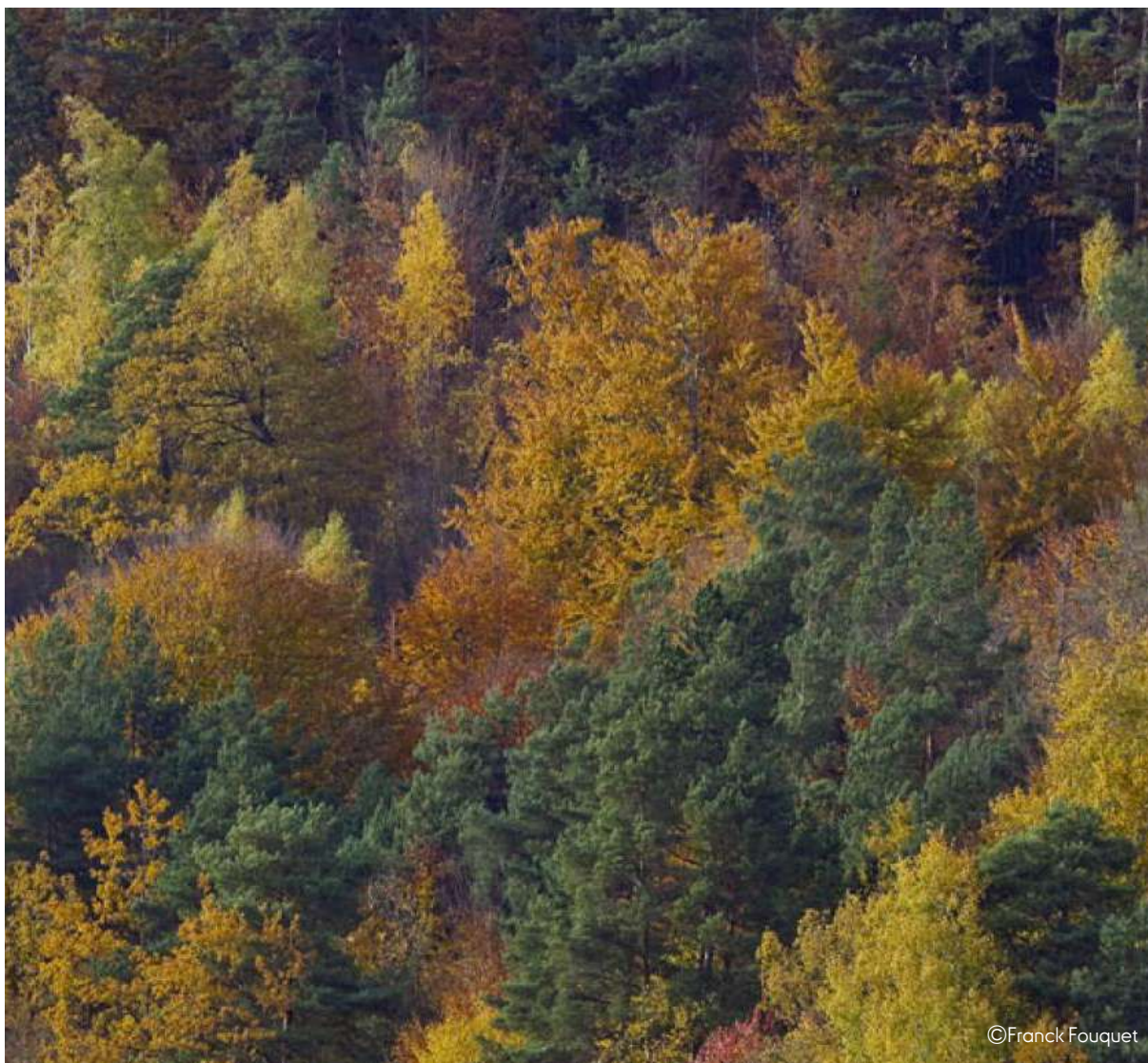


BIOMIMÉTISME FORESTIER

2025

©Kristaps Ungurssur Unsplash



Crédits

Coordination du projet : Jonathan Lenglet puis Emmanuel Paul, *Parc national de forêts*, Jean-Matthieu Cousin, *Ceebios*

Rédaction : Jean-Matthieu Cousin, Luce-Marie Petit, Anne Gaillard, *Ceebios*

Graphisme et mise en page : Thibaut Vandemoortele, *Ceebios*, avec la contribution graphique de *tometa.org*

Apports et contributions : Thibaut Houette, Cécile Dupuch, Delphine Mathou, Claire François-Martin, *Ceebios*

Avec le soutien financier de l'ADEME, la Région Grand Est et la Région Bourgogne-Franche-Comté.



Edito

La forêt est souvent regardée comme un patrimoine à préserver. Elle est aussi, et peut-être plus que jamais, une formidable source d'inspiration pour construire l'avenir.

Depuis plus de 400 millions d'années, les écosystèmes forestiers expérimentent des solutions d'une remarquable efficacité. Ils savent optimiser les ressources, recycler la matière, stocker le carbone, coopérer, s'adapter aux perturbations et développer des formes de résilience dont nos sociétés ont aujourd'hui un besoin urgent. Face aux défis du changement climatique, de l'épuisement des ressources naturelles, de la soutenabilité de nos modèles d'organisation collective et de la nécessaire transition de nos modèles économiques, la forêt apparaît comme un immense laboratoire d'innovations à ciel ouvert.

Le biomimétisme nous invite précisément à changer notre regard sur le vivant. Il ne s'agit plus seulement d'admirer la nature, de l'étudier ou de la protéger, mais de reconnaître qu'elle peut nous enseigner des solutions nouvelles pour répondre aux enjeux de notre temps. La biodiversité devient alors non seulement un patrimoine à transmettre, mais aussi une ressource de connaissance, d'innovation et de création de valeur.

Cette vision résonne particulièrement avec la mission du Parc national de forêts. Unique parc national consacré aux écosystèmes des forêts feuillues de plaine, il porte une responsabilité majeure en matière de préservation de la biodiversité. Or, si les massifs forestiers du Parc national nous sont arrivés jusqu'à aujourd'hui dans un état de conservation remarquable, c'est précisément parce que les hommes qui y ont vécu au fil des siècles ont toujours su penser et agir avec les forêts. Le monde a considérablement changé depuis l'époque gallo-romaine ou les prémices de la révolution industrielle, dont les traces sont encore largement visibles sur le territoire, mais le défi est toujours le même : s'inspirer de la forêt est le meilleur gage de sa préservation et de sa valorisation.

Mais le Parc national de forêts a également pour vocation d'accompagner le développement durable de son territoire. Faire le lien entre conservation des patrimoines naturels d'exception et développement économique constitue l'une des raisons d'être de son action. Le biomimétisme forestier offre précisément cette opportunité. Il crée un pont entre les mondes de la recherche, de l'entreprise, de l'ingénierie, de l'aménagement et de la gestion des espaces naturels. Il permet de démontrer que protéger la biodiversité n'est pas une contrainte pour le développement des territoires, mais bien une condition de leur capacité à innover et à prospérer durablement.

C'est pourquoi le Parc national de forêts s'est engagé aux côtés du Centre d'études et d'expertise dédié au déploiement du biomimétisme, le Ceebios, dans une démarche ambitieuse visant à faire émerger sur notre territoire un centre de référence du biomimétisme forestier. Notre ambition est claire : faire de ce territoire situé aux confins de la Bourgogne-Franche-Comté et du Grand Est un lieu d'excellence où se rencontrent chercheurs, entreprises, collectivités et acteurs de la forêt pour imaginer les innovations de demain inspirées par le vivant.

Cette ambition s'appuie sur des atouts exceptionnels. Avec ses vastes forêts feuillues, ses espaces bénéficiant d'un haut niveau de protection, ses programmes de recherche et sa position au cœur de deux grandes régions forestières françaises, le Parc national de forêts dispose des conditions idéales pour devenir un territoire pilote du biomimétisme forestier en Europe.

Le présent manuel constitue une première étape de cette aventure collective. Il est le fruit d'un travail partenarial entre le Parc national de forêts, l'Ademe, les Régions Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté, et le Centre d'études et d'expertise dédié au déploiement du biomimétisme, le Ceebios. Il regorge ainsi d'exemples d'innovations concrètes inspirées de la biodiversité, de l'arbre et de la forêt. Il invite à découvrir l'immense potentiel d'inspiration offert par les écosystèmes forestiers et ouvre des perspectives nouvelles pour les filières économiques, les territoires et les politiques publiques.

L'étude économique réalisée conjointement à ce livre blanc vient confirmer cette promesse. Portant sur « le potentiel du biomimétisme forestier en Grand Est et en Bourgogne-Franche-Comté en matière de développement économique et d'innovation dans la filière forêt-bois du territoire », réalisée par le Vertigo Lab, elle doit inciter les acteurs de ce territoire emblématique, le Parc national de forêts, et ses deux régions d'appartenance, à se saisir de cette opportunité pour régénérer leurs modalités d'action et de développement.

Ainsi, le Parc national de forêts souhaite, à partir de ce travail, poursuivre sa vocation en devenant un territoire pilote de l'innovation bio-inspirée issue des écosystèmes forestiers. Les opportunités sont nombreuses et couvrent tout un ensemble de domaines fort variés : la sensibilisation du grand public, la formation d'étudiants, la recherche scientifique et l'innovation technologique, l'accueil et l'accompagnement d'entrepreneurs, l'application du biomimétisme forestier à la gestion et au développement de la filière sylvicole, la mise en œuvre d'un développement territorial mimant des fonctions écosystémiques, etc. Ces différentes pistes permettront peu à peu d'incarner ce concept de biomimétisme forestier, d'expérimenter grandeur nature, et de continuer à tisser les fils d'interactions durables entre les sociétés humaines et les forêts.

À travers cette démarche, nous affirmons une conviction simple : la biodiversité n'est pas seulement ce que nous devons préserver. Elle est aussi ce qui peut nous aider à inventer un futur plus résilient, plus sobre et plus désirable.

Comme le rappelait Léonard de Vinci : « Va prendre tes leçons dans la nature, c'est là qu'est notre futur. » Cette invitation n'a sans doute jamais été aussi actuelle.

Philippe Puydarrieux

Directeur du Parc national de forêts

Avant-propos

Les forêts sont sous les feux des projecteurs : écosystèmes fragiles à protéger, sources de « services écosystémiques » multiples, ressources et lieux de ressourcement, lieux aussi de conflits depuis des siècles, par exemple contre les « coupes rases » et l'accaparement par quelques intérêts privés d'un bien commun, par ailleurs détenu par un propriétaire du foncier qui devient de fait responsable des arbres et des écosystèmes. Après des décennies où la « gestion durable » de ces forêts semblait acquise à condition de s'en donner la peine et d'arbitrer les conflits par le droit, nous scientifiques sommes sollicités pour aider à comprendre et surtout aider à agir. Car les forêts sont embarquées dans les défis vertigineux de notre siècle : un changement climatique qu'il faut contenir en apprenant à vivre avec, une crise de la biodiversité très difficile à appréhender tellement le concept de biodiversité est en lui-même compliqué, tout cela dans un contexte d'urbanisation croissante et de mondialisation des marchés, de « transition énergétique » et de « planification écologique », d'investissement massif dans des nouveautés technologiques qui s'enchaînent sans qu'on puisse seulement réfléchir aux besoins, et plus récemment d'appel à la souveraineté et à la défense nationale.

Comment des scientifiques, par ailleurs concentrés sur des approches et des disciplines bien définies, peuvent-ils contribuer à la décision et à l'action pour réenchanter nos futurs dans les contextes décrits ci-dessus, aussi complexes, incertains et ambigus, qu'angoissants ? Les scientifiques de la nature et des forêts ne cessent d'inventer des concepts pour apporter cette contribution : développement durable, biodiversité, anthropocène, et plus récemment reconnaissance des services écosystémiques, solutions fondées sur la nature ou biomimétisme.

Parmi ces concepts, le biomimétisme a une place particulière, de par sa filiation avec les sciences de l'ingénieur qui rassemblent des disciplines fondamentales – physique, biologie, mathématique – au service de l'innovation concrète. Historiquement pensée pour créer des objets techniques en s'inspirant du vivant, la biomimétique développe une ingénierie créative : face à un besoin humain bien identifié – coller, protéger sa peau et son corps, construire son habitat... – on commence par observer et comprendre à la façon d'un biologiste comment le vivant a résolu le problème, puis on mobilise l'ingénierie (chimique, mécanique, biologique, écologique) pour concevoir un produit qui répond au besoin.

Ce manuel du biomimétisme forestier commence ainsi par un inventaire des fonctionnalités et des problèmes résolus par les écosystèmes forestiers et leurs organismes qui inspirent ou pourraient inspirer des objets techniques (cf le tableau 1). Puis, mise au service du développement du Parc national de forêts, la démarche s'interroge sur comment le biomimétisme peut servir le territoire forestier et les systèmes (écologiques et sociaux) qui en dépendent. Par exemple en utilisant durablement le bois en profitant autant que possible de la diversité des espèces d'arbres et sans déconstruire trop vite le bois massif dont l'organisation multiéchelles – matériau cellulaire, sandwich, composite à renfort filamentaire – s'apparente aux matériaux les plus high tech de l'industrie moderne. Au-delà des « astuces technologiques » issues du vivant pour protéger ou construire, on retient alors une inspiration plus profonde et essentielle pour l'ingénierie moderne : comment utiliser, préserver et restaurer nos ressources fondamentales – l'eau et les sols – en s'inspirant des forêts ? Comment croître avec lenteur et résilience comme les arbres à la fois gigantesques, longévifs et fragiles ? Comment coopérer, s'organiser et s'adapter comme des forêts riches de réseaux complexes d'interactions entre organismes, dans leur environnement ?

Bonne lecture à tous ceux, scientifiques, décideurs publics, entrepreneurs, habitants ou visiteurs du territoire, qui veulent avoir un autre regard sur l'innovation pour nos territoires.

Meriem Fournier

Ingénieure Générale des Ponts, des Eaux et des Forêts

Directrice de l'Unité Mixte de Recherche SILVA, Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE.

Biomimétisme forestier

Une invitation à changer de regard sur la forêt, innover par la bio-inspiration et transformer nos territoires forestiers

■ Ce livre blanc a pour objectif de mettre en lumière le potentiel des écosystèmes forestiers en termes de sources d'inspiration, pour accompagner les transitions, pour changer nos manières d'aménager les forêts et plus largement pour repenser nos interactions avec le vivant. Tout en présentant les principes généraux de cette démarche, il propose des rencontres inspirantes et des exemples d'applications, ainsi que des ressources pour se saisir collectivement de ce sujet et l'ancrer dans les territoires forestiers.

LE BIOMIMÉTISME

Approche interdisciplinaire prenant pour modèle le vivant afin de relever les défis d'une nécessaire transition écologique, économique et sociale¹. Faisant appel à un large champ de disciplines, il s'appuie sur un socle scientifique solide et peut être mobilisé dans de nombreux domaines (matériaux biocompatibles dans la santé, profils aérodynamiques optimisés dans les transports, algorithmie inspirée des colonies d'insectes sociaux dans le numérique, etc.).

LES FORÊTS

Présentes sur presque toutes les surfaces émergées du globe terrestre, les forêts ont démontré des capacités d'adaptation à des conditions environnementales très diversifiées. Ces propriétés remarquables en font un sujet d'intérêt de premier plan pour atteindre les ambitions de transitions écologique et sociétale portées par le biomimétisme.

Cependant, dans un contexte de polycrises (changement climatique, érosion de la biodiversité) fragilisant fortement les socio-écosystèmes forestiers, la recherche du bon équilibre entre exploitation des ressources forestières pour répondre à une demande croissante en bois et préservation de l'intégrité des écosystèmes forestiers pour maintenir les autres services écosystémiques associés, est un défi auquel les régions forestières doivent faire face.

LE BIOMIMÉTISME FORESTIER

Se définit comme une dynamique émergente, en appui aux initiatives en faveur de la transition écologique, économique et sociale des territoires. Il s'articule autour de trois domaines d'actions indépendants (figure 1 page suivante) présentés dans ce livre blanc : la valorisation de la connaissance des sciences de la forêt, l'innovation bio-inspirée au service de la filière forêt-bois, une invitation à repenser la gouvernance des territoires.

Un territoire laboratoire pour expérimenter le biomimétisme forestier

Situé à cheval entre les régions Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est, le Parc national de forêts est un territoire représentatif des régions forestières feuillues de plaine. La filière forêt-bois y est un secteur historique et essentiel. Du fait de sa position géographique, de son statut et de sa mission, il émerge comme un territoire d'expérimentation privilégié des différentes dimensions du biomimétisme forestier.

Fédérer les acteurs pour faire émerger une dynamique collective

L'enjeu est de structurer, avec l'ensemble des acteurs intéressés, autour du Parc national de forêts et de Ceebios (le centre d'étude et d'expertise en biomimétisme), une dynamique collective de formation et de soutien à la pratique de l'innovation bio-inspirée. Cette démarche pourrait s'incarner dans la création d'un centre de ressources dédié au biomimétisme forestier, à destination des acteurs des territoires forestiers et dont les contours sont présentés dans ce document.

¹ Annexe : « Qu'est-ce que le biomimétisme ? »

Biomimétisme forestier

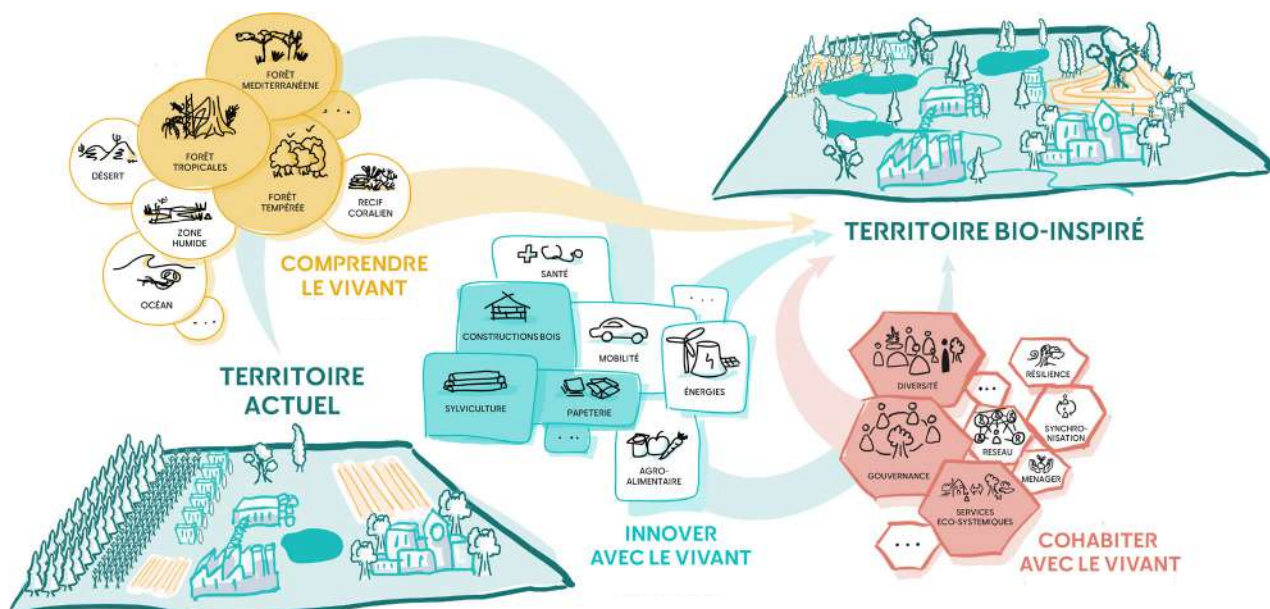


Figure 1: Représentation schématique du biomimétisme forestier ©Ceebios

COMPREDRE LE VIVANT

AXE
1

Pour qui ? Principalement pour la communauté scientifique et les acteurs de l'innovation.

Cet axe explore la biodiversité des écosystèmes forestiers via le prisme de la bio-inspiration. À travers des cas d'étude, il montre qu'il est notamment possible de s'intéresser à la biologie des arbres pour imaginer par exemple des fondations de bâtiment moins impactantes pour les sols ou encore des protections solaires pour la peau plus durables. Le biomimétisme forestier est donc un puissant levier de valorisation de la connaissance extraite de ces écosystèmes.

INNOVER AVEC LE VIVANT

AXE
2

Pour qui ? Pour les acteurs de la filière économique forêt-bois.

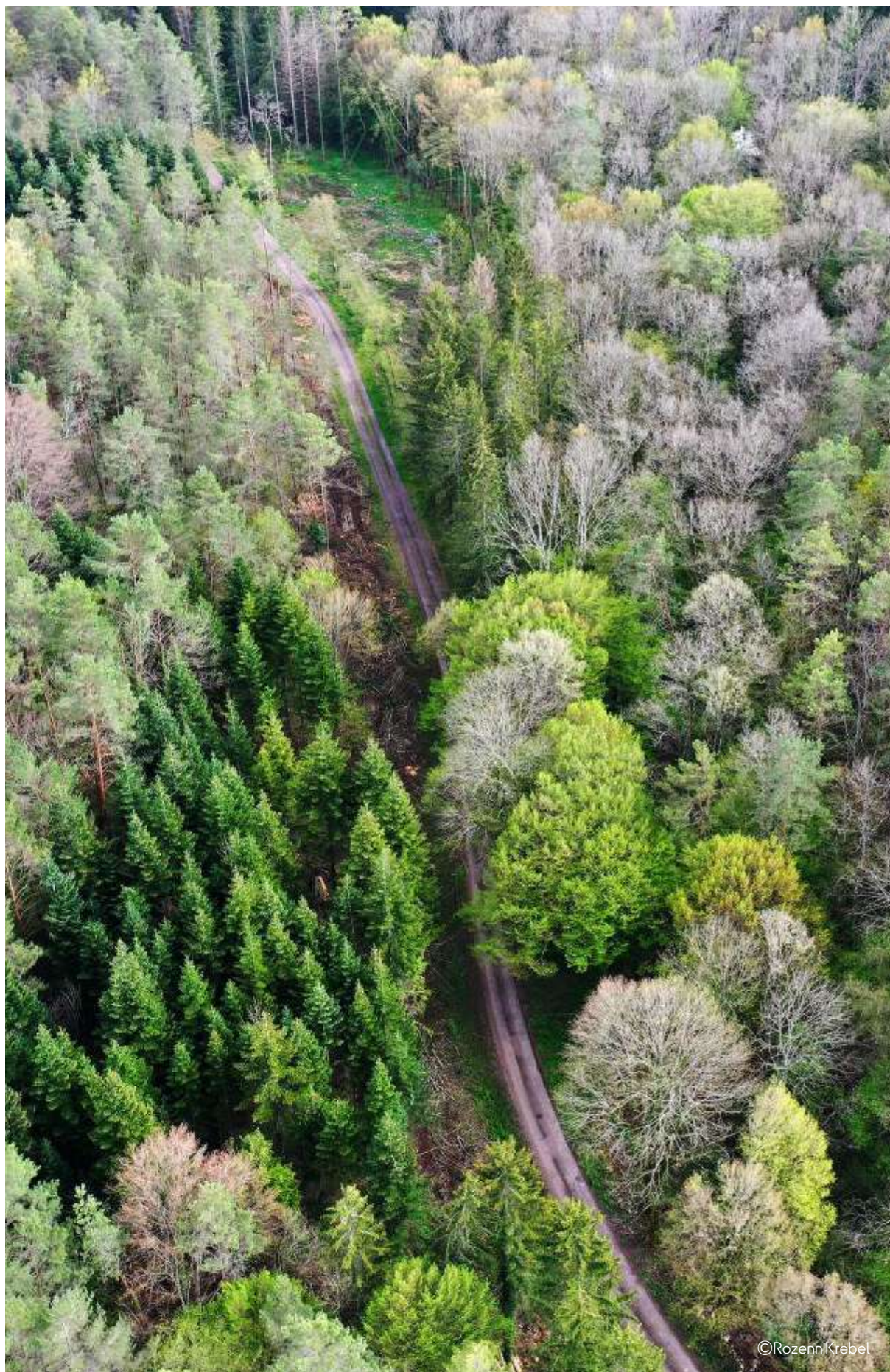
Cet axe suggère pour chacun des grands enjeux auquel la filière fait face, des perspectives de résolutions nouvelles, à partir d'un panel de concepts innovants ciblés issus du monde de la biologie. Pratiques de gestion forestière, valorisation de la ressource bois, monitoring et suivi des forêts, gestion de l'équilibre agro-sylvo-cynégétique : la biomimétique ouvre de nouveaux horizons technologiques et économiques. De plus, sa nature intrinsèquement collaborative favorise l'émergence de partenariats inédits entre acteurs du territoire.

COHABITER AVEC LE VIVANT

AXE
3

Pour qui ? Particulièrement destiné aux acteurs de l'aménagement territorial : urbanistes, paysagistes, aménageurs, décideurs de politiques publiques.

Cet axe invite à faire converger les deux premières dimensions du biomimétisme forestier dans une vision systémique du territoire. Il propose d'explorer ce que la forêt peut enseigner en termes de dynamiques d'interdépendance, de gestion des ressources et de résilience pour imaginer de nouvelles manières d'(a)ménager le territoire et d'organiser les filières économiques durablement.



Sommaire

Synthèse	6
Introduction	10
Genèse et intention de la démarche	10
Le Parc national de forêts, un territoire d'expérimentation	11
Définition du biomimétisme forestier	13
Méthodologie de travail	13
Axe 1 : L'écosystème forestier inspire le biomimétisme	16
Caractéristiques d'un écosystème forestier	17
Richesse de la biodiversité en forêt	20
S'inspirer d'un écosystème complexe	22
[Focus] Repenser l'ancrage architectural à la manière des racines d'arbres	27
[Focus] Repenser la protection solaire de la peau à la manière des végétaux	28
Axe 2 : L'innovation bio-inspirée au service de la filière forêt-bois	30
La filière forêt-bois en Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté	31
Gérer durablement la forêt	33
Les grands défis à relever	34
[Focus] Une approche bio-inspirée pour des colles saines et performantes ?	37
[Focus] Une approche bio-inspirée pour se protéger des tiques ?	38
[Focus] Une approche bio-inspirée pour détecter les départs de feux en forêt ?	39
[Focus] Une approche bio-inspirée pour détourner les ongulés des plantations ?	40
Axe 3 : S'inspirer des forêts pour transformer nos manières d'habiter et d'aménager	42
Structuration de cette recherche	44
Lisières et interfaces : les marges comme zones d'innovation territoriale	46
[Focus] ZAC de Coconi-Ouangani à Mayotte : un quartier pensé comme une forêt	48
Conclusion et perspectives	52
Annexes	56
A propos de la forêt	56
Qu'est-ce que le biomimétisme ?	58
Le Territory Lab	61

Introduction

Genèse et intention de la démarche

Un contexte de crises propice à l'émergence du biomimétisme

Les crises auxquelles sont aujourd'hui confrontées les forêts (épisodes climatiques extrêmes, maladies et attaques de ravageurs...), nous rappellent que la connaissance de la biodiversité et la compréhension systémique du fonctionnement du vivant sont des prérequis fondamentaux pour agir et faire face à ces situations, parfois extrêmes, avec pertinence.

Dans ce contexte, le biomimétisme² propose d'explorer la manière dont les dynamiques d'évolution du vivant confèrent aux organismes comme aux écosystèmes des capacités d'adaptation susceptibles d'inspirer des solutions innovantes et durables.

Le biomimétisme apparaît ainsi, comme un levier pertinent pour soutenir les démarches visant à préserver les usages et services rendus par les forêts, d'autant plus nécessaires dans un contexte de changements globaux et de crises systémiques affectant aujourd'hui ce secteur.

Intention de ce livre blanc

Donner des clés pour comprendre et s'inspirer

Ce livre blanc vise à fournir au lecteur des repères pour comprendre le potentiel encore largement inexploré des écosystèmes forestiers, en tant que sources d'inspiration pour accompagner les transitions et repenser nos manières d'interagir avec le vivant. Il expose les principes du biomimétisme forestier, met en lumière des exemples et des rencontres inspirants et propose des ressources pour une appropriation collective de cette démarche.

Faire émerger un territoire de référence

À ce jour, aucun territoire de référence n'est clairement identifié pour la mise en œuvre du biomimétisme en milieu forestier. Le Parc national de forêts, représentatif de la diversité des forêts de feuillus de l'est de la France et des hêtraies européennes, dispose des atouts nécessaires pour jouer ce rôle. En fédérant les compétences des régions Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est, il peut s'affirmer comme un territoire pilote, ouvrir la voie à de nouveaux projets en complémentarité avec les initiatives existantes autour de l'arbre et de la forêt et contribuer au rayonnement national de cette démarche.



©PNFor

²Annexe : « Qu'est-ce que le biomimétisme ? »

Le Parc national de forêts, un territoire d'expérimentation

Créé en 2019, il est le premier parc national situé dans la partie nord de la France. Entre le nord de la Côte d'Or en Bourgogne-Franche-Comté et le sud de la Haute-Marne en Grand Est, deux régions comptant à elle deux près de 3,7 millions d'hectares de forêts. Il est principalement dédié à la protection des forêts feuillues de plaine qui couvrent plus de la moitié de sa surface totale et près de 96% des 56 000 ha du Cœur réglementé (zone protégée). Le Parc national de forêts abrite également la plus vaste réserve intégrale forestière de France métropolitaine, sur plus de 3000 ha, en forêt domaniale d'Arc-Châteauvillain. Le statut de protection forte dont bénéficient les forêts du Cœur de Parc national apparaît comme un atout du point de vue des enjeux de préservation des patrimoines dont la biodiversité. Mais il interroge également profondément les pratiques de gestion forestière, d'exploitation et de fréquentation des forêts au titre d'activités de loisir, naturalistes, cynégétiques et scientifiques. L'aire d'adhésion du Parc national regroupe à ce jour 110 communes, engagées dans la mise en œuvre de sa charte et dans plusieurs dispositifs d'action publique en faveur de la biodiversité (aires terrestres éducatives, capitale de la biodiversité, atlas de la biodiversité communale).

Le Parc national est aussi un territoire agricole où la polyculture-élevage domine avec des parcelles de grandes cultures imbriquées avec la forêt ou déployées sur les plateaux. Les prairies de fond de vallée sont valorisées par le pâturage. Leur permanence permet le maintien d'une diversité floristique et joue le rôle de filtre aux abords des cours d'eau, au même titre que les forêts. Par sa localisation en tête de bassins hydrographiques, le Parc national porte une responsabilité vis-à-vis des territoires situés à l'aval. Les prairies permanentes occupent une surface importante dans le territoire : 22 978 hectares dédiées au pâturage ou à la fauche. Elles constituent, avec les pelouses sèches, les milieux les plus menacés du territoire par les changements de pratiques (amendements, mise en cultures).



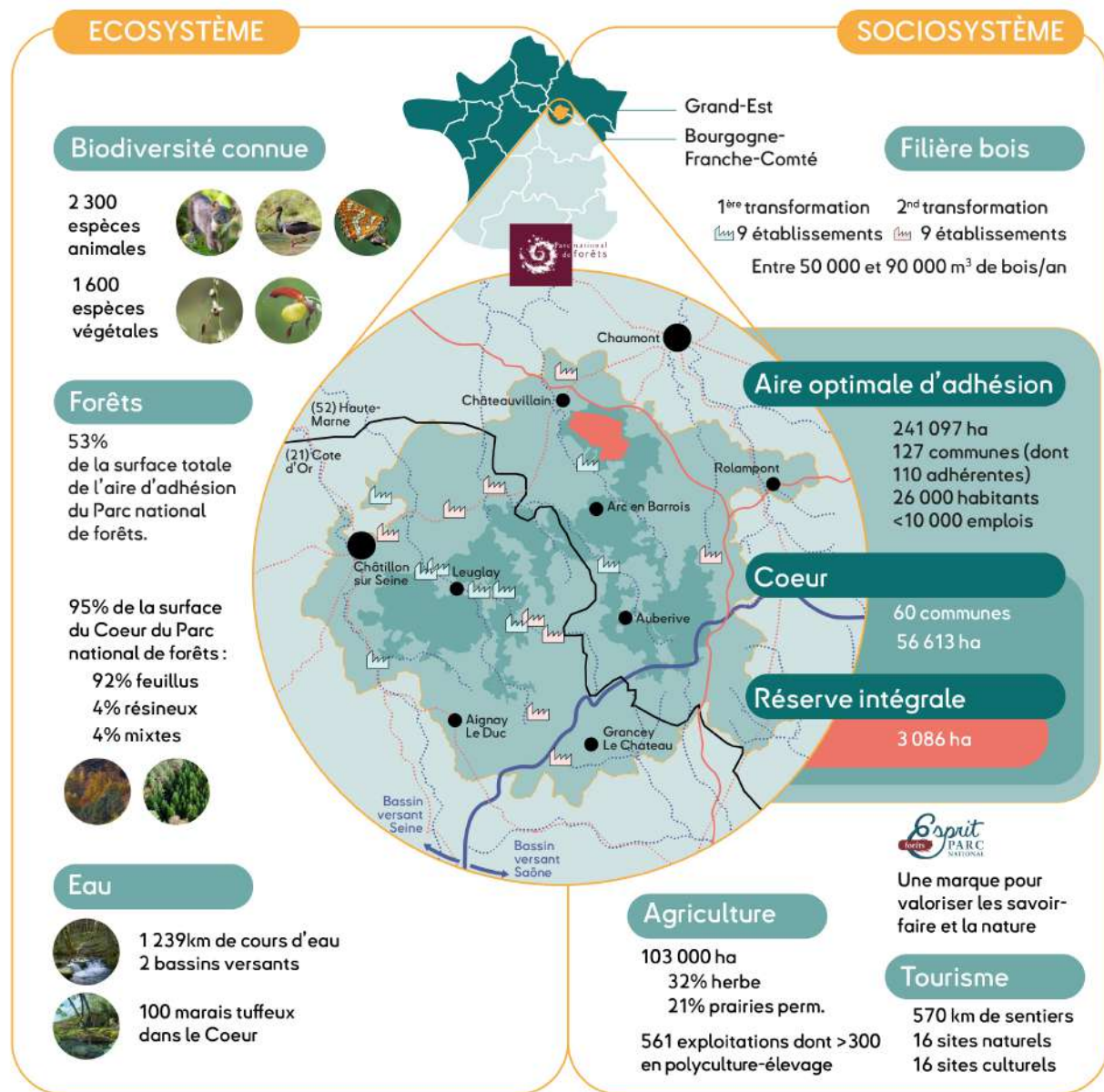
Les écosystèmes de ce territoire sont aujourd'hui soumis à des pressions importantes et diversifiées. Ils sont également, avec l'arbre et les paysages, des marqueurs symboliques puissants et mobilisateurs. La forêt est plus particulièrement un élément central du territoire, composante essentielle de son économie, de son histoire et de son identité. Dans un double mouvement d'écologisation des pratiques et de (re)territorialisation des activités, elle constitue un objet d'étude mais aussi d'engagement. Le Parc national de forêts bénéficie ici d'un fort levier d'action et d'activation des imaginaires. Il semble possible de recourir à ces derniers afin de travailler de nouveaux récits où la biodiversité occupe une place centrale (One health, approches biorégionales, paysages régénératifs, etc.).

Le Parc national de forêts se mobilise pour devenir acteur et facilitateur de la transition sur son territoire, en coopération avec les habitants, les collectivités, les associations et les entreprises qui le composent. Il souhaite faire du biomimétisme un levier d'actions et d'expérimentations au service de ses missions.

La carte en page suivante complète cette première description de ce territoire forestier métropolitain.

PARC NATIONAL DE FORÊTS

Identité d'un territoire forestier



Définition du biomimétisme forestier

Ce livre blanc propose de définir le biomimétisme forestier comme une démarche d'appui aux initiatives existantes sur un territoire en faveur de la transition écologique, économique et sociale. Chacune des 3 grandes parties de ce document reprend un des axes de cette définition pour l'approfondir et l'illustrer avec des exemples concrets.

COMPRENDRE LE VIVANT

Explorer spécifiquement les **écosystèmes forestiers** comme **source d'inspiration** dans un processus d'innovation.

INNOVER AVEC LE VIVANT

Souligner les possibilités d'application du **biomimétisme** pour **transformer et accompagner des secteurs** qui dépendent directement ou indirectement de la forêt (sylvicole, traitement bois, biomatériaux, etc.).

COHABITER AVEC LE VIVANT

Développer une approche systémique et territoriale en considérant la forêt comme un socio-écosystème, où les dynamiques d'interdépendance, de gestion des ressources et de résilience peuvent inspirer des modèles soutenables pour l'aménagement des territoires et l'organisation des filières économiques.

Méthodologie de travail

Ce travail s'inscrit dans une démarche pluridisciplinaire et partenariale, mobilisant des corpus professionnels, scientifiques et techniques, variés ainsi que des langages et des regards issus de cultures d'action différentes. Cette diversité constitue le socle de la démarche, en permettant de croiser des approches parfois complémentaires, parfois contrastées, afin de mieux appréhender la complexité des socio-écosystèmes forestiers.

L'élaboration de ce livre blanc repose sur un travail de co-construction mêlant les expertises des équipes du Parc national de forêts, de Ceebios (Centre d'études et d'expertise en biomimétisme) et plus largement celle des acteurs de la filière forêt-bois. Il repose ainsi sur un travail d'une durée de 12 mois, jalonné par des points réguliers avec un comité de pilotage composé de représentants du Parc National de forêts, de l'ADEME, de la Région Grand Est et de la Région Bourgogne-Franche-Comté.

Il s'articule autour de 3 grandes étapes clés : la définition du concept de biomimétisme forestier et de son périmètre ; un travail de terrain à la rencontre des acteurs du territoire forestier en Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté ; une revue bibliographique de la littérature scientifique et technique et la recherche de perspectives d'application de la démarche du biomimétisme forestier pour la filière forêt-bois.

Périmètre de l'étude

Bien que prenant racine dans le territoire du Parc national de forêts et des deux régions forestières attenantes, l'intention de ce travail est de s'adresser à tous les territoires forestiers. De fait, c'est une définition générale de la forêt³ qui est retenue dans ce livre blanc, ce qui permet de s'ouvrir à des stratégies biologiques inspirantes issues de milieux forestiers divers (et notamment tropicaux).

Pour préciser le périmètre de la filière forêt-bois, au cœur de la deuxième dimension du biomimétisme forestier, il a été décidé de retenir l'ensemble des structures s'inscrivant dans la sélection de codes NAF (Nomenclature d'Activités Française) suivante : sylviculture (02), 1ère et 2ème transformation du bois (16, 31), industrie papetière (17), bois énergie (02) et le secteur de la construction (41). Cette conception de la filière forêt-bois est largement partagée (ADEME, ministères, interprofessions...). Il a également été décidé d'ouvrir la réflexion à d'autres activités en lien direct avec la forêt ou dépendant des services écosystémiques qui en découlent, comme l'agroforesterie (01), les industries pharmaceutiques et chimiques (20 et 21), les activités cynégétiques (01), le tourisme et activités sportives (93), les activités de captage, traitement et distribution d'eau (36), les activités de recyclage et réemploi du bois et dérivés (38), la pêche et l'aquaculture (03).

³Annexe : "À propos de la forêt"

A la rencontre des acteurs du territoire forestier

En plus des échanges réguliers avec les membres du COPIL projet, 17 entretiens et 5 visites terrains ont été menés sur un panel d'acteurs du milieu forestier le plus large et représentatif possible dans le temps imparti pour cette étude (experts scientifiques, entreprises du territoire, associations et organisations représentatives de filières

forestières, institutions). L'objectif étant de cerner les enjeux techniques, économiques et sociaux auxquels sont confrontés la forêt et ses multiples parties prenantes, et d'évaluer le potentiel de la démarche du biomimétisme forestier en réponse à ces enjeux.

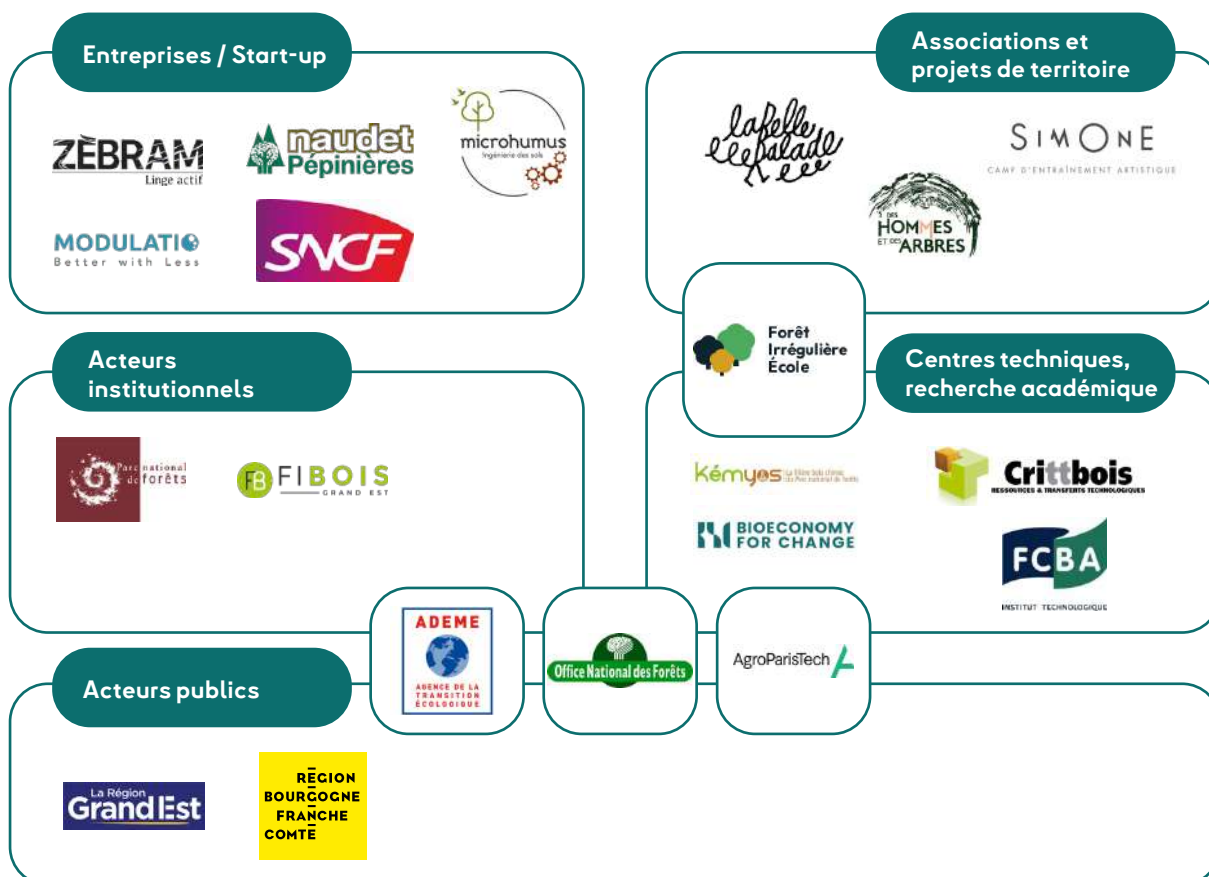


Figure 2 : Cartographie des acteurs rencontrés

Recherche de stratégies bio-inspirées

Ce travail d'exploration a ensuite été complété par une première recherche bibliographique dans la littérature scientifique et technique, menée par une équipe pluri-disciplinaire de Ceebios (ingénieur R&D de l'industrie, ingénieur agronome, architecte, urbaniste et paysagiste), afin d'identifier les innovations bio-inspirées émanant d'espèces biologiques forestières et/ou pouvant être adaptées aux enjeux du socio-écosystème forestier, en croisant les apports scientifiques avec les savoirs d'usage et les pratiques de terrain.

Ces étapes ont été menées de manière itérative, en favorisant des allers-retours entre observation du vivant, pratiques professionnelles, retours de terrain et mise en perspective théorique.



© Senvoler

Axe 1 : L'écosystème forestier inspire le biomimétisme

Cet axe met en évidence comment l'observation fine des biotopes forestiers, à la croisée de l'approche scientifique et du biomimétisme, constitue une source d'inspiration précieuse et foisonnante pour innover, à toutes les échelles et dans tous les secteurs d'activité de notre société.

Caractéristiques d'un écosystème forestier

Lorsque le climat et le sol le permettent, **le stade terminal de l'évolution naturelle d'un milieu ouvert terrestre est très souvent une forêt**. Il existe une grande diversité de forêts au niveau mondial. À chaque climat correspond un climax déterminé : la **forêt feuillue décidue** correspond aux **climats tempérés frais**, la **forêt sclérophylle sempervirente** est le **climax des climats méditerranéens**, au **climat boréal** correspondent la **taïga** ou la **forêt sempervirente boréale** et enfin les **forêts tropicales** aux milieux chauds et humides. Chacune de ces grandes formations végétales ou biomes, se succèdent de l'équateur aux pôles en fonction des climats propres à chaque latitude et de la nature des sols.⁴

En France, les forêts sont classées selon 11 régions écologiques et 91 sylvoécorégions⁵ telles que définies par l'inventaire forestier de l'IGN (Institut Géographique National). Des fiches descriptives de chaque sylvoécorégion précisent les spécificités des forêts françaises en fonction du climat, de la géologie, de l'hydrographie, des sols, de l'utilisation du territoire et des paysages forestiers (figure 3). Autant de facteurs environnementaux qui influent sur la diversité biologique des forêts françaises.

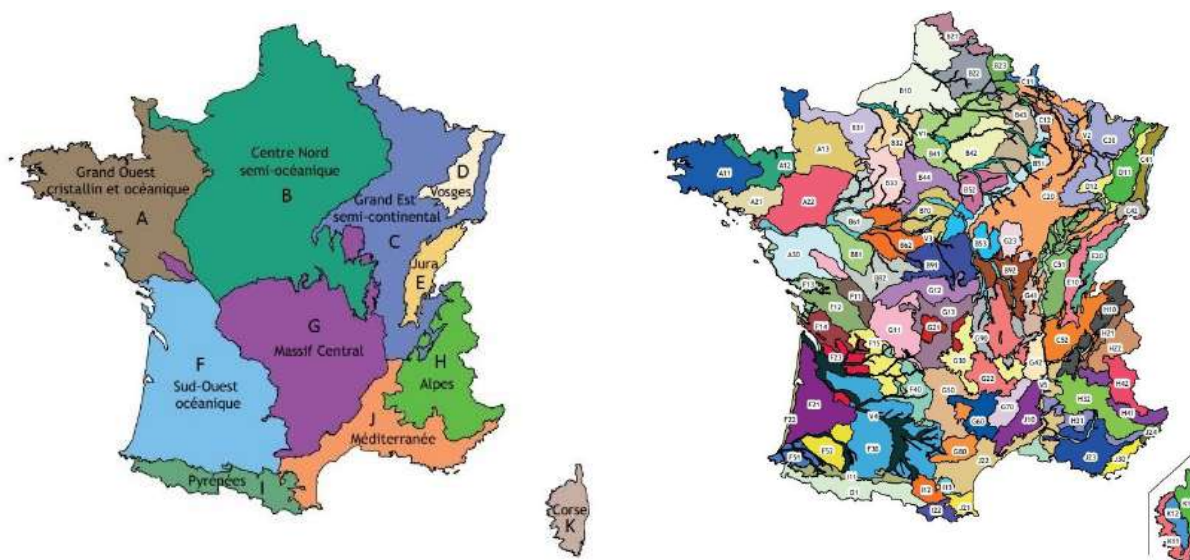


Figure 3 : Cartes des grandes régions écologiques et des sylvoécorégions métropolitaines françaises
Par Didier-CTP – Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=86027827>

Ces biotopes profondément liés à la nature du milieu d'implantation sont construits autour de caractéristiques communes qu'il est nécessaire d'appréhender dans une démarche de bio-inspiration pour mieux comprendre l'origine de la biodiversité observée et les corrélations entre les spécificités d'une espèce et son environnement.

⁴ <https://biologievegetale.be/ecologie-vegetale/ecosystemes/dynamique-de-la-vegetation/les-stades-terminaux/>

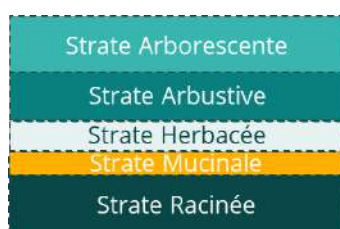
⁵ <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article773>

Caractéristique #1 – Structuration tridimensionnelle

La subdivision de la forêt en différentes **strates** et **sous-ensembles** forme une grande **diversité de micro-écosystèmes**, offrant des conditions variées d'accès à l'eau, à la lumière et aux nutriments pour les espèces présentes en forêt. La forêt se structure ainsi :

Structuration verticale :

Plusieurs strates ou étages sont observables à partir du sol. Une première strate mucinale composée de mousses et champignons de quelques centimètres de haut cède rapidement le pas à une strate herbacée (jusqu'à 1 mètre de haut). Une strate arbustive (1 à 7 mètres) précède une strate arborescente (au-dessus de 7 mètres). A cet ensemble, il faut ajouter une strate supplémentaire souterraine contenant les systèmes racinaires et mycorhiziens.



Structuration horizontale :

De même, la forêt n'est pas homogène horizontalement. Elle se constitue d'une mosaïque de sous-ensembles diversifiés : buissons denses, chablis et zones de régénération, clairières, marais et mares, lisières. Ces subdivisions sont autant de micro-écosystèmes présentant leurs propres caractéristiques au sein d'une forêt. De plus, ces sous-ensembles se délimitent le long de zones de rencontres entre micro-écosystèmes, appelées plus précisément écotones.



Ainsi, cette organisation spatiale complexe de la forêt multiplie les habitats et favorise une riche biodiversité. La forêt est un milieu dense et en trois dimensions, ce qui impacte les modes de communication entre espèces et les déplacements de la faune qui doit se repérer dans l'espace et éviter les obstacles.

Chaque espèce peut être observée dans les micro-écosystèmes qui lui sont les plus favorables en termes d'accès à la lumière, à l'eau et à la fertilité du sol. Les espèces végétales présentes en forêt sont classées par groupes écologiques.

Caractéristique #2 – Une échelle de temps long

La forêt suit un cycle naturel de plusieurs centaines d'années, dont le renouvellement se déroule à l'échelle d'un chablis, qui correspond à un espace libéré par la chute d'un arbre et l'arbre tombé lui-même, à la suite d'une perturbation ou de son vieillissement. La succession écologique est l'ensemble des étapes décrivant un cycle évolutif complet de l'écosystème après une perturbation, depuis la recolonisation par des plantes pionnières jusqu'à un stade mature ou climax. La forêt est donc un système dynamique, en constante évolution, capable dans une certaine mesure d'adaptation y compris face à des situations de crises environnementales.

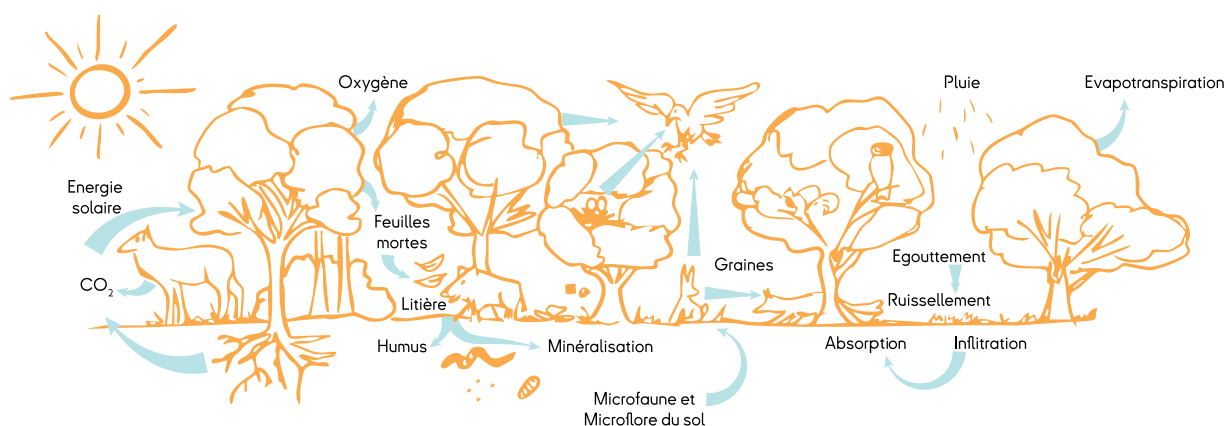


Figure 4: Flux et réseau trophique au sein de l'écosystème forêt (inspiré du Guide illustré de l'écologie, Bernard Fischesser et Marie-France Dupuis-Tate, 1996)

Caractéristique #3 – Organisation et flux

La forêt est un écosystème caractérisé par de nombreux flux de matière, d'eau et d'énergie entre les différentes espèces - végétales, animales, bactériennes et fongiques – et avec le biotope (figure 4).

Flux d'énergie



La **lumière** est la principale entrée d'énergie dans l'écosystème forestier. Par la **photosynthèse**, les végétaux produisent leur biomasse à partir d'eau et de dioxyde de carbone en présence de lumière. La **croissance en hauteur** des arbres permet d'augmenter l'accès à la lumière au niveau de la canopée. Les lianes ou épiphytes utilisent les arbres comme support, ce qui réduit leur besoin d'investir des ressources pour la croissance d'un tronc.

Flux d'eau



L'eau est principalement absorbée par les racines, en symbiose avec les mycorhizes, qui multiplient la surface d'absorption. Les racines ont la capacité de filtrer l'eau du sol et de contribuer à sa qualité. L'eau est transportée vers les feuilles pour la photosynthèse par les vaisseaux conducteurs de sève brute. L'évapotranspiration de l'eau par les feuilles contribue à la montée de sève dans le tronc.

Selon la composition et la granulométrie des sols forestiers, leur capacité à stocker l'eau varie. Elle augmente avec la présence d'argiles ou de grains fins à la différence d'éléments grossiers ou de calcaire qui laissent l'eau s'infiltrer sans la stocker.

Flux de matière



Le **réseau trophique** regroupe l'ensemble des chaînes alimentaires, depuis les **producteurs** (végétaux, lichens), les **consommateurs primaires** (herbivores), les **consommateurs secondaires** (carnivores) et les **décomposeurs**. La **complémentarité et la redondance** de groupes d'espèces remplissant les mêmes fonctions au sein d'une forêt favorise la conservation des fonctions de l'écosystème dans le temps, malgré des perturbations récurrentes.

- Les arbres sont des espèces architectes. Ils structurent physiquement l'écosystème et servent d'habitat à de nombreuses espèces. Ils absorbent l'eau et les nutriments du sol par les racines et captent l'énergie solaire pour la stocker sous forme de matière organique.
- Les consommateurs primaires et secondaires permettent la circulation de la matière au sein de l'écosystème par les réseaux trophiques. Ils contribuent à la dissémination de certaines graines de plantes.
- Certains animaux du sol et du bois, comme des vers et des micro-organismes, décomposent la matière organique et participent à la lente formation de l'humus, réserve assimilable pour la production de nouveaux végétaux.
- Les micro-organismes du sol jouent également un rôle dans le cycle des minéraux : les bactéries nitrifiantes captent l'azote minéral pour en faire de l'azote organique assimilable par les plantes.

Flux de carbone



Les écosystèmes forestiers sont des composantes importantes du cycle du carbone à l'échelle mondiale en raison de leur capacité à en stocker des quantités beaucoup plus importantes que les autres écosystèmes terrestres, jouant ainsi un rôle irremplaçable dans la régulation du bilan carbone global et le maintien du climat mondial.

Les principaux moteurs de ces flux de carbone sont la photosynthèse qui permet aux plantes chlorophylliennes de transformer le dioxyde de carbone gazeux en composés chimiques plus ou moins complexes de la famille des sucres ; et la respiration cellulaire qui brûle ces sucres pour produire de la chaleur et relarguer du dioxyde de carbone. Ce cycle du carbone forestier est caractérisé par des flux importants : il a été estimé que le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère est échangé (renouvelé) avec la biosphère terrestre par le biais de la photosynthèse tous les sept ans, dont 70 % via les forêts. Ces flux sont spatialement étendus et hétérogènes (en fonction des conditions climatiques, du type de végétation) et temporellement variables (suivant les cycles journaliers, saisonniers). Une partie du carbone absorbé est stocké de manière plus ou moins pérenne dans les organismes, sous différentes formes dont le bois. Ainsi plusieurs strates de la forêt stockent du carbone : à peu près autant dans le sol que dans la biomasse vivante environ 45% chacun et autant dans la litière que dans le bois mort environ 5% chacun⁶.

Du fait des différentes pressions s'exerçant sur les forêts les cycles du carbone évoluent fortement. Les forêts perdent petit à petit leur capacité à emmagasiner le carbone. De plus, certaines pratiques de gestion forestière peuvent ponctuellement et localement transformer la forêt en source de carbone. C'est le cas notamment pour les parcelles mises à nu, le temps que le couvert forestier se reforme.

⁶ <https://foret.ign.fr/IGD/fr/indicateurs/1.4>

Richesse de la biodiversité en forêt

Les caractéristiques des forêts (structuration tridimensionnelle, temps long et organisation des flux) expliquent en grande partie le foisonnement de biodiversité que l'on peut y observer, du fait de la multiplicité des micro-habitats possibles.

Part de la biodiversité vivant en forêt

La forêt est un milieu terrestre qui abrite et nourrit une très grande diversité d'êtres vivants. En effet, 80 % de la biodiversité terrestre mondiale est présente dans les forêts, avec les deux tiers de celle-ci présents dans les forêts tropicales.

Les forêts tropicales abritent la plus grande diversité d'espèces terrestres, avec 80 % des espèces d'amphibiens, 75 % des espèces d'oiseaux et 68 % des espèces de mammifères, ainsi qu'une bonne partie des 60 000 espèces d'arbres connues que compte la planète. À titre d'exemple, un hectare de forêt tropicale (soit la taille d'un terrain de football) abrite en moyenne plus de 150 espèces d'arbres, contre une quinzaine seulement dans nos forêts tempérées.

Quelle biodiversité en forêt ? Faune, flore, micro-organismes

La biodiversité forestière se définit comme l'ensemble de la diversité spécifique (espèces) des êtres vivants qui habitent et composent l'écosystème forestier. Elle inclut les êtres vivants présents dans les sols forestiers, ainsi que les espèces qui interagissent avec l'écosystème forestier sans pour autant y passer l'ensemble de leur vie.

Dans une forêt, le vivant est réparti en strates, chacune étant caractérisée par un microclimat, une flore et une faune spécifique. Il est admis que l'essentiel de la biodiversité d'une forêt se concentre dans le sol et le bois mort. En France par exemple, 25 % de la biodiversité forestière se concentre dans le bois mort.

Quelques chiffres sur la biodiversité en forêt :

- en France métropolitaine, une forêt de petite surface (jusqu'à 300 hectares) accueille un nombre d'espèces supérieur à 5 000 ; une grande forêt (de plusieurs milliers d'hectares) accueille plus de 10 000 espèces ;
- la faune représente plus des deux tiers des espèces ; elle est elle-même composée à plus de 90 % d'insectes. Les mammifères, les oiseaux, les reptiles et les amphibiens, pris dans leur ensemble, ne représentent, au maximum, que 3% de la biodiversité forestière ! Ce chiffre est important à souligner, car ce sont généralement ces seuls groupes d'espèces animales qui sont « visibles » pour tout un chacun et qui sont, parfois, pris en compte dans la gestion forestière ;
- la diversité des végétaux compte pour 10 à 20 % environ des espèces ; seuls les ligneux, les autres plantes à fleurs et les fougères, parfois les mousses, sont en partie pris en compte dans la gestion forestière ;
- la diversité des autres règnes et formes de vie (soit tout de même de 15 à 33 % des espèces) est principalement le fait des champignons (plus de 2 000 espèces, dans une grande forêt) et de lichens.

Evolution de la biodiversité et en particulier des végétaux

Cette diversité observée en forêt est le résultat d'un processus évolutif vieux de 500 millions d'années, initié avec la colonisation des surfaces émergées du globe par des protolichens. Ces protolichens, grâce à leur action sur la roche mère, amorcèrent le long processus de formation des sols, substrat organominéral à la base du développement végétal terrestre à venir. Vers -350 à -300 millions d'années, l'apparition de la lignine conférant rigidité structurelle à certains tissus biologiques et permettant le transport de l'eau dans les xylèmes, va favoriser la formation de structures végétales élancées vers le ciel à la recherche d'un maximum de lumière. Enfin, il faudra attendre le Jurassique (-200 à -145 millions d'années) pour voir apparaître les premières plantes à fleurs. Il est nécessaire de rappeler ici que les premières formes de photosynthèse apparaissent bien avant, il y a plus de 2 800 millions d'années dans les océans. Cette réaction chimique unique dans le vivant permet à la quasi-totalité des végétaux terrestres de convertir l'énergie solaire en sucres, élément de base de leur métabolisme.





©Romaric Leconte

Bases de données pour la biodiversité en forêt (liste non exhaustive)

Observatoire des forêts françaises : <https://observatoire.foret.gouv.fr/>

Observatoire de la biodiversité des forêts : <https://www.open-sciences-participatives.org/fiche-observatoire/132>

Base de données BD Forêt® : <https://geoservices.ign.fr/bdforet>

Plateforme Open Data de l'Office National des Forêts : <https://geo-onf.opendata.arcgis.com/>

Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN) : <https://inpn.mnhn.fr/accueil/index>

Programme Vigie-Nature

Les sols dans l'inventaire forestier national : <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/les-sols-dans-linventaire-forestier-national-5506>

Inventaire forestier : <https://inventaire-forestier.ign.fr/>

Observatoire du Parc national de forêts : <https://observatoire.foret-parcnational.fr/>

Observatoire Grand Est de la biodiversité : <https://biodiversite.grandest.fr/la-biodiversite-a-la-loupe/observatoire-regional-biodiversite/>

S'inspirer d'un écosystème complexe

Grilles de lecture

Comment s'inspirer de ce foisonnement de formes de vie abritées dans une forêt ? Comment percer les secrets d'une telle richesse biologique ?

Il existe plusieurs angles d'études des forêts selon les disciplines scientifiques, notamment :

- Les botanistes insistent sur les paramètres végétaux et leur répartition dans l'espace, en s'intéressant non seulement aux arbres, mais aussi aux arbustes, aux plantes de sous-bois, aux lianes, aux épiphytes, aux champignons, aux mousses, aux algues et aux lichens.
- Les écologues étudient les relations d'interdépendance qu'entretiennent les composantes végétales et animales de la forêt entre elles, en insistant sur la diversité (des espèces végétales et animales, des habitats, des niches écologiques) et la complexité (des structures, des architectures forestières, des relations).

D'autres disciplines peuvent être mobilisées : mycologie, hydrologie, microbiologie, sciences du sol, physique...

Les différentes grilles de lecture utilisées par la suite pour observer l'écosystème forestier à ces différentes échelles et s'en inspirer sont les suivantes :

- Entrées thématiques par strates - Arbres / Plantes herbacées / Champignons / Faune / etc.
- Echelles dimensionnelles – Population / Organisme / Organe / Tissu / Cellule / Molécule
- Echelle temporelle individu – de la Graine à l'Arbre
- Echelle temporelle population – Succession écologique des plantes pionnières à la forêt.

Le biomiméticien complètera généralement cette lecture par une approche fonctionnelle :



LES FORMES ET MOTIFS DU VIVANT

Pour repenser la rigidité d'un édifice, l'aérodynamisme d'un objet en mouvement, les propriétés de surfaces...



LA MATIÈRE ET LES PROCESSUS ASSOCIÉS

Pour repenser la production et l'utilisation des matériaux, les processus de production et transfert d'énergie ...



LES JEUX D'INTERACTIONS INTRA ET INTER ESPÈCES

Pour repenser les processus algorithmiques, apprendre à naviguer dans un environnement complexe, imaginer de nouveaux modes de gouvernance...

Galerie d'enseignements à tirer de l'observation des écosystèmes forestiers

Les tableaux ci-dessous ont pour objectif de donner une vue d'ensemble du potentiel du biomimétisme forestier, à travers une inspiration puisée dans les écosystèmes forestiers à différentes échelles. Ils ne sont bien évidemment pas exhaustifs. Le choix des modèles biologiques s'est porté majoritairement sur des espèces vivant en forêt, pour mettre en valeur les espèces inféodées à ces écosystèmes, mais sans exclure les espèces présentes en forêt seulement sur

une partie de leur cycle de vie ou les espèces qui peuvent être observées en forêt mais sont présentes également dans d'autres écosystèmes. La forêt dans son ensemble ne figure volontairement pas elle-même comme modèle inspirant. Cette dimension de la bio-inspiration est abordée plus spécifiquement dans le dernier chapitre « S'inspirer des forêts pour transformer nos manières d'habiter et d'aménager ».

• **TABLEAU 1 : S'inspirer des arbres**

MODÈLES	TRAITS FONCTIONS BIOLOGIQUES	MÉCANISMES / PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	APPLICATIONS POTENTIELLES	APPROCHES FONCTIONNELLES
Racines	Ancrage dans le sol (support structurel)	Architecture du système racinaire adaptable aux forces appliquées sur la structure, mobilisant un large volume de sol par sa large surface de contact	Fondations de bâtiments adaptables et diffuses réduisant le besoin de compaction du sol (Stachew et al., Houette et al.)	
	Pénétration dans le sol	Croissance par les pointes, système de croissance hiérarchique multi-phases	Installation d'infrastructures souterraines réduisant les ressources nécessaires et les nuisances sur le sol (Stachew et al.)	
	Captation et transport de l'eau	Entrée d'eau du sol dans les racines par les poils racinaires associés aux mycorhizes, déplacement de l'eau vers le tronc et les feuilles dans des vaisseaux imprégnés de lignine, dans le sens d'un gradient vertical de potentiel hydrique, combiné à la dépression générée par l'évapo-transpiration	Dispositifs de filtration, récolte d'eau, transport d'eau, exemple des pompes artificielles bio-inspirées (Compact and thermosensitive nature-inspired micropump : https://www.nature.com/articles/srep36085), étude de la capacité des plantes à résister à la sécheresse et à la cavitation, plateforme « CaviPlace », laboratoire INRAE	
	Métabolisme du calcium des arbres oxalogènes, comme l'Iroko (<i>Milicia excelsa</i>) et le Noyer Maya (<i>Brosimum alicastrum</i>)	Excrétion d'ions oxalate dans le sol par les racines, qui forment du carbonate de calcium CaCO_3 après transformation par des bactéries et champignons du sol et précipitation avec le calcium (voie oxalate-carbonate)	Stockage du carbone durablement dans les sols grâce aux arbres oxalogènes. Projet d'agroforesterie « Arbres Sauveurs ». 21 kg de dioxyde de carbone stockés par l'arbre Iroko par an, stable dans le sol pendant 100 000 ans (film Nature = Futur ! L'arbre sauveur)	
	Interactions entre les racines et la vie du sol	Porosité du sol à proximité des racines qui offre une variété de refuges et d'espaces de vie pour la faune et la fonge	Architecture de façades qui favorisent l'implantation spontanée de biodiversité dans les anfractuosités du support. Exemples Pochecho et murs biodiversitaires de ChartierDalix	
Tronc	Protection thermique et solaire	Forme ronde du tronc (minimise influx de chaleur vers l'intérieur) ; Rugosité de l'écorce (alternance de zones illuminées et de zones d'ombre, ce qui favorise le refroidissement par convection de l'air) ; Rejet de la chaleur par rayonnement infrarouge (grâce aux tanins) ; Piégeage d'air dans les couches de l'écorce (isolation thermique)	Systèmes de façades innovants qui favorisent les zones d'ombre et l'évacuation des excès de chaleur lors des canicules. Exemple du projet Mimesis à Nice par Béchu & associés (non construit)	

MODÈLES	TRAITS FONCTIONS BIOLOGIQUES	MÉCANISMES / PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	APPLICATIONS POTENTIELLES	APPROCHES FONCTIONNELLES
Branches	Amortissement mécanique	Architecture ramifiée structurelle pour fournir un mécanisme d'amortissement robuste permettant de protéger le tronc en transférant l'accumulation excessive d'énergie mécanique dans le tronc vers les branches pour une meilleure dissipation en cas de vents très forts	Système d'amortissement passif des vibrations de grandes amplitudes pour des structures en rotation. Brevet DGA et labo LadHyx et thèse de B. Theckes 2012	
Feuilles	Photosynthèse	Utilisation de l'énergie lumineuse pour synthétiser de la matière organique à partir de dioxyde de carbone et d'eau	Photosynthèse artificielle pour la production d'hydrogène et le stockage de carbone. Projet européen E-Scaled : https://escaled-project.eu/	
	Protection contre le rayonnement solaire	Réflectance de la lumière augmentée par la présence de cristaux de cire et de poils (trichomes) à la surface de l'épiderme ; Repliement des feuilles pour réduire l'absorption de lumière	Applications en cosmétique pour la photoprotection de la peau, revêtements bio-inspirés pour des façades de bâtiments ou de véhicules	 
	Régulation thermique	Aérodynamisme de la feuille dans le vent favorisant le renouvellement de la couche d'air autour de la feuille et son refroidissement (Henrion 2009) ; Evaporation permet de refroidir les feuilles pour maintenir une photosynthèse efficiente	Renouvellement de la couche d'air autour des bâtiments, aménagement de quartiers qui favorisent la circulation de l'air ; Maintien d'une couche humide sur les façades pour favoriser leur refroidissement	
	Captation des polluants et particules	Micro-organismes (bactéries, champignons) présents sur les feuilles adsorbent, dégradent et séquestrent les polluants (Weyens et al. 2015)	Dépollution, phytoremédiation	
	Disposition des feuilles sur une plante (phyllotaxie)	Les rameaux d'une plante sont répartis dans l'espace de manière à assurer à l'ensemble des feuilles une exposition à la lumière équilibrée tout en minimisant les ombres portées	Algorithme inspiré de la phyllotaxie, pour optimiser l'implantation et l'orientation d'un ensemble de bâtiments vis-à-vis des contraintes d'ensoleillement. Cabinet d'architecture IN SITU en collaboration avec le laboratoire de biologie végétale RDP	
Sève de l'Hévea (<i>Hevea</i>)	Mécanisme d'auto-cicatrisation	Libération de molécules qui permettent de colmater une lésion (Botier, 2020)	Matériaux auto-cicatrisants par l'encapsulation de substances actives réparatrices	
Pommes de pin (cônes femelles)	Mécanisme de libération des graines quand les conditions climatiques sont propices.	Ouverture passive du cône grâce à un gonflement différentiel des 2 faces des écailles de pomme de pin (effet bilame) en réponse à une variation du couple température ambiante / hygrométrie	Façades adaptatives (exemples pavillon HygroSkin d'ICD/ITKE 2012, Orléans ; Pho'liage par ArtBuild 2019-2021, Paris/Lyon)	
Noix de Macadamia	Résistance mécanique de l'épicarpe (enveloppe externe du fruit)	Organisation hiérarchique des fibres végétales en multicouches renforcées par des polymères organiques (Speck et al.)	Matériaux composites légers et résistants pour l'industrie, la mobilité.	
Surface des graines	Interactions avec le sol, les animaux	Microstructures générées par la forme des cellules et recouvertes de cires	Science des matériaux, contrôle de la mouillabilité avec l'eau, adhésion	 

• **TABLEAU 2 : S'inspirer des plantes herbacées**

MODÈLES	TRAITS FONCTIONS BIOLOGIQUES	MÉCANISMES / PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	APPLICATIONS POTENTIELLES	APPROCHES FONCTIONNELLES
Sporanges de fougères (capsules contenant les spores)	Dispersion des spores	Propulsion des spores par rupture de l'annulus et libération de l'énergie mécanique stockée (Forterre 2013)	Mécanismes de propulsion	
Plantes grimpantes de type liane Lierre <i>Hedera helix</i>	Adhésion au support	Double mécanisme : colle à partir de nanoparticules organiques, combinée à des poils racinaires qui sont imbriqués dans la surface du support	Formulation de nouveaux adhésifs à base de protéines	
Communautés végétales	Interactions entre arbres et différentes strates associées	Stratégies d'échange d'informations, d'eau et de nutriments	Approche circulaire de la production à l'échelle d'une zone industrielle : Kalundborg Symbiosis (https://www.symbiosis.dk/en/)	

• **TABLEAU 3 : S'inspirer des champignons**

MODÈLES	TRAITS FONCTIONS BIOLOGIQUES	MÉCANISMES / PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	APPLICATIONS POTENTIELLES	APPROCHES FONCTIONNELLES
Diverses souches de champignons	Gestion métabolique de polluants	Séquestration, dégradation et transformation de molécules (dont les hydrocarbures et les métaux lourds) par leur métabolisme	Mycoremédiation, dépollution/ Exemples d'entreprises : Yphen, Novobiom, Mycophyto	

• **TABLEAU 4 : S'inspirer de la faune**

MODÈLES	TRAITS FONCTIONS BIOLOGIQUES	MÉCANISMES / PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	APPLICATIONS POTENTIELLES	APPROCHES FONCTIONNELLES
Pic-vert <i>Picus viridis</i>	Légèreté du bec et protection du cerveau contre les chocs répétés	Amortissement par la structure spongieuse des os du bec et redirection des contraintes mécaniques vers la base du crâne (Wang et al. 2011)	Matériaux soumis à des chocs intenses et répétés	 
Chauve-souris <i>Microchiroptera</i>	Estimation des distances par écholocation	Principe de réflexion sonore. L'onde incidente est réfléchi si la taille caractéristique de la cible est égale à la longueur d'onde du signal	Capteurs ultrasoniques dans la robotique. Outils d'imagerie médicale	
Chouette <i>Tyto alba</i>	Vol silencieux	Bords de fuite des ailes couverts de fines structures qui réduisent les turbulences et absorbent les bruits	Structuration des pales d'éoliennes (Siemens / Enercon). Ou encore des pantographes du train japonais à grande vitesse Shinkansen, pour réduire le bruit	

MODÈLES	TRAITS FONCTIONS BIOLOGIQUES	MÉCANISMES / PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	APPLICATIONS POTENTIELLES	APPROCHES FONCTIONNELLES
Grenouille arboricole <i>Staurois guttatus</i>	Adhésion et lubrification des pattes par un mucus	Adhésion humide grâce à un mucus sécrété entre les pattes et le substrat, via les forces capillaires (Endlein 2013)	Formulation de matériaux adhésifs fluides biocompatibles et collant en milieu humide	
Hérisson <i>Erinaceus</i>	Protection contre les chocs	Enchevêtrement d'épines dont la structure est poreuse et présente un gradient de rigidité, ce qui permet d'absorber les chocs sans casser	Casque Hedgemon en développement	 
Ecureuil <i>Sciurus</i>	Grimpe d'arbres	Griffes acérées et articulation de la cheville pour orienter les griffes	Robotique, systèmes préhensiles	
Collembole <i>Collembola</i>	Propriétés de surface de la cuticule	Micro-texturation de surface, propriétés d'hydrophobie et oléophobie (Helbig et al. 2011)	Matériaux bio-inspirés auto-nettoyants anti-adhésion. Projet de recherche ANR BIOS-CA avec Renault https://anr.fr/Projet-ANR-18-CE22-0018	 
Coccinelle <i>Coccinellidae</i>	Changement de couleur, communication	Changement d'indice optique d'un assemblage multicouche air-chitine par injection d'un fluide (hygrochromie)	Matériaux changeant de propriétés de manière passive en réponse à des stimuli de l'environnement (eau, température, etc.)	
	Déploiement des ailes	Stockage d'énergie élastique dans la forme compacte de l'aile, qui permet un déploiement rapide lorsque cette énergie est libérée	Déploiement de panneaux photovoltaïques, robotique, structures miniaturisées, emballages évolutifs et adaptatifs	

Repenser l'ancrage architectural à la manière des racines d'arbres

En architecture, les systèmes de fondations, encore largement conçus comme des structures massives et monofonctionnelles, pourraient être repensés à la lumière des précieux enseignements de la biologie des racines d'arbres, capables d'assurer un ancrage performant tout en s'adaptant à des conditions environnementales variables.



Le défi

En architecture, la conception des fondations repose encore majoritairement sur des systèmes massifs, impliquant une forte compaction des sols. Ces approches, souvent monofonctionnelles, répondent principalement à des enjeux de stabilité mécanique, au détriment d'autres fonctions essentielles telles que la gestion de l'eau, la limitation de l'érosion ou l'adaptabilité aux évolutions du milieu.

Ce que fait le vivant

Les racines assurent l'ancrage de l'arbre grâce à un système ramifié qui se développe en explorant le sol par ses extrémités. Leur morphologie évolue en permanence en fonction des conditions environnementales rencontrées au cours du cycle de vie de l'arbre.

Au-delà de l'ancrage, le système racinaire échange, stocke et transporte l'eau et les nutriments au sein de la rhizosphère, contribue à réduire l'érosion en surface et en profondeur et crée des habitats favorables à de nombreuses autres espèces. Il s'agit donc d'un système hautement multifonctionnel.

PROBLÈME

Des fondations rigides, fortement impactantes pour les sols et peu adaptables aux variations environnementales.

STRATÉGIE DU VIVANT

Système racinaire ramifié, adaptable et multifonctionnel.

PRINCIPE BIO-INSPIRÉ

Répartir les forces, explorer le sol, s'adapter localement aux contraintes.

APPLICATIONS POTENTIELLES

Fondations architecturales plus sobres, résilientes et adaptées aux contextes géotechniques complexes.

Approche scientifique et biomimétique

Afin de comprendre les mécanismes à l'origine de la performance d'ancrage des racines, leurs traits morphologiques ont été analysés à l'aide d'outils numériques et d'analyses paramétriques, à partir de modèles 3D reconstruits par photogrammétrie. Ces mécanismes ont ensuite été transposés dans des concepts d'ancrage architectural cherchant à réunir, au sein d'un même système, des fonctions de pénétration dans le sol, de support structurel et de réduction de l'érosion. Des tests mécaniques sur des modèles réduits ont permis d'évaluer l'effet de différentes variantes morphologiques bio-inspirées sur les performances d'ancrage.

Enseignements et perspectives

Cette démarche a permis d'identifier des mécanismes pertinents à transférer vers de futurs projets architecturaux, notamment dans la conception de fondations adaptables à des contextes d'usages et environnementaux spécifiques. En particulier, la distribution des forces propre aux systèmes racinaires, réparties sur un grand volume de sol, permet de mieux faire face aux fluctuations du milieu. Cette approche pourrait s'avérer particulièrement intéressante pour répondre aux enjeux liés au retrait / gonflement des argiles, qui affectent de nombreuses régions françaises, dont la Bourgogne-Franche-Comté et le Grand Est⁷.

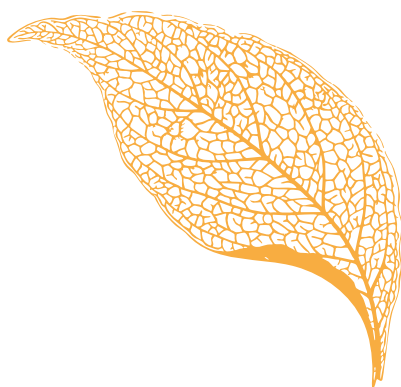
Équipe projet

Thibaut Houette (rédaction), Elena Stachew et Petra Gruber (University of Akron), Jason W. Miesbauer (The Morton Arboretum) – 2018–2022

⁷<https://www.cerema.fr/fr/actualites/mieux-prevenir-risque-retrait-gonflement-sols-argileux-rga>

Repenser la protection solaire de la peau à la manière des végétaux

Dans le domaine de la cosmétique, la formulation de crèmes solaires, encore largement fondée sur des approches chimiques impactantes pour l'environnement, peut s'inspirer de la biologie des plantes, organismes fixés ayant aussi développé des stratégies de protection physique efficaces contre les UV.



Le défi

Développer une protection solaire performante reposant sur des mécanismes alternatifs aux filtres chimiques classiques, tout en limitant l'impact environnemental.

Ce que fait le vivant

Contrairement aux espèces mobiles pouvant limiter leur exposition aux UV, les plantes sont des organismes fixés pouvant être fortement exposés au rayonnement solaire. Elles doivent donc se protéger des effets délétères des UV, principalement sur l'ADN et certaines activités enzymatiques.

Parmi différentes stratégies, elles développent notamment une pellicule de cires structurée à la surface des feuilles. Composée de micro et nanocristaux organisés en trois dimensions, cette structure réfléchit efficacement les UV tout en laissant passer la lumière visible nécessaire à la photosynthèse. Renouvelable et adaptable aux conditions environnementales, ce film confère également des propriétés d'hydrophobicité remarquables, constituant un système multifonctionnel.

PROBLÈME

Les protections solaires actuelles, majoritairement basées sur des filtres chimiques ou minéraux, peuvent avoir des impacts environnementaux et sanitaires.

STRATÉGIE DU VIVANT

Systèmes de protection physique intégrés à la surface des feuilles, fondés sur la réflexion sélective des UV grâce à des micro/nano structures organisées en trois dimensions.

PRINCIPE BIO-INSPIRÉ

Réfléchir les UV sans bloquer la lumière visible grâce à une structuration de surface autoassemblée, renouvelable et adaptable.

APPLICATIONS POTENTIELLES

Développer des protections solaires innovantes reposant sur des mécanismes physiques, potentiellement biosourcées et adaptées à la peau.

Approche scientifique et biomimétique

Un procédé de déposition d'une solution de cire dissoute a permis de former des films structurés afin d'étudier les propriétés optiques⁸. Les paramètres influençant l'auto-assemblage des cristaux de cire (température d'évaporation, concentration, nature du solvant) ont été identifiés.

Les résultats montrent que la capacité de réflexion des UV dépend principalement de la structure tridimensionnelle du film, indépendamment de sa composition chimique. La réflectance est corrélée à la géométrie et à l'agencement spatial des micro et nanostructures, via des phénomènes de diffusion optique. Des tests sur des substrats mimant la peau humaine ont permis d'augmenter la réflectance des UV de 20 à 30 %.

Enseignements et perspectives

Ces travaux montrent qu'il est possible de concevoir des protections anti-UV fondées sur des mécanismes physiques plutôt que chimiques, ouvrant la voie à l'utilisation de matériaux potentiellement biosourcés en substitution de filtres minéraux tels que le dioxyde de titane (TiO₂) ou l'oxyde de zinc (ZnO).

Équipe projet

Bio-Inspired Materials Group: Functionalities & Self-Assembly,
Université de Pau & Pays Adour, CNRS, IPREM UMR 5254
L'Oréal Research & Innovation 2025

⁸ Das, A., Polacchi, L., Fouron, J. Y., Montaux-Lambert, A., Billon, L., & Luengo, G. S. (2025). Biomimetic UV protection of skin surface by structured epicuticular wax films. *Materials Today Bio*, 33, 101991.

Axe 2 : L'innovation bio-inspirée au service de la filière forêt-bois

Cet axe s'adresse plus spécifiquement aux acteurs de la filière économique forêt-bois. Il explore, pour chacun des grands enjeux auxquels elle est confrontée, des perspectives de résolutions nouvelles, à partir d'un panel de concepts innovants empruntés au monde biologique.

La filière forêt-bois en Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté

La filière forêt-bois est définie comme l'ensemble des activités liées à la production et à la transformation du matériau bois, "de la graine à la cendre". Elle couvre notamment les activités de sylviculture, de plantation et d'exploitation forestière ; la 1ère transformation (sciage, industries du panneau bois et de la pâte à papier) ; la 2ème transformation (ameublement, menuiserie, emballage, tonnellerie) ; ainsi que la construction bois, les activités liées au bois énergie et des marchés de niche comme celui des charbons actifs.

En Grand Est ainsi qu'en Bourgogne-Franche-Comté, ces filières sont particulièrement importantes tant en termes d'emplois non délocalisables (jusqu'à 2% des emplois régionaux), que de production de richesses⁹. Cette forte implantation sur ces deux territoires s'explique par la présence de massifs forestiers importants.

La Bourgogne-Franche-Comté compte à elle seule 11% de la forêt française alors qu'elle ne représente que 9% du territoire métropolitain. Soit 1,77 millions d'hectares de forêts. Cinquième région forestière par sa surface, la Bourgogne-Franche-Comté dispose du deuxième plus fort volume de bois sur pied à l'hectare (213 m³/ha) et d'un fort taux de prélèvement (5.3 m³/ha/an). La majorité des forêts de cette région (72,5%) est composée de feuillus, 12,3% sont uniquement composées de résineux et 15,2% sont donc mixtes. Cependant, malgré de forts taux de volume sur pied et de production biologique annuelle, cette région observe un appauvrissement relatif de ses forêts en essences nobles.

Les forêts de Bourgogne-Franche-Comté sont majoritairement privées (à hauteur de 60%) mais inégalement réparties sur le territoire : le Doubs, le Jura et la Haute-Saône sont, par exemple, des territoires composés majoritairement de forêts publiques.

En Grand Est, la forêt couvre 1/3 du territoire soit plus de 1,98 millions d'hectares. Ce qui représente presque 12% de la surface forestière française. Le volume de bois sur pied est de 210 m³/ha. Ces forêts sont au global composées à 79% par des feuillus et 21% de résineux.

La région Grand Est possède une configuration particulière : avec plus de 55% de forêt publique (19% de forêts domaniales et 36% de forêts communales détenues par pas moins de 3000 communes forestières) et un morcellement très prononcé des forêts privées (300 000 acteurs privés). L'Office national des forêts y est donc un acteur incontournable, 1 salarié sur 4 de l'ONF travaillant en Grand Est.

Chaque année, à elles deux, ces régions prélèvent l'équivalent de 18,6 millions de m³ de bois (9,1 millions de m³ en Bourgogne-Franche-Comté et 9,5 millions de m³ en Grand Est)¹⁰. L'action de cette filière s'appuie sur des stratégies régionales dédiées : le programme régional forêt-bois 2018-2027 en Grand Est¹¹ et le contrat forêt-bois 2018-2028 en Bourgogne-Franche-Comté¹². Ces documents permettent de décliner localement les orientations nationales en termes de politique forestière (Contrat stratégique de la filière bois et Programme national de la forêt et du bois), en les adaptant aux spécificités des massifs forestiers régionaux. Ils visent à définir les objectifs de mobilisation du bois par grands massifs et par usages, en prenant en compte les enjeux sociétaux et environnementaux (et en premier lieu les impératifs d'atténuation et d'adaptation des forêts au changement climatique).

⁹ Voir « Etude du potentiel d'impact du biomimétisme en Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est », Vertigolab, 2025

¹⁰ IGN, Inventaire forestier national, Mémento 2025

¹¹ https://draaf.grand-est.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/2019_10_30_PRFB_Grand_Est_vF1_cle8b9f81.pdf

¹² <https://www.grandest.fr/wp-content/uploads/2022/01/3221-plaquette-prfb-2020-vf-web.pdf>



L'utilisation du bois est donc la clé de voûte de cette filière. Cependant cette ressource, jusque-là abondante, est menacée à la fois par un appauvrissement des forêts en bois de qualité du fait des aléas climatiques de plus en plus marqués et fréquents, mais aussi par une demande qui explose dans un contexte de décarbonation de l'économie. Le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, tout comme des objectifs ciblés d'accroissement de l'utilisation du bois dans certaines filières nécessitent donc de prendre quelques précautions, pour limiter les concurrences d'usages. Des normes européennes instaurent par exemple le principe d'une utilisation des bioressources en cascade pour limiter au maximum les transferts d'impact. La filière cherche aussi à développer de nouveaux usages du bois ainsi qu'à optimiser les usages existants. Par exemple, pour soutenir l'ambition du BTP qui vise 30% d'incorporation de bois dans la construction d'ici 2030, les centres de recherches comme le FCBA (L'Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement) ou le CRITT (Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie) Bois, travaillent sur la modularité de l'habitat pour faciliter l'évolutivité et le réemploi. Des projets de recherche sont aussi menés pour accélérer l'intégration des bois de feuillus de qualité secondaire ou le bois scolyté déclassé dans la construction qui utilise à ce jour majoritairement du résineux de première qualité.

Cette dynamique d'innovation sectorielle pourrait être soutenue avantageusement par le biomimétisme, comme le souligne une étude du potentiel d'impact du bio-

mimétisme en Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est récemment réalisée par le bureau d'étude VertigoLab¹³. Cette étude souligne toutefois la nécessité d'enraciner profondément la culture de l'innovation dans la filière, pour favoriser l'émergence de solutions nouvelles et facilement appropriables par l'ensemble de ses acteurs.

La filière est consciente de la nécessité de se réinventer pour faire face à ces défis. Elle s'adosse à des structures comme les interprofessions régionales Fibois qui mènent des actions visant à fédérer les acteurs de la filière, promouvoir les différents usages du bois et enfin représenter localement et nationalement les acteurs de la filière notamment vis-à-vis des services de l'Etat et des chambres consulaires (agriculture, commerce, artisanat).

La filière s'appuie aussi sur des structures comme le collectif *Des Hommes et Des Arbres* qui a vu le jour en Lorraine, soutenu financièrement par les collectivités locales et le programme Territoire d'Innovation. Cette initiative qui s'est rapidement étendue à toute la région Grand Est, a été pensée comme un outil pour faciliter la mise en réseau bien au-delà de la filière forêt-bois et favoriser l'émergence de projets collectifs autour de l'arbre sous toutes ses formes, où qu'il soit implanté. Ce terrain d'expérimentation et d'apprentissage permet ainsi à la diversité d'acteurs gravitant autour de la forêt de confronter les points de vue, les expertises et ainsi de faire émerger des pratiques communes, pour construire les usages de la forêt de demain.

¹³ Voir « Etude du potentiel d'impact du biomimétisme en Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est », Vertigolab, 2025

Gérer durablement la forêt

Les forêts françaises sont gérées par l'homme depuis des siècles. Cependant, comme il a été rappelé précédemment, le XXI^{ème} siècle apporte un changement de paradigme qui vient remettre en cause profondément les pratiques de la filière forêt-bois. Le temps long de la forêt se heurte à un environnement qui devient imprévisible et très fluctuant (conditions climatiques, évolution du marché du bois, augmentation des populations d'ongulés...). Il devient difficile de planifier la gestion d'une parcelle forestière sur 20 ans. Mais le forestier n'est pas sans ressource face à ce défi. Car, dans sa pratique, il est habitué à ne pas transformer le milieu sur lequel il agit (pas d'arrosage, pas de fertilisation, pas ou très peu de travail du sol), mais à s'y adapter. C'est en exploitant cette posture qu'il pourra repenser la nécessaire adaptation des territoires forestiers.

Pour accompagner ces mutations, le monde forestier s'équipe d'observatoires qui lui permettent de documenter les dynamiques forestières sur tout le territoire, afin de pouvoir éclairer la prise de décision. A l'échelle du Parc national de forêts, le Centre d'Étude et de Ressources sur la Forêt (CERF) étudie trois thématiques prioritaires :

- La dynamique temporelle du territoire sur le temps long, par l'approche des changements d'occupation des sols et des pratiques ;
- Le suivi de l'impact des changements climatiques sur le territoire et l'identification de réponses adaptatives ;
- La dynamique et le fonctionnement des écosystèmes naturels, en particulier la forêt de plaine, en lien avec leur degré d'anthropisation.

Dans ce contexte de dégradation des conditions climatiques et de perte massive de biodiversité, les forêts ne sont maintenant plus uniquement perçues comme des gisements de matériaux bois, mais aussi comme d'importants puits de carbone planétaires et des réservoirs de biodiversité à protéger. Les différents documents stratégiques régionaux affichent clairement la préservation de la forêt dans le souci de la multifonctionnalité comme une priorité. Les nombreux services écosystémiques rendus par les forêts sont de plus en plus considérés avec intérêt. Des initiatives locales comme la *Bourse des arbres* ou nationale comme *Sylv'ACCTES* donnent la possibilité aux propriétaires forestiers de valoriser leur forêt autrement qu'en produisant du bois. Ces mécanismes permettent de financer différemment les travaux d'entretien et de gestion de la forêt, ouvrant ainsi la porte à de nouveaux compromis dans les choix de gestion.

La sylviculture mélangée à couvert continu (SMCC) semble être une méthode de gestion forestière intéressante dans ce contexte. En cherchant à maintenir un peuplement diversifié en essences et en tailles pour garantir un couvert continu, elle permet de préserver les sols forestiers, les ressources en eau et les habitats pour la faune et la flore. La récolte du bois est plus ponctuelle et diffuse que dans une gestion en futaie régulière, mais les interventions sont moins coûteuses et nombreuses, ce qui permet d'atteindre un autre équilibre financier que les mécanismes de paiement pour services environnementaux viennent renforcer. Cette pratique est cependant encore perçue comme trop compliquée à mettre en œuvre car les interventions sont plus diffuses et nécessitent plus d'observation et d'adaptation. Ce qui nécessite un changement en profondeur des habitudes et des perceptions du travail en forêt.

La Forêt Irrégulière Ecole regroupe un collectif de partenaires (Agro Paris Tech, ONF, CNPF, Syndicat intercommunal de gestion forestière de la région d'Auberive, Parc national de forêts, les Communes forestières, la ligue de l'enseignement de Haute-Marne) qui a pour objectifs de documenter dans le temps les bénéfices de cette méthode de gestion pour convaincre et former différents types de public (technique, grand public, élus), afin de favoriser l'adoption de cette méthode.

Cette pratique de gestion s'appuie sur l'observation des dynamiques de libre évolution d'une forêt dans les réserves intégrales. Elle est par essence bio-inspirée ce qui la rend doublement pertinente dans le contexte du biomimétisme forestier.

Dans le Parc national de forêts, le hêtre est une espèce très dynamique et en même temps reconnue pour sa sensibilité face aux conséquences du réchauffement climatique. Adapter la gestion forestière demande donc d'anticiper le possible dépérissement de cette espèce. Or, sans aller jusqu'à introduire de nouvelles essences plus méridionales, les forestiers constatent que des espèces moins sensibles à la sécheresse estivale sont naturellement présentes dans les massifs forestiers du Parc national. Cependant ces espèces subissent une double pression qui les empêche de se développer davantage : la présence du hêtre et la surpopulation d'ongulés. Si la SMCC permet de réduire la première en intervenant pour limiter le développement du hêtre au profit de ces essences locales plus adaptées au climat de demain, elle n'a pas, à ce jour, de réponses à apporter à la deuxième. La pression cynégétique est d'autant plus compliquée à gérer en SMCC que les jeunes plants à protéger sont plus éparpillés (caractère diffus de la régénération naturelle).

Quels que soient les modes de gestion de la forêt envisagés, 3 grands défis ont été identifiés. Le chapitre suivant essaye d'éclairer par le prisme de la bio-inspiration des pistes de solutions à co-construire pour y faire face.

Les grands défis à relever

Les propositions qui suivent ne sont pas exhaustives et ont vocation à être challengées par les acteurs de la filière. Certaines de ces propositions sont détaillées dans les focus en fin de chapitre.

Adaptation au changement climatique

Dans le quart nord-est de la France, les effets du changement climatique sont particulièrement exacerbés : températures excessives et réduction drastique de la pluviométrie en période estivale. La forêt est-elle capable de s'adapter d'elle-même à ces changements importants et soudains ? Le renouvellement du cortège botanique via des techniques de migrations assistées est-il efficace ? Suffisant ? Comment anticiper les impacts d'une possible généralisation de la migration assistée (que ce soit en variabilité génétique intraspécifique ou en diversité d'espèces) sur le cortège mycorhizien qui se développe en symbiose avec le sol et les arbres des forêts du nord-est de la France ?

Au-delà de la forêt elle-même, comment adapter efficacement toutes les pratiques et l'outil industriel au nouveau régime forestier à venir ? Comment faire face à la variabilité et l'imprévisibilité d'accès à la ressource bois ?

Comment anticiper et se préparer au risque de feux de forêts ? L'expérience des forestiers du sud de la France ne semble pas complètement transposable. En effet, les volumes de bois dans les forêts du Grand Est ou de la Bourgogne-Franche-Comté sont beaucoup plus importants que ceux de la garrigue méditerranéenne et il n'existe pas d'espèces adaptées à résister aux incendies. Le comportement d'un feu dans ces forêts denses est donc en partie inconnu.

• **TABLEAU 5 : Adaptation au changement climatique**

ENJEUX	POTENTIEL D'INSPIRATION BIOLOGIQUE	MECANISMES / PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT / SOLUTIONS	APPROCHES FONCTIONNELLES
Prolifération des parasites et insectes ravageurs	La complexité des interactions intra et inter espèces au sein des systèmes naturels de même que l'organisation spatiale et la temporalité de ces milieux sont des mécanismes fondamentaux de robustesse et de résilience à ne pas négliger dans la recherche de stratégies d'adaptation au changement climatique.	Lutte biologique utilisant des phéromones. Sylviculture mélangée à couvert continu. Forêt Irrégulière Ecole dans le Parc national de forêts	
Sécheresses récurrentes			
Extension des feux de forêt	Systèmes olfactifs des mammifères et du bombyx du mûrier (<i>Bombyx mori</i>) pour détecter la signature chimique volatile d'un départ de feu.	Technologie de nez artificiels e-nose ou néose. https://aryballe.com/ https://www.smart-nanotubes.com/ Voir focus	 
	Rôle des tanins dans le blocage de la propagation du feu chez certains résineux (<i>Sequoiadendron giganteum</i> , <i>Pinus canariensis</i>)	Pour développer des matériaux ignifugés permettant de protéger les installations humaines à proximité des forêts à risque ?	
	Rôle du liège du chêne (<i>Quercus suber</i>) dans la protection contre le feu : tissu spécialisé poreux, formé de cellules mortes remplies d'air et entourées de subérine.		

Equilibre agro-sylvo-cynégétique

La régulation de la chasse au grand gibier et l'absence significative des grands prédateurs ont permis aux populations d'ongulés sauvages de prospérer (expansion numérique et géographique) depuis les années 1970. Aujourd'hui, ces populations ont dépassé la capacité

« d'accueil » de la plupart des grands massifs forestiers entraînant une sur-prédation des jeunes plants (issus de la régénération naturelle ou de plantations), ce qui menace à terme le renouvellement des forêts.

• **TABLEAU 6 : Equilibre agro-sylvo-cynégétique**

ENJEUX	POTENTIEL D'INSPIRATION BIOLOGIQUE	MECANISMES / PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT / SOLUTIONS	APPROCHES FONCTIONNELLES
Préserver les plantations et la régénération naturelle de l'abrou-tissement et de l'écorçage.	Les cris de détresse des mammifères sont composés de caractéristiques acoustiques universelles, qui font émerger chez les grands ongulés de la peur et des comportements de fuite.	Projet de recherche SNCF, ENES et MNHN Voir focus	

Valorisation de la ressource bois

Jusque dans les années 2020 en Grand Est, l'accroissement naturel des forêts était supérieur aux prélèvements. Mais depuis, le monde de la forêt fait face à une bascule. Les impacts du réchauffement climatique et la prolifération de parasites réduisent fortement, année après année, la quantité de bois disponible alors que la demande, elle, explose. L'essor de la bioéconomie et plus particulièrement la nécessité de démocratiser des sources d'énergies renouvelables pour le chauffage domestique et collectif viennent ajouter un degré de complexité dans la gestion de la ressource bois. Comment valoriser au mieux cette ressource pour qu'elle reste renouvelable ?

Comment transformer un produit entrant inhomogène en un produit de sortie le plus homogène possible et standardisé pour faciliter son intégration dans les processus industriels de transformation ?

La compétitivité de l'industrie de transformation du bois s'est principalement construite sur la spécialisation. La digitalisation des scieries permet, via des moyens d'imagerie scanner et des technologies de traitement numérique fondées sur l'intelligence artificielle, de gagner quelques pourcentages d'optimisation sur les déchets produits lors du sciage d'une grume.

La chimie du bois se développe pour répondre à de multiples enjeux ; parmi lesquels, celui de la recherche des colles et des finitions plus respectueuses de l'environnement. Des travaux sont menés pour mettre au point des solutions adhésives biosourcées pour le collage de matériaux à base de bois (panneaux de particules...). Trois grandes familles de composants sont étudiées : la lignine, les protéines, les tanins. Mais la première présente encore des limites en termes de résistance mécanique, la seconde vis-à-vis de la sensibilité à l'eau et la dernière est limitée d'un point de vue du sourcing. Des exemples commencent pourtant à être commercialisés comme Evertree, Resicare développé par Michelin, Purebond chez Columbia forest product.

Un autre champ de recherche en forte progression porte sur les débouchés des molécules du bois : produits phytosanitaires, pharmacologie et santé, constituants pour béton à base de lignine.

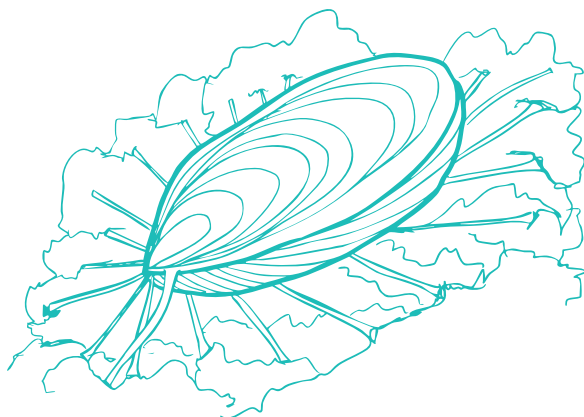
Ces acteurs s'organisent autour de la plateforme collaborative <https://woodinchem.com/> pour consolider cette filière naissante.

• **TABLEAU 7 : Valorisation des ressources en bois**

ENJEUX	POTENTIEL D'INSPIRATION BIOLOGIQUE	MECANISMES / PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT / SOLUTIONS	APPROCHES FONCTIONNELLES
Réduire les émissions de COV des matériaux dérivés du bois	Le byssus de la moule (<i>Mytilus edulis</i>) contient une colle particulièrement résistante à l'environnement marin. Elle pourrait inspirer des alternatives crédibles aux colles à base de formaldéhyde.	Panneau contreplaqué PureBond Voir focus	
	La croissance du mycélium de champignon est maintenant utilisée pour agréger des particules de matières organiques (y compris le bois) pour créer des matériaux légers et facilement dégradables en fin de vie.	BioFabrics, Ecovative, Kering, Bolt Threads, Mogu, Muskin, Grado Zero Espace, MycoTech, MycoWorks	
Promouvoir la construction bois	Le cône femelle des pins maritimes (<i>Pinus pinaster</i>) possède la capacité de s'ouvrir et se fermer passivement en fonction des conditions météorologiques. Le matériau qui compose ces écailles peut inspirer des solutions de thermorégulation passive dans les nouvelles constructions.	Projet HygroSkin d'ICD/ITKE 2012, Solution Pho'liage de l'agence Art Build	
	Algorithme inspiré de la phyllotaxie, (arrangement des feuilles sur une plante) pour optimiser l'apport solaire direct dans un bâtiment.	Résidence solaire d'Ordener par In situ et Nobateck, conçue pour une meilleure valorisation de l'ensoleillement	

Une approche bio-inspirée pour des colles saines et performantes ?

Dans l'industrie du panneaux bois, le remplacement des colles à base de formaldéhyde par des alternatives moins polluantes, sans compromettre les performances mécaniques attendues, est un enjeu industriel fort.



PROBLÈME

Remplacer des colles émettrices de COV (Composés Organiques Volatiles), par des alternatives bio-sourcées performantes et rentables.

STRATÉGIE DU VIVANT

Fixation à différents supports par sécrétion d'une colle capable de résister durablement à un environnement marin.

PRINCIPE BIO-INSPIRÉ

Modifier la structure chimique d'une bio-ressource pour imiter la structure des colles sécrétées par les organismes marins.

APPLICATIONS POTENTIELLES

Produits dérivés du bois, obtenus par pressage et collage.

Le défi

Les procédés industriels de production de panneaux bois sont matures et permettent de valoriser des bois de seconde qualité et des connexes de scieries, en les transformant en matériaux aux dimensions géométriques et propriétés mécaniques standardisées. Cependant, la fabrication de ces produits nécessite l'utilisation de colles généralement à base de formaldéhyde, sources d'émissions importantes de COV (Composés Organiques Volatiles). Des alternatives existent, notamment à partir de produits biosourcés¹⁴ mais ces solutions n'atteignent pas encore les performances requises notamment en termes de tenue à l'humidité et de rentabilité économique.

Ce que fait le vivant

La moule est un organisme marin capable de se fixer durablement à une large gamme de supports partiellement ou totalement immergés. Pour cela, elle sécrète via une glande à la base de son pied des filaments de collagène (byssus) qui se fixent sur le support et lui permettent de résister à des efforts hydrodynamiques extrêmes. Une protéine spécifique est responsable du pouvoir adhésif de ces filaments.

Approche scientifique et biomimétique

La synthèse des adhésifs de moule étant complexe et coûteuse, sa production en vue d'une utilisation industrielle (biosourcing) n'est pas réaliste. Il est cependant possible de s'inspirer du mode de fonctionnement de cet adhésif pour tenter de le mimer. Des chercheurs ont pu mettre en évidence la présence d'acides aminés particuliers (DOPA) qui jouent un rôle essentiel dans les propriétés d'adhésion observées, via la formation de liaisons hydrogènes avec des éléments du substrat sur lequel la moule se fixe. De plus, en présence d'oxygène et lorsque la température augmente, les DOPA peuvent s'oxyder, ce qui facilite la formation de liaisons entre plusieurs DOPA et donc la solidification de la colle.

Enseignements et perspectives

Ces chercheurs ont ainsi réussi à greffer des DOPA sur des protéines de soja historiquement utilisées comme colle à bois permettant ainsi d'augmenter les propriétés d'adhésion de ces dernières¹⁵. Cette approche bio-inspirée est à l'origine de nouveaux produits panneaux bois comme le Purebond©¹⁶.

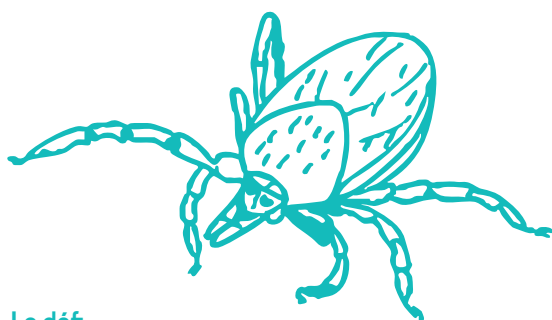
¹⁴ Siahkamari, M., Emmanuel, S., Hodge, D. B., & Nejad, M. (2022). Lignin-glyoxal: a fully biobased formaldehyde-free wood adhesive for interior engineered wood products. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 10(11), 3430-3441

¹⁵ Liu, Y., & Li, K. (2002). Chemical modification of soy protein for wood adhesives. Macromolecular Rapid Communications, 23(13), 739-742.

¹⁶ <https://www.columbiaforestproducts.com/plywood/purebond>

Une approche bio-inspirée pour se protéger des tiques

Face à la prolifération des tiques et aux risques sanitaires associés, le biomimétisme ouvre des pistes inédites pour concevoir des stratégies de protection non chimiques, inspirées des mécanismes développés par le vivant.



Le défi

La prolifération des tiques, vectrices de maladies graves, est devenue un enjeu majeur de santé publique. Selon une enquête Baromètre Santé Publique France publiée en 2016, 25% de la population française a déjà été piquée par une tique au cours de sa vie. Pour les professionnels de terrain, notamment les forestiers, le risque d'exposition est omniprésent. Les solutions actuellement disponibles reposent principalement sur l'usage de produits chimiques appliqués sur la peau ou les vêtements, dont la non-toxicité est aujourd'hui remise en question, ou sur des inspections régulières, souvent insuffisantes en cas d'exposition prolongée.

Ce que fait le vivant

Les tiques sont présentes sur l'ensemble du territoire français et actives principalement de mars à octobre. Peu mobiles, elles se fixent temporairement sur leurs hôtes (mammifères, oiseaux, reptiles) afin de se nourrir. Leur petite taille et leur comportement discret rendent leur détection difficile, en particulier en milieu forestier.

Pourtant, de nombreux organismes vivants interagissent avec leur environnement à travers des mécanismes fins d'adhésion, de collecte ou au contraire de limitation de l'accrochage de particules, d'organismes ou de substances indésirables.

PROBLÈME

Prolifération des tiques, notamment en forêt, et limites des solutions chimiques existantes.

STRATÉGIE DU VIVANT

Mécanismes naturels de collecte, d'adhésion ou de répulsion de particules observés chez certains organismes.

PRINCIPE BIO-INSPIRÉ

S'appuyer sur des propriétés physiques (formes, textures, charges) plutôt que sur des substances actives.

APPLICATIONS POTENTIELLES

Vêtements, équipements ou dispositifs limitant l'accrochage des tiques ou facilitant leur détection.

Approche scientifique et biomimétique

Dans le cadre de ce projet, une équipe de l'ONF Grand Est, en collaboration avec l'INRAE, des designers et Ceebios s'est intéressée à la gestion du pollen chez l'abeille domestique. Lors de la collecte du pollen, l'abeille mobilise deux modes opératoires complémentaires : un mode actif, par contact direct avec les anthères, et un mode passif, fondé sur des phénomènes d'adhésion électrostatique.

Les structures morphologiques impliquées – pattes, crochets, poils – permettent non seulement la collecte efficace du pollen, mais aussi son conditionnement et son transport sécurisé jusqu'à la ruche. Ces mécanismes offrent des pistes d'inspiration pour concevoir des dispositifs capables d'interagir finement avec de très petits organismes présents à la surface des vêtements.

Enseignements et perspectives

Les formes, textures et organisations observées chez l'abeille constituent des sources d'inspiration prometteuses pour imaginer des gants, manches ou équipements limitant l'accrochage des tiques ou facilitant leur détection et leur retrait.

Ces premières explorations ouvrent la voie à des stratégies de protection fondées sur des principes physiques et morphologiques plutôt que chimiques, mieux adaptées aux usages professionnels en milieu forestier. Elles font l'objet de projets de recherche et de développement dédiés afin d'évaluer leur efficacité, leur ergonomie et leur acceptabilité sur le terrain.

Équipe projet

Office national des forêts (ONF), INRAE (réseau CiTIQUE)

École Nationale Supérieure de Création Industrielle, Ceebios, Big Bang Project 2024

Une approche bio-inspirée pour détecter les départs de feux en forêt ?

La détection précoce des départs de feux en forêt est un enjeu majeur pour permettre une lutte efficace contre ces phénomènes dévastateurs dont la fréquence et l'ampleur vont s'accroître dans les décennies à venir, du fait du réchauffement climatique.



Le défi

A ce jour, la détection des feux de forêts repose principalement sur de la surveillance humaine terrestre et aérienne, des technologies d'imagerie satellitaires, des capteurs optiques couplés à du traitement d'image numérique ou enfin des capteurs miniaturisés complexes disposés en réseau dans les massifs forestiers¹⁷. Si l'observation humaine « in situ » nécessite peu d'infrastructures, elle présente cependant un délai de réponse assez long et est complexe à déployer. Les moyens de détection optiques (imagerie satellitaire, caméra optique/IR...) sont plus réactifs car automatisables¹⁸. Leur déploiement est somme tout limité compte tenu des coûts élevés de ces approches. Enfin, les technologies de type « réseau de capteurs sans fil » (WSN) présentent l'avantage de fournir une donnée combinée (le taux d'humidité de l'air, la présence de CO et de CO₂) en temps réel et localisée (la distance moyenne entre capteurs étant de quelques centaines de mètres). Mais la démultiplication des capteurs implique un coût d'installation et d'entretien non négligeable et soulève des enjeux d'autonomie énergétique.

Ce que fait le vivant

Le bombyx du murier (*Bombyx mori*) est un papillon nocturne capable de capter des molécules de phéromones à de très faibles concentrations dans l'air via ses antennes. Un mâle pourrait ainsi détecter une femelle dans un rayon de 11km ! Grâce à un battement d'aile spécifique, le papillon oriente un flux d'air d'une manière précise vers ses antennes dont l'architecture en réseau permet de concentrer dans un volume réduit une très grande surface de détection. Cette stratégie confère au système olfactif du papillon une forte sensibilité et surtout une capacité à évaluer la direction depuis laquelle le signal chimique se propage dans l'air ambiant.

PROBLÈME

Détecter un départ de feu reste un défi. Des dispositifs existent mais sont souvent complexes à mettre en œuvre et peu adaptés à la surveillance continue sur de grands territoires.

STRATÉGIE DU VIVANT

Système de détection de phéromones émises à plusieurs kilomètres de distance, pouvant estimer la localisation de la source.

PRINCIPE BIO-INSPIRÉ

Détecter à distance la signature chimique d'une combustion et estimer sa localisation dans l'espace.

APPLICATIONS POTENTIELLES

Réseaux de capteurs bio-inspirés pour la détection de signaux chimiques rapide et située liés aux départs de feu.

Approche scientifique et biomimétique

De plus en plus robustes et miniaturisées, de nouvelles technologies de nez artificiel¹⁹ s'inspirent du fonctionnement du sens olfactif des mammifères terrestres. Les molécules volatiles réagissent avec un nombre limité de récepteurs différents, générant ainsi une réponse « combinatoire » unique : la signature olfactive d'une espèce chimique volatile donnée. Ces technologies émergentes ne peuvent toutefois pas déduire de ce signal la distance et la direction de la source émettrice comme le fait le bombyx. De telles solutions bio-inspirées ne semblent pas encore avoir été combinées et testées.

Enseignements et perspectives

Cette approche semble pourtant être une piste prometteuse pour développer des technologies peu énergivores, sensibles et directionnelles capables de détecter des départs de feu en forêt.

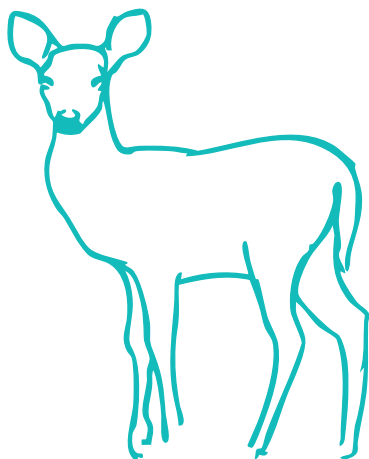
¹⁷ Alkhatib, A. A. (2014). A review on forest fire detection techniques. International Journal of Distributed Sensor Networks, 10(3), 597368.

¹⁸ Özel, B., Alam, M. S., & Khan, M. U. (2024). Review of modern forest fire detection techniques: Innovations in image processing and deep learning. Information, 15(9), 538.

¹⁹ <https://aryballe.com/> ou encore <https://www.smart-nanotubes.com/>

Une approche bio-inspirée pour détourner les ongulés des plantations ?

L'expansion des populations d'ongulés sauvages induit un déséquilibre agro-sylvo-cynégétique particulièrement marqué dans le quart nord-est de la France. Cette pression réduit le potentiel de renouvellement des peuplements et nécessite des investissements supplémentaires pour protéger les plantations.



PROBLÈME

Renouvellement des peuplements forestiers compromis du fait du broutage intensif des jeunes plants.

STRATÉGIE DU VIVANT

Le caractère aversif des cris de détresse et d'alarme chez les mammifères.

PRINCIPE BIO-INSPIRÉ

Produire des sons artificiels basés sur des caractéristiques sonores associées au danger.

APPLICATIONS POTENTIELLES

Effaroucheurs pour ongulés avec des sons aversifs artificiels pour limiter le phénomène d'habituation.

Le défi

Depuis les années 1970, les populations de cerfs, de chevreuils et de sangliers n'ont cessé d'augmenter dans les forêts françaises. Par exemple, le nombre de chevreuils prélevés par an au niveau national a été multiplié par 10 en l'espace de 40 ans²⁰. Désormais trop nombreux, ils limitent le renouvellement de certains massifs forestiers en broutant les jeunes pousses, en écorçant les tiges (frottis) et en se nourrissant de glands et de châtaignes en trop grande quantité. Le rétablissement d'un meilleur équilibre gibier – forêt est devenu une priorité inscrite dans les feuilles de routes forestières en Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté²¹. En attendant que ces démarches territoriales donnent des résultats, les forestiers sont contraints d'utiliser des dispositifs de protection individuels coûteux. Des travaux de recherche sont menés pour caractériser et comparer l'efficacité de ces méthodes²².

Approche scientifique et biomimétique

Une collaboration entre la SNCF, le laboratoire de bio-acoustique ENES et le Muséum national d'Histoire Naturelle a permis de développer des signaux sonores d'effarouchement bio-inspirés pour éviter les collisions entre la faune sauvage et les trains. Les solutions d'effarouchement à base d'ultrasons étant inefficaces sur les ongulés²³, les scientifiques ont analysés le répertoire vocal des mammifères et ont ainsi pu mettre en évidence des phénomènes acoustiques non linéaires universels associés au danger et à l'urgence, qui réduisent le risque d'habituation. En combinant ces caractéristiques sonores, ils ont pu créer des sons artificiels dont le caractère aversif a ensuite été testé sur des populations de cerfs²⁴.

Enseignements et perspectives

Une telle approche biomimétique pourrait-elle être transposée en forêt ou dans des parcelles agroforestières pour réduire la pression du gibier sur les plantations localement et à des périodes précises de l'année ? Est-ce que l'absence de danger réel (comme le passage d'un train) associé au fonctionnement de ces effaroucheurs est une limite à son utilisation en forêt ? Quels seraient les impacts d'une telle approche sur le reste de la faune ? Les activités sportives et touristiques ? Autant de questions qui pourraient faire l'objet d'un projet de recherche dédié en milieu forestier.

²⁰ <https://foret.ign.fr/IGD/fr/indicateurs/2.4.2>

²¹ <https://www.grandest.fr/grands-projets/agriculture-viticulture-foret-bois/les-contrats-de-filieres-agricoles-agroalimentaires-et-forestieres/> & <https://draaf.bourgogne-franche-comte.agriculture.gouv.fr/contrat-region-al-foret-bois-de-bourgogne-franche-comte-a1627.html>

²² <https://renfor.hub.inrae.fr/projets/pico>

²³ Terrade, A., Prosnier, L., Vion, C., Locatelli, Y., Mathevon, N., & Reby, D. (2024). High-frequency hearing sensitivity does not systematically imply aversion to ultra-sounds in large terrestrial mammals. *Bioacoustics*, 33(5), 448-459.

²⁴ Terrade, A., Massenet, M., Pernel, L., Mathevon, N., Anikin, A., & Reby, D. (2025). Nonlinear phenomena make animal calls alarming for human listeners. *iScience*, 28(6).

Axe 3 : S'inspirer des forêts pour transformer nos manières d'habiter et d'aménager

Les chapitres précédents ont permis d'entrer dans la complexité des forêts, d'en comprendre les dynamiques écologiques et d'explorer les principes du biomimétisme forestier. À partir de ce socle partagé, le regard s'élargit ici à l'échelle urbaine et territoriale, là où ces connaissances viennent interroger concrètement nos manières de faire, de décider et de cohabiter avec le vivant.

**A
X
E
1** L'écosystème forestier inspire le biomimétisme

**A
X
E
2** L'innovation bio-inspirée au service de la filière forêt-bois

**A
X
E
3** S'inspirer des forêts pour transformer nos manières d'habiter et d'aménager

Ce troisième axe prolonge les enseignements issus de l'observation des écosystèmes forestiers (axe 1) et des démarches d'innovation bio-inspirées (axe 2), en les replaçant à l'échelle du territoire. Il ne s'agit pas d'en proposer une application directe, mais d'explorer comment ces principes peuvent transformer les manières de penser, de gouverner et de concevoir l'aménagement comme un processus relationnel, évolutif et situé.

À travers cette approche, le territoire est envisagé comme un système vivant, traversé par des interdépendances écologiques, sociales et économiques. Il invite ainsi à interroger les cadres de l'action publique, les modes de coopération entre acteurs et les trajectoires de transformation territoriale, plutôt que la production de modèles stabilisés.

Cet axe propose une ouverture exploratoire qui s'inscrit plus largement dans le cadre d'une démarche de recherche-action-transmission, intitulée Territory Lab co-pilotée par Ceebios²⁵. Nourrie par des allers-retours entre observation du vivant, pratiques professionnelles et expérimentations de terrain, cette approche ne vise ni la formalisation d'un modèle figé ni la production d'un cadre prescriptif. Elle cherche au contraire à outiller les acteurs de l'aménagement et des territoires pour agir dans des contextes complexes, incertains et évolutifs, et ouvre un champ de réflexion et d'apprentissage collectif au service de la régénération des milieux de vie, dans un contexte marqué par l'incertitude climatique, la raréfaction des ressources et la complexité croissante des systèmes territoriaux.

Aborder l'aménagement à partir de l'inspiration des forêts conduit ainsi à un changement de regard. Les forêts ne sont plus seulement observées comme des ensembles biologiques, mais comme des systèmes vivants ancrés dans des milieux singuliers, façonnés par des interactions multiples, des régulations fines et des trajectoires évolutives. Elles offrent des clés de compréhension pour penser les territoires comme des ensembles relationnels, où humains, autres espèces, sols, eau, climat et usages sont étroitement interdépendants.

• **TABLEAU 8 : APPROCHE COMPARATIVE DES PRINCIPES ORGANISATIONNELS @CEEBIOS**

TERRITOIRE VU COMME UN SUPPORT À AMÉNAGER	TERRITOIRE VU COMME UN SYSTÈME VIVANT À MÉNAGER
Vision linéaire, techniciste et sectorisée	Approche systémique, adaptative et holistique
Centralisation et contrôle vertical	Organisation distribuée, polycentrique et coopérative
Spécialisation des fonctions	Diversité fonctionnelle et redondance
Optimisation maximale	Robustesse par sous-optimisation et souplesse
Pilotage normatif et descendant	Pilotage dynamique, apprentissage en marchant, co-évolution
Temporalité courte, temps zéro	Temporalités longues, cycles lents et régénération. Intègre aussi des réactions rapides face aux perturbations (canicule, sécheresse, chablis), montrant la coexistence de temps courts et longs.
Clôture et exclusion du non-humain	Porosité, coexistence multi-espèces, accueil
Modèle extractif et productiviste	Permaéconomie, sobriété, redevabilité
Infrastructures inertes	Matrices vivantes (sols, eau, biomasse)
Fragmentation des milieux	Connexions écologiques et continuités sensibles
Récit technique ou marketing	Récits de soin, d'ancrage et de transformation

²⁵Annexe : Territory Lab

Structuration de cette recherche

Le premier niveau relève d'une inspiration d'ordre organisationnel, centrée sur les principes d'organisation du vivant. Les forêts se développent sans pilotage centralisé, par ajustements permanents entre espèces, par des relations de coopération, de compétition et de régulation. Observer ces dynamiques permet d'interroger nos propres façons de nous organiser collectivement : planification, gouvernance, coopération entre acteurs, design de l'information, articulation des échelles, prise de décision dans le temps long.

Cette lecture agit principalement sur les postures. Elle invite à considérer l'aménagement non comme une succession d'actes techniques isolés, mais comme un processus évolutif, fondé sur l'apprentissage, la relation au milieu et la capacité à composer avec des systèmes ouverts et vivants.

Les principes organisationnels observés dans les écosystèmes forestiers peuvent être mis en regard de logiques d'actions territoriales, comme le propose le tableau suivant :

• **TABLEAU 9 : LES PRINCIPES ORGANISATIONNELS INSPIRÉS DE LA FORÊT**

PRINCIPE ORGANISATIONNEL INSPIRÉ DE LA FORÊT	FONCTION ÉCOSYSTÉMIQUE ET SOCIALE	TRANSPOSITION À LA GOUVERNANCE, À L'URBANISME ET AU MÉNAGEMENT
Auto-organisation distribuée	Résilience par interdépendance	Gouvernance polycentrique – Subsidiarité active – Espaces d'autonomie – Ménagement coopératif
Stigmergie (traces, signaux, coopération indirecte)	Coordination par signaux dans l'environnement	Signalétique d'usage, pilotage par l'usage, urbanisme des interactions Apprentissage en marchant
Diversité fonctionnelle	Complémentarité et redondance	Urbanisme des complémentarités, écosystèmes d'activités, programmations mixtes – Hybridation des usages – Polyvalence – Singularité des lieux – Plasticité urbaine
Redondance / Résilience	Maintien des fonctions – Stabilité – Capacité de rebond – Résilience systémique	Diversification des solutions – Multiplicité des formes urbaines et des modes d'habiter – Capacité d'accueil face aux aléas
Synchronisation	Rythmes partagés, cycles adaptatifs	Cycles du vivant – Réversibilité – Itérations évolutives, temporalités longues, scénarii ouverts et évolutifs
Mutualisation des ressources	Sobriété et optimisation collective	Infrastructures partagées, mutualisation foncière – Communs territoriaux – Coopération
Coexistence et interdépendance	Cohabitation multi-espèces – Non-nuisance – Régénération mutuelle – Entrelacement des fonctions écologiques et sociales	Prise en compte des autres qu'humains - Régulation non conflictuelle - Urbanisme multi-espèces - Planification régénérative, seuils de compatibilité écologique
Relations co-évolutives	Adaptabilité dynamique – Réajustement par interactions – Apprentissage mutuel – Transformation réciproque	Projets-processus – Dialogue inter-acteurs – Adaptation continue – Gouvernance

Le second niveau relève d'une approche écosystémique, directement liés aux formes d'habitat et aux choix de conception. Les écosystèmes forestiers montrent comment sols, végétation, eau et climat interagissent pour créer des conditions favorables à la vie. À cette échelle, l'inspiration forestière éclaire la manière de concevoir nos habitats en interaction avec leur environnement : gestion du cycle de l'eau, régulation thermique, continuités écologiques, vitalité des sols, multifonctionnalité des espaces.

Cette approche ouvre des pistes pour imaginer des quartiers capables de mieux faire face aux aléas climatiques – inondations, sécheresses, canicules – en s'appuyant sur les services écosystémiques, et non uniquement sur des dispositifs techniques.

L'approche écosystémique est mise en perspective à travers le tableau suivant, qui croise les fonctions structurantes des écosystèmes forestiers avec des stratégies opérationnelles issues d'approches bioinspirées et régénératives de la conception urbaine et territoriale :

• **TABLEAU 10 : FONCTIONS STRUCTURANTES DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS ET INSPIRATION À L'ÉCHELLE URBAINE ET TERRITORIALE @CEEBIOS**

FONCTION ÉCOSYSTÉMIQUE DE LA FORÊT	RÔLE ÉCOLOGIQUE STRUCTURANT	TRADUCTION TERRITORIALE ET URBAINE BIO-INSPIRÉE
Régulation du cycle de l'eau	Réduction du ruissellement, recharge des nappes	Quartiers-bassins versants, infiltration douce, Keyline Design ²⁷ , sols urbains poreux
Production et régénération des sols	Création d'humus, recyclage de matière organique	Boucles locales matière-déchets, chantiers régénératifs, mycorémédiation
Régulation microclimatique	Ombre, humidité, inertie thermique naturelle	Îlots de fraîcheur, canopées urbaines, design climatique des espaces publics
Trame de biodiversité	Connexions biologiques, niches multiples	Trames fines, corridors écologiques habités, écopaysages dans les lisières
Résilience aux perturbations	Capacité d'adaptation face aux chocs	Urbanisme processuel, réversibilité, gestion dynamique du foncier
Boucles de recyclage et transformation	Transformation continue de la matière, circularité énergétique	Métabolisme urbain vivant, économie circulaire territoriale, filières organiques locales
Fonction culturelle et symbolique	Rôle écologique : ancrage culturel, lien affectif, régulation sociale	Récits territoriaux, lisières symboliques, festivals nature, forêts-réservoirs de sens.

Ces deux niveaux d'inspiration se nourrissent mutuellement. La transformation des formes urbaines et des infrastructures est indissociable de l'évolution des cadres organisationnels et culturels qui les structurent.

Ensemble, ces deux niveaux d'inspiration engagent à la fois des transformations physiques (formes architecturales, urbaines, paysagères, ingénierie écologique, planification...) et des transformations culturelles et organisationnelles, qui touchent à notre rapport au territoire, à notre relation au vivant, au temps long et à l'incertitude.

Cette exploration s'inscrit dans une posture d'analyse attentive aux dynamiques relationnelles à l'œuvre dans les systèmes vivants. Dans des sociétés humaines largement structurées par la performance, la spécialisation et

la mise en concurrence, l'attention se porte plus particulièrement sur ce que les dynamiques coopératives du vivant peuvent apporter à la transformation des territoires.

Il ne s'agit ni d'idéaliser le fonctionnement des écosystèmes forestiers, ni de nier les rapports de force à l'œuvre dans les systèmes humains, mais de considérer la coopération comme une ressource structurante, souvent sous-exploitée, pour faire face à la complexité. En ce sens, l'inspiration forestière invite à identifier des leviers capables de renforcer la résilience des milieux de vie, leur capacité d'adaptation et la qualité de l'habiter, en travaillant les relations autant que les formes et les dispositifs.

²⁶ Le Keyline design est une technique d'aménagement paysager qui consiste à maximiser l'utilisation des ressources en eau d'un terrain à partir d'une étude topographique de la parcelle.

Lisières et interfaces : les marges comme zones d'innovation territoriale

Les lisières forestières – interfaces entre milieux ouverts et milieux denses – concentrent des dynamiques écologiques majeures : diversité biologique élevée, échanges de flux, régulations progressives entre lumière et ombre, humidité et sécheresse.

Ces zones de transition peuvent être comprises comme des écotones, au sens écologique du terme : des espaces où s'intensifient les interactions entre milieux adjacents et où émergent des dynamiques spécifiques.

Ces zones de bordure jouent donc un rôle structurant dans le fonctionnement des écosystèmes. Elles accompagnent les évolutions du milieu en limitant les discontinuités.

À l'échelle des territoires, cette lecture conduit à porter une attention particulière aux marges : franges urbaines, interfaces agriurbaines, bords de cours d'eau, interstices, zones de contact entre fonctions et usages. Longtemps perçus comme secondaires, ces espaces apparaissent comme des zones stratégiques, capables d'accueillir des formes d'innovation territoriale à la fois écologiques, sociales et organisationnelles.

En tant qu'écotones territoriaux, ces marges révèlent souvent les limites des découpages fonctionnels et administratifs classiques, et invitent à repenser les modes de conception et de gouvernance.

Transposé à l'aménagement, le fonctionnement d'une lisière invite à concevoir des zones de transition épaisses, capables d'absorber les tensions entre usages, fonctions et milieux.

Interfaces productives et régulation écosystémique

Dans les écosystèmes forestiers, les lisières sont souvent des zones de forte fertilité. Elles combinent l'apport de ressources issues des milieux ouverts avec la protection du couvert forestier, favorisant des systèmes multifonctionnels et résilients.

À l'échelle territoriale, cette inspiration éclaire le développement de dispositifs hybrides intégrés aux projets d'aménagement : lisières nourricières, jardins-forêts, haies multifonctionnelles, micro-bocages. Ces interfaces assurent simultanément plusieurs fonctions – production, régulation climatique, filtration de l'eau, restauration des sols, accueil de biodiversité, aménité paysagère – et participent à une logique de services écosystémiques imbriqués.

Zones de cohabitation et régulation des usages

Dans les écosystèmes forestiers, la lisière est une zone de transition où coexistent des espèces aux exigences écologiques différentes. La diversité des micro-habitats et les ajustements permanents entre espèces permettent une répartition fine de l'espace et des ressources. La lisière fonctionne ainsi comme un espace de régulation, capable d'absorber les tensions entre milieux adjacents et de maintenir une stabilité dynamique face aux perturbations.

À l'échelle des territoires, ces propriétés éclairent la manière dont certains espaces intermédiaires peuvent accueillir des usages multiples et évoluer par ajustements progressifs. Les franges urbaines, interfaces agriurbaines ou bords de parcelles deviennent alors des lieux propices à la cohabitation des fonctions et à la négociation des usages, plutôt qu'à leur séparation stricte.

Ces espaces peuvent ainsi soutenir des formes de gestion partagée et d'expérimentation collective : vergers partagés, sentiers de biodiversité, espaces hybrides entre espace public, productif et naturel. En s'inspirant du fonctionnement des lisières forestières, ils offrent des cadres favorables à une régulation collective des usages, fondée sur l'adaptation, la coordination et la gestion évolutive des territoires.

• **TABLEAU 11 : FONCTIONS DE LA LISIÈRE ET TRADUCTIONS TERRITORIALES**

Les dynamiques observées dans les lisières forestières peuvent être synthétisées à travers le tableau suivant, qui met en regard leurs fonctions écologiques et sociales et leurs traductions possibles dans la fabrique territoriale :

FONCTION DE LA LISIÈRE FORESTIÈRE	PROPRIÉTÉS ÉCOLOGIQUES, SOCIALES	TRADUCTION TERRITORIALE ET APPLICATIONS DANS LA FABRIQUE URBAINE
Zone de transition et d'échange	Écotone, gradients, biodiversité de bordure	Interfaces agriurbaines, zones tampons, interstices, agriculture agroforestière, lieu hybride urbain-rural
Dynamique régulatrice	Régulation thermique, tampon écologique	Lisières climatiques, franges de résilience, transitions paysagères
Réservoir de biodiversité	Multitude de niches, espèce pionnières	Corridors vivants, biodiversité utile, écosystèmes d'accueil
Porosité et perméabilité	Flux croisés d'espèces, humains et non humains	Passages, chemins doux, continuités sensibles et sociales
Lieu d'observation et d'interprétation	Espace pédagogique et sensoriel	Parcours narratifs, mobilier écologique, signalétiques, flux d'information
Co-habitation inter-espèces	Partage de l'espace, équilibre d'usages	Espaces des communs (vergers, composts, prairies partagées), tiers-lieux régénératifs
Matrice de transition	Mutation lente, plasticité territoriale	Zones de projet ouvertes, urbanisme des seuils, gestion évolutive des franges

Le focus qui suit, illustrent comment des entreprises ou des territoires peuvent intégrer dans leur raison d'être une relation étroite avec la forêt, et s'en inspirer — non seulement dans les procédés ou les formes d'organisation, mais aussi dans leur rapport au temps, aux milieux et à la coopération. À leur échelle, ils incarnent des modèles bio-inspirés, régénératifs et résilients.

ZAC de Coconi–Ouangani à Mayotte : un quartier pensé comme une forêt



Figure 5 : Bassin versant de la baie de Sada @Ceebios

Penser le quartier comme une forêt : hydrologie régénérative et organisation territoriale

L'approche exploratoire proposée par Ceebios à l'échelle de la ZAC de Coconi–Ouangani à Mayotte, illustre de manière explicite comment les principes de fonctionnement des écosystèmes forestiers peuvent orienter l'aménagement d'un quartier confronté à des contraintes climatiques et hydrologiques extrêmes. La démarche engagée ne relève pas d'une transposition formelle de la forêt, mais d'une lecture fine de ses logiques systémiques – cycles de l'eau, relations sol-milieu-relief, organisation distribuée des flux – appliquées à l'échelle urbaine et territoriale.

Cette dernière est menée dans le cadre d'une mission de Recherche & Développement à Mayotte, portée par l'EPRDM (Etablissement Public de Reconstruction et de Développement de Mayotte), en collaboration avec l'équipe de maîtrise d'œuvre Interland. Il s'agit d'un projet visant à tester, dans un contexte réel, comment l'inspiration forestière peut devenir un levier de résilience hydrique, climatique et territoriale, en lien étroit avec le bassin versant.

Un territoire soumis à des contraintes climatiques extrêmes

Le site de Coconi–Ouangani est caractérisé par des aléas climatiques majeurs, amplifiés par le changement climatique :

- des épisodes de pluies très intenses, concentrées sur quelques mois,
- jusqu'à huit mois consécutifs sans pluie,
- une érosion marquée des sols liée au ruissellement,
- une pression croissante sur la ressource en eau, tant pour les usages domestiques qu'écosystémiques.

Lors des épisodes pluvieux, l'eau ruisselle violemment, ravine les sols, dégrade les infrastructures et emporte la matière organique. À l'inverse, durant la saison sèche, l'absence de précipitations prolongée pose une question centrale :

Comment rendre autonome en eau le quartier, lorsqu'il ne pleut pas pendant huit mois ?

Les modèles conventionnels de gestion de l'eau – fondés sur l'évacuation rapide des eaux pluviales et sur des réseaux techniques centralisés – montrent ici leurs limites. Ils accentuent les phénomènes d'érosion, n'assurent pas le stockage et rendent les territoires dépendants d'infrastructures coûteuses et vulnérables.

S'inspirer de la forêt pour répondre à la question de l'eau

Face à ces contraintes, la forêt apparaît comme un modèle de référence particulièrement pertinent. Les écosystèmes forestiers sont capables de traverser de longues périodes de sécheresse tout en limitant les effets destructeurs des pluies intenses. Ils y parviennent grâce à une régulation diffuse, distribuée et progressive du cycle de l'eau.

Dans une forêt, l'eau est :

- interceptée par la canopée,
- ralentie par la strate végétale,
- infiltrée dans les sols,
- stockée temporairement dans les sols et la biomasse,
- restituée lentement aux milieux, aux nappes et à l'atmosphère.

Cette capacité à ralentir, stocker et redistribuer l'eau dans le temps long constitue un service écosystémique majeur. C'est cette logique qui a été transposée à l'échelle du quartier.

À Coconi–Ouangani, le cycle de l'eau n'est plus traité comme une contrainte technique secondaire mais comme un principe structurant du projet urbain, pensé en continuité avec le bassin versant. Le quartier devient ainsi un système hydrologique intégré, où chaque composante contribue à la régulation globale.

Une influence directe sur les formes urbaines et paysagères

Cette approche bio-inspirée a contribué à orienter la conception des formes urbaines.

L'implantation du bâti, le tracé des voiries, la hiérarchisation des espaces publics et la gestion des espaces ouverts ont été définis à partir des logiques naturelles d'écoulement, de ralentissement et d'infiltration de l'eau.

Les sols sont considérés comme de véritables infrastructures vivantes, capables de stocker, filtrer et redistribuer l'eau. Les espaces végétalisés jouent un rôle central dans la stabilisation des sols, la régulation microclimatique et la réduction des îlots de chaleur.

Plutôt que de concentrer la gestion de l'eau dans quelques ouvrages techniques, le projet repose sur une multiplication de dispositifs fins et distribués, inspirés du fonctionnement forestier : sols perméables et structurés, points de collecte et de stockage, espaces plantés multifonctionnels, baissières, continuités écologiques et hydrologiques épousant le relief naturel.

Comme dans une forêt, la robustesse du système repose sur la diversité, la redondance et l'interconnexion des éléments.

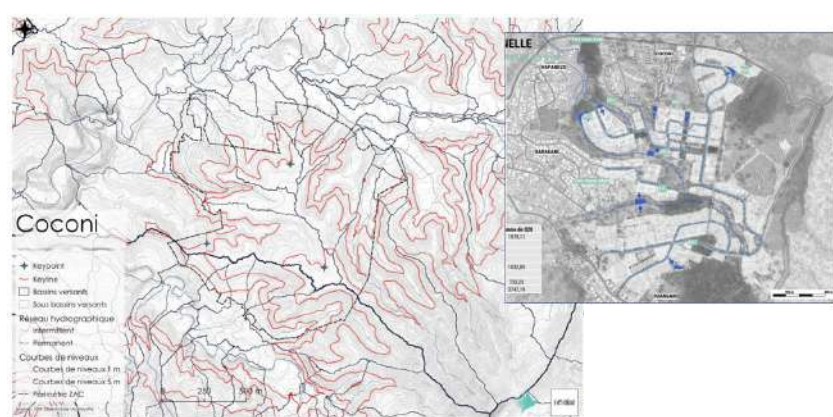


Figure 6 : Projets INterland, Keyline Regrarians Transporter l'eau par des lignes clefs @Ceebios & Karthèque @Ceebios

Vers des quartiers plus autonomes et adaptatifs

L'un des objectifs majeurs de la démarche est de renforcer l'autonomie hydrique du quartier, en particulier face aux longues périodes sans pluie qui caractérisent le contexte mahorais. En ralentissant, infiltrant et stockant l'eau lorsqu'elle est disponible, le système urbain gagne en robustesse et devient moins dépendant d'infrastructures lourdes et centralisées, tout en s'adaptant plus finement aux aléas climatiques.

Cette recherche d'autonomie intègre également le bâti comme une composante active du cycle de l'eau. À l'image de certains organismes forestiers capables de capter l'humidité atmosphérique, des dispositifs architecturaux bio-inspirés (tels que les tours Warka Water), sont envisagés comme des micro-capteurs hydriques, capables de condenser l'eau atmosphérique et de la restituer sous forme de gouttes, de fontaines ou de points d'eau accessibles, en complément des autres dispositifs du quartier.

Le bâti devient ainsi un élément contributif du socio-écosystème urbain, participant à la régulation, au stockage et à la mise à disposition de l'eau à différentes échelles. Cette continuité entre dispositifs architecturaux, organisation urbaine et fonctionnement du bassin versant permet de penser le quartier comme un système hydrologique multi-échelle, cohérent et interdépendant.

Comme dans une forêt, la robustesse du système repose sur la diversité, la redondance et l'interconnexion des éléments.

Au-delà de la seule question de l'eau, cette expérimentation montre comment l'inspiration forestière peut nourrir la conception de quartiers pensés comme des socio-écosystèmes vivants, capables de produire des services écosystémiques essentiels : régulation climatique, protection des sols, confort d'usage et amélioration de la qualité de vie des habitants.

Ce focus illustre ainsi comment le biomimétisme forestier, mobilisé dans une démarche de Recherche & Développement territoriale encore en cours, peut devenir un levier opérationnel pour renouveler la conception urbaine, en articulant lecture des milieux, organisation des flux et formes d'habitat dans une perspective de résilience et de régénération à long terme.

SOLS FORESTIERS

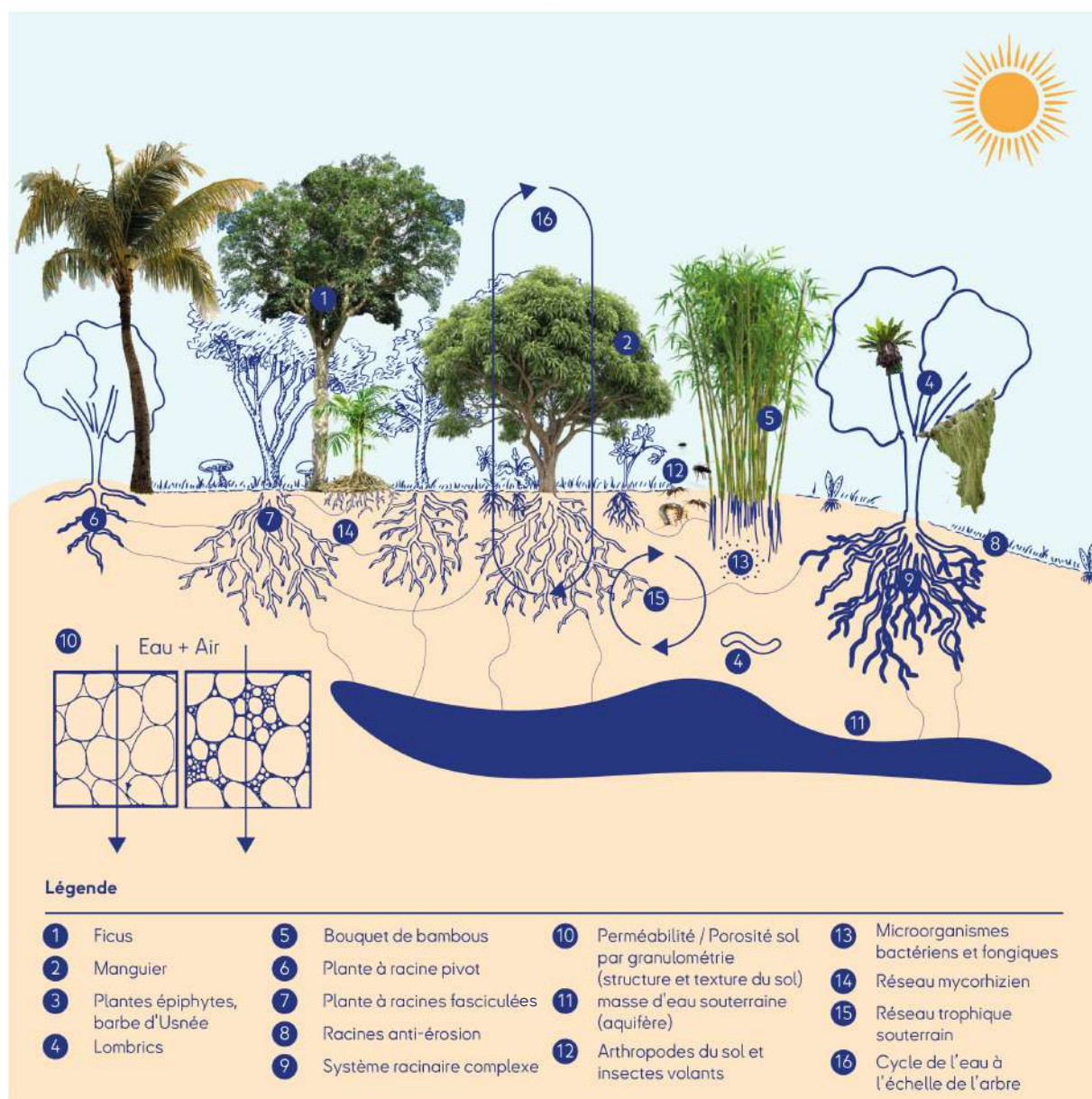


Figure 7 : Extrait de la fiche écosystème sur les sols forestiers à Mayotte @ Ceebios



VIVANT

Espèces végétales et fongiques
épiphytes prenant appui sur d'autres pour
leur support de croissance et d'ancrage **3**

couple « sol – racines végétales » **8 9 10**
**lutter contre l'érosion hydrique
des sols lors d'aménagements**

Diminution de l'effet "splash" par interpositions
horizontales des différents étages de végétation

Diminution du ruissellement
gravitaire d'eau par interposition
des racines perpendiculairement
au sens de la pente (écoulement) **9**

Ouverture et structuration poreuse du
sol par les racines et les mycorhizes **9 10 14**

Maintien de la terre par les racines
superficielles (système fasciculé) **7**

Maintien de la terre par les racines
profondes (système pivotant) **6**

Déplacement multidirectionnel dans le sol **4**

Système racinaire multifonctionnel **9**

Morphologie adaptable et adaptée aux
contraintes physiques **9**

Couple « sol – végétation » **16**
**Améliorer la gestion de l'eau & régénérer
son cycle, au travers de l'aménagement**

Récolte d'eau aérienne

Transport d'eau gravitaire

Transport d'eau anti-gravitaire

Cellules végétales aux propriétés anisotropes

Propriétés antifouling des cuticules
d'arthropodes du sol **12**

Production de mucilage

Diversité d'espèces en
complémentarités fonctionnelles **1,2,3,5,6,7**

Stratégies d'organisation fondées sur la
transmission d'information **12**

Accueil de la biodiversité

Le climat (eau), le sol et la forêt : des matrices
indissociables

Diversité de production de biomasse végétale **5**

Cycle de la matière et de l'énergie en réseau
trophique circulaire complexe **15**

Réseau mycorhizien : Echangeur direct de
ressources et relais d'information **14**

Réseau mycorhizien : Hiérarchisation et
régulation du réseau autour d'arbres "hub" **14**



BIOINSPIRATION

Construire sur les infrastructures
existantes et à la verticale minimiser les
emprises au sol **8**



Systèmes d'interception des précipitations

Systèmes d'interception du ruissellement de
surface

Systèmes de maintien de la structure du sol
et revêtement perméables

Dispositifs de cohésion horizontale du sol

Dispositifs de cohésion verticale du sol

Système d'insertion d'infrastructures
souterraines sans destruction de sol **8**



Repenser l'ancrage architectural à la
manière des racines d'un arbre **8**



Façades bioinspirées

Aménagement selon le chemin de l'eau

Pompes bioinspirées passives

Canalisations résistantes à la fissuration

Canalisations et volume de stockage
hygiéniques auto-nettoyants

Stockage d'eau sous forme d'hydrogel

Le jardin mahorais comme modèle agricole
productif et écologique **8**



Optimiser par l'organisation, la com-
munication et le design intelligent **8**



Valorisation socio-culturelle des liens à la
forêt et à la biodiversité terrestre **8**



Agroforesterie vectrice de réapprentissage
collectif et intergénérationnel sur la
préservation des milieux **8**



Porter le récit des interdépendances
vitales entre matrices environnementales
et sociales (One Health) **8**



Valorisation de co-produits de filières **8**



Modèle d'organisation robuste,
performant, écologique et durable **8**



Modèle de coopération
multifonctionnelle et pluristratifiée **8**

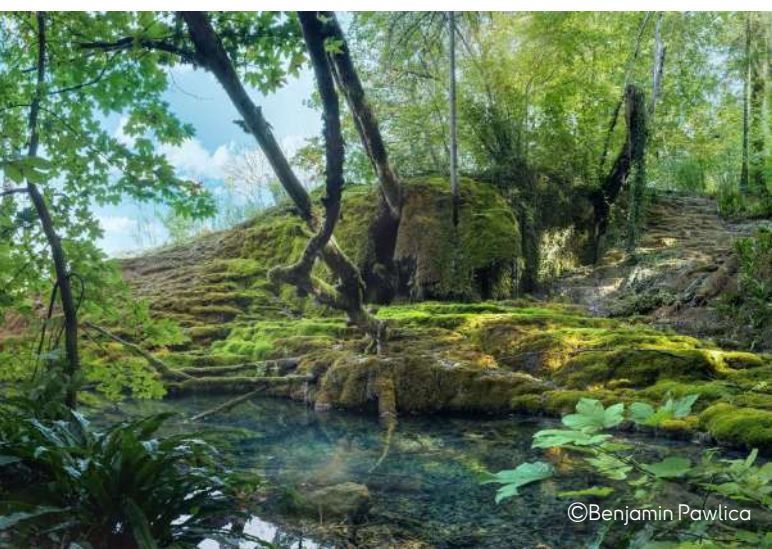


Modèle d'efficacité et de justesse dans
la distribution des ressources **8**



Conclusion et perspectives

Les régions Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est, avec leurs 3,7 millions d'hectares de forêts cumulés, détiennent un patrimoine naturel exceptionnel dont la valeur dépasse largement les enjeux de la production de bois. En effet, ces écosystèmes forestiers abritent une biodiversité remarquable et fournissent des services écosystémiques indispensables à notre société. De fait, la filière forêt-bois est un secteur historique et essentiel dans ces territoires, pourvoyeur de nombreux emplois.



©Benjamin Pawlica

Pourtant, les crises systémiques et planétaires actuelles – changement climatique, érosion de la biodiversité, tensions sur les ressources – fragilisent profondément ces socio-écosystèmes forestiers. La recherche du bon équilibre entre exploitation des ressources forestières pour répondre à une demande croissante et préservation de l'intégrité des écosystèmes forestiers pour maintenir les autres services écosystémiques associés est un défi auquel ces territoires font face.

La mobilisation du biomimétisme par les acteurs de la forêt permettrait de maintenir voire d'accroître le dynamisme régional de cette filière (nombre d'emplois et valeur ajoutée produite) comme le souligne l'étude du potentiel d'impact du biomimétisme en Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est, menée par le bureau d'étude Vertigolab conjointement à ce travail de formalisation du biomimétisme forestier. Cette mobilisation nécessite néanmoins au préalable un terrain d'expérimentation, pour favoriser l'acculturation de la filière au concept de biomimétisme et surtout pour mener des premières expérimentations convaincantes qui pourront ensuite servir de levier pour fédérer et mobiliser plus largement.

Le Parc national de forêts : laboratoire vivant du biomimétisme forestier et territorial

C'est dans ce contexte que le Parc national de forêts émerge comme un territoire d'expérimentation privilégié. Situé à cheval entre la Côte-d'Or et la Haute-Marne, ce parc incarne déjà, à travers sa charte, une vision innovante du développement territorial. Sa mission de protection des patrimoines naturels, conjuguée à son engagement pour une ruralité dynamique, en fait un cadre particulièrement pertinent pour explorer de nouvelles manières de penser, de gouverner et de (a)ménager des territoires forestiers. La démarche biomimétisme forestier émane de la rencontre entre le Parc national de forêts et Ceebios et de cette envie commune d'explorer la question de la mise en œuvre du biomimétisme à l'échelle d'un territoire ici forestier, en complément de l'approche par les solutions fondées sur la nature déjà profondément ancrée dans ce milieu.

Ceebios est le centre d'études et d'expertise dédié au déploiement du biomimétisme en France. Société coopérative d'intérêt collectif à but non lucratif, Ceebios fédère un écosystème de parties prenantes (académiques, économiques, institutionnelles) qui

développent des outils, des méthodes et des ressources pour catalyser l'innovation biomimétique. Fort de 10 années d'expérience, Ceebios affirme la nécessité de placer les territoires au cœur de la démarche biomimétique pour répondre de manière pertinente aux enjeux de soutenabilité. Le territoire constitue en effet un espace de mise en relation des acteurs, des savoirs et des usages. Il est de plus l'échelle à laquelle se construisent la robustesse de nos habitats et leur articulation avec les écosystèmes qui soutiennent les activités humaines.

A travers le présent livre blanc, les équipes du Parc national de forêts et de Ceebios proposent donc de considérer le biomimétisme forestier comme une démarche d'appui par la bio-inspiration aux initiatives territoriales existantes et à venir, en faveur des transitions écologiques, économiques et sociales. C'est aussi une invitation à repenser le sens et la place de la culture de l'innovation dans un univers imprégné par le temps long de la forêt.



©Heiner

Trois dimensions pour une approche intégrée

Le biomimétisme forestier s'articule autour de trois dimensions complémentaires et interdépendantes, faisant chacune appelle à des compétences et des acteurs du territoire différents.

Valorisation des connaissances - En premier lieu, le biomimétisme forestier est une invitation à observer, étudier et valoriser les écosystèmes forestiers comme une source d'inspiration significative et pertinente pour relever les enjeux du XXIème siècle. Que ce soit à l'échelle des plantes et en particulier de l'arbre, de la faune sauvage, des interactions entre communautés ou du fonctionnement complexe de l'écosystème entier, le biomimétisme est un prisme de lecture du vivant novateur. Le biomimétisme forestier est donc avant tout un levier de valorisation de la connaissance extraite de ces écosystèmes et par conséquent, un prétexte à davantage explorer et préserver cette richesse.

Innovation biomimétique - Ensuite, le biomimétisme forestier est une invitation à mobiliser la biomimétique : un outil opérationnel au service de l'innovation. L'analyse des enjeux de la filière forêt-bois réalisée dans ce livre blanc montre que la biomimétique pourrait

apporter des réponses novatrices aux défis techniques de la filière. De la conception de matériaux biosourcés aux systèmes de gestion forestière inspirés des dynamiques naturelles, la biomimétique ouvre de nouveaux horizons technologiques et économiques. Sa nature intrinsèquement collaborative favorise l'émergence de partenariats inédits entre acteurs du territoire.

Vision systémique - Enfin, le biomimétisme forestier est une invitation à faire converger les deux premières dimensions dans une vision systémique du territoire, en l'abordant comme un socio-écosystème vivant. Le Parc national de forêts et Ceebios proposent d'explorer ce que la forêt peut enseigner en termes de dynamiques d'interdépendance, de régulation, de gestion des ressources et de résilience, afin d'éclairer les cadres de l'action publique, de renforcer les modes de coopération entre acteurs et d'accompagner les trajectoires d'aménagement. Cette approche systémique vise ainsi à imaginer et accompagner, dans la durée, la transformation des territoires et l'organisation des filières économiques, en tenant compte de la complexité, des interactions et du temps long propres aux systèmes vivants.

Appel à l'action

Le Parc national de forêts constitue donc le laboratoire idéal de développement, d'ancrage et de déploiement du biomimétisme forestier. L'enjeu est de structurer, avec l'ensemble des acteurs intéressés, une dynamique collective de formation et de soutien à la pratique de l'innovation bio-inspirée. Suite aux présents travaux soutenus par l'ADEME et les Régions Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté, cette démarche pourrait s'incarner dans la création d'un centre de ressources dédié au biomimétisme forestier.

Ce centre de ressources aurait pour vocation de faciliter l'accès aux connaissances actuelles en matière de biomimétisme, tout en animant un réseau d'acteurs du territoire.

Concrètement, voici quelques propositions qui pourraient être mises en œuvre collectivement pour donner corps à ce centre de ressources.

- Le développement d'un format de balades inspirantes en forêt, permettrait par exemple, de proposer un outil tout public, ludique et immersif, pour faire découvrir au plus grand nombre le potentiel inspirant d'un écosystème forestier à travers le prisme du biomimétisme. Ainsi, tout en arpentant la forêt en compagnie d'un guide, les participants auraient l'occasion de découvrir via de nombreuses anecdotes et faits scientifiques situés, les propriétés remarquables des plantes, animaux et champignons qui les entourent. Ils pourraient ainsi apprendre à observer différemment le vivant, en s'interrogeant sur les fonctions cachées derrière les formes, les matériaux du vivant et l'organisation d'une forêt.
- Une version plus poussée de ce concept de balades bio-inspirées, couplée à un atelier de découverte de la méthodologie biomimétique encadré par des biomiméticiens expérimentés, pourrait être proposée aux collectivités, aux entreprises ainsi qu'aux étudiants des régions Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté. Pour les inciter, à travers la pratique, à identifier les sujets liés à leurs activités où la bio-inspiration pourrait s'avérer pertinente et les encourager à la mettre en œuvre.

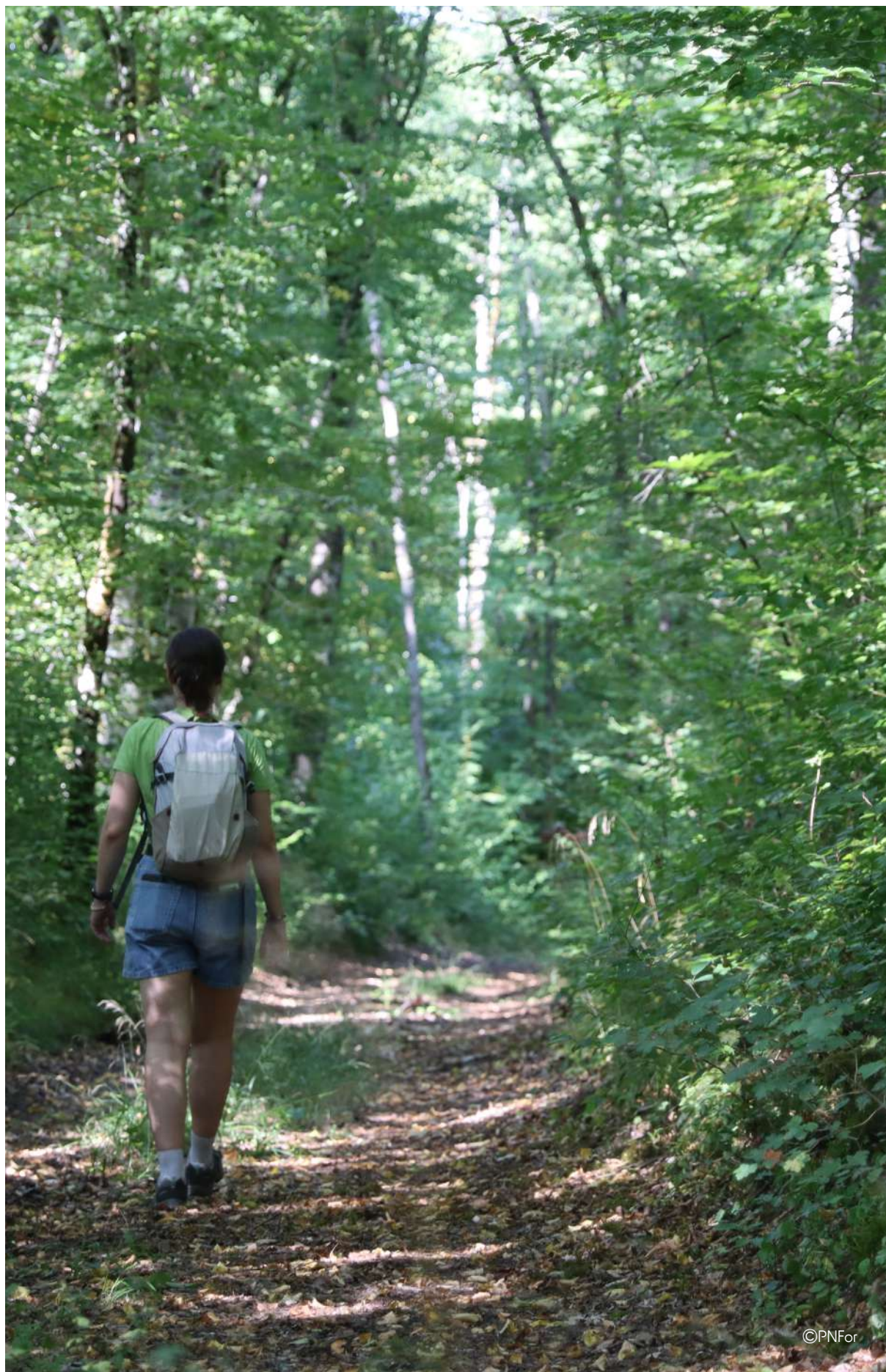
• Un accompagnement plus spécifique pourrait venir compléter ces initiatives de sensibilisation / formation, à travers l'organisation d'événements thématiques dédiés aux filières économiques régionales.

• En parallèle de cette offre de sensibilisation et d'accompagnement, d'autres actions visant à faire émerger des innovations bio-inspirées pour répondre aux enjeux de ces territoires forestiers sont nécessaires. A la fois pour soutenir le développement des activités économiques liées à la forêt, mais aussi pour convaincre par l'exemple de la pertinence de la méthode proposée dans ce livre blanc. Le centre de ressources, en collaboration avec les universités et les grandes écoles régionales, pourrait organiser un hackathon, par exemple sur les enjeux de valorisation des bois déclassés, où le biomimétisme serait l'approche à utiliser. De telles actions présentent le double intérêt de former de nombreux étudiants à la bio-inspiration et de les inciter à découvrir l'entrepreneuriat, tout en permettant l'émergence de solutions intéressantes pour la filière, via l'intelligence collective.

• Au-delà des missions d'un centre de ressources, des projets de recherche pluridisciplinaires, comme ceux évoqués dans les focus de ce livre blanc, permettraient d'associer le monde de la recherche académique à cette dynamique. Les régions Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est comptent des unités de recherche de pointe sur les thématiques de la forêt et des pratiques sylvicoles, des matériaux et en particulier du bois, de la chimie des bioressources, de l'agroécologie, de la biologie des sols... qui pourraient apporter des connaissances précieuses et nécessaires dans une telle démarche.

• Enfin, il serait pertinent de mobiliser un collectif d'acteurs autour des enjeux de la bio-inspiration territoriale pour poursuivre la recherche action sur l'aménagement par l'expérimentation ancrée dans la réalité d'un territoire forestier.

L'avenir de nos forêts et des territoires s'esquisse aujourd'hui. Le biomimétisme forestier offre une contribution pour l'écrire en s'inspirant de l'évolutions des écosystèmes forestiers que nous avons la responsabilité de préserver pour mieux les transmettre.



Annexes

A propos de la forêt

Qu'est-ce qu'une forêt ?

La forêt correspond à un ensemble de populations végétales, animales et fongiques, dominé par des arbres. Plus précisément, cet ensemble doit couvrir une surface conséquente et homogène (> 0,5 ha d'un seul tenant et d'une largeur > 20m), couverte à plus de 10% par des arbres, de tailles supérieures à 5m, organisés en une multitude d'écosystèmes (lisière, zone humide, litière et bois morts, futaies...), dont l'utilisation n'est ni agricole, ni urbaine²⁸. Elle constitue dans la plupart des cas le stade terminal « stable » du dynamisme végétal naturel sur les surfaces émergées du globe où les conditions climatiques ne sont pas extrêmes.

Qu'est-ce qu'un arbre ?

Pour qu'une plante puisse être considérée comme étant un arbre, elle doit réunir quatre critères²⁹ : (1) la hauteur, (2) la présence massive de bois des racines aux branches, (3) la présence d'un tronc et (4) la longévité. Ces critères largement acceptés dans l'univers forestier sont pour autant discutables. Par exemple, une jeune pousse issue de la germination d'une graine d'arbre ou encore une cépée issue d'un châtaigner coupé à sa base ne respectent pas l'ensemble de ces 4 critères, il n'en demeure pas moins qu'ils sont très proches de la nature même d'un arbre.

Les forêts à travers le monde

Selon un rapport publié en 2020 par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)³⁰, les forêts couvrent près d'un tiers (31 %) des terres émergées, soit environ 4 milliards d'hectares (figure 5). Cela représente presque la superficie cumulée de la Russie, du Canada, des États-Unis et des pays de l'Union européenne. Plus d'un tiers des forêts (34 %) sont des forêts primaires, où l'activité humaine est réduite à l'état de traces. La plupart se situe au Brésil, au Canada et en Russie. À l'inverse, 7 % de la superficie forestière mondiale sont constituées de forêts plantées par l'Homme.

Si les forêts sont présentes sous presque tous les climats, c'est dans les zones tropicales (45 %) et boréales (27 %) que se concentrent près des trois quarts des forêts mondiales (figure 5). En effet, la constitution d'un climax forestier (état d'équilibre spontané de la végétation) est impossible sous climat froid (région arctique, haute altitude) ou sec (semi-désert), ou encore lorsque la nature du sol est défavorable (pauvre, salé...). Le climax est alors simplement une formation arbustive ou herbacée, parfois à faible densité de végétation comme les semi-déserts³¹. Les forêts sont classées en fonction de critères biogéographiques qui traduisent le climat local (forêt boréale, tempérée, tropicale, de montagne) ou par types de végétation (forêt de feuillus, de résineux, décidue, sempervirente) ou encore selon l'état d'intégrité de l'écosystème (forêt primaire, climaxique, secondaire, dégradée, anthropisée).

Cette diversité de champs de contraintes auxquelles les forêts se sont adaptées au cours de l'évolution (depuis plus de 400 millions d'années³²) est centrale. C'est l'assurance de trouver un large panel de stratégies inspirantes pertinentes encore aujourd'hui face à de nombreuses situations problématiques.

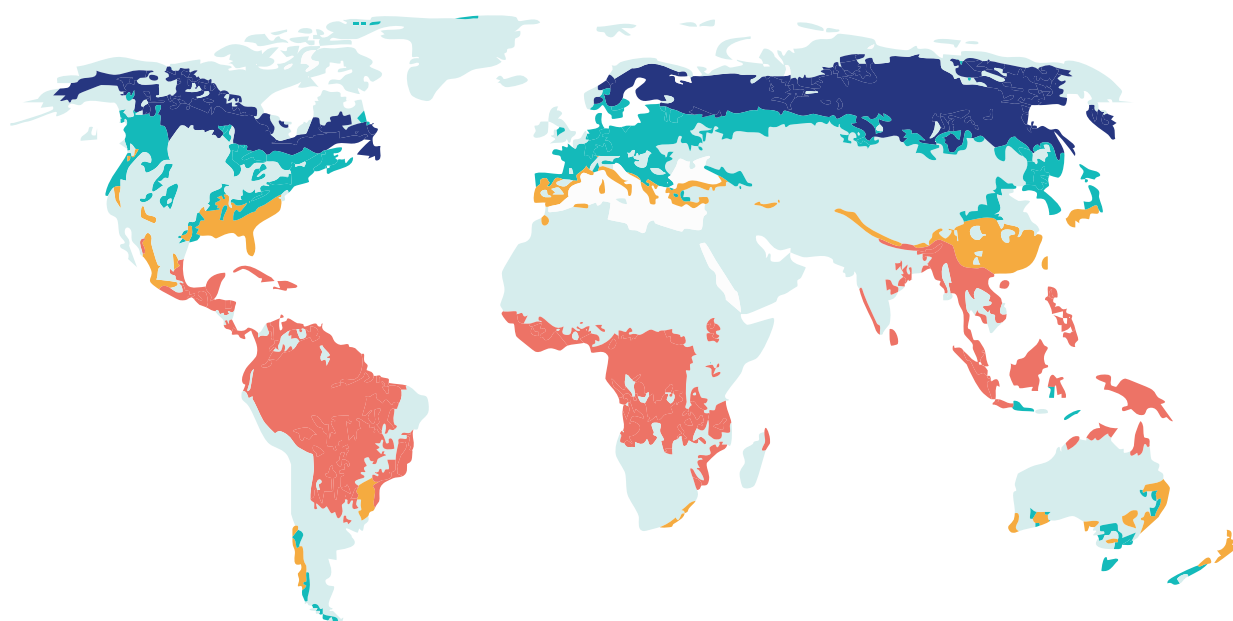
²⁷ IGN. 2023. Qu'est-ce qu'une forêt ? <https://www.ign.fr/reperes/quest-ce-quune-foret>

²⁸ Dans la peau d'un arbre, secret et mystère des géants qui vous entourent, Catherine Lenne, Points

²⁹ FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome.

³⁰ <https://biologievegetale.be/ecologie-vegetale/ecosystemes/dynamique-de-la-vegetation/les-stades-terminaux/>

³¹ MNHN. 2021. Muller S., Rouhan G. Comment les arbres sont-ils apparus sur Terre : <https://www.mnhn.fr/fr/actualites/comment-les-arbres-sont-apparus-sur-terre>



45% forêts
tropicales

31% forêts
boreales

16% forêts
de feuillus

11% forêts
subtropicales

46

milliards d'ha de forêts
dans le monde

73 300

espèces d'arbres différents



En France :

2,8 milliards m3 bois vivant
+50% en 4 décennies

17,5 millions ha
surface boisée en métropole

8 millions ha
en Outre-mer
(45% Guyane et Dom-Tom)

Figure 8 : Répartition des forêts dans le monde ©Ceebios

Qu'est-ce que le biomimétisme ?

« Va prendre tes leçons dans la nature, c'est là qu'est notre futur ! »

Cette maxime attribuée à Léonard de Vinci résume parfaitement la philosophie du biomimétisme. Il s'agit littéralement de chercher à s'inspirer du vivant pour réaliser un objet technique, pour repenser l'habitat et l'organisation de nos espaces de vie, pour communiquer et traiter l'information avec efficacité, voire pour imaginer de nouveaux modes de gouvernance. Mais, pour cela, encore faut-il oser se pencher avec curiosité sur le vivant qui nous entoure pour mieux l'étudier, le comprendre, s'en inspirer.

Contexte d'émergence et finalité

Le biomimétisme est une démarche en plein essor, déclinée à différentes échelles (du matériau à l'aménagement des territoires), dans différents champs d'application (monde économique, enseignement supérieur et recherche, politiques publiques...).

Faisant appel à un large champ de disciplines (des sciences naturelles aux sciences humaines et sociales, de la philosophie à l'art, de la biologie à l'ingénierie, du design à l'urbanisme), elle s'appuie sur un socle scientifique solide de plus en plus conséquent, comme en témoigne l'accroissement constant du nombre de publications scientifiques en lien avec ce sujet ces dernières années (figure 9). Cet essor repose sur de nombreuses nouvelles technologies qui permettent d'étudier le vivant à de toutes petites échelles (moléculaires, cellulaires) aussi bien qu'à de très grandes échelles (flux de matières et d'énergie dans un écosystème, migrations transcontinentales...). Les découvertes qui en découlent changent en profondeur notre compréhension des systèmes biologiques.

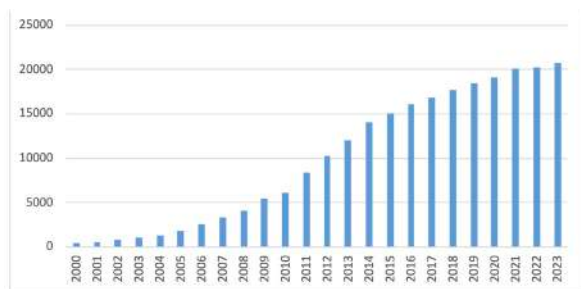


Figure 9 : Evolution du nombre de publications scientifiques en lien avec le biomimétisme
Nombre de publications scientifiques par année accessibles sur google scholar avec la requête biomimicry OR bio-inspiration OR bio-inspired Source : Gscholar, 2025

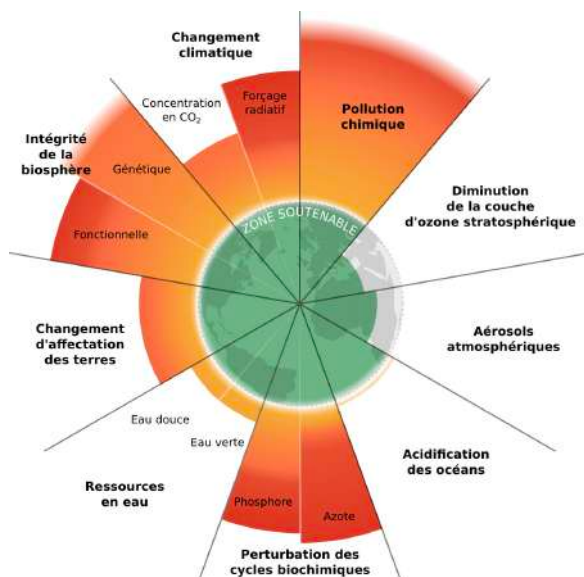


Figure 10 : Limites planétaires
CC BY-NC-ND 3.0 Azote for Stockholm Resilience Centre, based on analysis in Sakschewski and Caesar et al. 2025

Par ailleurs, le modèle technico-économique sur lequel reposent nos sociétés modernes est maintenant confronté à la rareté des ressources (matières premières et énergies). Il devient urgent de développer de nouveaux paradigmes techniques et sociétaux pour aller vers plus de sobriété.

Enfin, l'ensemble des activités humaines cumule un impact sur le reste de la biosphère supérieur à la capacité de charge des écosystèmes dans lesquels nous vivons, comme en témoignent les dépassements avérés de nombreuses limites planétaires (figure 10). Il est donc nécessaire de rechercher à réduire au maximum ces impacts voire de basculer dans une dynamique inverse de régénération des écosystèmes dont nous dépendons (approvisionnement en eau, purification de l'air, production de matières premières...) pour aller vers plus de robustesse.

Le biomimétisme est une démarche qui émerge de la convergence de ces 3 contextes. Il s'agit de chercher à préserver le vivant (humain et non humain) dans un contexte planétaire qui se dégrade, en misant sur l'innovation inspirée par le vivant, laquelle s'appuie sur notre capacité nouvelle à le comprendre de manière plus approfondie et systémique.

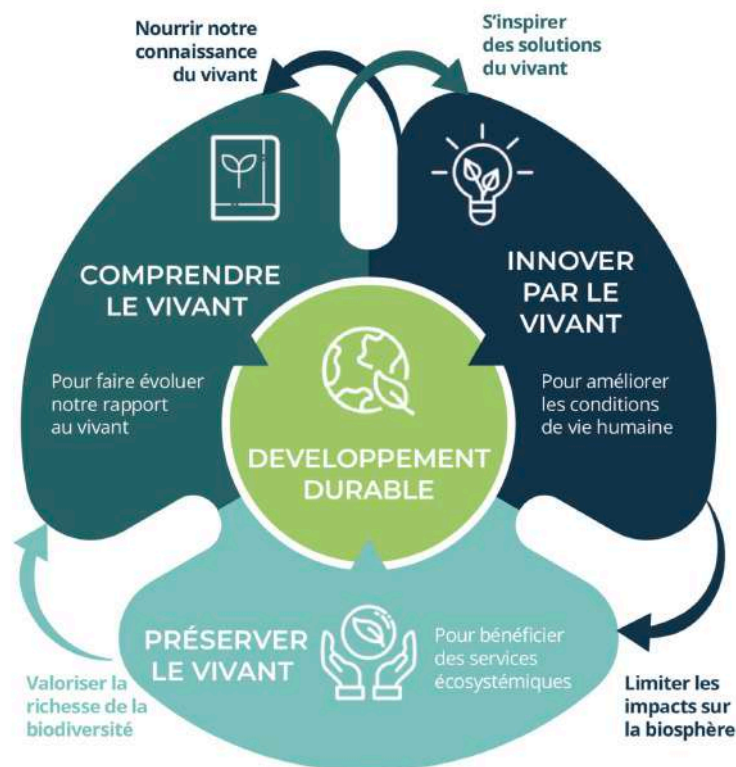


Figure 11: Les 3 dimensions du biomimétisme ©Ceebios

En France, de nombreux acteurs du biomimétisme s'engagent en faveur de cette ambitieuse dynamique transcendant le cadre conventionnel de l'innovation, à travers la signature d'une charte qui explicite le cadre éthique sous-jacent³².

Démarche d'innovation

S'inspirer du vivant est un processus créatif que l'humanité utilise depuis la nuit des temps. Il existe de nos jours différentes nuances, outils et méthodes pour y parvenir, suivant la finalité recherchée.



Figure 12 : sémantique de la bio-inspiration d'après norme ISO18458:2015

³² <https://blog.pikaia.fr/biomimetisme/pour-un-biomimetisme-au-service-de-la-vie/>

La biomimétique est une méthodologie bien documentée dans la littérature scientifique³⁴ et éprouvée sur le terrain³⁵. Elle permet à un concepteur d'aller chercher dans le domaine de la biologie une manière originale de traiter la problématique à laquelle il est confronté, grâce à un processus en 4 étapes majeures (figure 13).

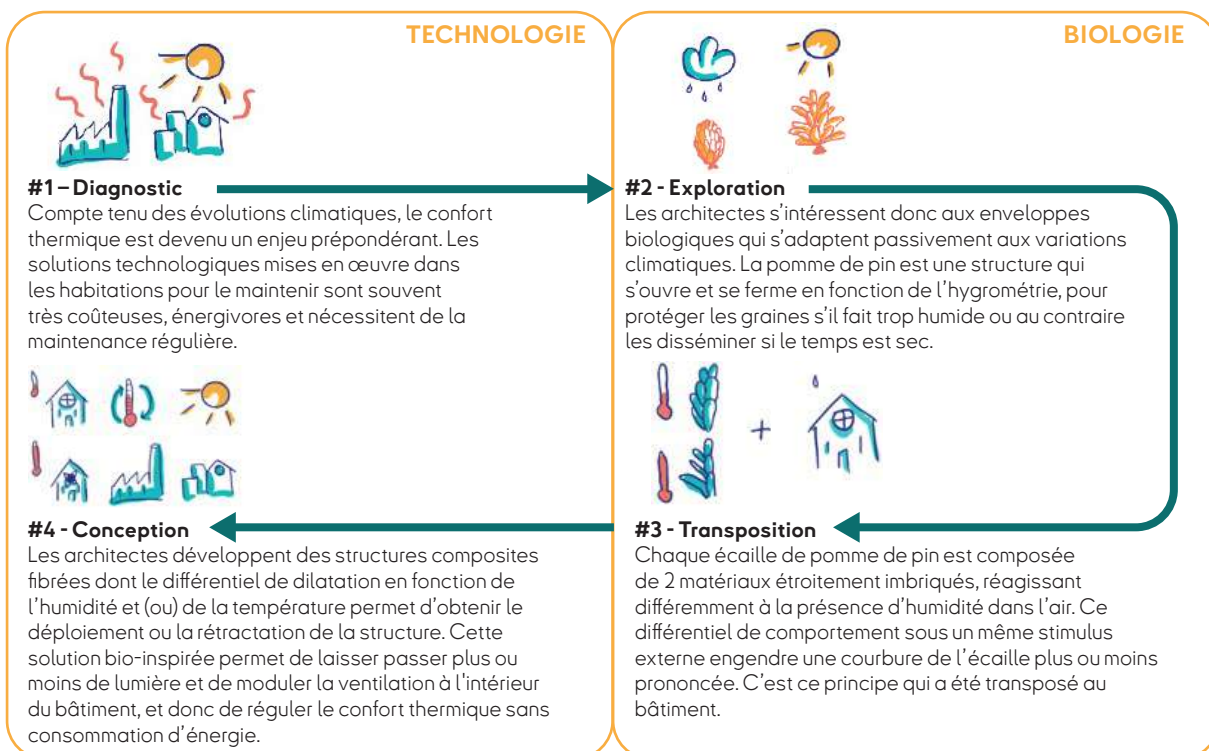


Figure 13: Exemple d'application illustrant le processus biomimétique ©Ceebios

Cette présentation du biomimétisme pose les bases d'une démarche qui se veut vertueuse et novatrice, au service des enjeux de transformation de nos sociétés. En s'intéressant plus spécifiquement à la forêt, ce livre blanc a pour ambition de souligner ce qui rend ce socio-écosystème suffisamment original pour justifier de chercher à en faire un gisement d'inspiration tout autant qu'un lieu d'expérimentation du biomimétisme.

³³ Fayemi, P. E. (2016). Innovation par la conception bio-inspirée: proposition d'un modèle structurant les méthodes bio-mimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM).

³⁴ <https://www.flickr.com/photos/biomimexpo/albums/72157679425780723/>

Le Territory Lab



L'approche urbaine et territoriale présentée dans la partie 3 du présent rapport s'inscrit dans un cadre plus large de recherche et d'expérimentation intitulé Territory Lab (TyL), un projet de Recherche–Action–Transmission copiloté par Ceebios, l'Institut des Futurs Souhaitables et Territoires en Transition.

Le Territory Lab articule ancrage territorial, bio-inspiration et dynamiques collaboratives. Son ambition est d'explorer, de valoriser et d'accompagner, par le prisme du vivant, des territoires et des organisations engagés dans des démarches de régénération écologique et sociale. Il constitue un cadre de réflexion et d'expérimentation visant à renouveler les manières de penser et de conduire les projets territoriaux, en intégrant pleinement les enjeux écologiques, sociaux et culturels. Ce projet rassemble un collectif pluridisciplinaire, issu de langages et de corpus professionnels différents.

Les objectifs du Territory Lab incluent notamment :

- L'étude et le développement de stratégies bio-inspirées, afin de proposer des méthodologies et des approches régénératives adaptées aux défis contemporains des territoires ;
- L'organisation de collectifs pluridisciplinaires, associant chercheurs, praticiens et acteurs locaux, pour coconstruire des communs immatériels au service de la transformation écologique et sociale.

Depuis 2018, fort de sept années de recherche appliquées à travers des expérimentations conduites dans plusieurs régions de France, le Territory Lab a posé des bases méthodologiques et stratégiques, en partie mobilisées par Ceebios pour nourrir les réflexions autour du biomimétisme forestier, au service des territoires et de la filière forêt-bois. Plutôt qu'un modèle figé à appliquer, il s'agit d'un cadre ouvert et évolutif, nourri par la recherche, l'expérimentation située et la coopération.



@Franck Fouquet