **fertilités** des sols (cadavres, bois mort, litière, fécès)



1 POURQUOI PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ DANS L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER ?

Par exemple : la faune du sol – un réseau trophique à part entière et un rôle fonctionnel crucial

Ghilarov (1970) : la décomposition de la litière est 5 fois plus lente lorsque la faune est écartée par le naphthalène répulsif



1 POURQUOI PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ DANS L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER ?

Activité des insectes décomposeurs du sol et de ses annexes

Dans la litière d'une chênaie-charmaie française (Arpin et al., 2000) :

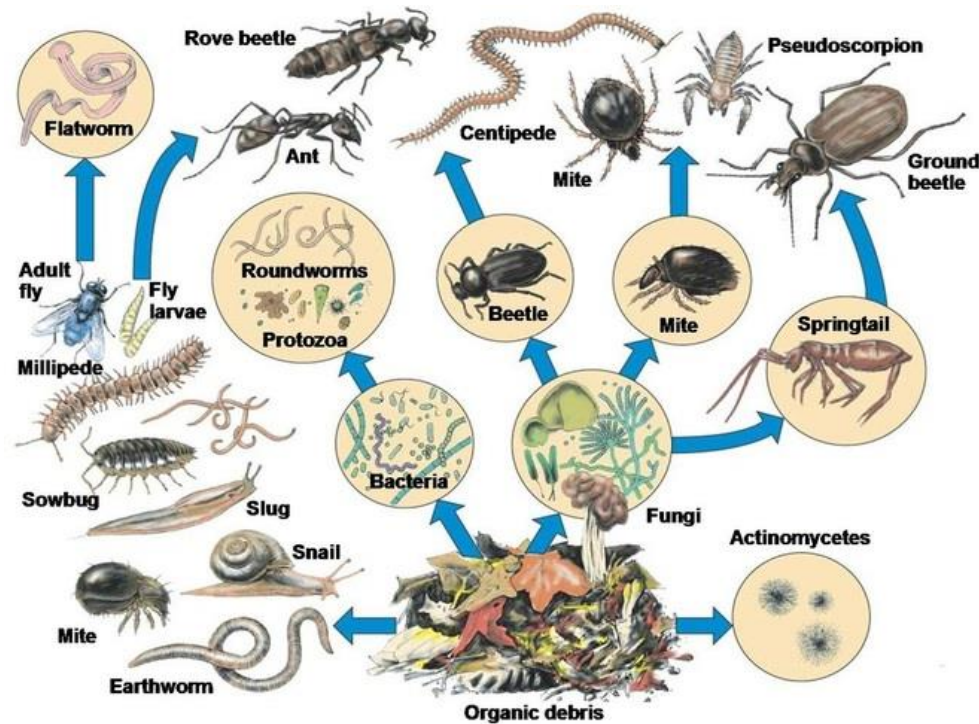
- Diptères → 1100 ind (larves et adultes)/m²
- Coléoptères → 340 ind(larves et adultes)/m²



Diptères **Bibionidae** saprophytophages de la litière



Coléoptères **nécrophores**



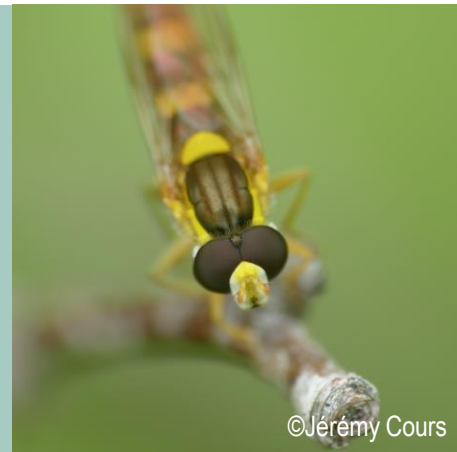
Coléoptères **Geotrupidae** coprophages

1 POURQUOI PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ DANS L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER ?

Mais aussi ...

Rôles fonctionnels, services écosystémiques – l'exemple des insectes

- **Adaptabilité** de l'écosystème et **capacités de réponse aux changements**
 - cf. police d'assurance et diversification des placements

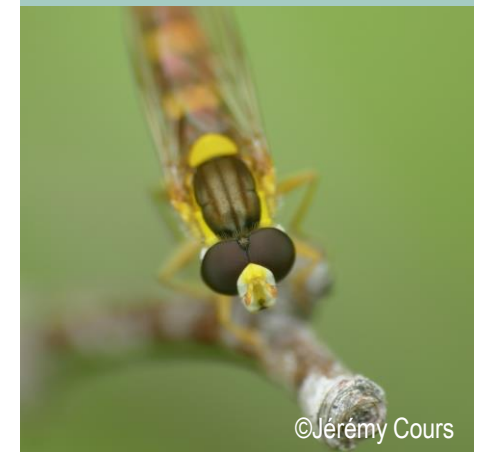


1 POURQUOI PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ DANS L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER ?

Mais aussi ...

Rôles fonctionnels, services écosystémiques – l'exemple des insectes

- **Position intermédiaire dans les réseaux d'interaction entre espèces**
 - Transformation des matériaux forestiers
 - **Préparation d'habitats pour d'autres organismes** (cf. espèces ingénieurs)
 - **Proies et prédateurs** : une position clé dans les réseaux trophiques
- **Biomasse animale forestière**
 - Dans les forêts d'Europe occidentale (Duvigneaud, 1974)
 - **Insectes → 5 kg/ha**
 - **Lombrics → 50 kg/ha**
 - **Mammifères et oiseaux → 1,3 kg/ha**



1 POURQUOI PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ DANS L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER ?

Mais aussi ...

Rôles fonctionnels, services écosystémiques – l'exemple des insectes

- Herbivorie et disservices



©Jérémy Cours

Hanneton forestier



Chenilles processionnaires
du pin



Bombyx disparate



Chrysomèle verte

1 LA FORÊT REFUGE ?

Milieux ouverts intra-forestiers extensifs → refuges pour des espèces de milieux ouverts en régression les milieux ouverts extra-forestiers intensifs (i.e. agrosystèmes).

- Taxons péri-forestiers héliophiles :
 - Papillons de jour, flore vasculaires, Apoïdes, etc.
 - Dans les tranchées forestières RTE.
- Flore vasculaire (Peterken & Francis, 1999)
- Invertébrés (Perry et al., 2018 ; Kozel et al., 2021)
- Oiseaux (Dubus, 2002)
- Souvent → espèces différents des taxons à enjeux



PETERKEN G.F., FRANCIS J.L., 1999. Open spaces as habitats for vascular ground flora species in the woods of central Lincolnshire, UK, *Biological Conservation*, 91, 1, p. 55-72.

PERRY K.I., WALLIN K.F., WENZEL J.W., HERMS D.A., 2018. Forest disturbance and arthropods: Small-scale canopy gaps drive invertebrate community structure and composition, *Ecosphere*, 9, 10, p. e02463.

KOZEL P., SEBEK P., PLATEK M., BENES J., ZAPLETAL M., DVORSKY M., LANTA V., DOLEZAL J., BACE R., ZBUZEK B., CIZEK L., 2021. Connectivity and succession of open structures as a key to sustaining light-demanding biodiversity in deciduous forests, *Journal of Applied Ecology*,

DUBUS G., 2002. Impact des systèmes sylvicoles sur la biodiversité : un approche comparative en Ardenne, Thèse de doctorat, Louvain-la-Neuve (Belgique), Université catholique de Louvain, Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale, 132 p.

1 ETAT DE LA BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE

Pas de suivi, pas de réseau d'observation.

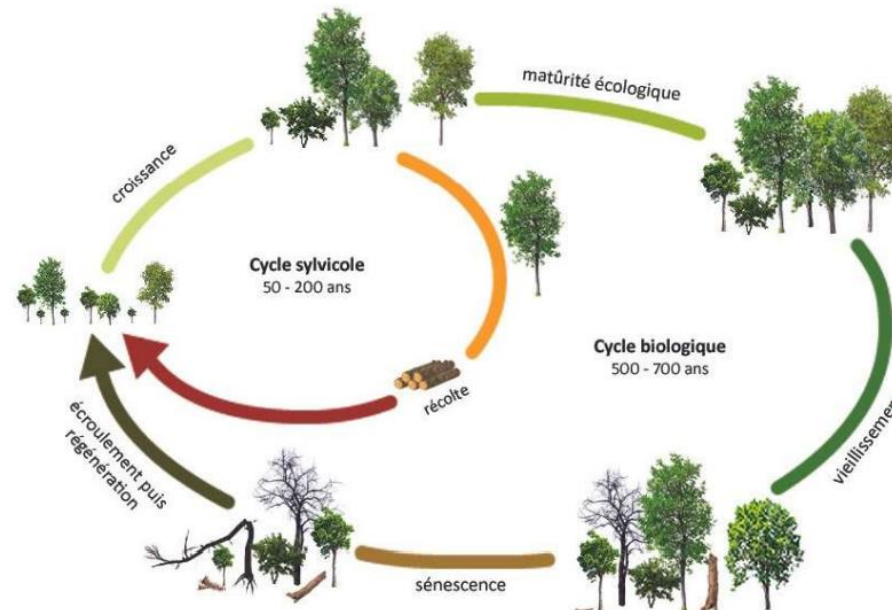
Pas de tableau de bord disponible

- **Espèces rencontrables en forêt / strictement forestière ?**
- **Biodiversité ordinaire**
- **Nombreux segments mal connus**
 - e.g. microfaune du sol
- **Biodiversité menacée ?**

1 LA BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE : QUELLE VULNÉRABILITÉ ?

Conservation de la biodiversité forestière, priorité aux taxons :

- Qui dépendent de la forêt :
 - Espèces typiquement forestières et sensibles aux interventions sylvicoles :
 - Inféodées aux **stades tronqués par la gestion** (stades âgés et pionniers) ;



1 LA BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE : QUELLE VULNÉRABILITÉ ?

Conservation de la biodiversité forestière, **priorité** aux taxons :

- **Qui dépendent** de la forêt :
 - Espèces typiquement forestières **et** sensibles aux interventions sylvicoles :
 - Inféodées aux **stades tronqués par la gestion** (stades âgés et pionniers) ;
 - **Peu mobiles** ;
 - Sensibles au **dérangement** ou au **tassement** (e.g. microfaune et microflore du sol) ;
 - Inféodées aux **intérieurs forestiers** (i.e. sciaphiles ; e.g. certaines bryophytes).
 - **Dont la forêt dépend** :
 - **Groupes fonctionnels importants** (e.g. pollinisateurs, prédateurs, décomposeurs, etc.)

1 LA BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE : QUELLE VULNÉRABILITÉ ?

La biodiversité forestière n'est pas épargnée par la crise d'extinction.

Groupes	% sp. forestières menacées (catégories UICN EN, CR, VU)
Mammifères (2017)	9%
Oiseaux (2016)	25%
Amphibiens (2015)	8%
Papillons de jour	8%

Pays	% sp. coléoptères saproxyliques menacées catégories UICN EN, CR, VU, NT + (EN, VU, CR)	Sources
Italie	39% (21%)	Carpaneto et al. 2015
Allemagne	30% (24%)	Schmidl & Büche, 2015
France	36%	Bouget et al. 2019
Suisse	27%	Sanchez et al. 2016
Europe	27% (14%) ; 40% (22%)	Nieto et al. 2010 ; Calix et al., 2018



42% des types d'habitats naturels d'intérêt européens (Annexe I DHFF) sont forestiers

<http://valdargens.n2000.fr/sites/valdargens.n2000.fr/files/documents/page/Annexe20120Directive20Habitat.pdf>

LA BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE : QUELLE VULNÉRABILITÉ ? L'HIVER DES INSECTES ?

L'hiver des insectes ?

Syndrome du « pare-brise propre »



Biodiversité

PLANÈTE BIODIVERSITÉ

ARTICLE SÉLECTIONNÉ DANS LA MATINALE DU 18/10/2017 > Découvrir l'application

En trente ans, près de 80 % des insectes auraient disparu en Europe

Ce déclin catastrophique est dû à l'intensification des pratiques agricoles et au recours aux pesticides. Il menace la chaîne alimentaire.

LE MONDE | 18.10.2017 à 20h01 • Mis à jour le 19.10.2017 à 07h56 |

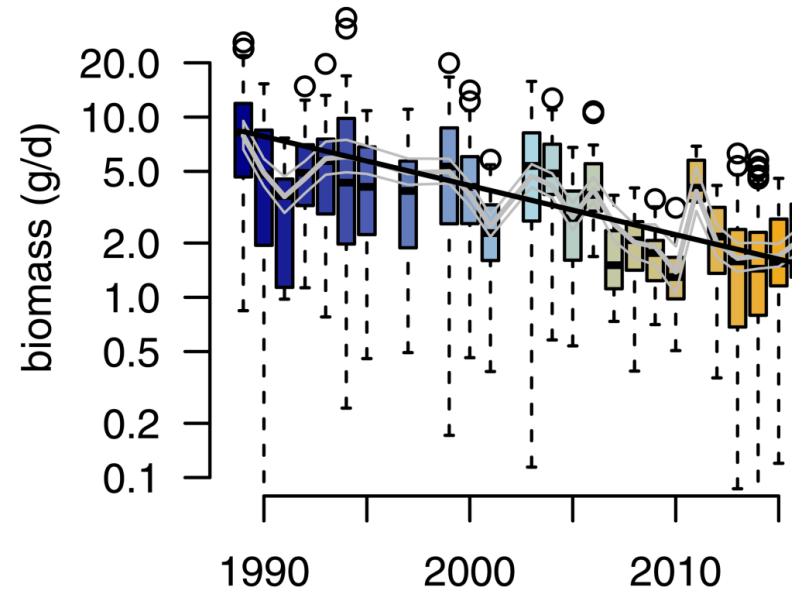


RESEARCH ARTICLE

More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas

Caspar A. Hallmann¹*, Martin Sorg², Eelke Jongejans¹, Henk Siepel¹, Nick Hofland¹, Heinz Schwan², Werner Stenmans², Andreas Müller², Hubert Sumser², Thomas Hörrén², Dave Goulson³, Hans de Kroon¹

A



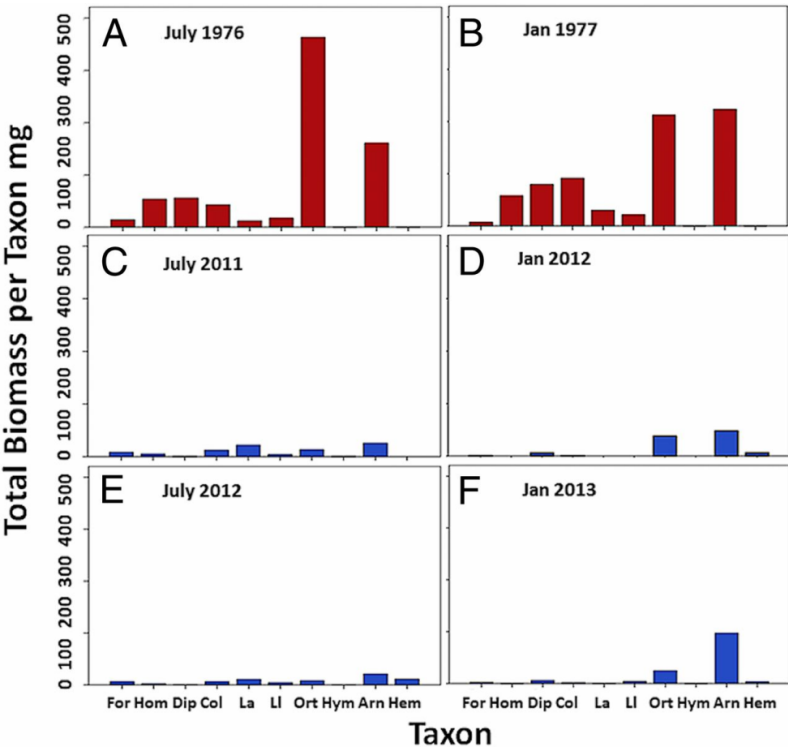
Cardoso P. et al., 2020. Scientists' warning to humanity on insect extinctions, *Biological Conservation*, 242, p. 108426.

Hallmann C.A. et al., 2017. More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas, *PLOS ONE*, 12, 10, p. e0185809.

Seibold S. et al., 2019. Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers, *Nature*, 574, 7780, p. 671-674.

LA BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE : QUELLE VULNÉRABILITÉ ? L'HIVER DES INSECTES ?

Un hiver aussi sous les tropiques



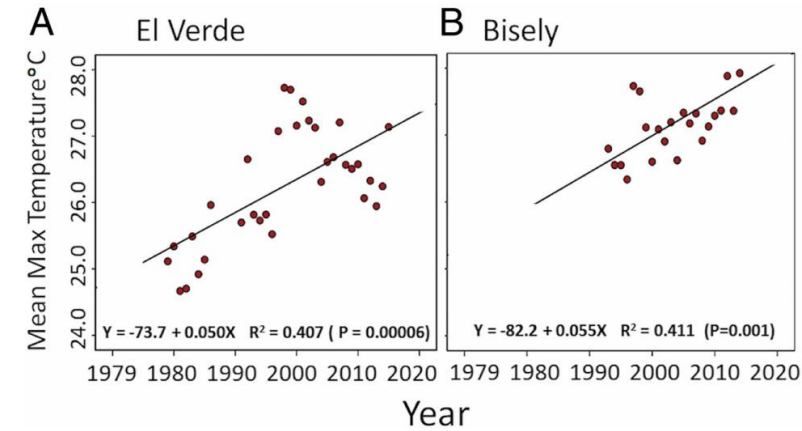
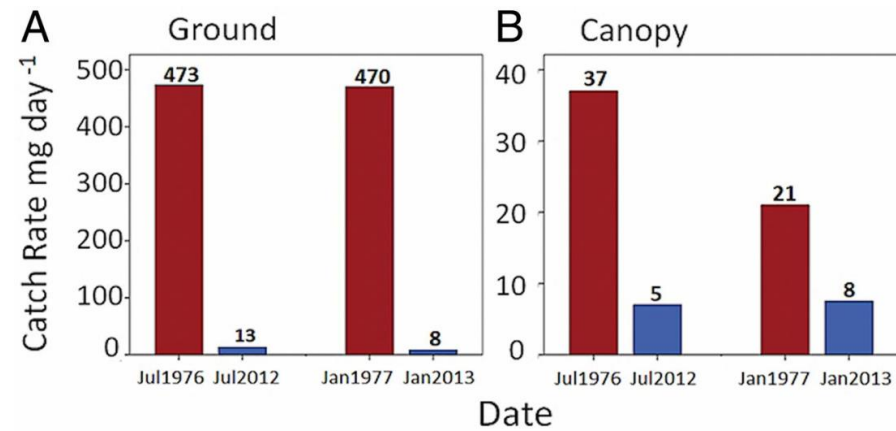
Climate-driven declines in arthropod abundance restructure a rainforest food web

Bradford C. Lister^{a,1} and Andres Garcia^b

^aDepartment of Biological Sciences, Rensselaer Polytechnic University, Troy, NY 12180; and ^bEstación de Biología Chamela, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, 47152 Chamela, Jalisco, Mexico

Edited by Nils Christian Stenseth, University of Oslo, Oslo, Norway, and approved September 10, 2018 (received for review January 8, 2018)

A number of studies indicate that tropical arthropods should be particularly vulnerable to climate warming. If these predictions are mechanisms (9, 10). While demonstrated impacts of climate change on tropical forests include reductions in plant diversity (14), changes in



1 CONCLUSION PREMIÈRE PARTIE

1. Forêt **multi-niches** → biodiversité forestière **riche et multi-guildes**
2. Biodiversité **spécifiques + refuge**
3. Des **réseaux trophiques** complexes, avec des **groupes fonctionnels** cruciaux (champignons symbiotiques, pollinisateurs, décomposeurs et cycles biogéochimiques, etc.)
4. **Menaces** actuelles (et futures) sur la biodiversité forestière

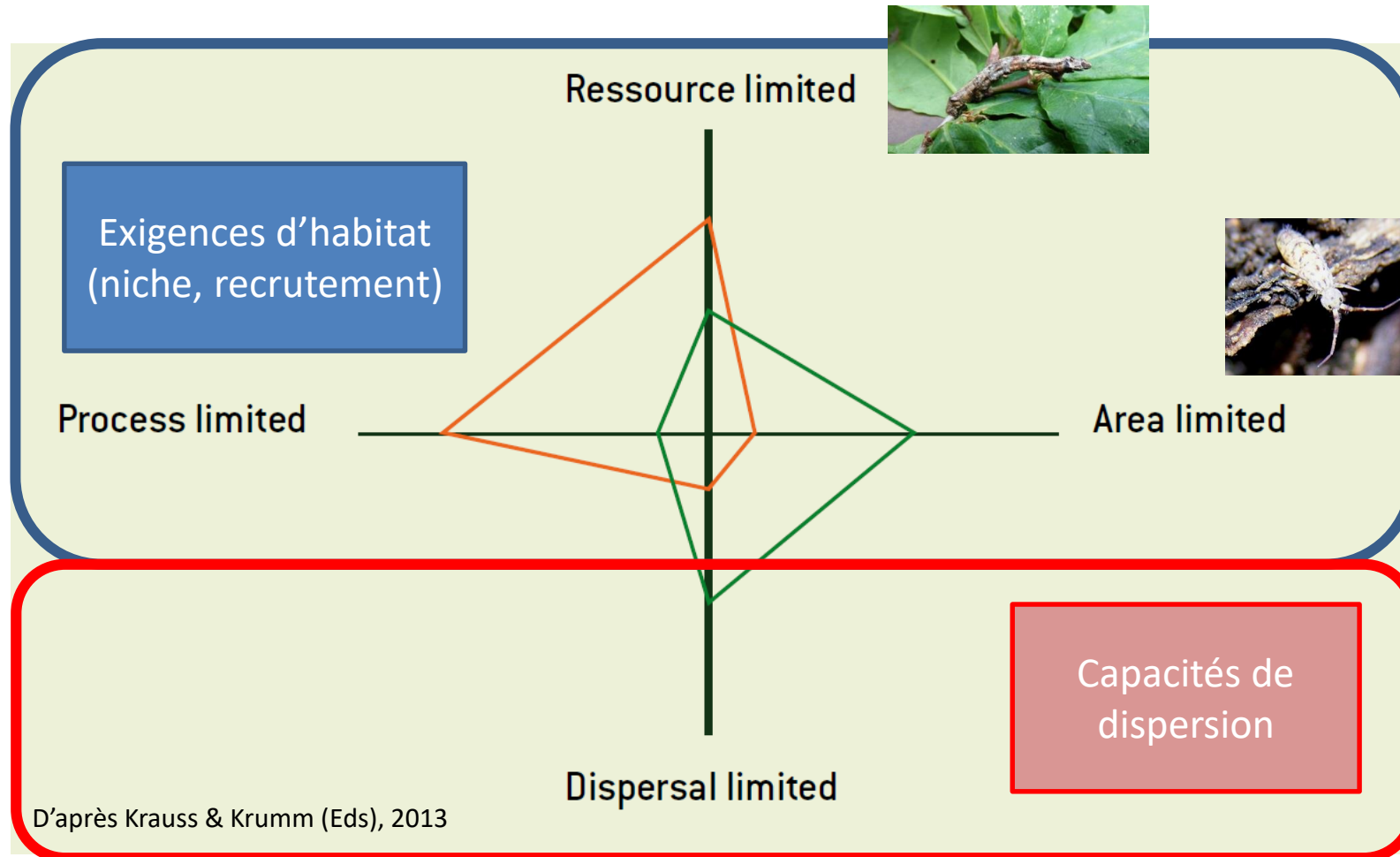
2

IMPACTS À L'ÉCHELLE DU PAYSAGE DE LA MOBILISATION DES BOIS SUR LA BIODIVERSITÉ

- 
1. Concepts d'écologie spatiale
 2. Impacts à l'échelle du paysage de la mobilisation des bois sur la biodiversité
 - 2.1. Echelle territoire
 - 2.2. Echelle massif

2 CONCEPTS D'ÉCOLOGIE SPATIALE

Parmi les facteurs de sensibilité de la biodiversité forestière aux menaces :

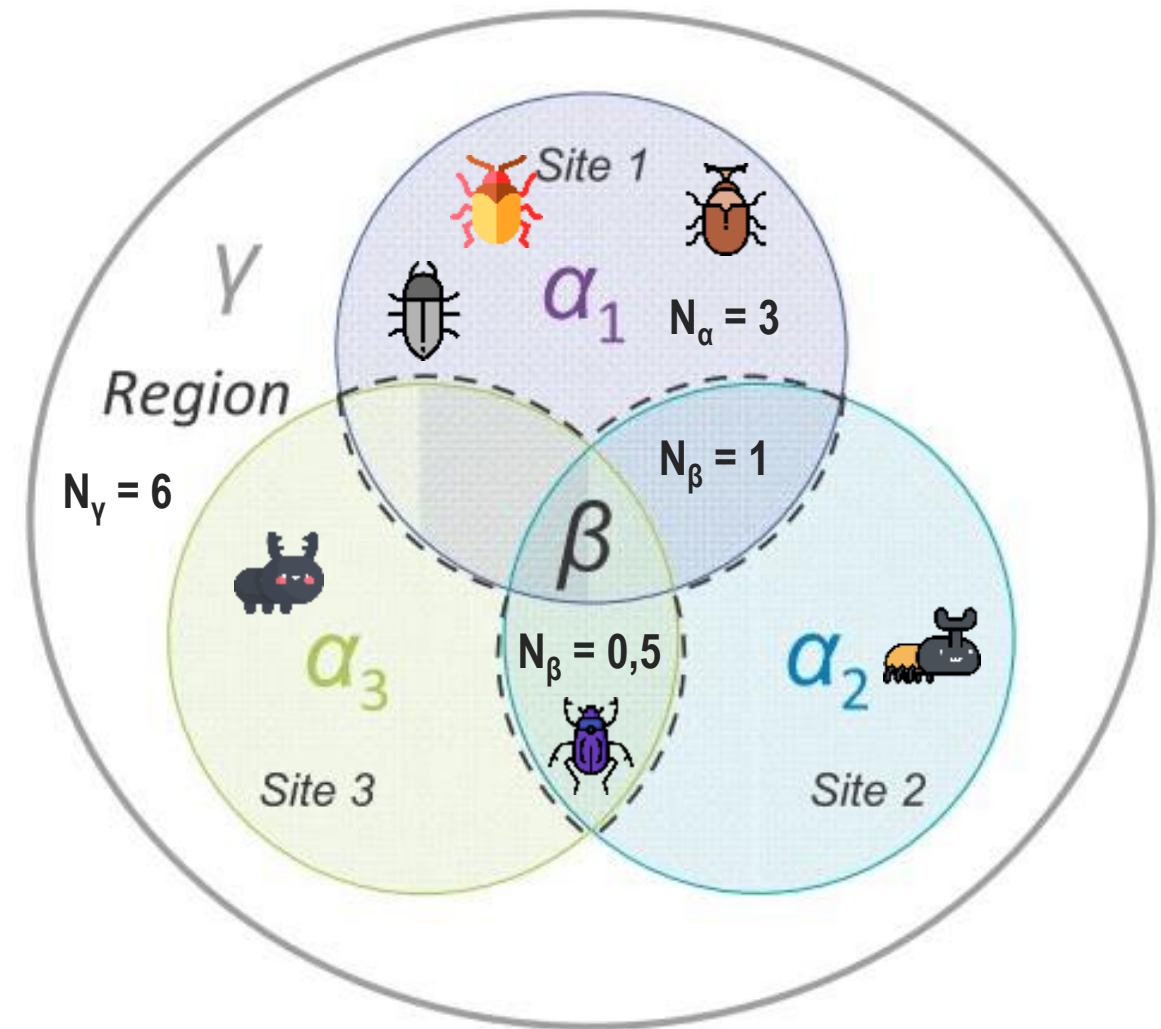


D'après Krauss & Krumm (Eds), 2013

2 CONCEPTS D'ÉCOLOGIE SPATIALE

Impacts à l'échelle du paysage de la mobilisation des bois sur la **biodiversité locale** (échelle parcelle = **alpha α**)

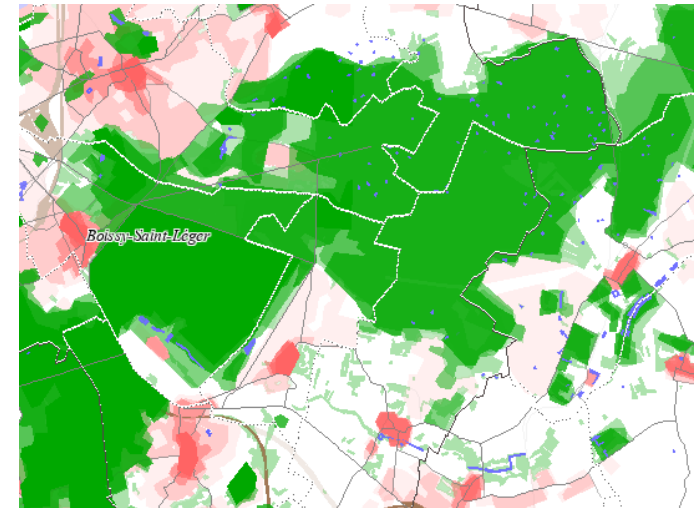
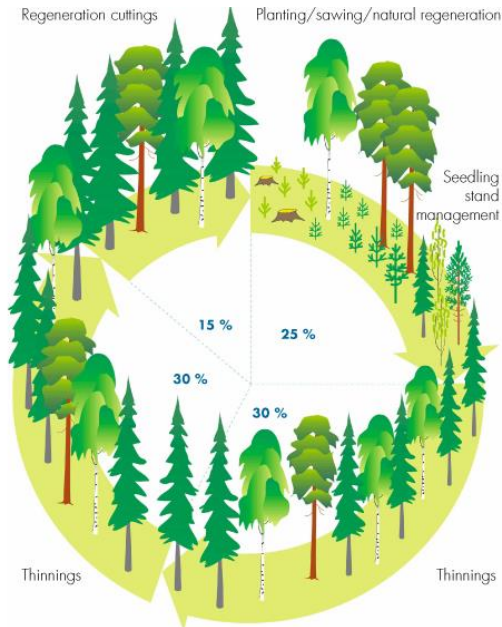
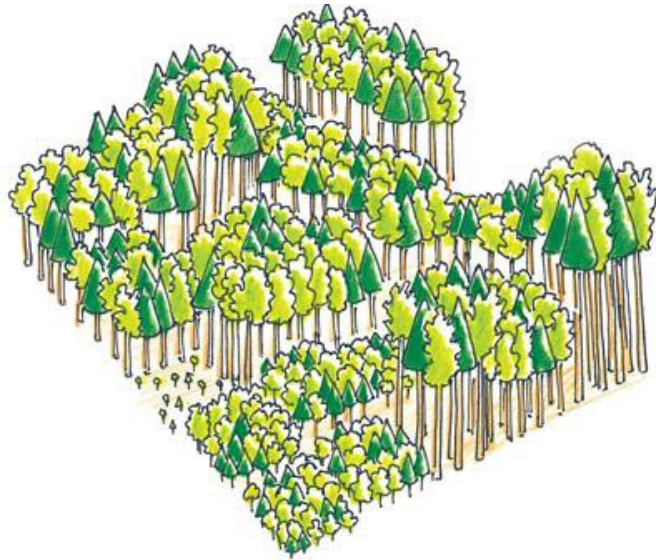
Impacts de la mobilisation des bois sur la **biodiversité à l'échelle du paysage** (échelle massif = **gamma γ**)



2 CONCEPTS D'ÉCOLOGIE SPATIALE

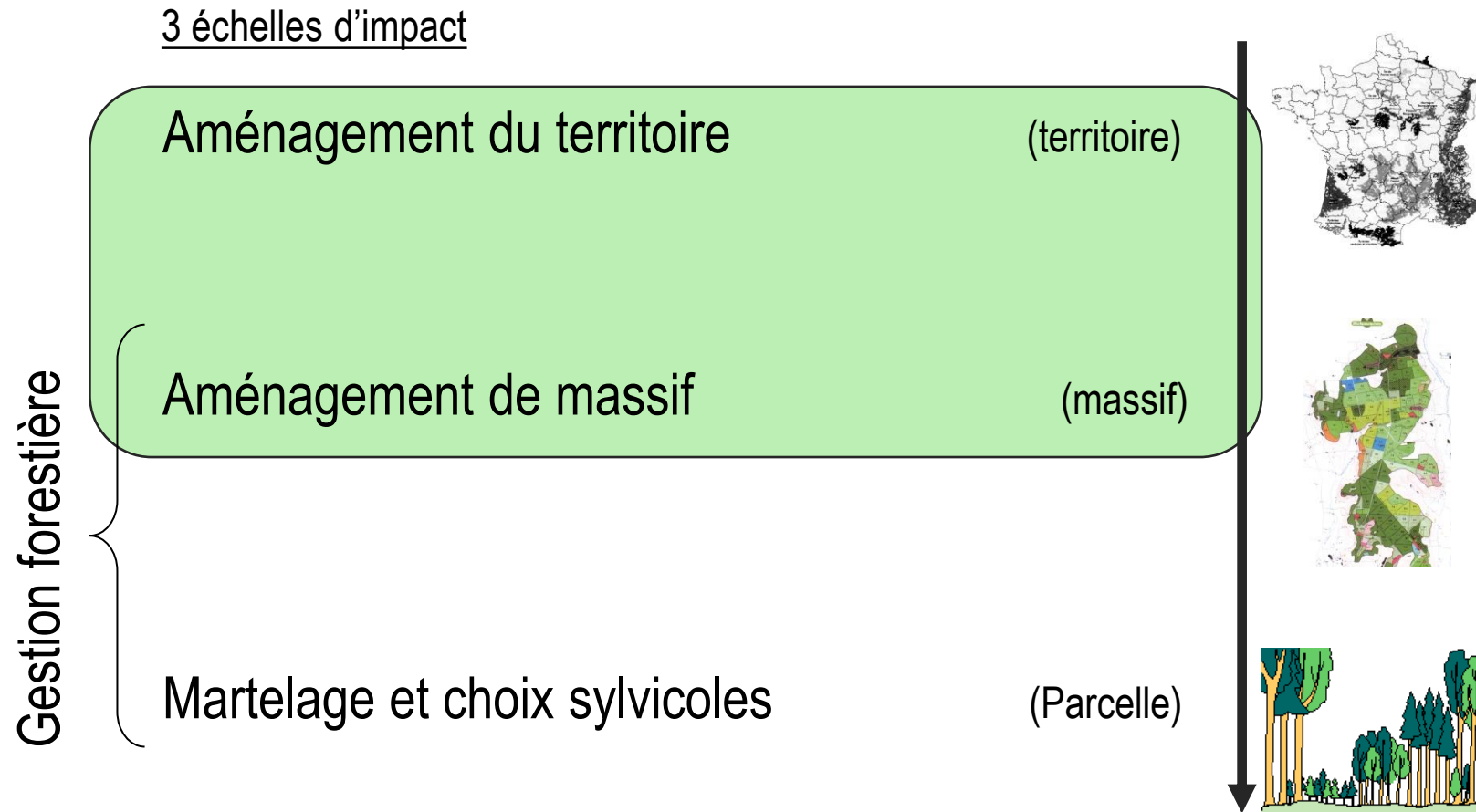
La forêt : **un milieu mosaïque et dynamique.**

Les paysages sont **hétérogènes dans le temps et l'espace.**



2 CONCEPTS D'ÉCOLOGIE SPATIALE

Impacts multi-scalaires de la mobilisation des bois sur la biodiversité



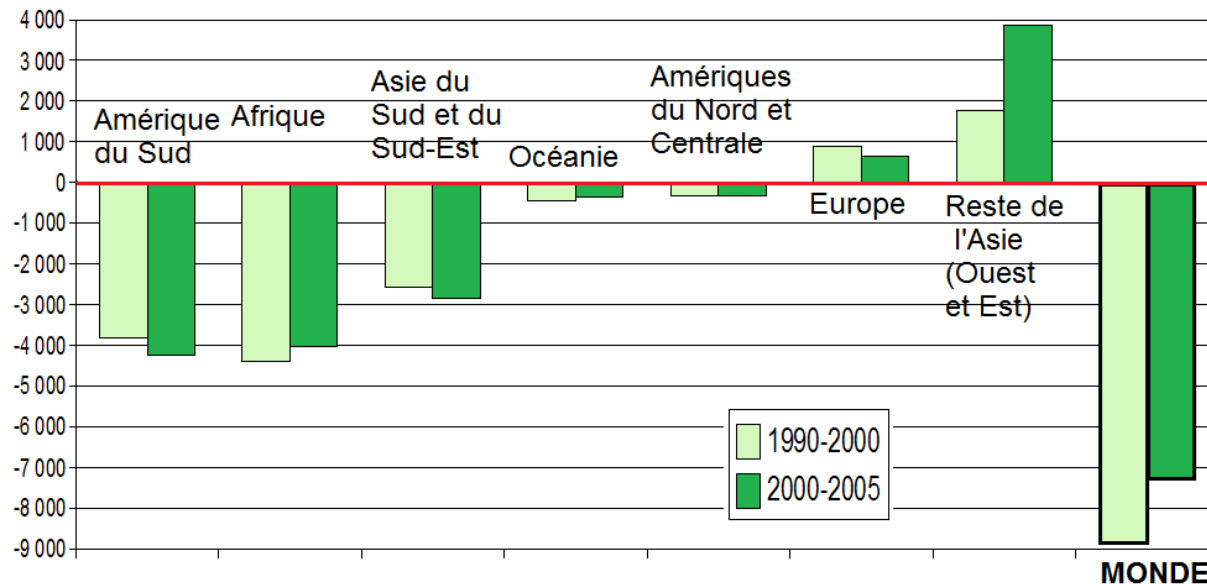
2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – ÉVOLUTION DU TERRITOIRE FORESTIER

Biodiversité mondiale : menaces internationales de la **déforestation**

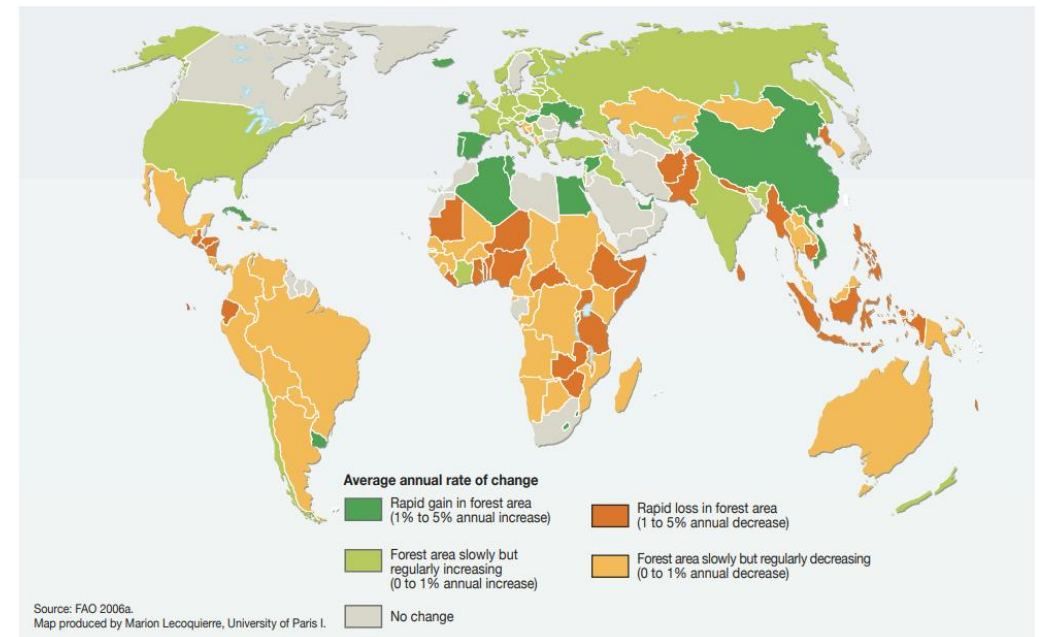
Déforestation mondiale =

- Surface forestière française métropolitaine chaque année ;
- 20 000 hectare de forêt perdue par jour

Evolution des surfaces de forêts depuis 1990 (en 1000/ha/an)

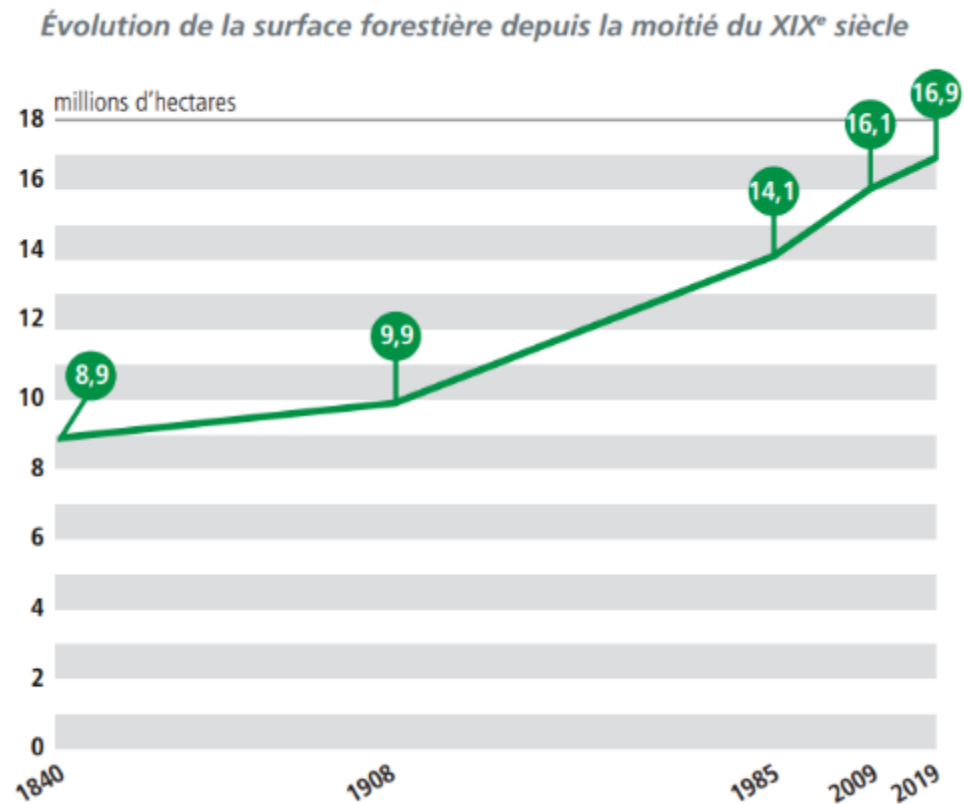


Changes in area covered by forest, 1990-2005



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – ÉVOLUTION DU TERRITOIRE FORESTIER

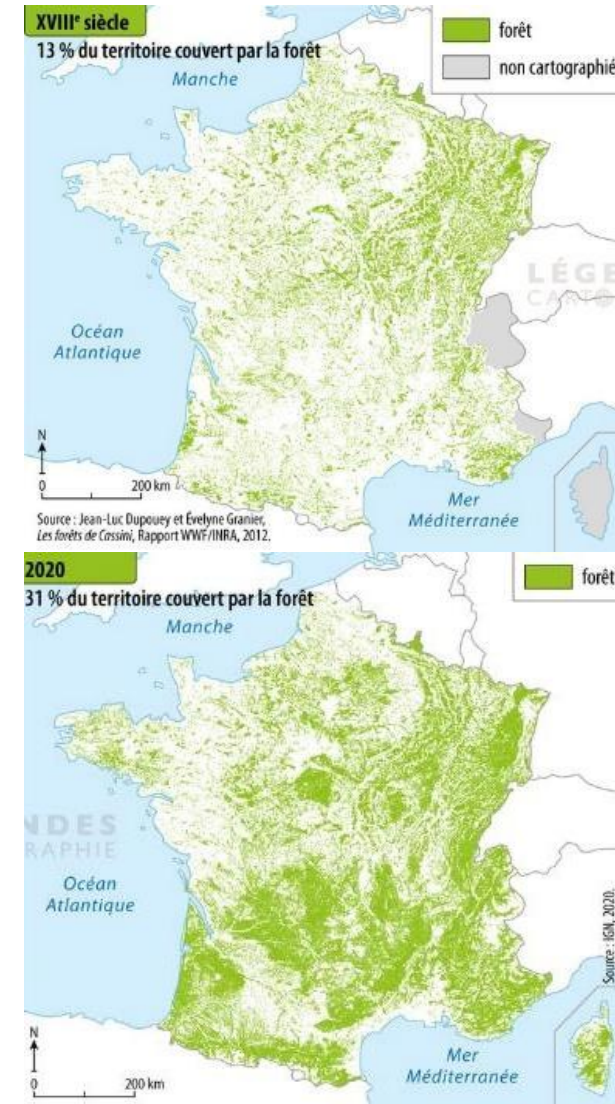
En France : extension et fragmentation de la forêt française – **doublment de la surface forestière en 2 siècles.**



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – ÉVOLUTION DU TERRITOIRE FORESTIER

En France : **évolution de la forêt depuis le 19^{ème} siècle.**

- Forte hétérogénéité nationale :
 - Accroissement fort en zone méditerranéenne et Massif Central
 - Lorraine + Centre + IDF + Nord = +21% de surface forestière
- Forêts anciennes vs. forêts récentes
 - Forêt ancienne (carte d'Etat-Major) : **de forte disparité entre territoires**
 - Lorraine : **70%** de forêt anciennes
 - Bretagne : **20%** de forêts anciennes

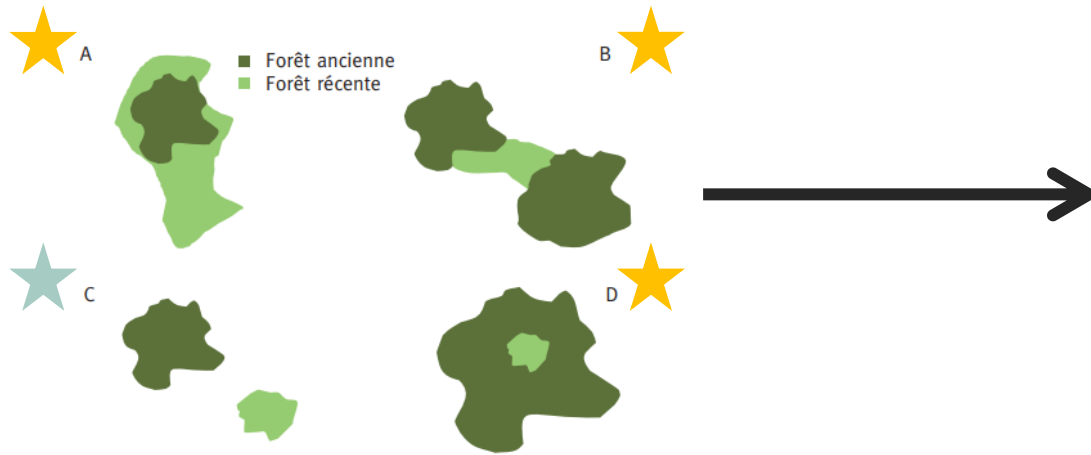


2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – ÉVOLUTION DU TERRITOIRE FORESTIER

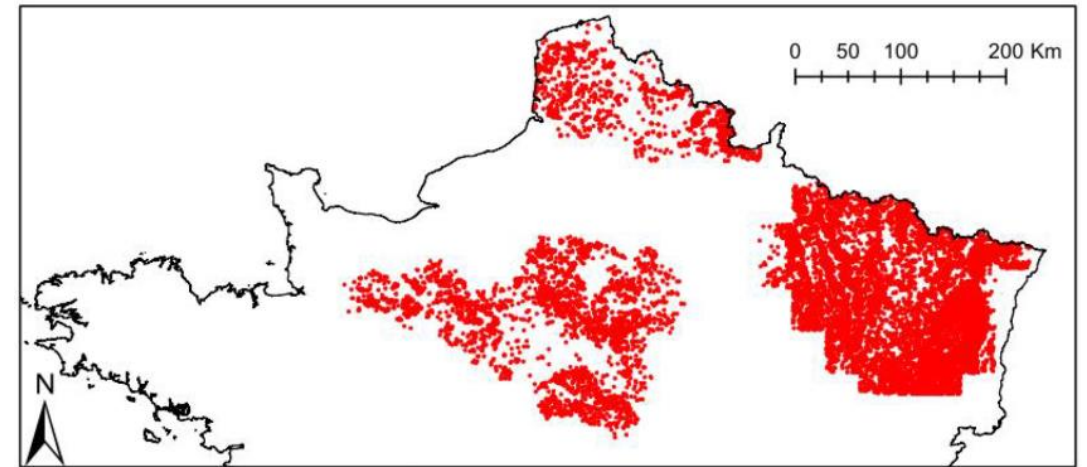
En France : **évolution de la forêt depuis le 19^{ème} siècle.**

- L'augmentation des surfaces forestières se fait principalement par agrégation[★] :
 - Forêts récentes : 88% en contact avec des forêts anciennes ;
 - Seulement 12% des forêts actuelles par nucléation[★] depuis 1830.

ILLUSTRATION DES QUATRE CONFIGURATIONS SPATIALES POSSIBLES
DES TACHES DE FORÊTS ANCIENNES ET RÉCENTES
Tiré de Bergès *et al.* (2016)



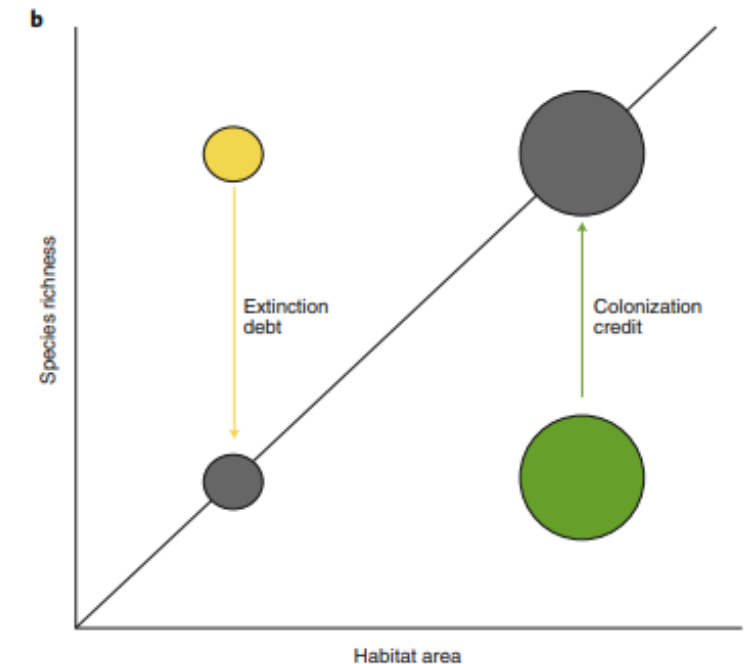
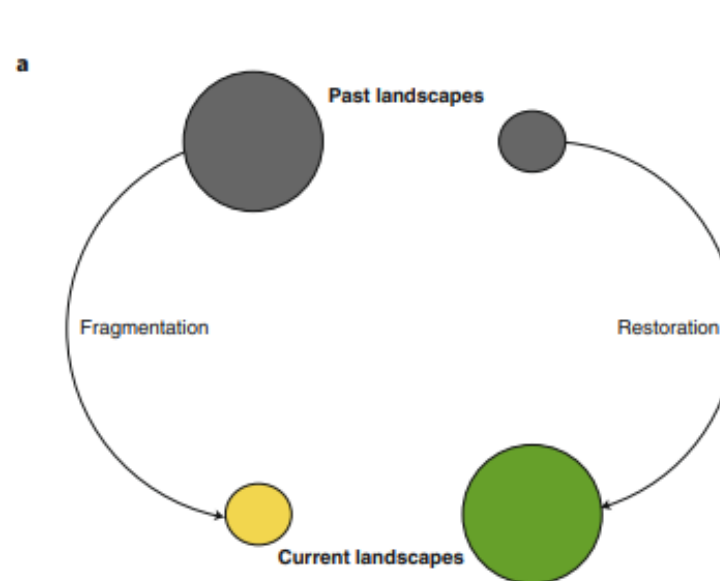
La distance moyenne à la lisière externe non forestière augmente (≠ lisières internes)



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – ÉVOLUTION DU TERRITOIRE FORESTIER

Dette d'extinction et crédit de colonisation

- Effets différés de la disparition d'espèces suite à une fragmentation ancienne des forêts
 - **Dette d'extinction**
- Délai de colonisation de forêts récentes
 - **Crédit de colonisation**

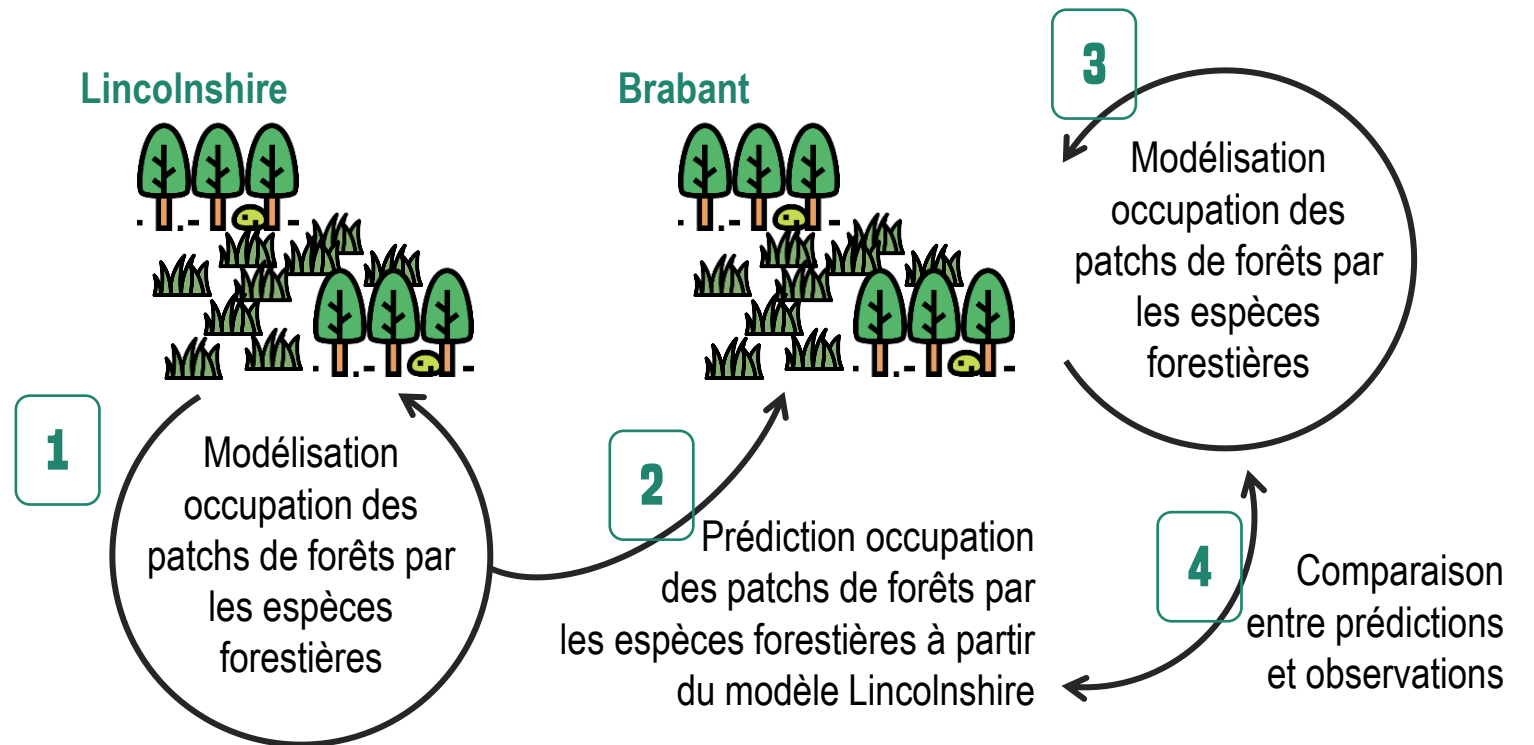
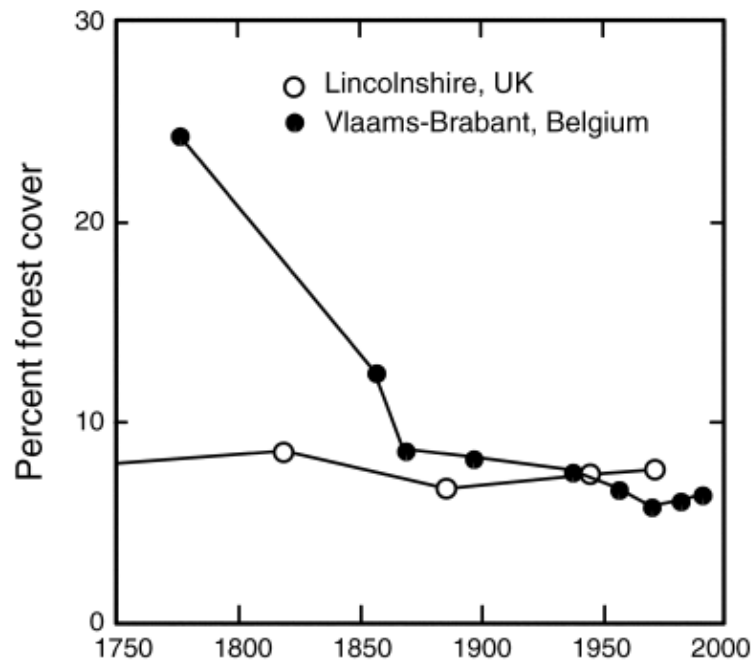


2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – ÉVOLUTION DU TERRITOIRE FORESTIER

Exemple : (Vellend et al., 2006)

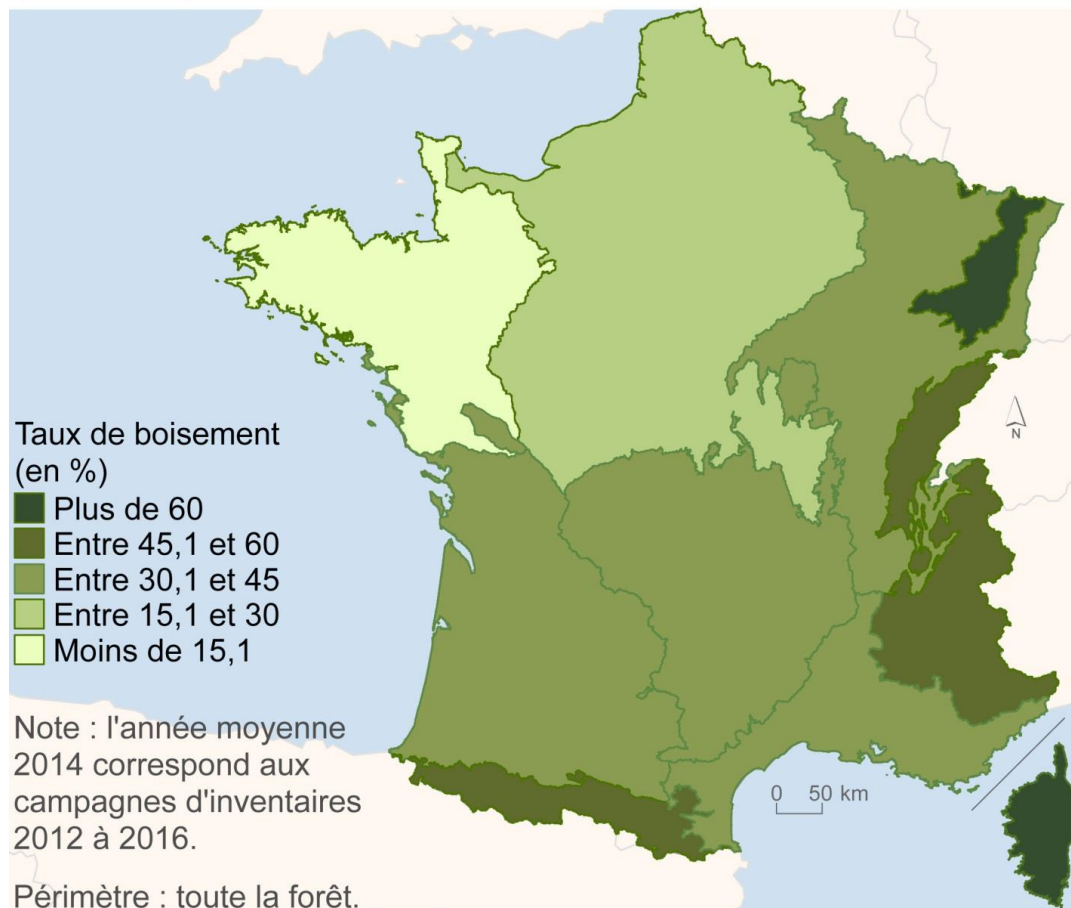
2 jeux de données floristiques et historiques sur un paysage de boisements fragmentés :

- **Lincolnshire (UK)** : taux de boisement faible et stable depuis 1000 ans (5-8%) → **dette d'extinction déjà payée**
- **Brabant (B)** : chute du taux de boisement entre 1775 et 1900 (de 25% à 8%) → **dette d'extinction en cours ?**



Taux de boisements les plus élevés dans les régions de montagne.

Taux de boisement par grande région écologique (GRECO) en 2014



ONB
Observatoire National
de la Biodiversité

Visuel ONB, d'après :

Origine des données : IGN, nouvelle méthode d'inventaire forestier, fond GRECO

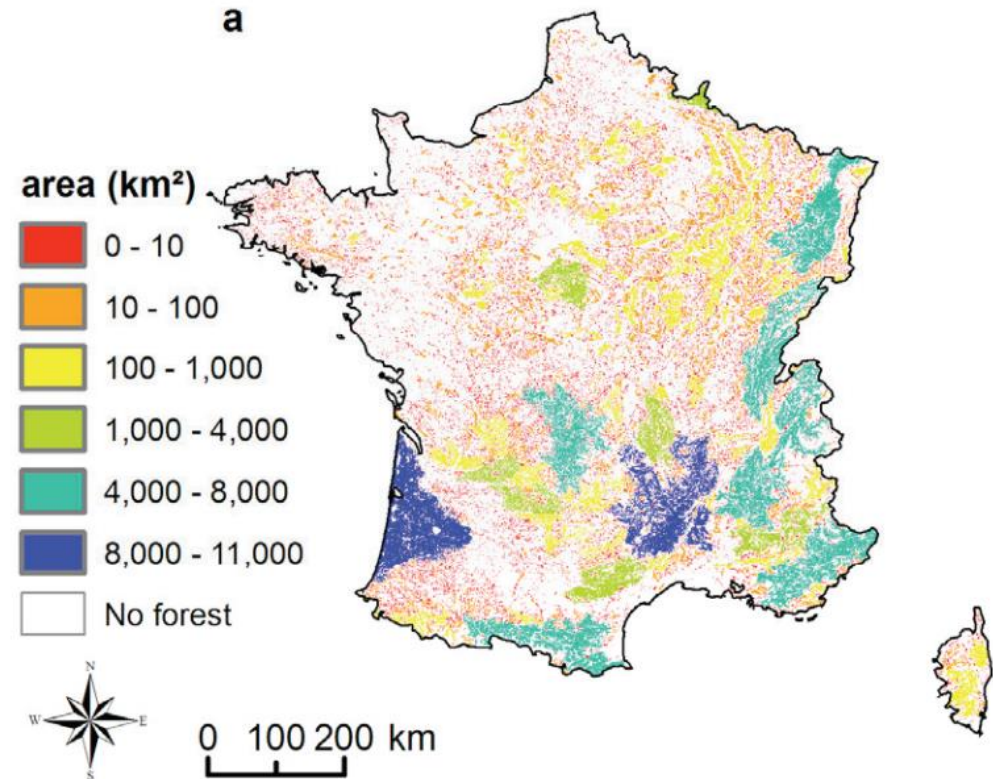
Traitements : Ecofor, 2018

Extension et fragmentation de la forêt française

La structure spatiale des **fragments forestiers** dans le paysage français est très différente en **plaine** et en **montagne**.

Les **grand fragments de forêts** ($> 5\text{km}^2$) couvrent une plus grande proportion de surface en **montagne** (**67,3%**) qu'en **plaine** (**29,1%**).

Taille du fragment forestier



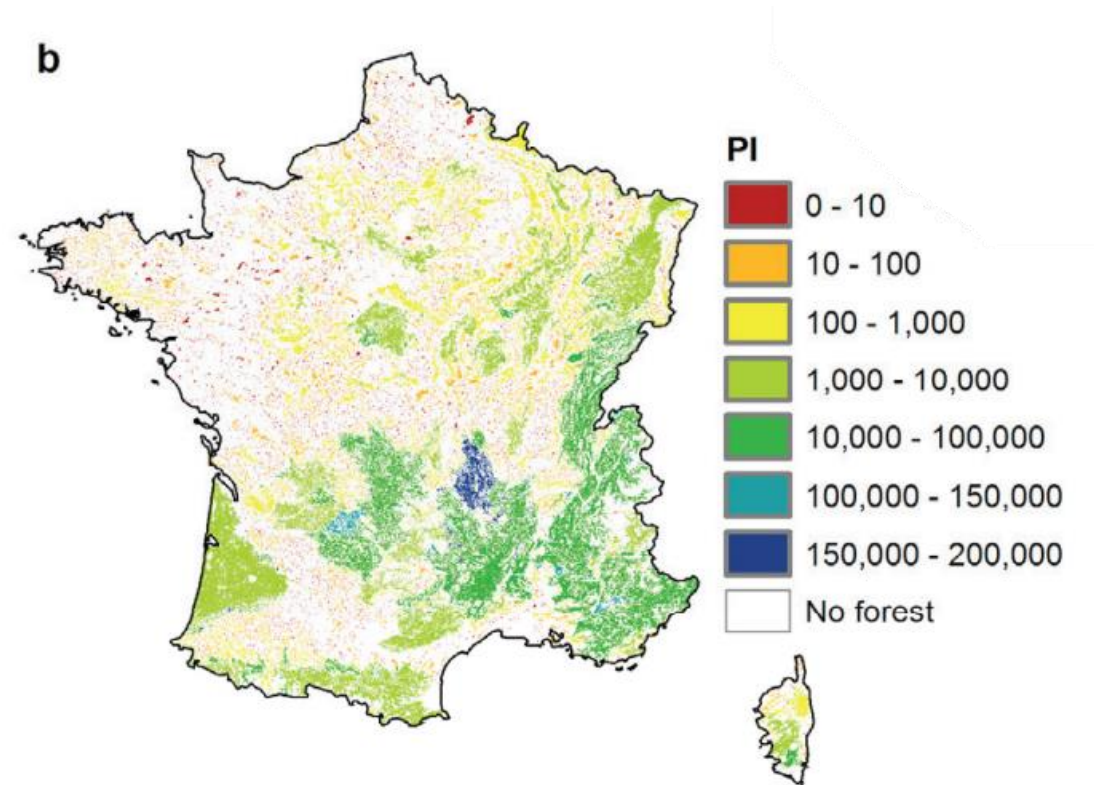
Extension et fragmentation de la forêt française

La structure spatiale des **fragments forestiers** dans le paysage français est très différente en **plaine** et en **montagne**.

Les **grand fragments de forêts** ($> 5\text{km}^2$) sont **plus proches** les uns des autres en montagne qu'en plaine.

Proximity index (PI) → haute valeur de PI lorsque fort rapprochement entre fragments (i.e. faible fragmentation)

Proximité entre fragments forestiers



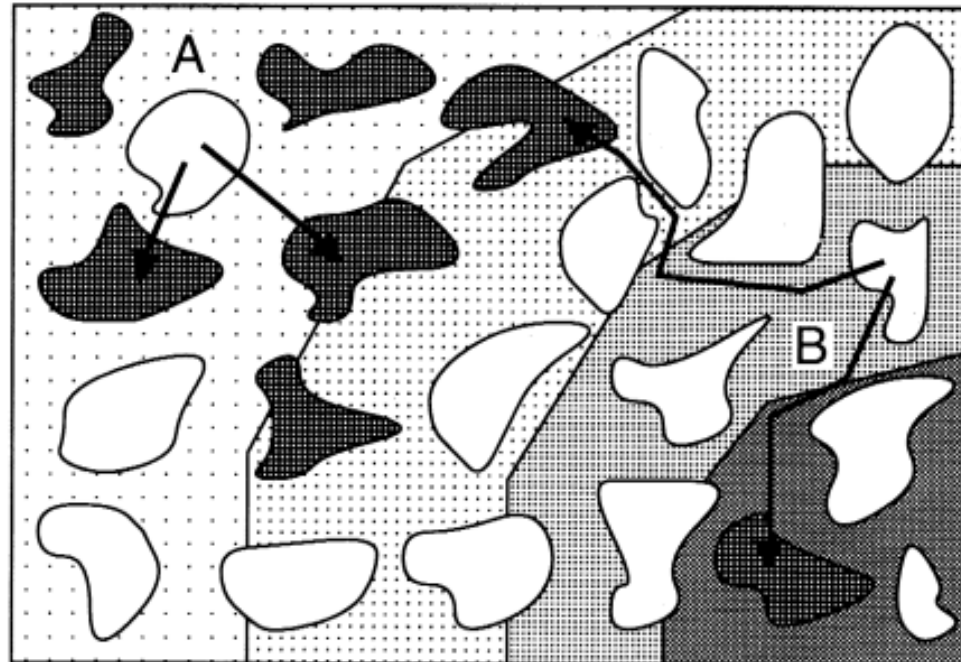
2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

Taylor et al. (1993)

« Degré selon lequel le paysage facilite ou contraint le mouvement des espèces entre les ressources en habitats »

La **probabilité de coloniser un habitat favorable** dépend de :

- La **distance aux sources** ;
- La **porosité** au déplacement.



La **connectivité du paysage** sous-tend une mosaïque de fragments. Les taches claires et sombres contiennent différentes **ressources** nécessaires à l'animal. Les surfaces de fond plus sombres présentent une **connectivité** plus élevée. Les animaux de la zone B peuvent accéder plus facilement aux fragments (flèches) et pourront ainsi compléter leurs besoins en ressources.

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

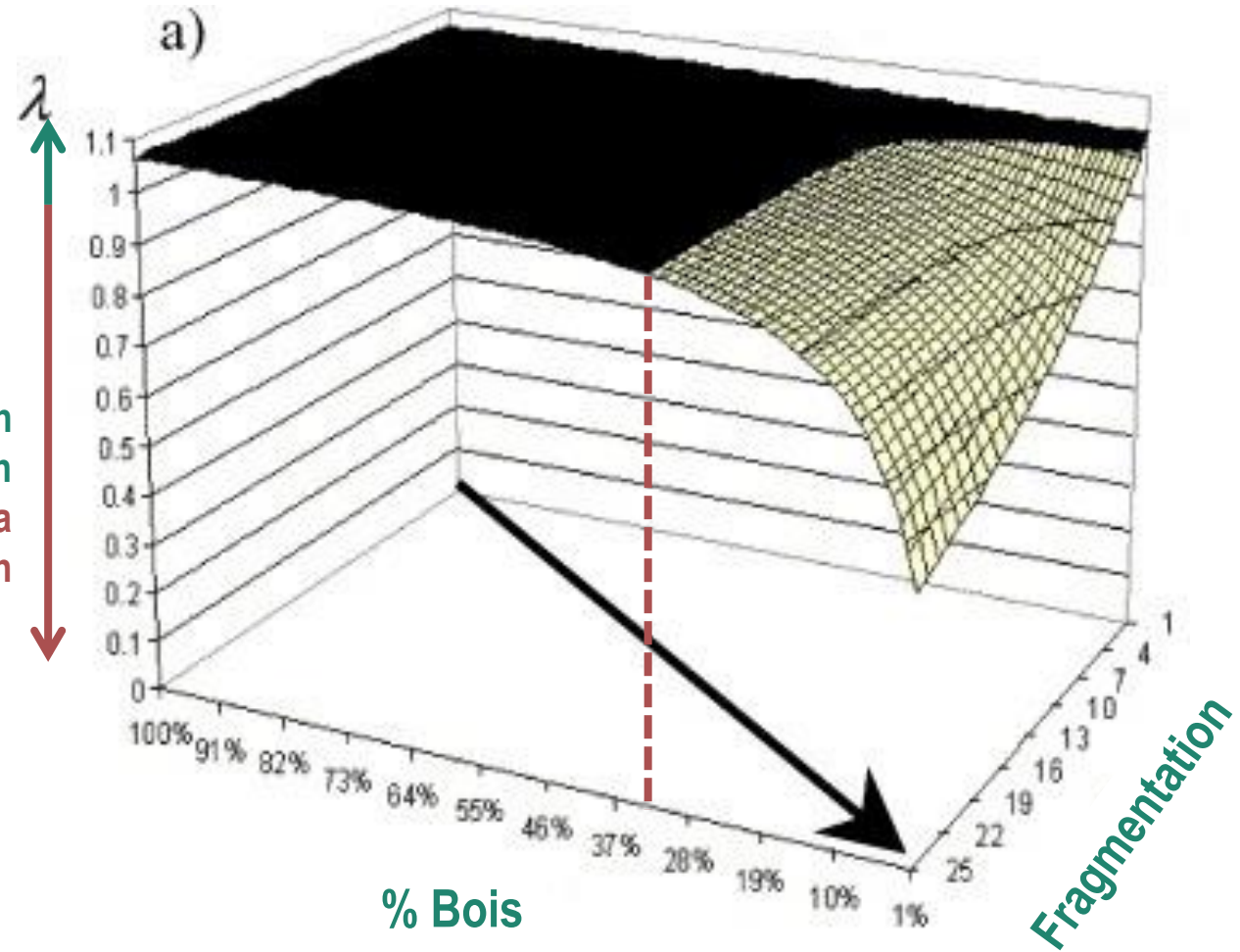
Effet du taux de boisement sur les espèces forestières

Caractéristique majeure du paysage agricole pour la survie des populations d'un Carabidae forestier (*Abax parallelepipedus*) → % d'éléments boisés (seuil à 33%)



© Olivier JAMBON/Guillaume BOUGER/Jean-Luc ROGER/INRA/Observatoire de Rennes/CNRS Photothèque

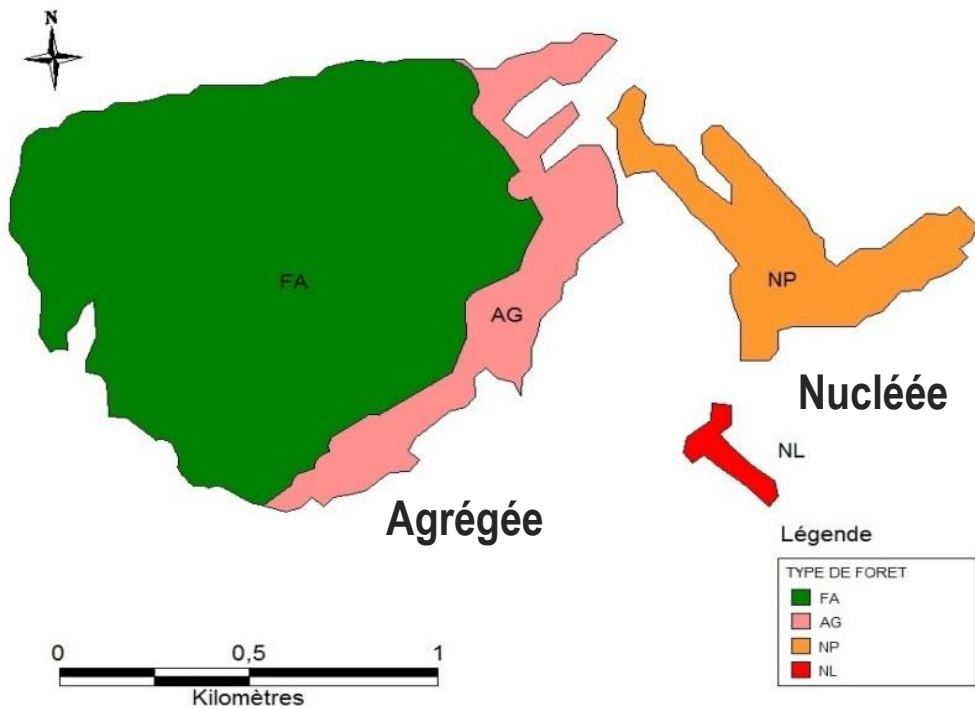
$\lambda > 1$: augmentation de la population
 $\lambda < 1$: extinction de la population



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

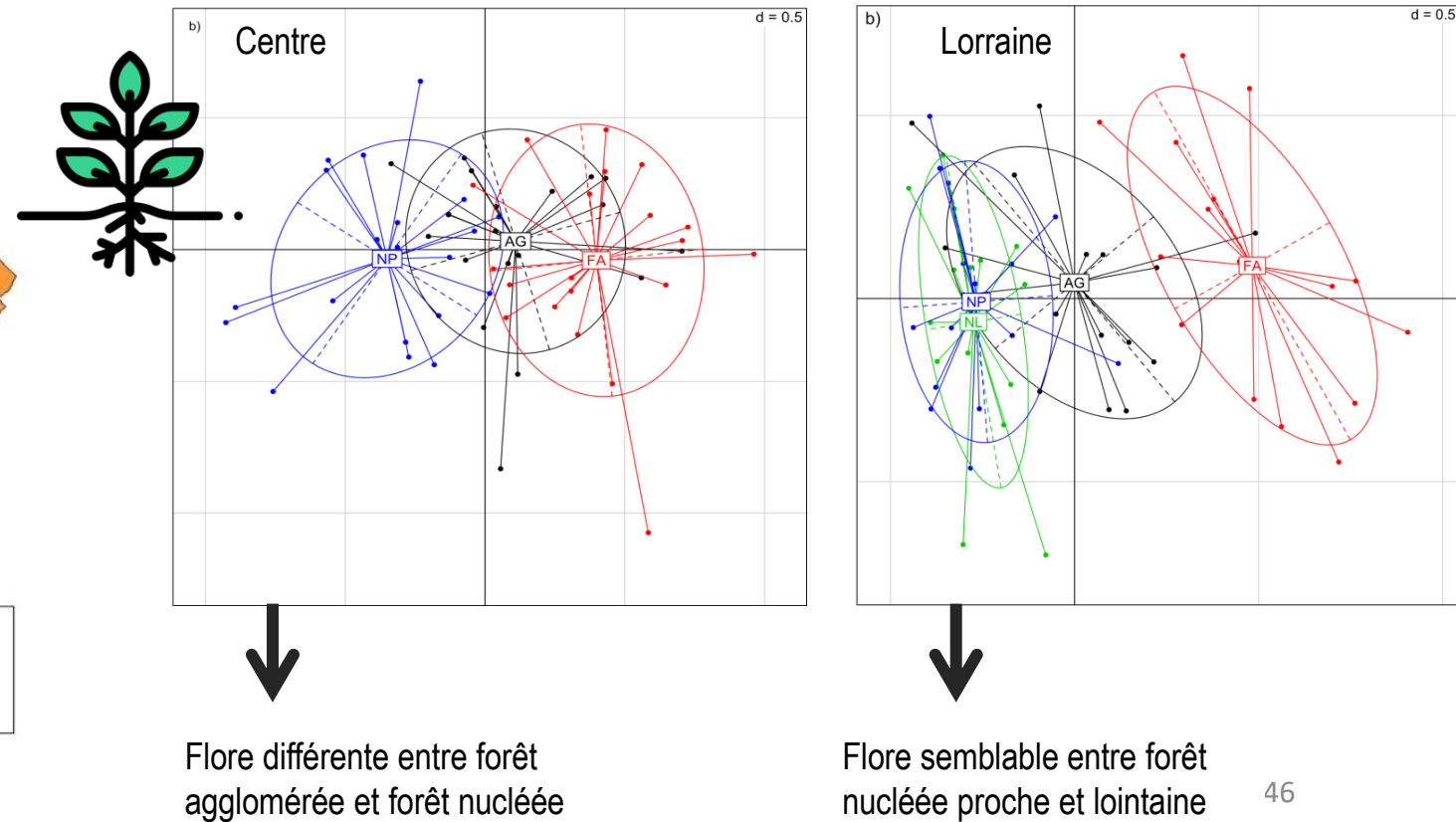
Doublement de la surface forestière : **agrégation, nucléation** et **colonisation des forêts récentes**

Nucléation vs. agrégation : distance à la forêt ancienne



FA : forêt ancienne
AG : forêt récente en
agrégation

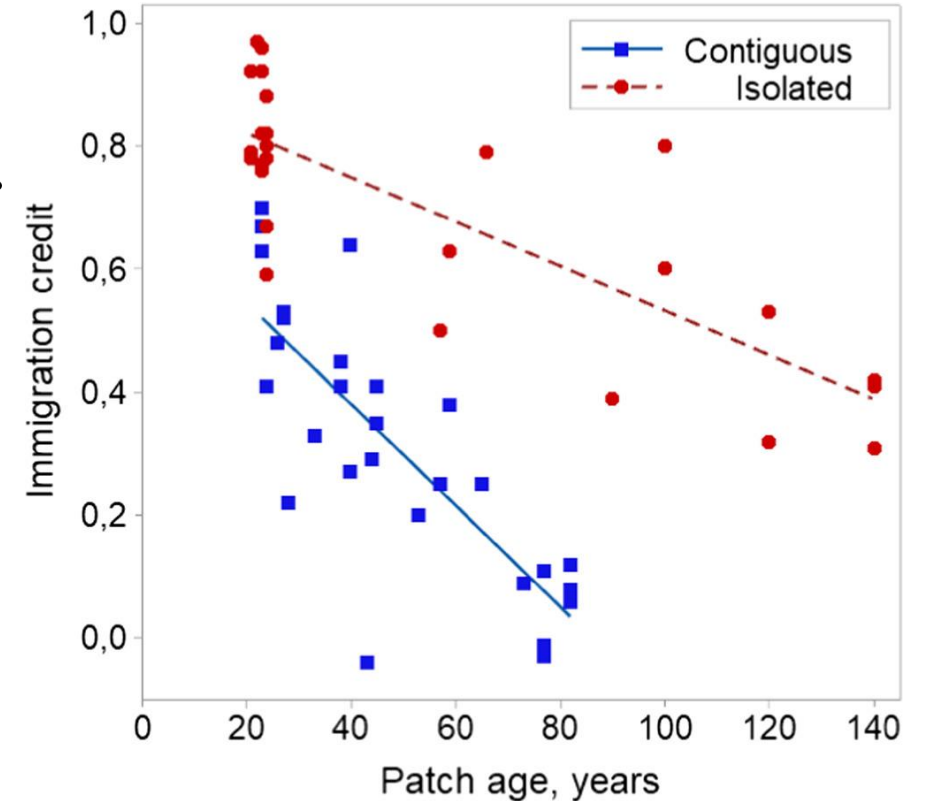
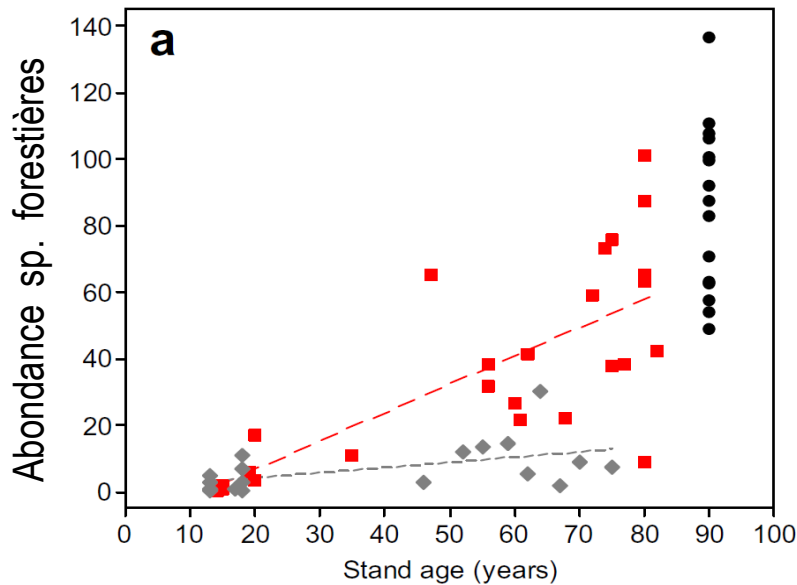
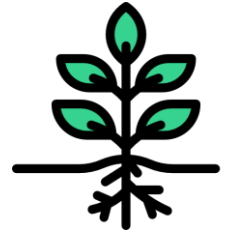
NP : forêt récente en nucléation
proche d'une forêt ancienne
NL : forêt récente en nucléation loin
d'une forêt ancienne



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

Doublement de la surface forestière : **agrégation, nucléation** et **colonisation des forêts récentes**

Colonisation plus rapide des forêts récentes agrégées.



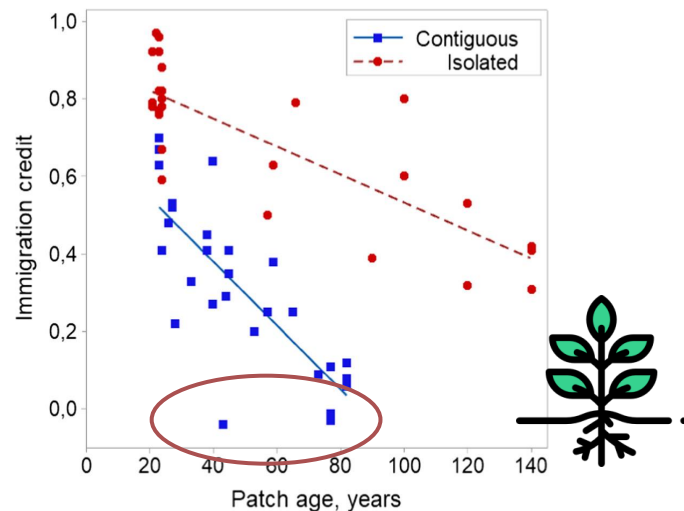
BRUNET J., HEDWALL P.-O., LINDGREN J., COUSINS S.A.O., 2021. Immigration credit of temperate forest herbs in fragmented landscapes—Implications for restoration of habitat connectivity, *Journal of Applied Ecology*, 58, 10, p. 2195-2206.

BRUNET J., VALTINAT K., MAYR M.L., FELTON A., LINDBLADH M., BRUUN H.H., 2011. Understorey succession in post-agricultural oak forests: Habitat fragmentation affects forest specialists and generalists differently, *Forest Ecology and Management*, 262, 9, p. 1863-1871.

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

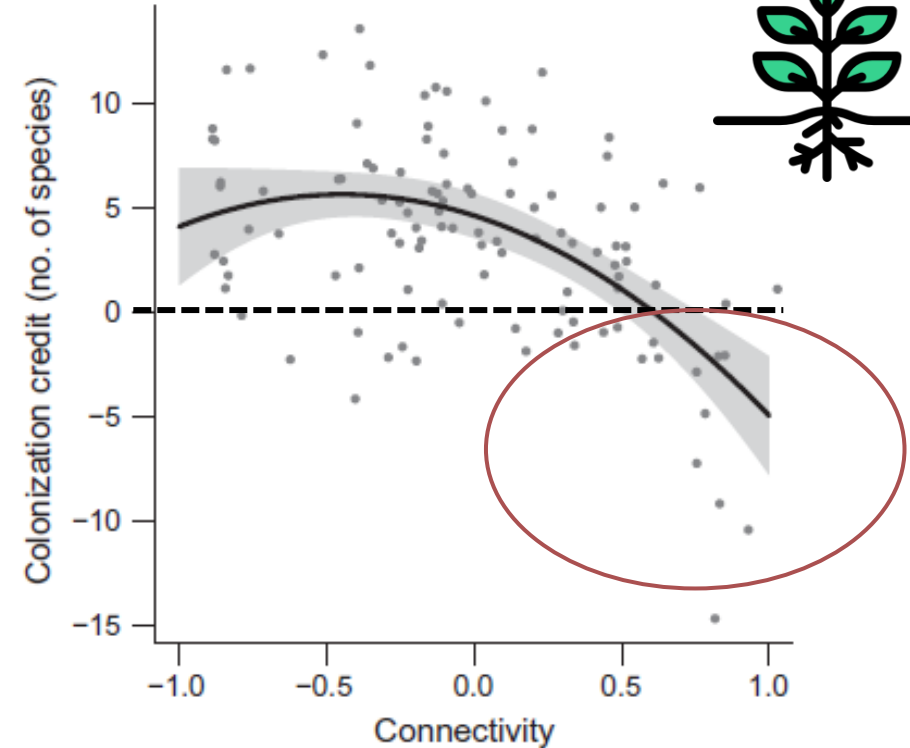
Controverse ? Qualité d'habitat, agencement spatial, continuité historique ?

- Forte connectivité des forêts récentes → **crédit de colonisation négatifs !**
- Les **forêts post-agricoles** meilleures que les forêts anciennes pour soutenir un grand nombre d'espèces de plantes forestières.



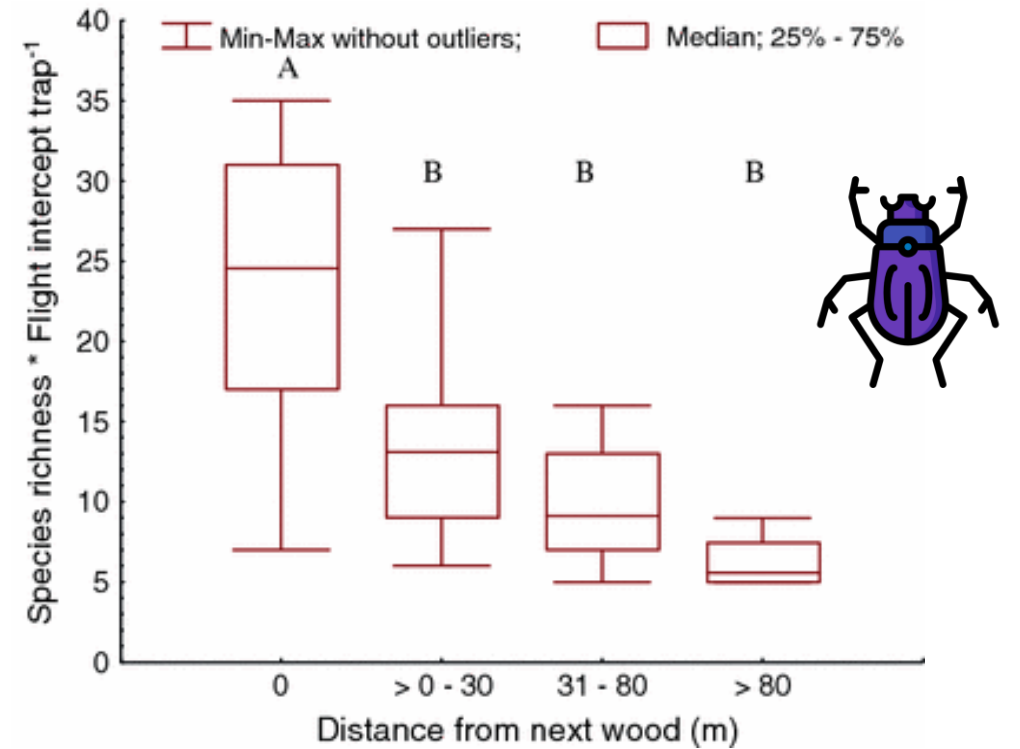
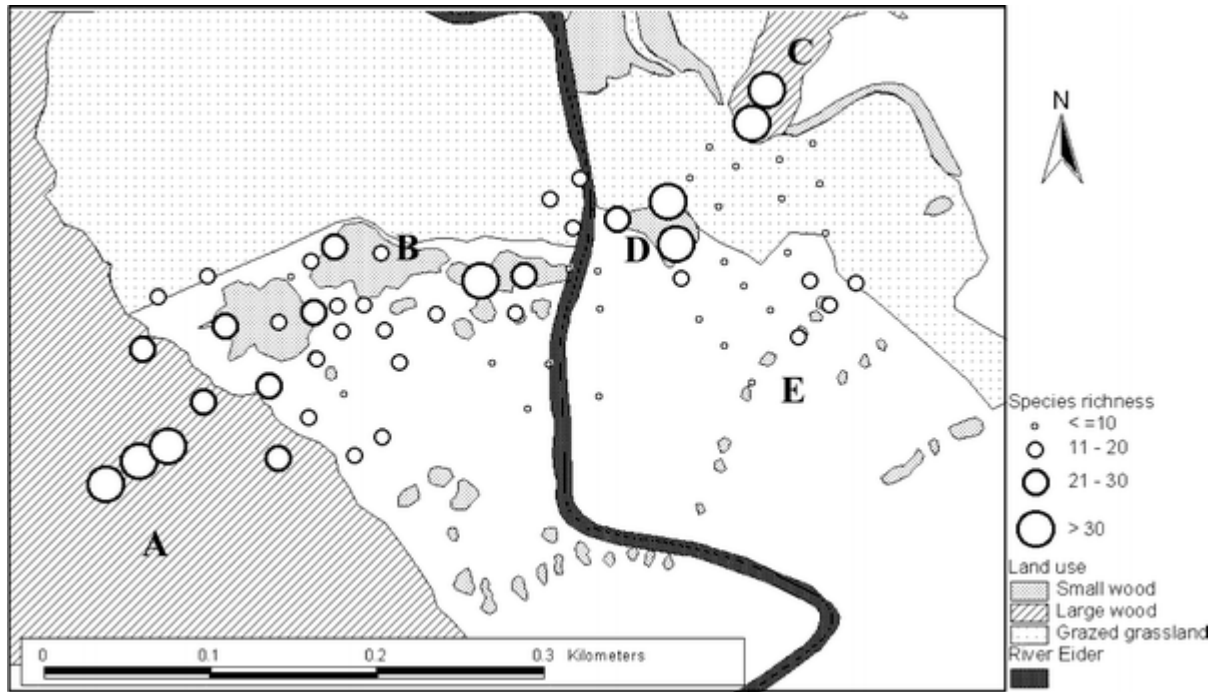
Colonization credit of post-agricultural forest patches in NE Germany remains 130–230 years after reforestation

Tobias Naaf*, Jens Kolk



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

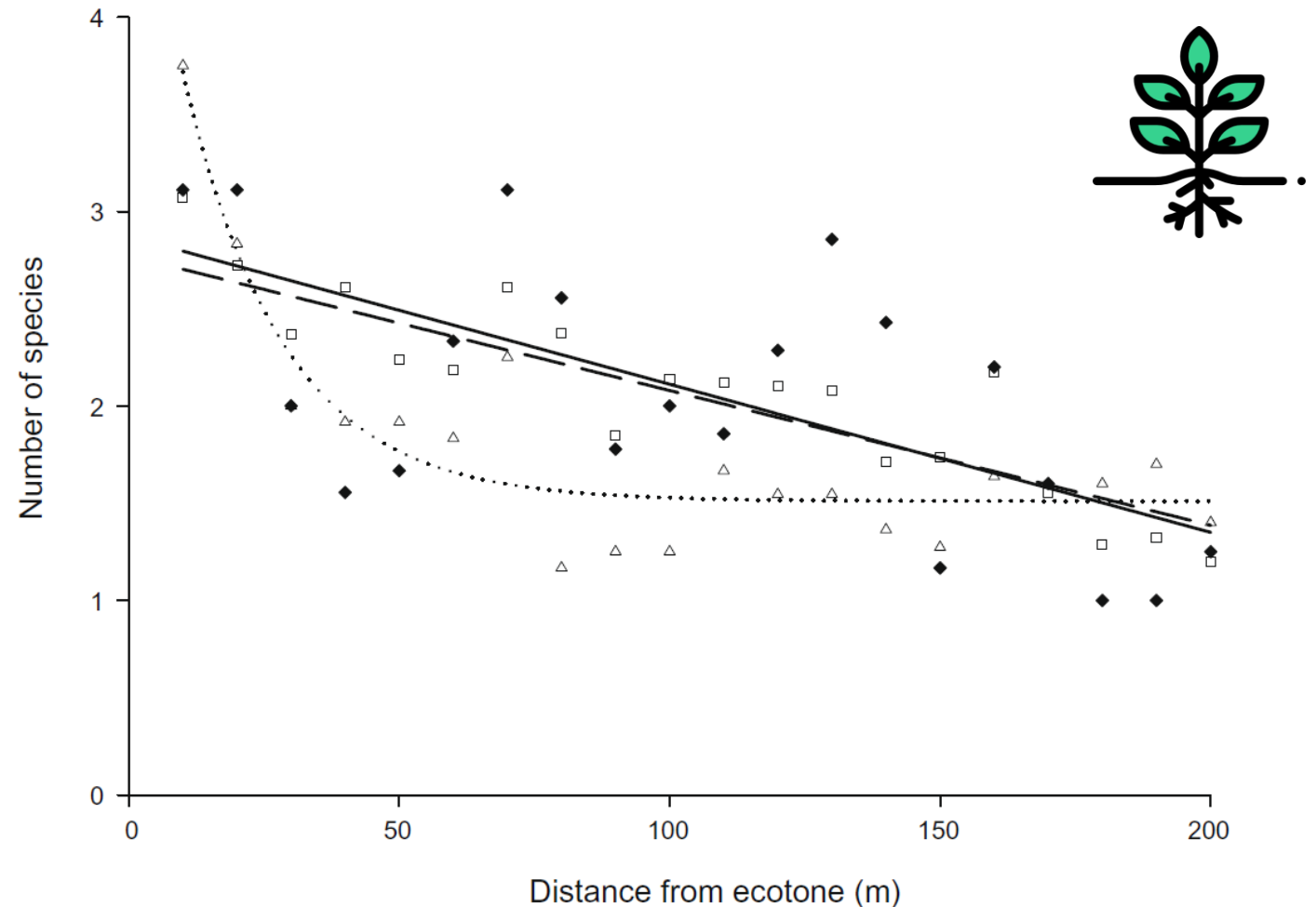
Connectivité forestière et coléoptères saproxyliques.



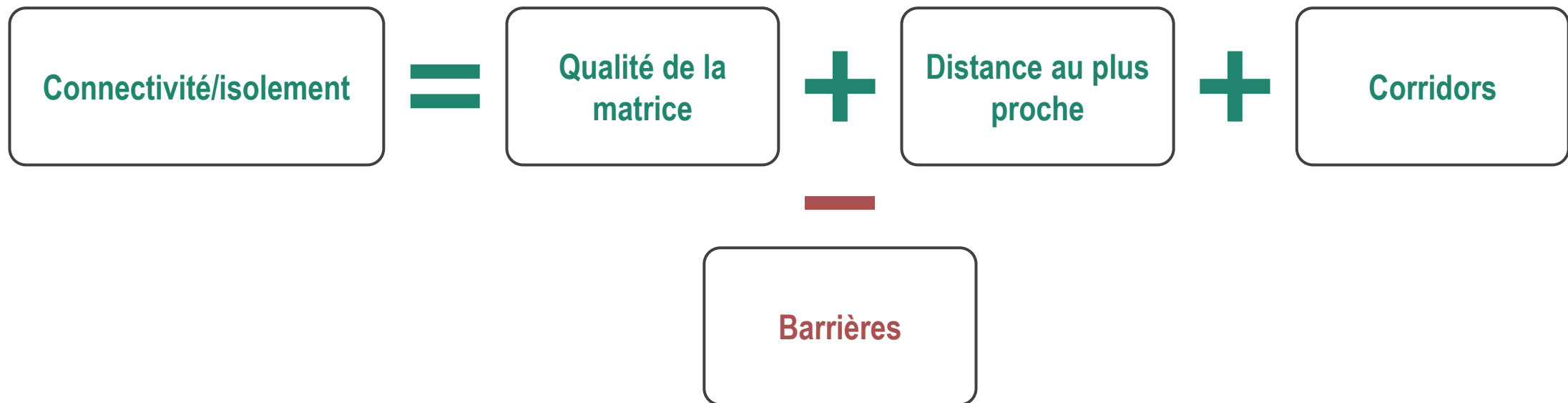
2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

Paysage et colonisation des forêts récentes

Les linéaires boisés augmentent la colonisation des espèces forestières dans les forêts récentes.



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

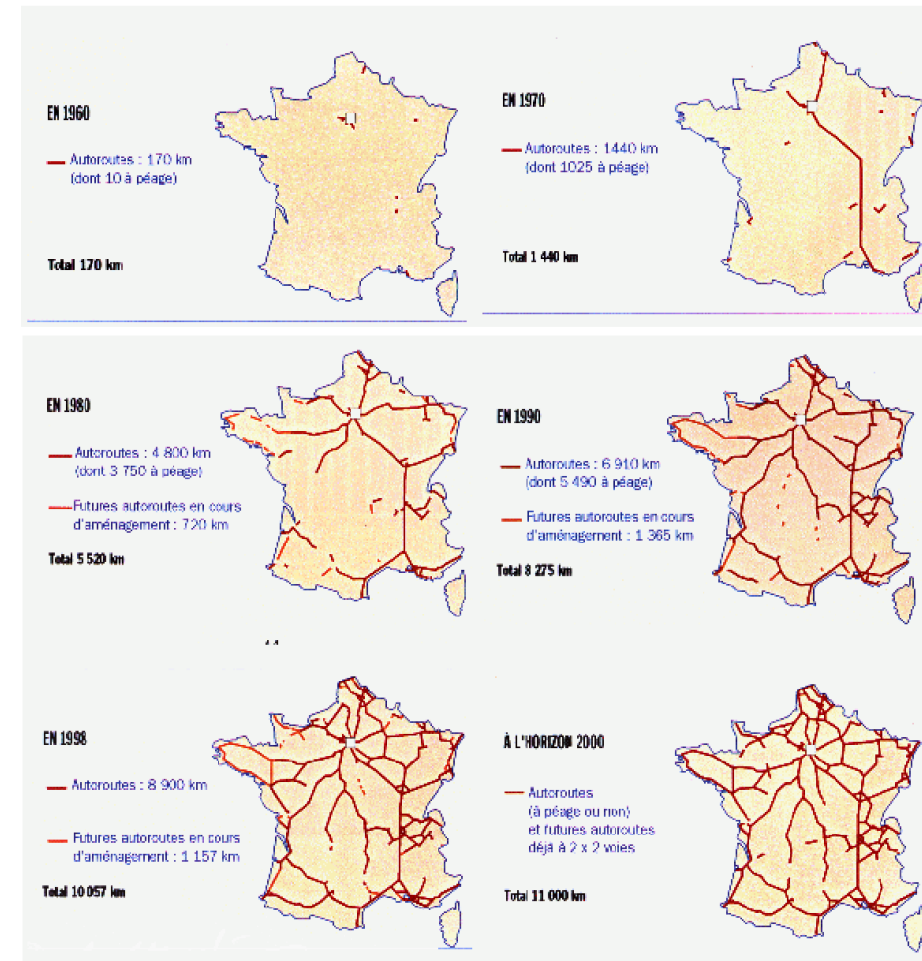


2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

Fragmentation forestière par les infrastructures de transport

Emprise des infrastructures

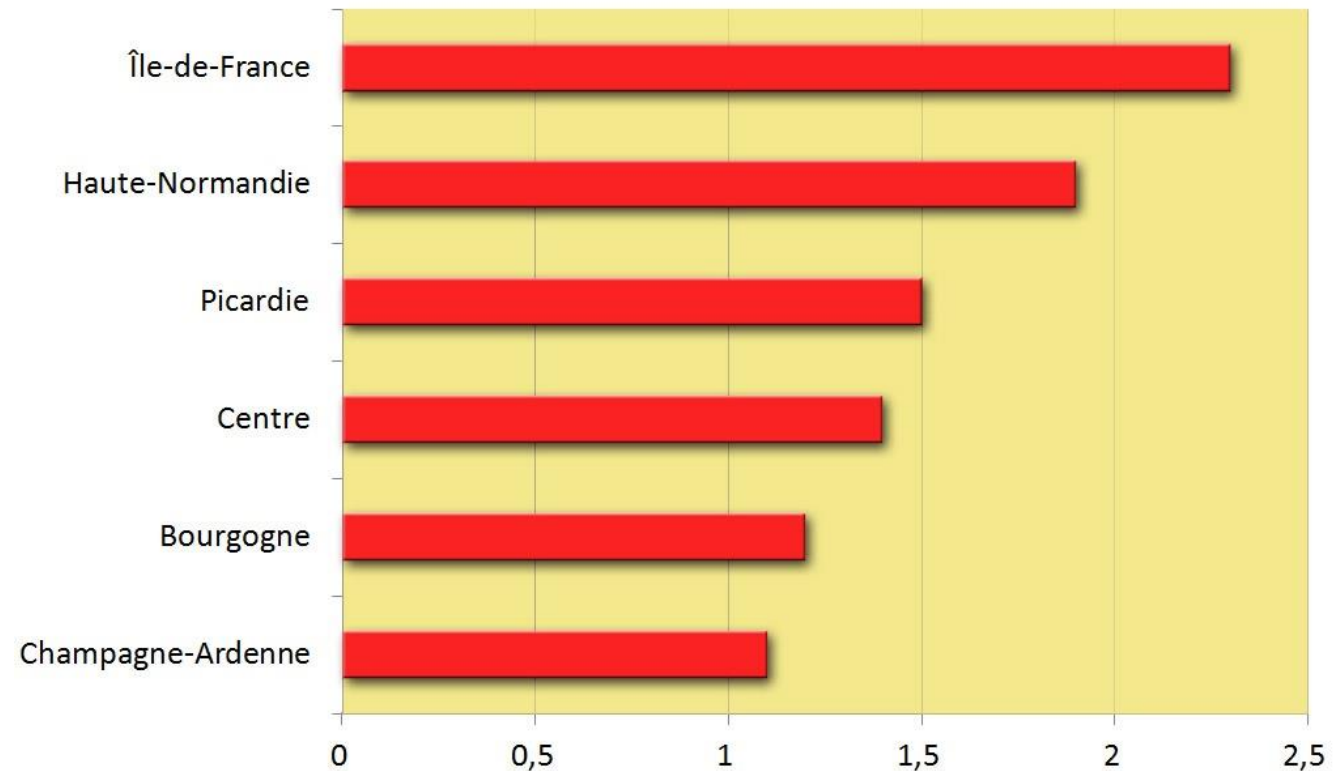
- En hausse depuis 50 ans (nombre et gabarit)
 - Autoroutes
 - 1960 → 170km
 - 1997 → 8 940km
- + réduction des haies



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

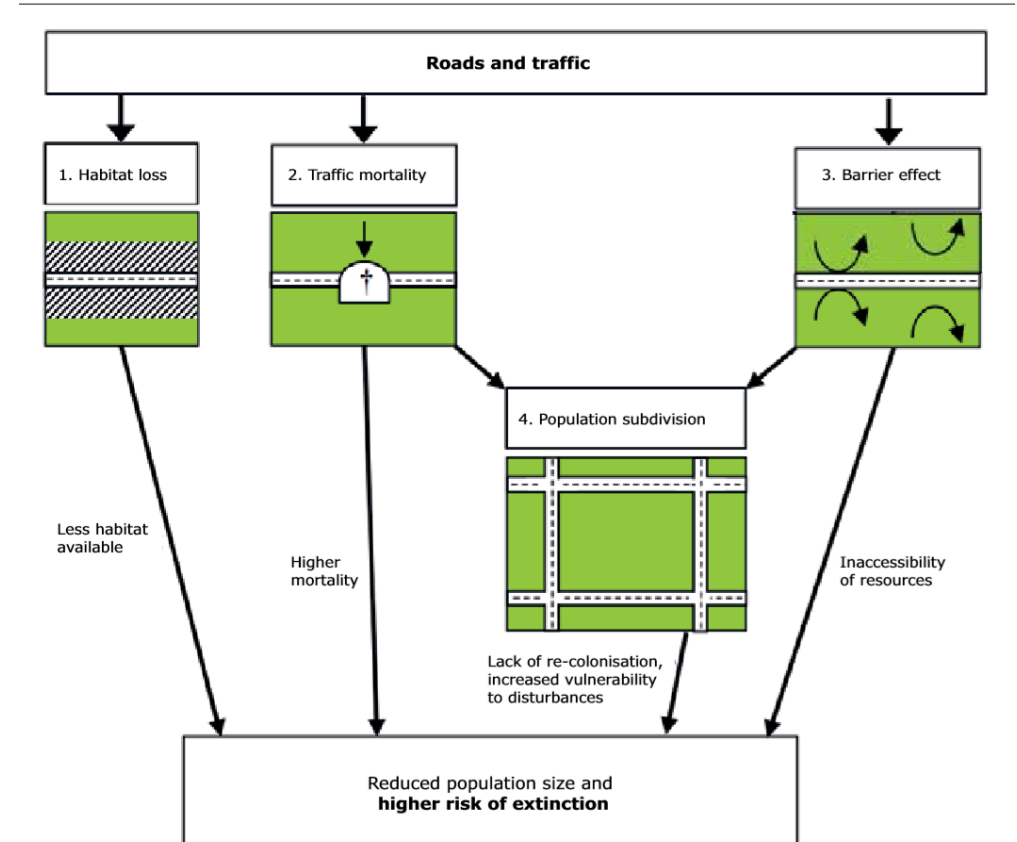
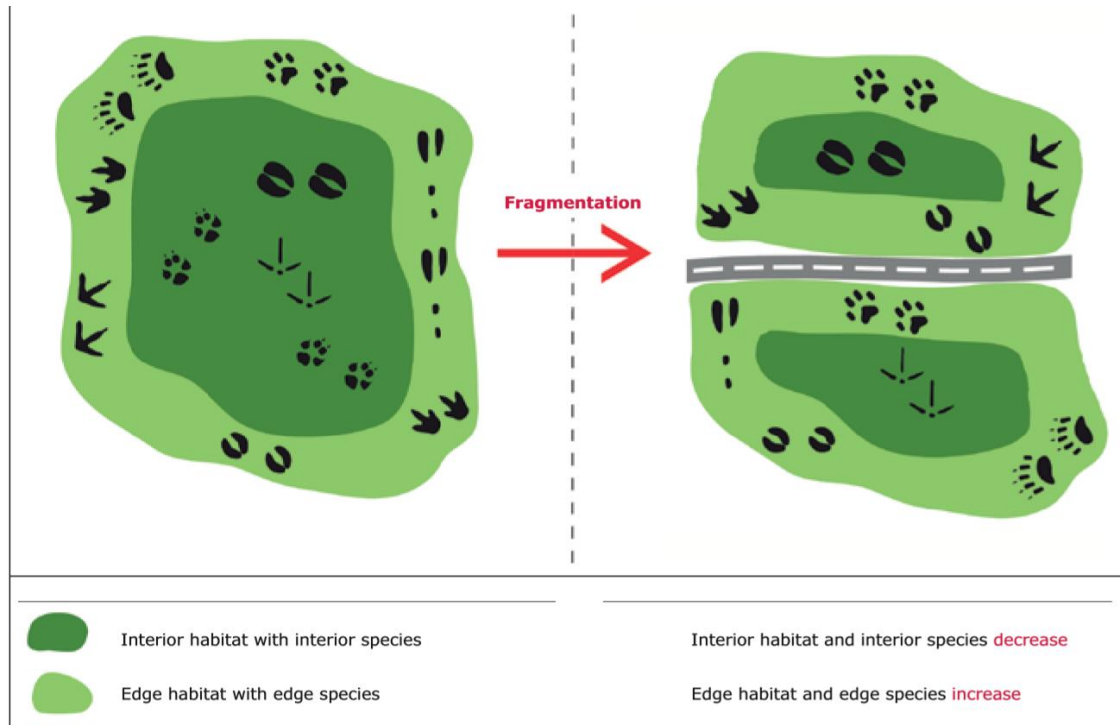
Fragmentation forestière par les infrastructures de transport

Indice de fragmentation (km/ha de voies de transport carrossables en forêt) pour 6 régions françaises, en retenant l'ensemble des voies carrossables. (exclus : chemins, sentiers, pistes cyclables, canaux, tunnels).



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

Impacts de la **fragmentation** des territoires forestiers français métropolitains sur la **biodiversité forestière**.



+ **effets de lisière** (changements abiotiques et biotiques, compétiteurs de milieux ouverts)

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONNECTIVITÉ

Effet de la densité de routes

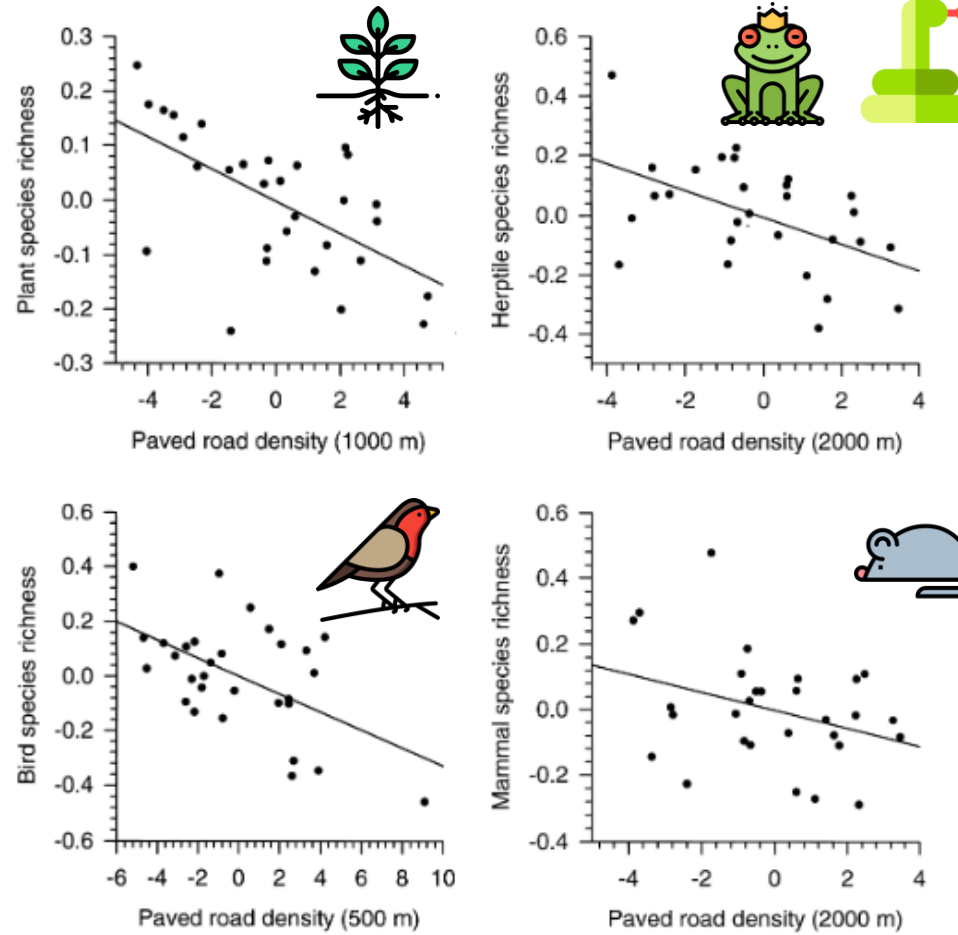




Figure 2. Partial plot of the relationship between species richness and density of paved roads on adjacent lands for herptiles, mammals, birds, and plants. The plots show the residuals of the species richness-area regression plotted against the residuals of the paved road density-area regression.

Aménagement agroécologique du paysage - Interfaces forêts/milieux ouverts

Effets des éléments boisés sur le maintien des auxiliaires (services écosystémiques) :

- Ennemis naturel ; 
- Pollinisateurs ; 
- Complémentations, refuges, sources alimentaires alternatives, espèces multi-habitats ;
- MABES = Mobile-agent-based ecosystem services (Kremen et al., 2007)
Rendent un service local tout en dépendant de multiples échelles paysagères

La proximité de la forêt favorise le cortège de pollinisateurs agricoles

- Lisière forestière
 - Ressources florales diversifiées, floraison étalée dans le temps, sources de nectar et de pollen de substitution quand les cultures sont hors fleurs
 - Micro-habitats de nidification et d'hivernage (arbres à cavités, bois mort, etc.)
- Effet de lisière forestière positif



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE – CONCLUSION

- Evolution du territoire forestier en France
- Effet du taux de boisement
- Effet de la distance au plus proche boisement
- Effet des corridors entre boisements
- Effet barrière par les infrastructures (fragmentation forestière)
- Lisières externes et services écosystémiques



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF

- Fragmentation forestière interne - Dessertes
- Connectivité interne et trames
- Taille et répartition des coupes



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – FRAGMENTATION FORESTIÈRE INTERNE

Desserte – réseau de routes forestières

XVII^{ème} siècle : constitution d'un **maillage dense de routes et voies forestières** (en quadrillage)

Exemple de la forêt royale de Chantilly (carte de Cassini)



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – FRAGMENTATION FORESTIÈRE INTERNE

Desserte – réseau de desserte et fragmentation forestière interne

% de forêt à plus de 500 m d'une route forestière :

- 27% en 1985
- 22% en 1998

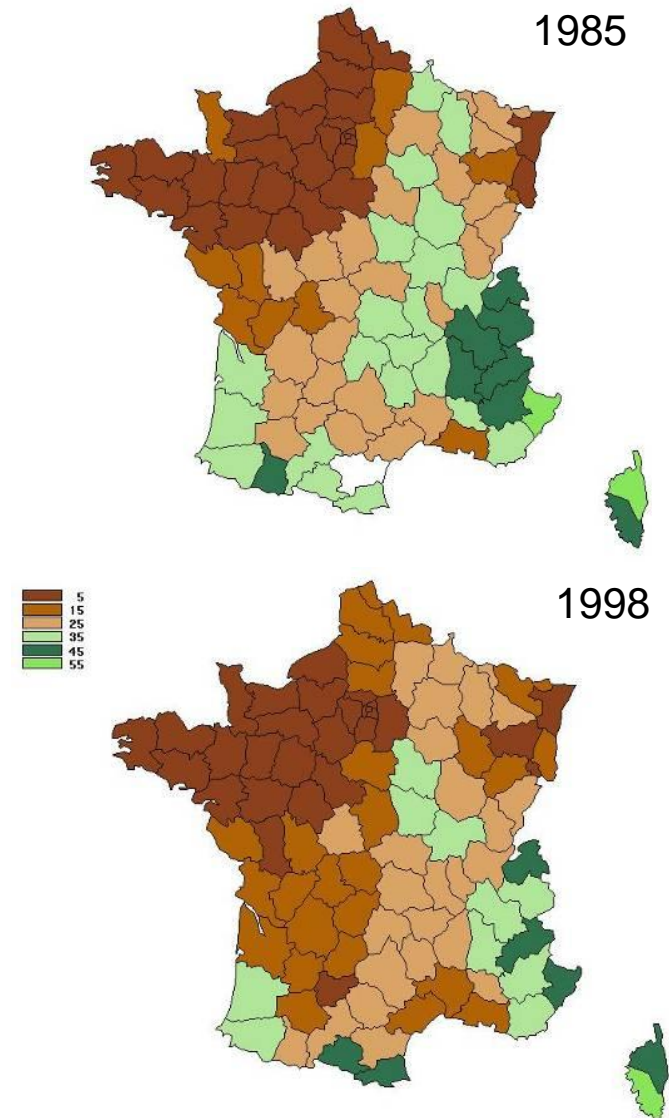
La distance moyenne à la lisière forestière interne diminue

Routes forestières :

Lisières internes

Corridors ou barrières ?

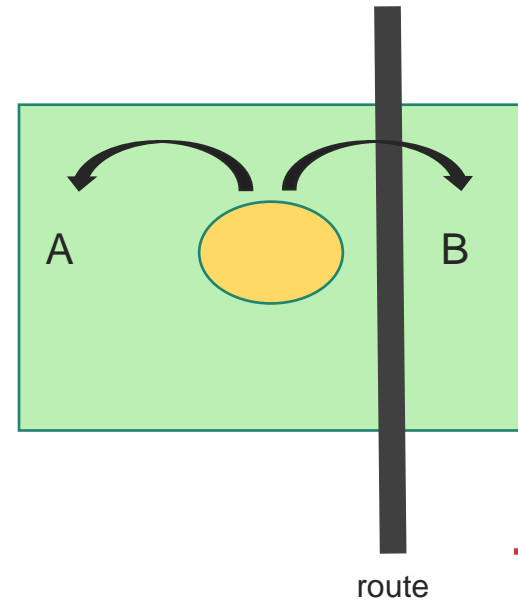
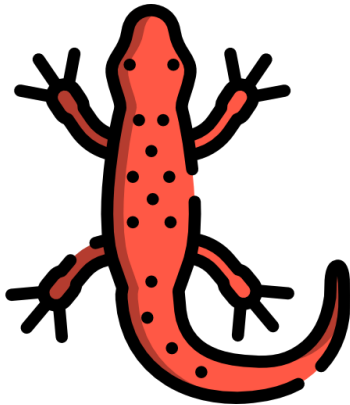
Ambiance des cœurs forestiers ?



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – FRAGMENTATION FORESTIÈRE INTERNE – EFFETS NÉGATIFS

Routes, pistes et effets barrières – effets (-)

Porosité du milieu forestier pour les amphibiens



**Taux de retour 51% plus bas
lorsqu'il faut traverser la route**

2

IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – FRAGMENTATION FORESTIÈRE INTERNE – EFFETS NÉGATIFS

Routes, pistes et effets barrières – effets (-)



Porosité du milieu forestier pour les gastéropodes

Arianta arbustorum (Hélice des bois)

Ne peut traverser un chemin non-imperméabilisé de 3m de large, mais un sentier de 30cm envahi par la végétation n'affecte pas ses déplacements



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – FRAGMENTATION FORESTIÈRE INTERNE – EFFETS POSITIFS

Routes, pistes et lisières internes – effets (+)

Lisières, clairières et Rhopalocères

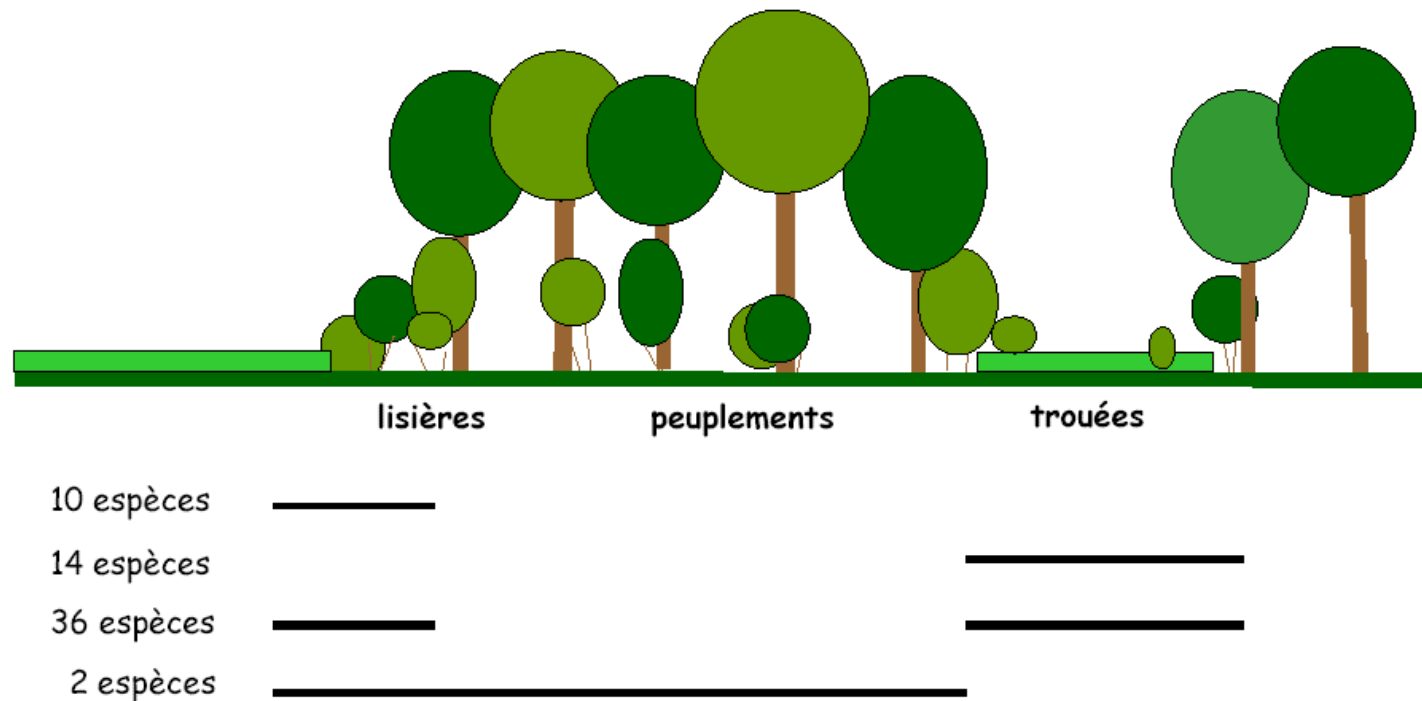


Figure 5 – Préférences écologiques des papillons forestiers (Rhopalocera) en Wallonie. Données: Philippe Goffart (CRNFB).

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – FRAGMENTATION FORESTIÈRE INTERNE – EFFETS POSITIFS

Routes, pistes et lisières internes – effets (+)

Gestion des lisières

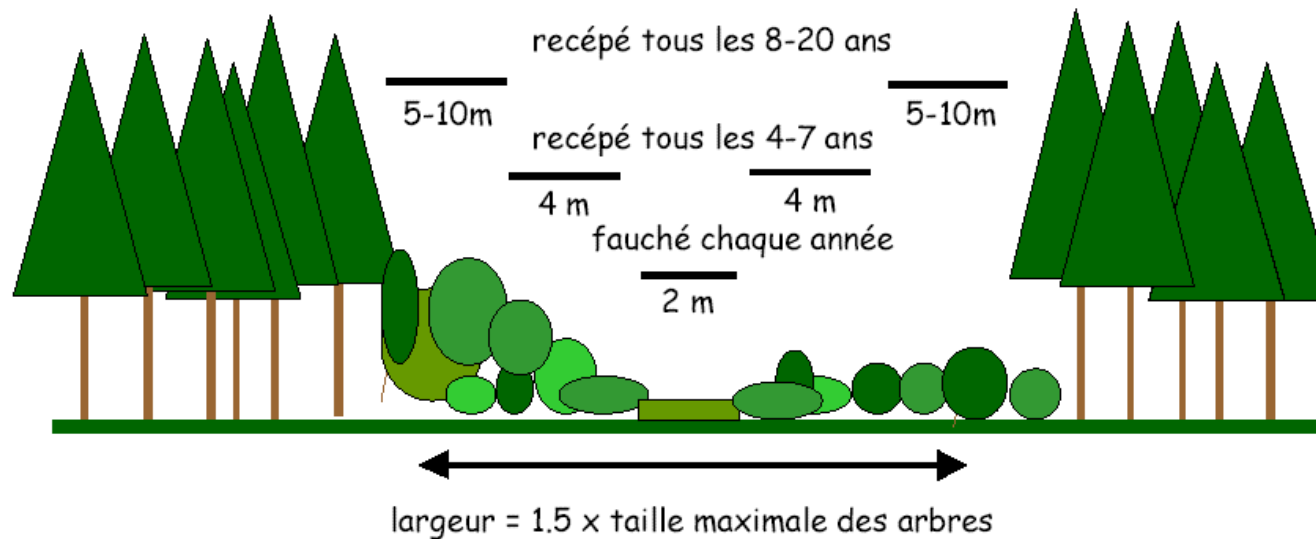
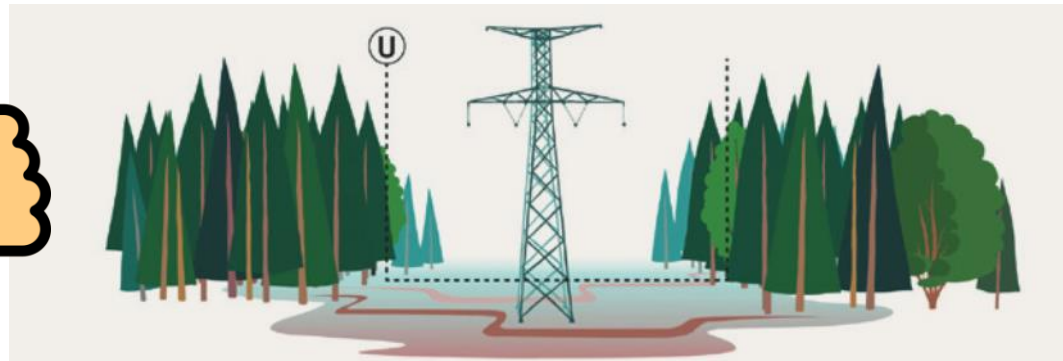


Figure 6 – Une gestion adéquate des bords de chemins forestiers permet de maximiser l'ensoleillement, de reconstituer une lisière étagée et de favoriser les espèces héliophiles. La largeur recommandée pour les layons est de 1,5 fois la hauteur maximale des arbres du peuplement limitrophe. D'après Warren & Fuller 1993.

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – FRAGMENTATION FORESTIÈRE INTERNE – EFFETS POSITIFS

Routes, pistes et lisières internes – effets (+)

Gestion des lisières

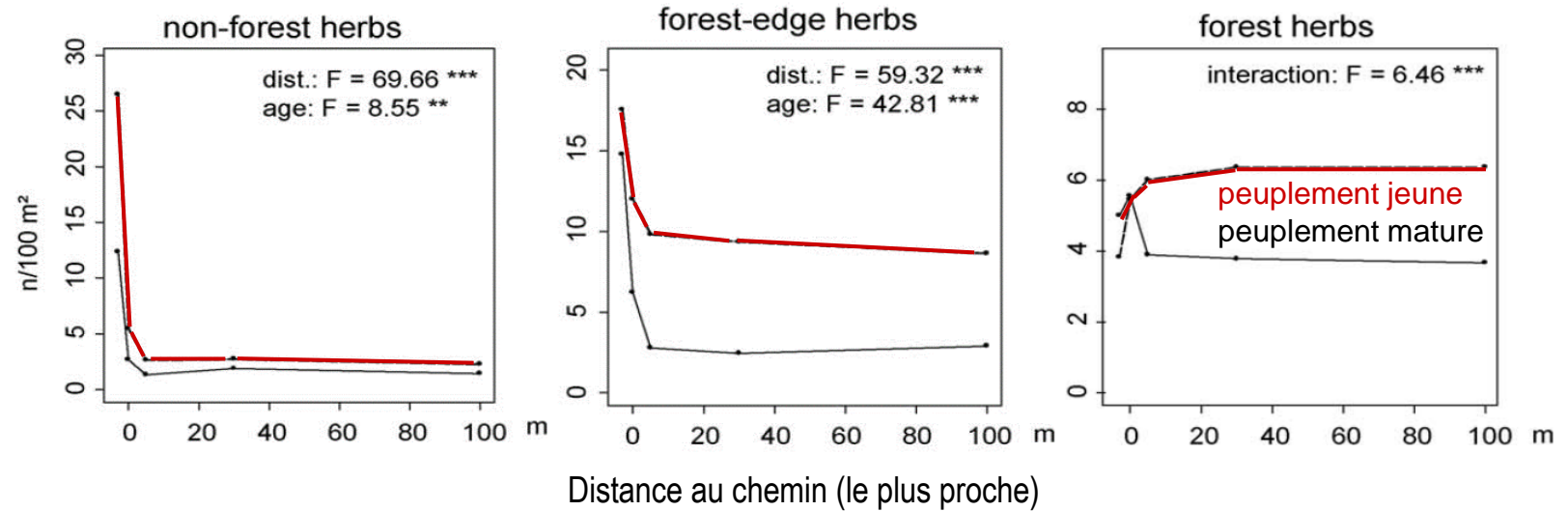


2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – FRAGMENTATION FORESTIÈRE INTERNE

Routes, pistes et corridors ouverts

- Quel lien avec les milieux ouverts extra-forestiers ?
- Quel rôle des routes et chemins ?
- Quel rôle des lisières forestières ?

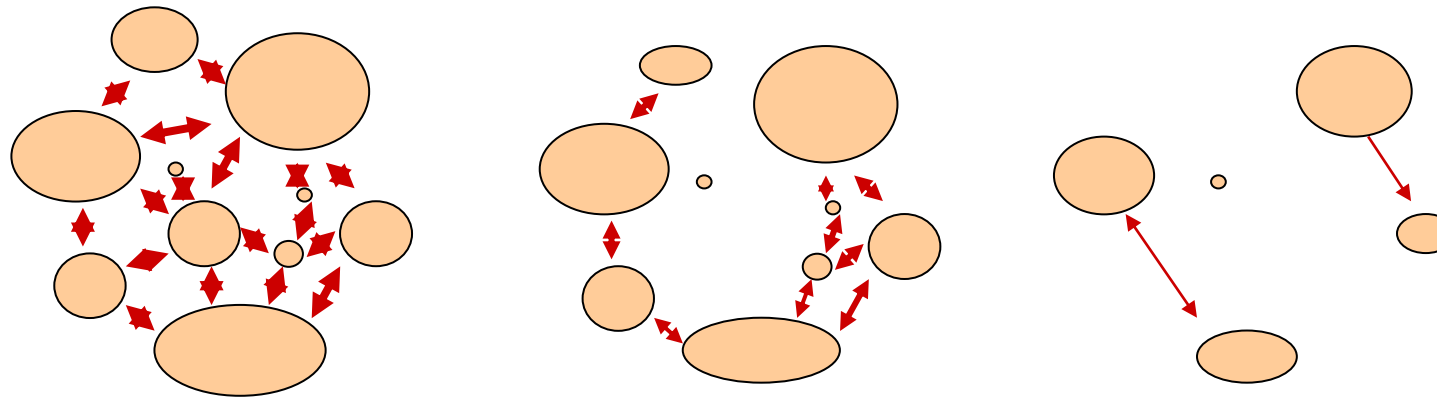
Les routes : des **corridors** pour les espèces péri- et non forestières



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Maintenir la connectivité entre taches d'habitats

Fondement de la trame verte et bleue : théorie des méta-populations



Forte connectivité

- Présence dans tous les fragments
- Populations importantes
- Stabilité de la méta-population

Equilibre extinction-colonisation
Taille des populations et connectivité

Faible connectivité

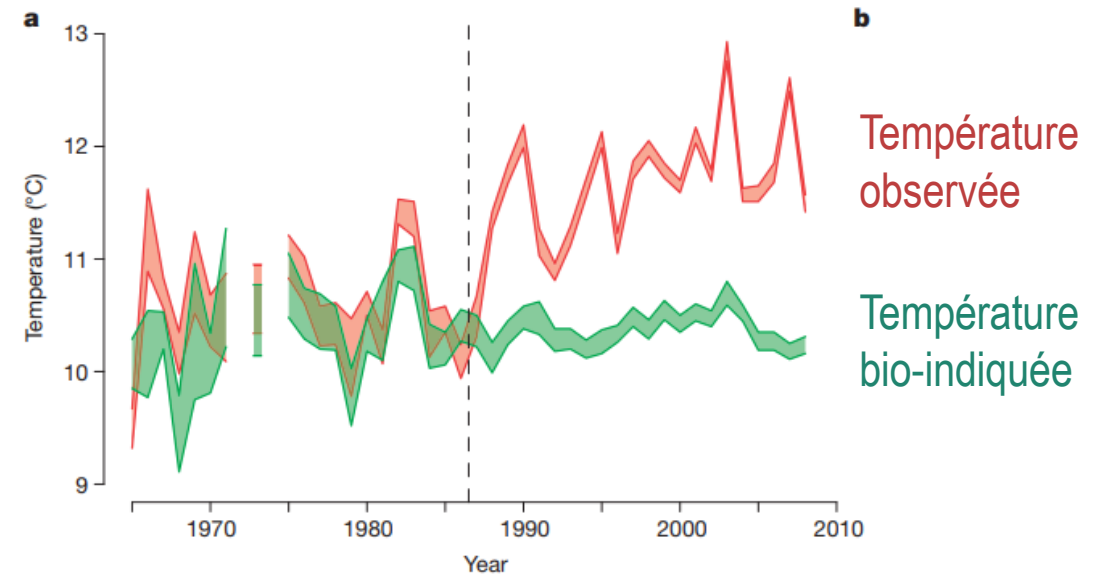
- Certains fragments non occupés
- Populations faibles
- Instabilité de la métapopulation

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame verte et bleue

Lois Grenelle 1 et 2 de l'Environnement :

- Maillage écologique fonctionnel permettant les mouvements d'espèces au sein des paysages changeants (notamment en réponse au changement climatique) ;



Retard de migration :

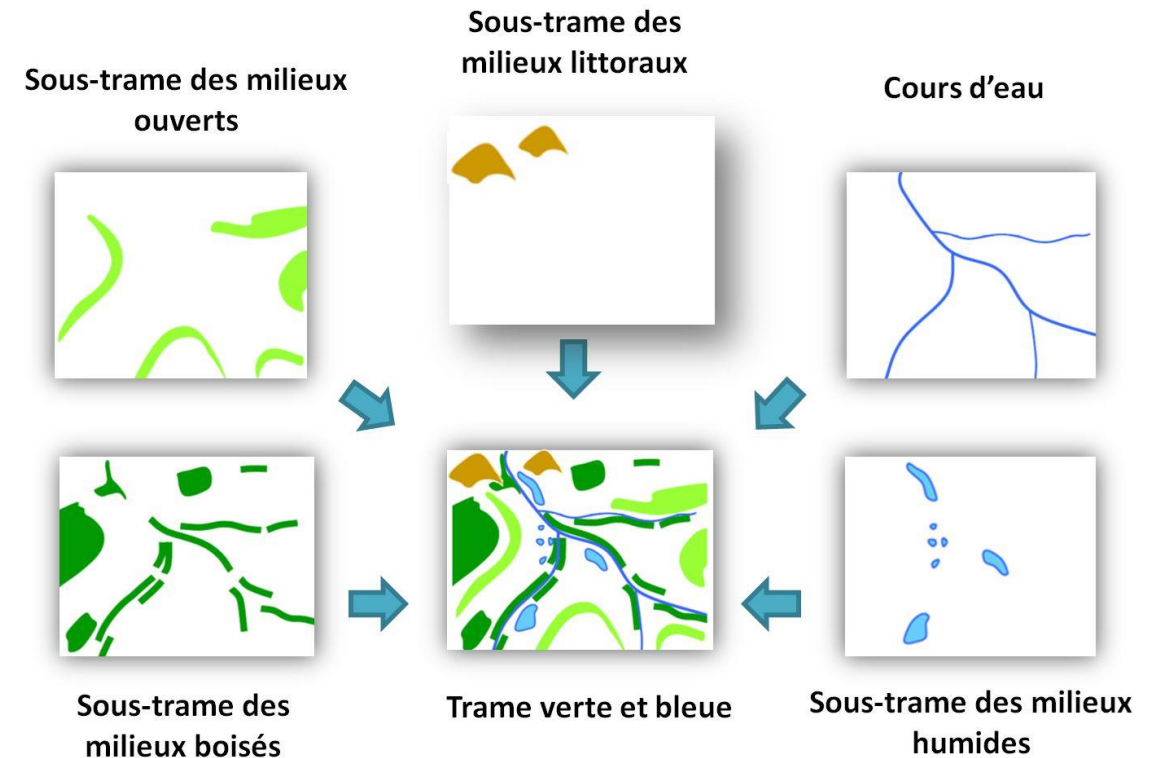
- Faible capacité de dispersion (le changement est trop rapide)
- Trop faible connectivité (effet de frein à la dispersion).

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame verte et bleue

Lois Grenelle 1 et 2 de l'Environnement :

- Maillage écologique fonctionnel permettant les mouvements d'espèces au sein des paysages changeants (notamment en réponse au changement climatique) ;
- **Définition de sous-trames** (forestière, pelouses, etc.)
 - Au sein de chaque trame, des zones cœurs et des zones « corridors »
- **Schéma de cohérence écologique dans chaque région depuis 2012**



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

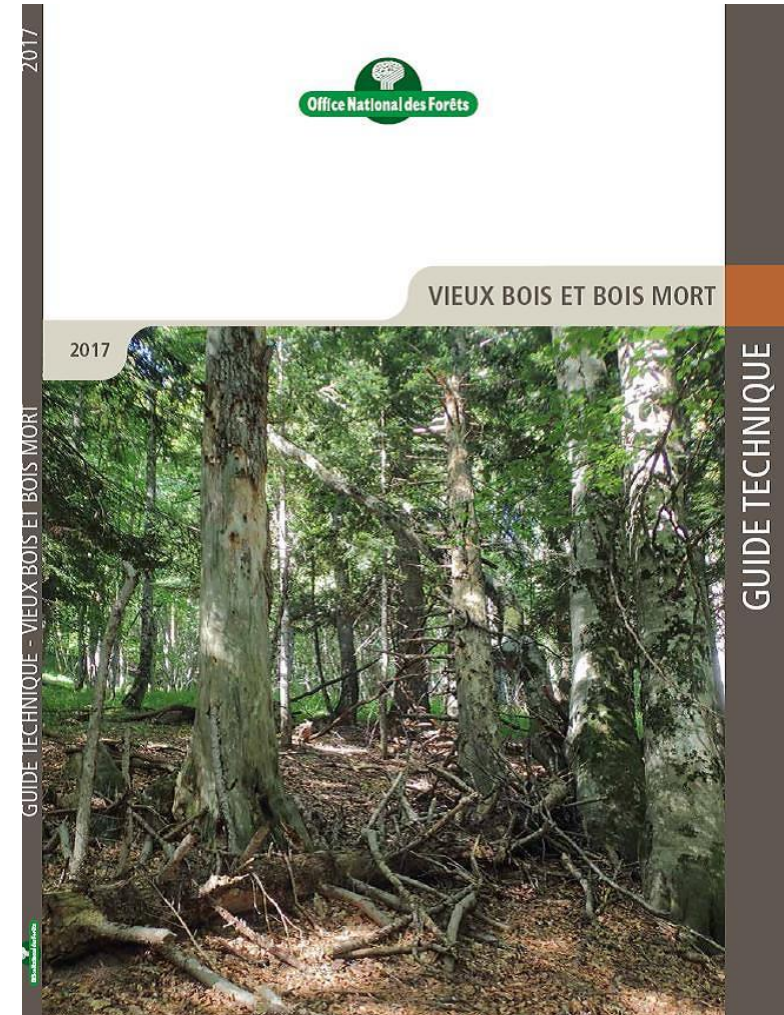
La trame verte et bleue en forêt

Trame forestière :

- Sous-trame des **vieux bois** ;
- Sous-trame des **zones ouvertes** ;
- Sous-trame des **zones humides**.

Quelle surface unitaire et cumulée des éléments ? Quelle disposition spatiale ? Quelles caractéristiques ?

SLOSS (« *several large or several small* »)



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

« On peut comparer les **organismes saproxyliques** à des **populations vivant sur des icebergs** en train de fondre. Ils doivent être **capables d'atteindre le prochain iceberg approprié** avant que l'iceberg d'origine n'ait disparu. »

Vandekerkhove et al. (2013)



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

Le bois mort, maillon faible des forêts exploitées

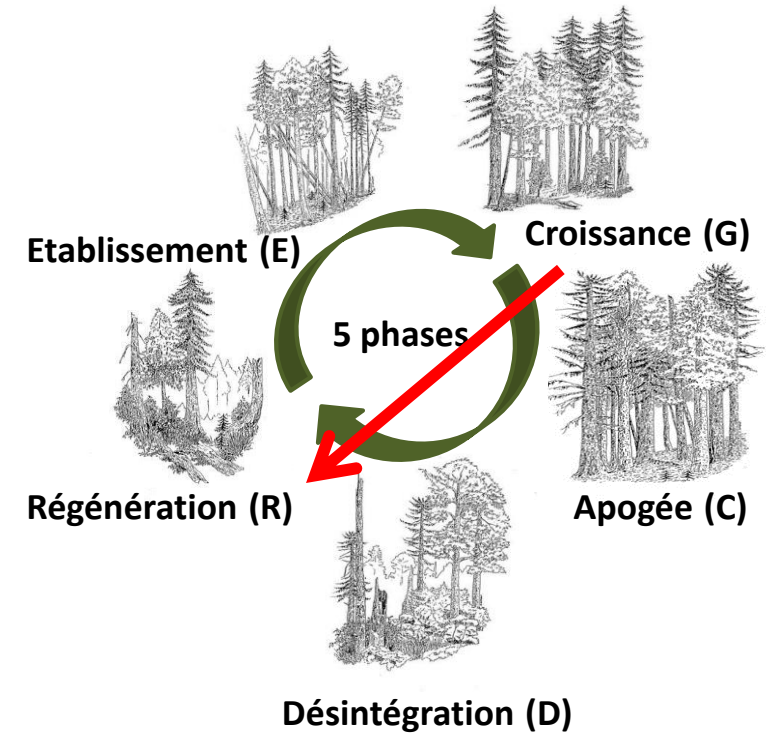
Cycle sylvicole = cycle sylvigénétique tronqué

- Exploitation des arbres avant mortalité ;
- Exclusion des perturbations ;
- Exportation du bois abattu.

Résultats :

Déficit global généralisé en forêt exploitée + déficit accru de certains types (GB, chandelles)

En Europe, le **volume de bois mort dans les forêts exploitées** est équivalent à **2-30% du volume présent dans les forêts à dynamique naturelle.**



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

Le bois mort, maillon faible des forêts exploitées

Cycle sylvicole = cycle sylvigénétique tronqué

- Exploitation des arbres avant mortalité ;
- Exclusion des perturbations ;
- Exportation du bois abattu.

Résultats :

Malgré son adaptation à des substrats éphémères, la biodiversité saproxylique est menacée par une fragmentation d'habitats excessive dans les forêts exploitées à l'échelle du peuplement et du paysage.



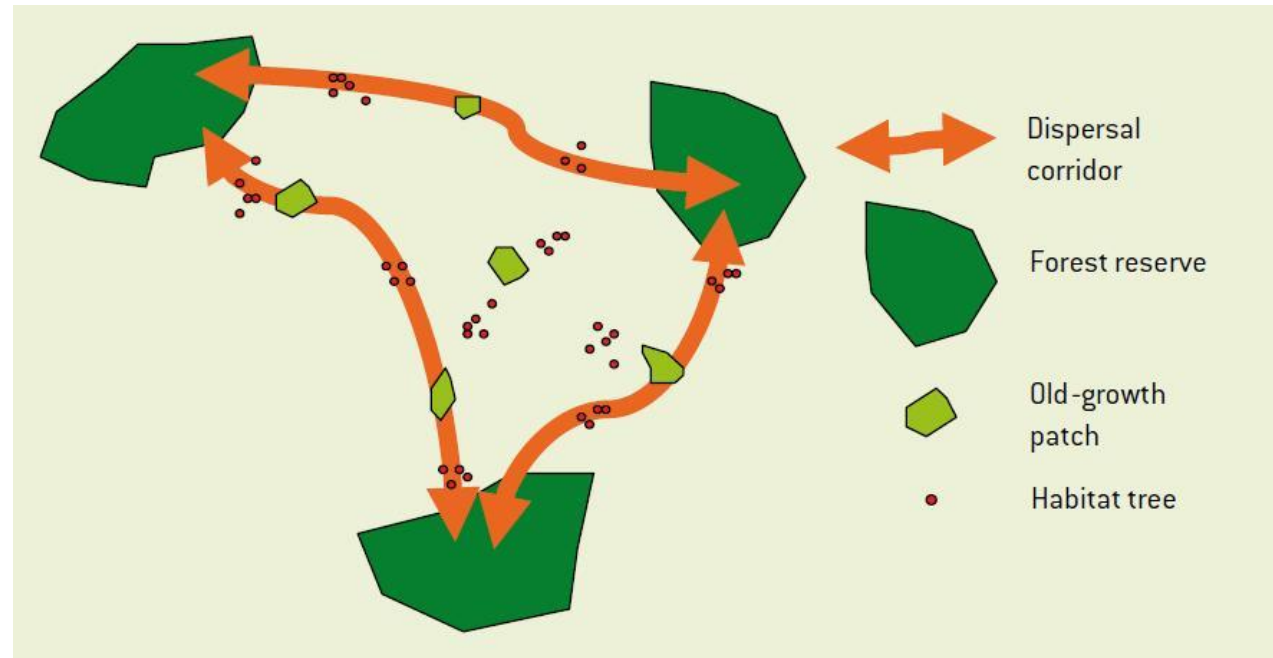
Exemple : la rosalie alpine (*Rosalia alpina*)

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

Représentation de la trame vieux bois

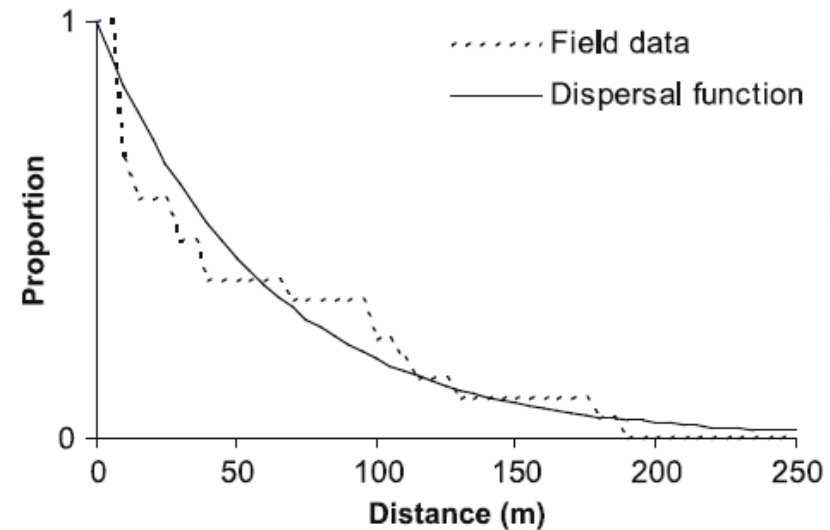
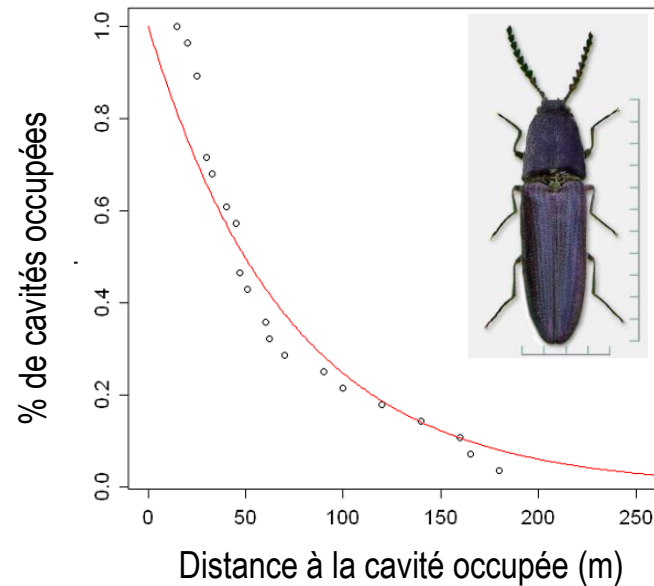
Les arbres et surfaces conservées doivent être en libre évolution permanente



2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

Des **arbres à cavités agrégés** car la présence d'une espèce cavicole dépend de la distance à une population source (e.g. *Limoniscus violaceus* et *Osmoderma eremita*)

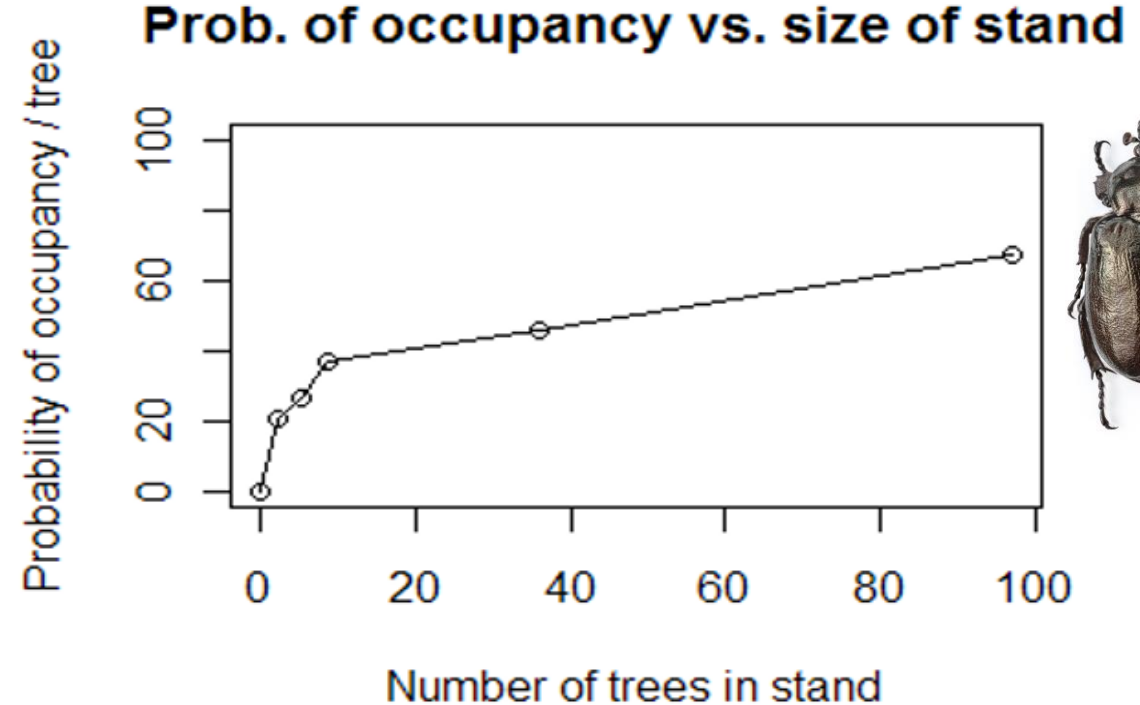


2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

Fragmentation d'habitat à l'échelle du peuplement

Probabilité d'occupation par arbres en fonction du nombre de chênes dans le peuplement, basé sur Ranius (2000)

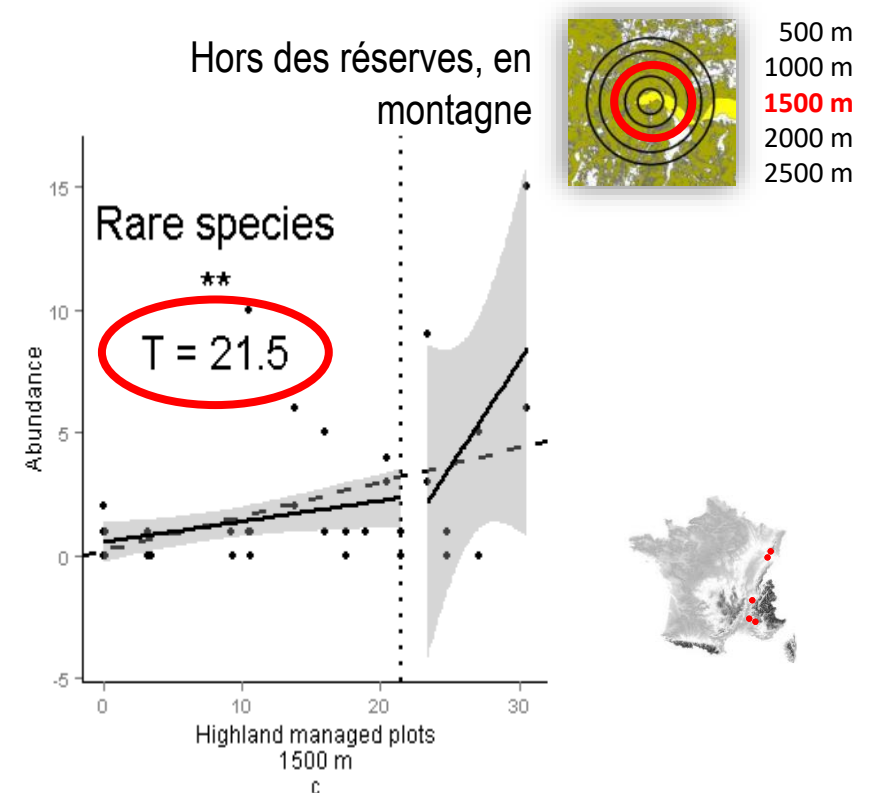
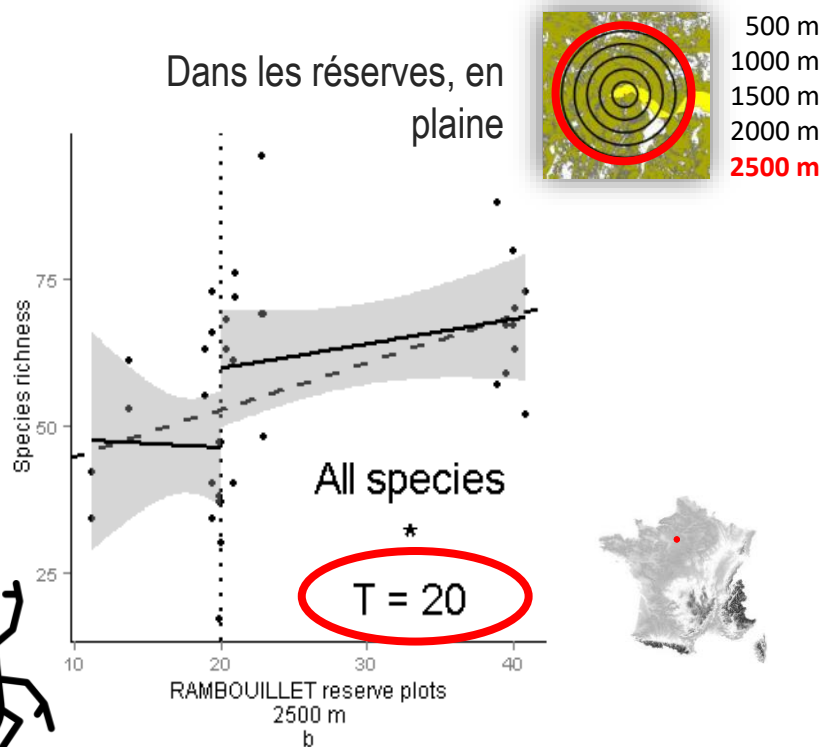
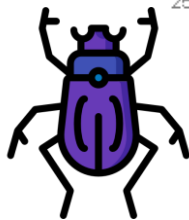


2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

Plus de 20% de la surface forestière en libre évolution permanente accroît la biodiversité locale.

« *spillover effect* »

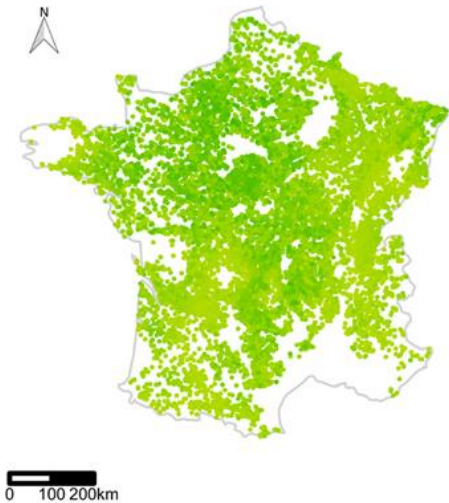


2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

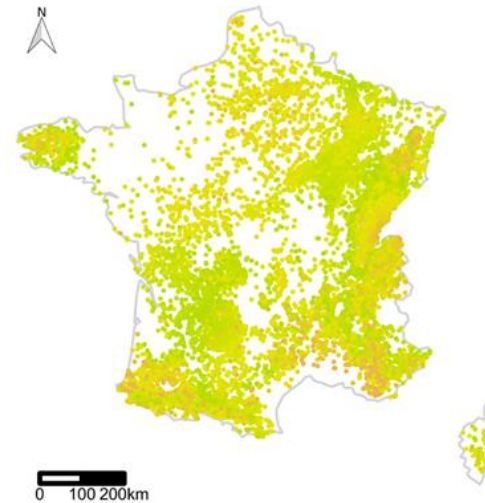
Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

Quelle est la part des forêts non-exploitées sans statut ?

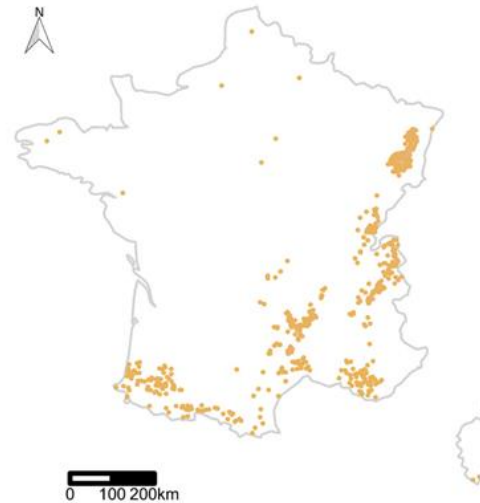
(b) Under 26 years



(c) 26 to 50 years



(d) Over 50 years



3% des forêts françaises ne sont plus exploitées depuis au moins 50 ans

Time since the last harvesting

5 10 15 20 25

30 35 40 45

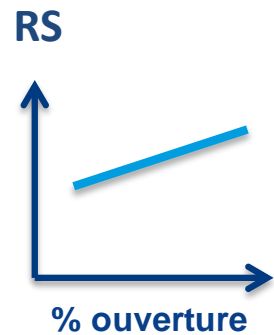
100 300 500

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

Remarque : les **effets de complémentation**

Effet de l'ouverture du peuplement



Mécanismes potentiels :

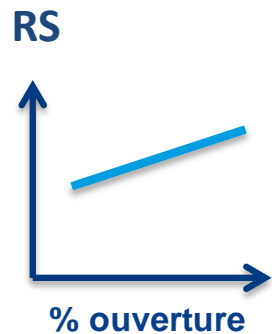
- (i) complémentation d'habitat
- (ii) microclimat des substrats
- (iii) thermodynamique vol / détectabilité

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – TRAME D'HABITATS

Trame de vieux bois et biodiversité saproxylique

Remarque : les **effets de complémentation**

Effet de l'ouverture du peuplement

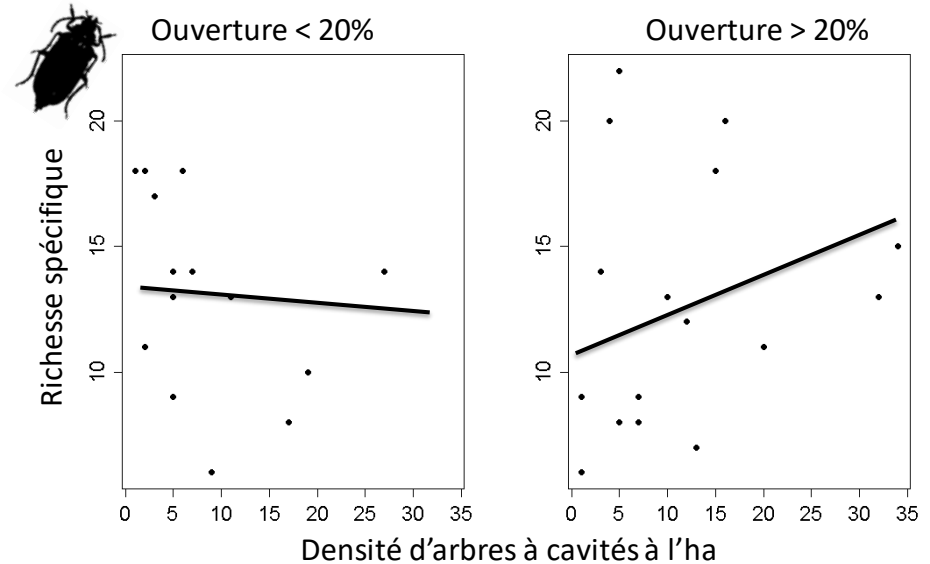


Mécanismes potentiels :

- (i) complémentation d'habitat
- (ii) microclimat des substrats
- (iii) thermodynamique vol / détectabilité

Les effets d'habitat varient en fonction du contexte abiotique

Réponse des coléoptères saproxyliques à la densité de cavités
- pessières/sapinières de montagne -



Les **effets positifs sur la biodiversité de la densité de microhabitats** dans les forêts de montagne augmentent avec l'**ouverture** du peuplement

Surface élémentaire des coupes

- Profondeur de l'effet de lisière ;
- Intérêt écologique des petites coupes et coupes progressives pour les espèces forestières ;
- Intérêt écologique des grandes coupes rases pour les spécialistes de milieux ouverts intra-forestiers
 - e.g. l'engoulevent
- **Diversification des tailles de coupes** (et donc multiplier les habitats).



Coupes rases ou progressives ?

Groupe taxinomique	Groupe écologique	Coupe rase (>1 ha)	Coupe progressive
Essences ligneuses	Pionnières	++	0/+
	Post-pionnières	-/0	+
	Dryades	--/-	+
Végétation du sous-bois	Péri- et non-forestières	++	+
	Forestières	-/+	+
	Bryophytes	--	-
Coléoptères Carabiques	<u>Sp</u> de milieu ouvert	++	++
	Généralistes forestiers	+	0
	Spécialistes forestiers	--/-	-/0
Oiseaux	<u>Sp</u> de milieu ouvert nichant au sol ou sur les arbustes	++	+ / ++
	Forestières nichant dans les arbres et les arbustes	--	-/0
	Forestières nichant dans les cavités	--	-/0
	<u>Sp</u> nichant dans des milieux ouverts avec arbres isolés	0	++

Effet des tailles de coupe : exemple de la réponse de la flore forestière

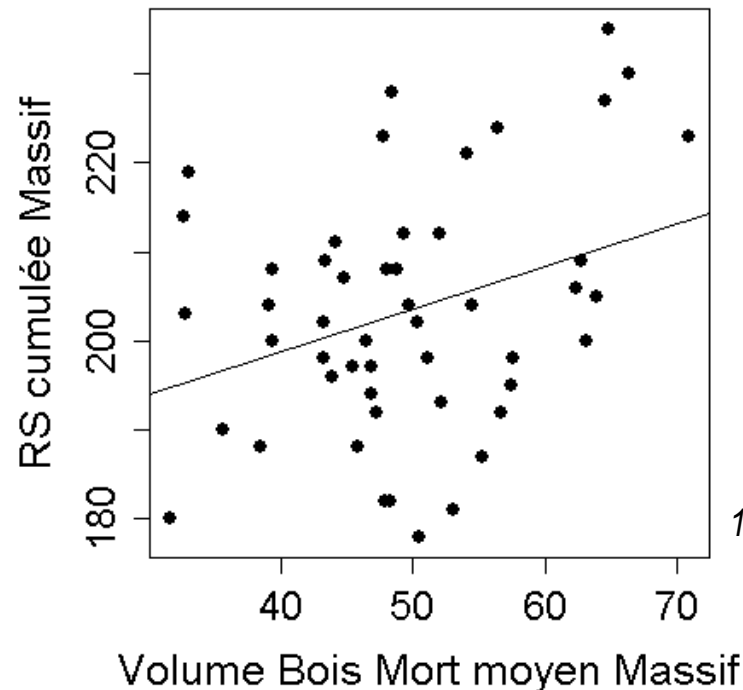
- La **vitesse de colonisation** des espèces forestières non ligneuses est de l'ordre de 0,3 à 0,5 m/an selon certains travaux récents (Brunet et Oheimb, 1998 ; Matlack, 1994)
 - Donc ces vitesses de colonisation sont compatibles avec un régime de perturbation par des coupes de petite taille
- Une espèce **forestière**, une fois supprimée du milieu suite à la coupe, mettra au moins **100 ans** pour recoloniser la zone coupée **sur 50 m** à partir des zones non coupées aux alentours.
- De nombreuses espèces forestières n'accumulent pas de banques de graines dans le sol.

2

IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – AMÉNAGEMENT ET DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DES COUPES

Attention au bois mort : élément important pour au moins 25% de la biodiversité forestière (Stokland et al., 2012).

La **diversité gamma** à l'échelle d'un massif où le volume de bois mort par parcelle est en moyenne plus fort, est significativement **plus forte**.



12 massifs, 50 tirages au sort de 10 placettes

2 IMPACTS À L'ÉCHELLE DU MASSIF – CONCLUSION

- Dessertes : effets barrières, lisière internes et corridors ;
- Effets de la connectivité dans la trame de vieux bois ;
- Effets de la taille et de la répartition des coupes.



CONCLUSION GÉNÉRALE ET CONTROVERSE

1. Forêts multi-niches, réseaux trophiques complexes, groupes fonctionnels cruciaux, menacés ;
2. Territoire forestier français en accroissement mais fragmenté ;
3. Des trames de continuité d'habitat en construction.

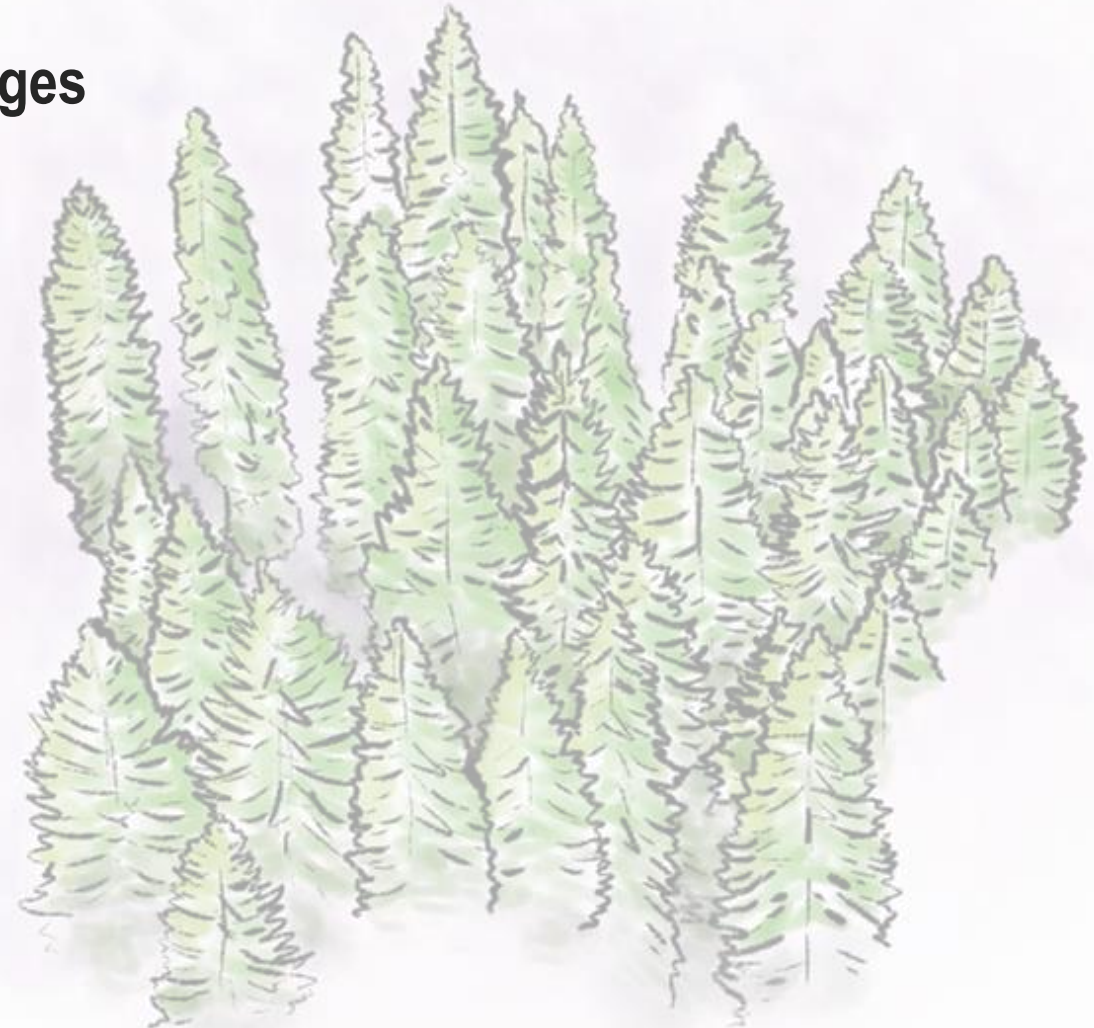


Controverses sur l'aménagement des paysages forestiers :

- Gestion multifonctionnelle

Ou

- Gestion sectorisée
 - Gestion productive
 - Gestion conservatoire dans les zones prioritaires pour la conservation de la biodiversité (pb → les définir et les localiser ...)



« *Land sparing* » vs. « *Land sharing* »