



**HAL**  
open science

## Suivi de la biodiversité, scénarios pour l'avenir, relations entre climat et biodiversité

François Chiron, Paul Leadley, Nicolas Delpierre

### ► To cite this version:

François Chiron, Paul Leadley, Nicolas Delpierre. Suivi de la biodiversité, scénarios pour l'avenir, relations entre climat et biodiversité. Jean-Michel Lourtioz; Jane Lecomte; Sophie Szopa; Catherine Even; Guillaume Roux. Enjeux de la transition écologique : Enseigner la transition écologique aux étudiants de licence à l'université, EDP Sciences, 24p, 2021, 978-2-7598-2662-9. 10.1051/978-2-7598-2661-2 . hal-03479260

**HAL Id: hal-03479260**

**<https://universite-paris-saclay.hal.science/hal-03479260>**

Submitted on 14 Dec 2021

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

# Chapitre 6

## Suivi de la biodiversité, scénarios pour l'avenir, relations entre climat et biodiversité

Ce chapitre nous montre qu'à l'aide des sciences dites participatives, le grand public et diverses associations en lien avec les scientifiques peuvent contribuer à l'observation de la **biodiversité** et de son évolution en apportant des données sur de grandes échelles spatiales et temporelles. En parallèle, les scientifiques développent des modèles quantitatifs ou qualitatifs de façon à prévoir les **scénarios** d'évolution possible de la **biodiversité** en réponse au réchauffement climatique. La confrontation des modèles de **biodiversité** aux modèles climatiques permet ainsi de pointer des solutions qui répondent à la fois à la préservation de la **biodiversité** et à l'atténuation du réchauffement climatique. À l'inverse, on découvrira que certaines mesures visant à réduire le réchauffement peuvent ne pas être bénéfiques à la **biodiversité** ou ne l'être que partiellement. Le chapitre montre aussi comment les arbres au sein des **écosystèmes** forestiers peuvent s'adapter au réchauffement climatique, même si les étés chauds et secs perturbent de façon notable leur fixation du carbone de l'**atmosphère**. De par leur rôle de **puits de carbone**, les forêts restent nos alliées pour atténuer le réchauffement climatique, et il nous faut donc les préserver ou même les développer.

### 6.1. Les outils et dispositifs d'observation de la biodiversité : l'apport des sciences participatives – F. Chiron

La **biodiversité** ne se résume pas qu'à une collection d'**espèces** (voir section 4.1). Son observation doit aussi rendre compte de l'abondance des populations, de leur **diversité génétique** et de la complexité des interactions entre **espèces** au sein de la **biosphère** à différentes échelles.

L'importance des observations sur le « terrain » a été à l'origine des sciences dites « participatives », qui se définissent comme la collaboration vertueuse de scientifiques, de citoyens volontaires et de « parties prenantes », telles que des associations naturalistes ou des entreprises. Ce travail en commun permet de définir les questions scientifiques, les protocoles, qui seront appliqués à large échelle, puis d'analyser les résultats pour répondre aux questions posées et en soulever de nouvelles, sans oublier de financer toutes ces actions.

### 6.1.1. Le nouvel essor des sciences participatives en écologie

Les **sciences participatives** ne sont pas nouvelles. Les sociétés savantes du XVII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle ont énormément participé aux collectes d'échantillons à travers le monde, qui ont nourri les collections des Muséums d'Histoire naturelle. La relation entre les scientifiques et ces naturalistes amateurs s'est un peu distendue ensuite, même si, certains programmes impliquant des citoyens datent de plus de 120 ans comme le « *Christmas Bird Count* » (Fig. 6.1).

Depuis deux décennies, on assiste à un renouveau des **sciences participatives** en écologie. Cela s'explique par le besoin de données sur de grandes échelles spatiales et temporelles, indispensables à l'analyse des changements globaux, car il nous faut comprendre et évaluer la réponse de la **biodiversité** au changement climatique, à l'urbanisation, aux politiques agricoles, etc. Ce renouveau dans les sciences est aussi dû au développement très rapide du numérique qui permet de massifier ces dispositifs. En France, les équipes de « Vigie-Nature » et de « 65Mo », développées par le Muséum national d'Histoire naturelle, coordonnent un grand nombre de ces programmes. Enfin, il a été prouvé que les dispositifs participatifs garantissent des observations plus pérennes que ne le permettent les dispositifs professionnels financés sur fonds publics [1].



**Figure 6.1:** Le « *Christmas bird count* » : un suivi des oiseaux d'Amérique du Nord avec plus de 50 000 participants (Source : USFWS Pacific Southwest Region, license CC BY 2.0, source : flickr).

À qui s'adressent les **sciences participatives**? Autrefois plus orientées vers un public naturaliste, elles se sont ouvertes au grand public et aux acteurs de l'environnement. Par exemple, l'essor il y a 30 ans du Suivi Temporel des Oiseaux Communs en France s'est construit sur les réseaux naturalistes spécialistes des oiseaux. Aujourd'hui «Oiseaux des jardins», un programme de Vigie-Nature, repose entièrement sur les observations du grand public qui y trouve là une occasion d'apprendre simplement à reconnaître les oiseaux. Le programme «Florilèges prairies urbaines» est quant à lui dédié aux gestionnaires des espaces verts urbains qui souhaitent évaluer et faire évoluer leurs pratiques de gestion pour mieux conserver les plantes en ville. L'implication croissante du grand public leur vaut aussi le nom de sciences citoyennes.

### 6.1.2. Des programmes et des processus collaboratifs entre scientifiques et citoyens

On distingue, en fait, deux grands types de programmes. Les premiers sont des programmes qui ont une visée transformative de leur action sur les **socio-écosystèmes**. Entrepris par toutes sortes d'acteurs comme des ONG, des collectivités locales, des fédérations d'agriculteurs etc., ils ont une action directe sur la société ou les **écosystèmes** mais n'attendent pas nécessairement une validation scientifique. Les seconds sont les observatoires de la **biodiversité** dont le but est de décrire à large échelle spatiale et sur le long terme son état. Ils sont initiés par les scientifiques [2].

Ainsi, individus, **espèces**, interactions **biotiques**, cycles de vie, saisons sont décrits en France dans plus de 150 programmes dédiés à la **biodiversité** terrestre, aquatique et marine rassemblant plus de 70 000 participants<sup>55</sup>. De prime abord très descriptifs, ces observatoires ont aussi une portée transformative essentielle. Les observations répétées de la nature par les participants, par exemple, un jardinier amateur qui participe à «l'Observatoire des Jardins» ou un agriculteur qui participe à «l'Observatoire Agricole de la Biodiversité», font évoluer leurs connaissances et changent leurs comportements avec des pratiques plus favorables.

Une des critiques faites aux **sciences participatives**, est de recruter des observateurs pas ou peu expérimentés dans le but de produire des résultats scientifiques valides. Avec du recul, on voit que la crainte de produire des données de mauvaise qualité est faible. Par exemple, les erreurs d'identification d'**espèces** dans l'*Observatoire papillons des jardins* ne sont que de 5%, un taux tout à fait acceptable et comparable à celui de naturalistes confirmés. Cette fiabilité des données s'explique par l'apprentissage rapide des insectes par les participants, la validation des données par les «pairs», c'est-à-dire les experts dans le domaine, et par des protocoles simples et adaptés au plus grand nombre.

55. <https://www.open-sciences-participatives.org/home/>

La force de ces programmes est la participation d'un grand nombre d'observateurs, qui est un objectif fondamental. La précision des analyses augmente avec le nombre de données, tandis que les incertitudes liées au hasard, et aux particularités des sites d'observation, s'estompent. Par la précision des analyses qu'ils autorisent, ces programmes jouent un rôle majeur dans les recherches en écologie fondamentale et dans les sciences de la conservation. Elles sont publiées dans des revues scientifiques internationales renommées, confirmant l'intérêt et la rigueur scientifique de ces recherches.

Mais l'intérêt des **sciences participatives** ne s'arrête pas là. Elles font évoluer la démarche scientifique elle-même. Pour bien comprendre cela, il est important de revenir sur l'approche classique en sciences que l'on appelle la méthode « hypothético-déductive ». Celle-ci revient à poser une question – après une revue de la bibliographie existante –, établir un protocole, collecter les données, analyser et répondre à la question initiale.

Dans ce contexte, la participation des citoyens consisterait uniquement à collecter les données, sans intervenir sur les questions en amont ou la production de résultats en aval, réservées aux scientifiques. Or, les gros jeux de données, les fameux « *big data* », ne sont pas construits pour répondre à une question unique. Les questions émergent en fonction des données collectées qui elles-mêmes dépendent de ce que les observateurs ont rapporté. Même si ceux-ci suivent des protocoles très standardisés, il y a une part de liberté dans les lieux, les moments d'observations, les **espèces**, ce qui oriente le choix des questions et les résultats produits par les scientifiques.

De même, les observateurs peuvent faire part de questionnements à l'issue de leurs observations qui seront ensuite explorées par les scientifiques, voire résolues par les observateurs eux-mêmes<sup>56</sup>. Ce processus dynamique et collaboratif élargit considérablement la place des participants, et la portée des recherches en écologie. Il développe la culture scientifique et l'esprit critique des participants autant d'atouts de nos jours.

### 6.1.3. Un exemple de programme de sciences participatives

Les programmes sur la **biodiversité** sont nombreux mais peu sont ceux qui étudient la coexistence entre individus, c'est-à-dire leurs interactions. *Birdlab* (Fig. 6.2) en est un exemple très ludique. C'est un *serious game* qui permet d'apprendre très simplement à reconnaître les oiseaux tout en étudiant leur comportement de recherche alimentaire. Le dispositif est simple, vous reproduisez sur votre smartphone ou tablette les déplacements des oiseaux se posant sur deux mangeoires identiques que vous aurez placées au préalable sur votre balcon ou dans votre jardin.

56. <https://usbeketrica.com/fr/article/avec-sciences-participatives-on-entre-soi-meme-en-transition>



**Figure 6.2:** Les espèces d'oiseaux suivies dans le cadre du programme « BirdLab »; un programme de sciences participatives pour étudier le comportement des oiseaux aux mangeoires (Source : <http://www.vigienature.fr/fr/vigie-manip/birdlab>).

Ce programme aide les chercheurs à comprendre combien d'espèces fréquentent les mangeoires, quelles espèces s'entraident ou s'évitent pour rechercher leur nourriture, dans quels contextes le nourrissage est-il favorable, etc. Les participants au programme peuvent ainsi apprendre relativement vite à reconnaître les oiseaux et leur comportement de façon ludique et à remporter des badges en fonction de leurs observations.

Pour les plus motivés, sur la base des outils et des démarches déjà existants (<https://www.open-sciences-participatives.org/home/> et <http://www.vigienature.fr/fre>), il est possible de proposer un nouveau projet de sciences participatives !

## 6.2. Scénarios et modèles d'évolution de la biodiversité – P. Leadley

### 6.2.1. Contexte général des scénarios et modèles

Les scénarios et les modèles de biodiversité sont utiles pour les scientifiques et les décideurs, ceci pour plusieurs raisons. En effet, ils permettent :

- de mieux comprendre et synthétiser un large éventail d'observations;
- d'alerter les décideurs sur les effets futurs indésirables des changements globaux tels que le changement d'affectation des sols, la surexploitation du vivant, le changement climatique, etc.;

- de fournir une aide à la décision pour l'élaboration de stratégies de gestion adaptative;
- d'explorer les implications des voies alternatives de développement socio-écologique et des options de gestion;
- d'anticiper les changements afin d'être proactif plutôt que réactif.

Les scénarios décrivent différentes évolutions de la biodiversité et des services écosystémiques en réponse aux changements futurs des pressions sur les écosystèmes (cf. rapport 2016 de l'IPBES, *Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques* [3]). Dans ces scénarios, les causes indirectes de ces évolutions sont, par exemple, la croissance démographique humaine, l'utilisation de l'énergie ou la production agricole. Les pressions directes sur la biodiversité sont nombreuses, mais la grande majorité des scénarios traite des impacts du changement climatique et du changement d'utilisation des terres et de la pêche.

Des modèles mathématiques sont ensuite utilisés pour convertir ces pressions directes en impacts sur la biodiversité et les services écosystémiques. Il existe une grande diversité dans le type et la complexité des modèles utilisés (cf. rapport 2016 de l'IPBES). Pour la biodiversité, on modélise souvent la répartition spatiale des espèces, la richesse spécifique, c'est-à-dire le nombre d'espèces par unité de surface, ou l'abondance des espèces. Pour les services écosystémiques, on modélise, par exemple, le stockage du carbone ou la régulation des inondations par les écosystèmes. Les deux exemples ci-dessous illustrent la façon dont on peut modéliser les impacts associés au changement climatique et à l'utilisation des terres sur la biodiversité.

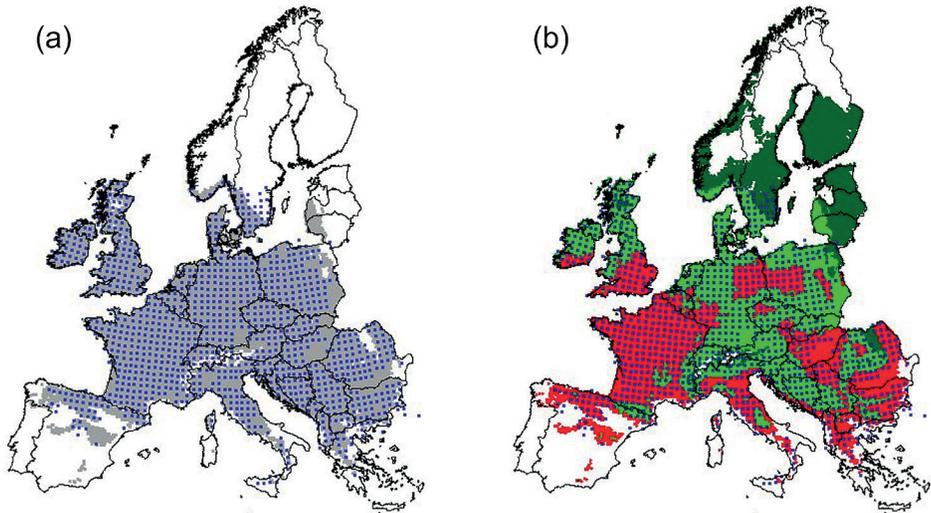
### 6.2.2. Modèle de « niche » – Application au chêne sessile

La relation entre l'abondance d'une espèce et les facteurs environnementaux reflète la « niche écologique » de l'espèce, c'est-à-dire l'ensemble des facteurs abiotiques qui sont nécessaires à la survie des individus ou des populations de cette espèce. Parmi les modèles de biodiversité, les modèles dits de niche, sont de loin les plus utilisés en termes de publications scientifiques. Ils combinent les données actuelles de répartition spatiale d'une espèce donnée avec la répartition spatiale du climat pour aboutir à un modèle statistique décrivant la façon dont l'espèce réagit à l'environnement.

Pour illustrer les modèles de niche et leur fonctionnement, nous choisissons ici une espèce d'arbre largement distribuée en Europe, le chêne sessile. Le modèle statistique utilisé permet de relier la probabilité de présence de l'espèce aux facteurs environnementaux en combinant la distribution spatiale de l'espèce avec plusieurs facteurs climatiques. Ce modèle prédit que le chêne sessile est mal adapté aux climats froids, ainsi qu'aux climats chauds et secs. Il préfère les climats tempérés.

Ceci était déjà connu qualitativement, mais le modèle statistique nous permet de quantifier cette relation. La capacité du modèle à décrire la distribution actuelle du chêne sessile est illustrée sur la [figure 6.3a](#); la distribution obtenue (en fond gris) est en très bonne adéquation avec la répartition actuelle. On vérifie que le chêne sessile ne se trouve pas en Europe du Nord parce qu'il y fait trop froid, ni dans une grande partie de l'Europe du Sud parce qu'il y fait trop chaud et trop sec.

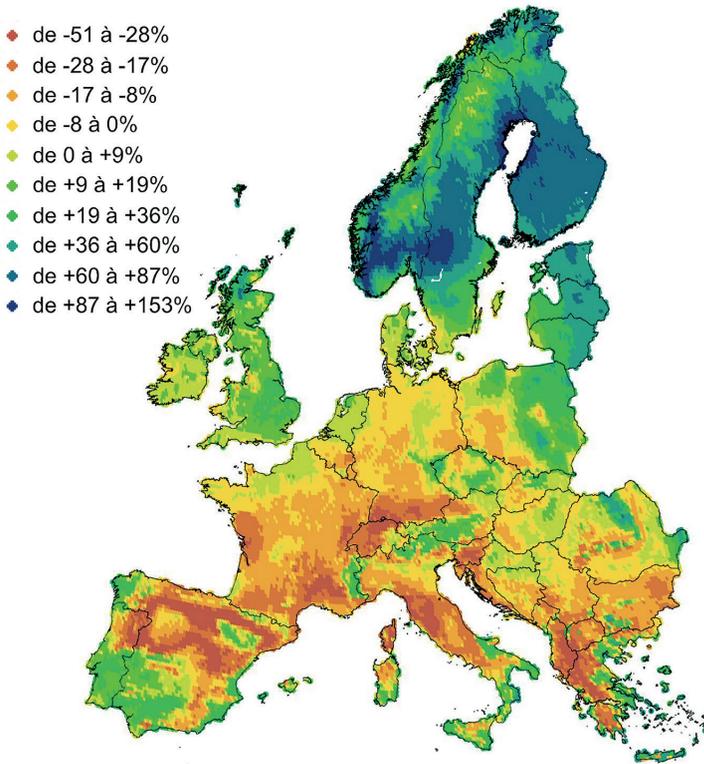
Mais ce qui est évidemment le plus intéressant, c'est que le modèle permet de prévoir les effets des changements climatiques futurs sur la répartition de l'[espèce](#). Si on combine la relation statistique précédente entre la présence du chêne sessile et les facteurs environnementaux et qu'on utilise en même temps un modèle climatique qui prédit, par exemple, de fortes émissions de [gaz à effet de serre](#), on obtient ainsi la distribution spatiale prédite pour l'[espèce](#) en 2080 ([Fig. 6.3a](#)). Le modèle prévoit ainsi que le chêne sessile disparaîtra d'une grande partie de son [aire de répartition](#) actuelle située au sud ou au centre de l'Europe (couleur rouge sur la [Fig. 6.3b](#)), car le [climat](#) y sera défavorable à cette [espèce](#). En revanche, le chêne sessile pourrait coloniser de grandes parties de l'Europe du Nord (couleur vert foncé sur la [Fig. 6.3b](#)), car le [climat](#) lui deviendra favorable.



**Figure 6.3 :** Répartition du chêne sessile. (a) : la répartition actuelle du chêne sessile en Europe (points bleus) et [modélisation](#) (gris); (b) : la répartition du chêne sessile prédite en 2080 (en vert) et sa disparition (en rouge) pour un [scénario](#) d'émissions élevées de [gaz à effet de serre](#). Avec la courtoisie de W. Thuiller, voir [4].

Ces résultats ont d'énormes implications pour la [biodiversité](#) et le fonctionnement des forêts. Ils ont, en particulier, contribué à alerter les forestiers sur les graves dangers que le changement de [climat](#) fait peser sur les forêts. En effet, les forêts sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques, car les arbres ont une très longue durée de vie.

Grâce au développement de nouvelles bases de données massives, ces modèles peuvent être appliqués à un très grand nombre de plantes mais aussi à presque toutes les **espèces** connues d'oiseaux, de mammifères et de reptiles, vu les mesures relativement fiables de leurs répartitions spatiales dont on dispose. Ainsi, un modèle de niche du type précédent a été utilisé pour prédire les impacts du changement climatique sur 1 500 plantes européennes. Le modèle prévoit une forte diminution du nombre d'**espèces** végétales par unité de surface (richesse spécifique) dans le sud de l'Europe avec, en contrepartie une augmentation potentiellement importante de la richesse de la végétation dans le nord de l'Europe. De nombreuses **espèces** vont, en effet, migrer vers le nord (Fig. 6.4).

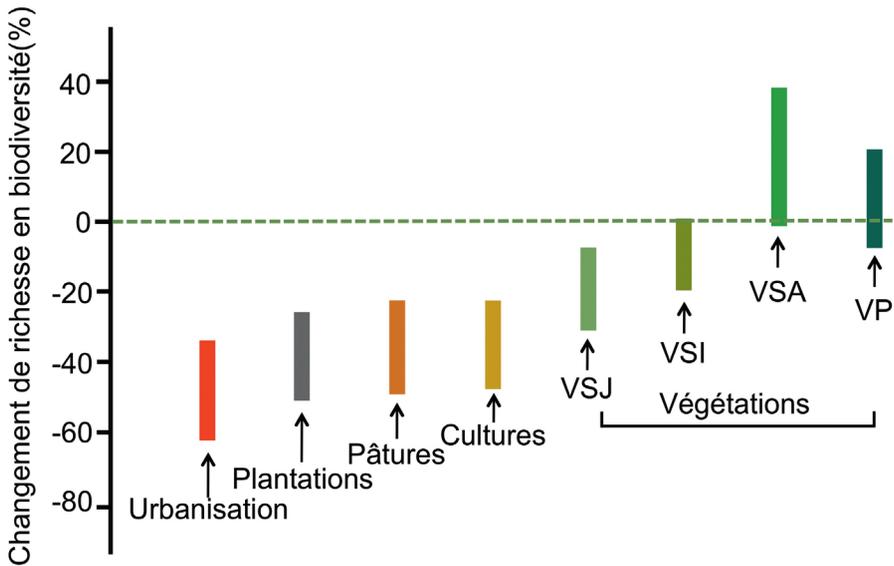


**Figure 6.4 :** Impact du changement climatique sur la diversité de plus de 1 500 **espèces** de plantes prédit en 2080. Avec la courtoisie de W. Thuiller, voir [4].

### 6.2.3. Exploitation des grandes bases de données

La disponibilité et l'analyse de grandes bases de données a permis d'autres percées majeures ces dernières années. Elle a notamment permis la **modélisation** des impacts dus aux changements d'utilisation des terres sur la **biodiversité**. On a ainsi pu exploiter une très grande base de données mondiales, qui compare les **écosystèmes**

non perturbés avec des zones proches transformées par la sylviculture, l'agriculture ou l'urbanisation. Grâce aux modèles développés, on réalise que la transformation des habitats naturels (c'est-à-dire la « végétation primaire ») en plantations d'arbres, en cultures, en pâturages ou en zones urbaines, a généralement des impacts très négatifs sur la **biodiversité** (Fig. 6.5).

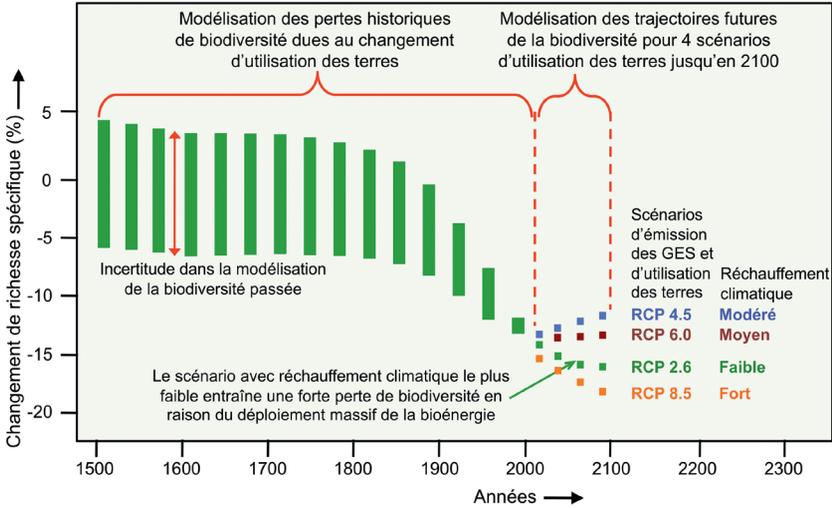


**Figure 6.5 :** Évolution de la richesse en **biodiversité**, c'est-à-dire du nombre d'**espèces** par unité de surface, en fonction du type d'habitat et de l'intensité d'utilisation. La hauteur des barres de couleur correspond à la disparité des données selon les différentes régions du monde. VP = Végétation primaire; VSA = Végétation secondaire adulte; VSI = Végétation secondaire intermédiaire; VSJ = Végétation secondaire jeune. D'après les résultats de [5].

Ce type de **modélisation** exploitant des bases de données massives a été utilisé pour reconstruire les changements passés de la diversité des **espèces** et explorer les impacts potentiels dans quatre **scénarios** futurs développés par le **GIEC/IPCC** (Fig. 6.6). Cette analyse met en évidence deux résultats importants :

(1) les changements passés dans l'utilisation des terres ont entraîné de fortes réductions de la richesse spécifique, en particulier au cours des 100 dernières années (sur lesquelles nous disposons étonnamment de très peu d'observations à l'échelle mondiale) ;

(2) les changements futurs de la richesse des **espèces** pourraient être positifs ou négatifs, mais, étonnamment, le meilleur **scénario** d'atténuation du changement climatique (le **scénario** « RCP 2.6 », en vert) est mauvais pour la **biodiversité**. En effet, la **bioénergie** est utilisée en grande quantité dans ce **scénario** de façon à atténuer le changement climatique. Ceci entraîne, en retour, la perte d'habitats naturels pour faire de la place aux cultures de plantes et d'arbres exploités pour la **bioénergie**.



**Figure 6.6 :** Modélisation des impacts de changement d'utilisation des terres sur la biodiversité. La partie du diagramme en bâtonnets verts correspond à la reconstruction des impacts passés en tenant compte des incertitudes de modélisation. Les courbes de couleur en pointillés (orange, vert, rouge et bleu) correspondent aux évolutions futures prédites de 2020 à 2100 à partir de différents scénarios de modélisation. D'après les résultats de [5].

## 6.2.4. Conclusions

Les développements récents en termes de modélisation de la biodiversité nous amènent aux principales conclusions suivantes :

- Les scénarios et modèles de biodiversité et de services écosystémiques sont des outils importants pour les scientifiques ;
- D'énormes progrès ont été réalisés dans la modélisation de la biodiversité au cours de la dernière décennie, en partie grâce au développement de bases de données massives ;
- Toutefois, l'utilisation de ces scénarios et modèles dans la prise de décision est encore trop limitée ;
- Il devrait être possible d'y remédier par une meilleure évaluation des incertitudes et une communication plus soutenue entre les scientifiques et les décideurs.

## 6.3. Les synergies et antagonismes climat et biodiversité – P. Leadley

L'atténuation du changement climatique et la protection de la biodiversité constituent deux des plus importants défis environnementaux du XXI<sup>e</sup> siècle. Mais les efforts déployés pour atténuer le changement climatique seront-ils bénéfiques

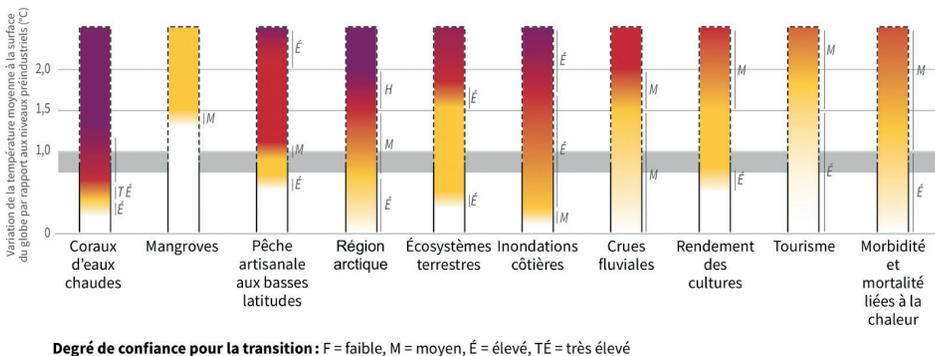
à la biodiversité? À l'inverse, la protection de la biodiversité peut-elle contribuer à réduire le réchauffement climatique?

Pour répondre à ces questions, il est utile de considérer les quatre liens importants, qui ont été mis en évidence entre biodiversité et changement climatique, aussi bien dans les évaluations du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – voir section 9.5) que dans celles de l'IPBES (Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques) :

1. les impacts du changement climatique sur la biodiversité;
2. l'impact des mesures d'adaptation et d'atténuation du réchauffement climatique sur la biodiversité;
3. les solutions fondées sur la nature;
4. les actions sur les causes communes du changement climatique et de la perte de biodiversité.

### 6.3.1. Les impacts du changement climatique sur la biodiversité

La figure 6.7 produite par le GIEC présente, de façon illustrée, l'évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur divers aspects de la biodiversité. Certains écosystèmes comme les récifs coralliens tropicaux et la toundra arctique sont déjà fortement touchés et le seront encore plus gravement dans le cas d'un réchauffement global à 2,0 °C et plus.



**Figure 6.7 :** Incidences et risques du réchauffement climatique pour divers systèmes parmi lesquels des écosystèmes naturels. Les couleurs indiquent si les impacts seront *a priori* faibles (couleur blanche), modérés (jaune) ou élevés (graduellement du rouge au violet). Le niveau de réchauffement considéré va croissant de 0 °C (niveau préindustriel) à 1 °C (niveau atteint au cours du siècle dernier), puis 1,5-2,0 °C (objectifs de l'accord de Paris de 2015) jusqu'à 2,5 °C, qui est la limite inférieure des projections actuelles de réchauffement climatique pour la fin du siècle. Figure extraite du rapport IPCC 2019 pour les décideurs<sup>57</sup>.

57. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf)

### 6.3.2. Impact des mesures d'adaptation et d'atténuation du réchauffement climatique sur la biodiversité

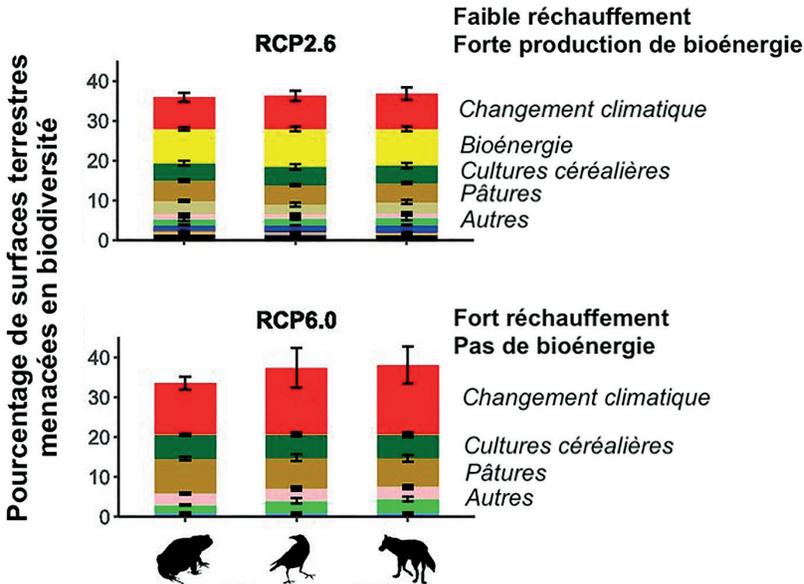
Deux mesures clés sont proposées pour atténuer le réchauffement climatique par la gestion des **écosystèmes** terrestres :

- La première mesure consiste à planter des arbres en grande quantité, c'est-à-dire jusqu'à plusieurs milliards d'arbres. Les arbres capturent, en effet, le **dioxyde de carbone** de l'air et le stockent dans leurs branches, leurs troncs et leurs racines, ce qui est favorable à l'atténuation du climat. Mais trop souvent, en pratique, des peuplements monospécifiques d'**espèces exotiques** sont plantés sur de grandes étendues. Dans d'autres cas, les plantations sont faites dans des zones qui n'étaient pas couvertes de forêts depuis longtemps. Dans ces deux cas, les effets sur la **biodiversité** peuvent être dévastateurs. La plantation d'arbres est donc une bonne idée à condition qu'elle se concentre sur le **reboisement** à partir d'**espèces** d'arbres indigènes.
- La deuxième mesure proposée consiste à remplacer les combustibles fossiles par la **biomasse** à grande échelle, ce qu'on appelle la **bioénergie**. La transformation de la **biomasse** végétale en combustibles liquides ou sa combustion directe à des fins énergétiques peut réduire considérablement la teneur en **gaz à effet de serre** dans l'**atmosphère**, car les plantations ainsi créées captureront en retour le **dioxyde de carbone** émis par combustion. Cependant, la production d'une grande quantité de **bioénergie** nécessite de grands espaces pour les plantations, et induit donc une pression énorme sur les **écosystèmes** naturels, les cultures agricoles et la production alimentaire. La **figure 6.8** représente le pourcentage de la **biodiversité** terrestre qui devrait être touchée par le changement climatique et diverses utilisations des terres en considérant deux **scénarios** : un **scénario** avec **bioénergie** et un **scénario** sans **bioénergie**. On réalise ainsi que la superficie des terres utilisées pour la **bioénergie** peut représenter une menace considérable pour la **biodiversité**.

### 6.3.3. Solutions fondées sur la nature

La protection et la restauration de la **biodiversité** peuvent contribuer à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique dans le cadre de ce qu'on appelle les « solutions fondées sur la nature ».

Un premier exemple est l'importance de la protection des **écosystèmes** naturels et de la restauration des **écosystèmes** dégradés. En effet, les **écosystèmes** naturels intacts stockent une grande quantité de carbone, mais celle-ci est libérée dans l'**atmosphère** lorsqu'ils sont détruits. Les gouvernements ont déjà fixé des objectifs majeurs de protection et de restauration dans plusieurs traités internationaux.



**Figure 6.8 :** Pourcentage de surfaces terrestres qui risquent d'être perdues pour la **biodiversité** des amphibiens, des oiseaux et des mammifères selon deux scénarios. Dans la figure du bas (scénario sans production de **bioénergie**), l'impact dominant sur la **biodiversité** est le changement climatique, car l'utilisation des **énergies fossiles** conduit à des émissions élevées de **gaz à effet de serre** et à un fort réchauffement de la planète. Dans la figure du haut (scénario avec production massive de **bioénergie**), l'impact associé à l'utilisation de grands espaces pour les plantations «**énergétiques**» est de même ampleur que l'impact dû au changement climatique. Source : [6] CC BY-NC-ND 4.0.

Si les gouvernements respectent effectivement ces engagements, cela permettra d'éviter d'importantes émissions de carbone résultant de la conversion des **écosystèmes** et de stocker le carbone dans les **écosystèmes** restaurés.

Un deuxième exemple concerne l'importance de la **diversité génétique** des plantes cultivées et des **espèces** sauvages apparentées aux plantes cultivées. Certains **cultivars** et certaines **espèces** sauvages apparentées aux plantes cultivées sont mieux adaptés aux **climats** chauds et secs que les cultures actuellement utilisées en agriculture (voir plus loin section 10.7.2). Le maintien de cette **diversité génétique** est donc essentiel pour permettre à l'agriculture de s'adapter rapidement au changement climatique.

### 6.3.4. Actions sur les causes communes du changement climatique et de la perte de biodiversité

Il existe des mesures que nous pouvons prendre pour réduire simultanément les pressions sur le **climat** et la **biodiversité**. Considérons, dans ce qui suit, trois exemples qui concernent l'agriculture et l'alimentation et qui seront développés plus loin dans la section 11.2.

Les pratiques agricoles ou agroécologiques durables peuvent contribuer de manière significative à la fois au **climat** et à la **biodiversité**. La replantation de haies délimitant les parcelles cultivées et s'opposant, de fait, aux cultures intensives permet simultanément de stocker du carbone et d'améliorer la **biodiversité**. La réduction de l'utilisation des **pesticides** et l'utilisation d'engrais organiques peuvent également contribuer à redonner vie aux sols agricoles et à augmenter la quantité de carbone qu'ils stockent.

Les régimes alimentaires qui comprennent beaucoup de viande de ruminants comme les bovins et les ovins, nécessitent beaucoup de terre, d'eau et d'engrais, et conduisent à une forte émission de **gaz à effet de serre** par rapport aux régimes alimentaires qui comprennent principalement des plantes ou d'autres types de viande comme la volaille. Par conséquent, changer notre alimentation peut également contribuer, de manière significative, à la protection de la **biodiversité** et à l'atténuation du changement climatique. En outre, cela peut contribuer à améliorer notre santé.

De plus, environ un tiers de la nourriture produite est soit gaspillée, soit avariée. Ainsi, la réduction des pertes alimentaires contribuerait à diminuer la quantité de production agricole et donc à réduire la pression sur le **climat** et sur la **biodiversité**.

### 6.3.5. Conclusion

Pour chacune des actions envisagées, il est difficile de déterminer leurs contributions relatives à l'atténuation du changement climatique et à la protection de la **biodiversité**. Cela étant, le rapport conjoint **GIEC** et **IPBES**, paru en juin 2021, résume ainsi les synergies et les compromis entre ces différentes actions :

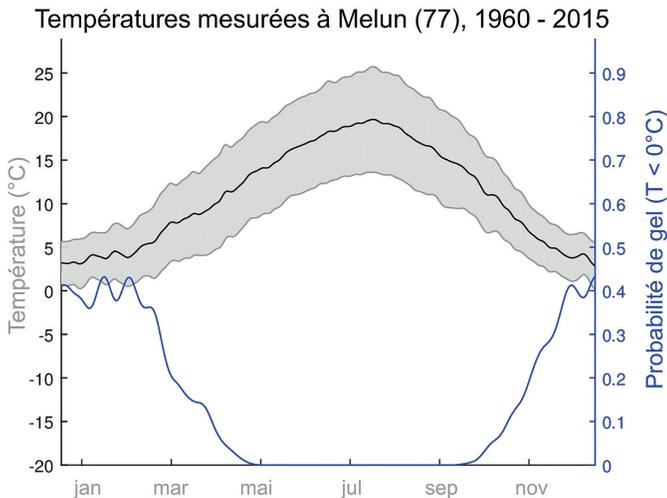
- La réduction importante de l'utilisation des combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz est absolument essentielle pour atténuer le changement climatique ;
- Le **reboisement** à grande échelle peut apporter une contribution majeure au climat, mais doit être déployé avec précaution ;
- La **bioénergie** ne peut apporter qu'une contribution modeste à l'atténuation du changement climatique, sinon il y a un risque élevé d'effets négatifs sur la **biodiversité** et la sécurité alimentaire ;
- Les changements de régime alimentaire peuvent apporter des solutions majeures au **climat** et à la **biodiversité** et présentent peu d'inconvénients, mais sont plus efficaces lorsqu'ils sont associés à une réduction du gaspillage alimentaire.

## 6.4. Comment les arbres répondent aux changements saisonniers ? – N. Delpierre

D'après le MOOC UVED : <http://www.barbeau.universite-paris-saclay.fr/press.html>

### 6.4.1. Les effets du réchauffement climatique sur la feuillaison des arbres

Les arbres sont des organismes immobiles. Ils vivent plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'années, et donc tout au long de leur vie, ils sont soumis à des variations environnementales fortes. Un exemple très clair est celui de l'alternance des saisons. Sur la [figure 6.9](#), on voit bien les variations saisonnières de température que les arbres subissent. En [climat](#) tropical, en général, cela ne pose pas de problème parce que les températures restent élevées toute l'année. Par contre, dans les zones climatiques plus froides, cela peut être problématique. Le risque principal est l'exposition des feuilles au gel. En effet, les jeunes feuilles, lorsqu'elles sont exposées à des températures en dessous de zéro, même modérément de l'ordre de  $-2$  à  $-3$  °C, deviennent nécrosées et doivent être remplacées par l'arbre, car il doit créer une nouvelle cohorte de feuilles au printemps pour pouvoir faire la [photosynthèse](#).



**Figure 6.9 :** Saisonnalité des températures (trait noir) et des probabilités de gel (trait bleu) au cours de l'année sur la station de Melun-Villaroche. Données moyennées sur la période 1960-2015. La zone grisée indique l'amplitude moyenne (températures maximales et minimales) autour des moyennes journalières. Données fournies par MétéoFrance.

C'est un phénomène un peu symétrique qu'on observe à l'automne. L'arbre perd alors ses feuilles qui sont encore riches en nutriments. Chez la plupart des [espèces](#), on observe généralement un jaunissement ou un rougissement des feuilles bien avant l'arrivée des premiers gels. La perte de couleur verte illustre la dégradation

des chlorophylles. Les chlorophylles sont des pigments qui sont riches en azote, et durant la phase de jaunissement, les chlorophylles se dégradent et l'azote se déplace depuis les feuilles vers les branches. Cela permet à l'arbre de réutiliser l'azote au printemps suivant pour la formation de nouvelles feuilles.

Dans ce contexte, on pourrait penser qu'il est avantageux pour les arbres de concentrer leur saison feuillée durant l'été, parce que la probabilité de gel y est évidemment la plus faible. Cependant, la durée de la phase feuillée détermine la capacité de l'arbre à acquérir des ressources durant la [photosynthèse](#). Il en résulte que sa phase feuillée doit commencer assez tôt et finir assez tard pour permettre à l'arbre de pouvoir bénéficier de ressources et se développer. D'autre part, la durée de sa phase feuillée lui permet d'échapper au gel au printemps et à l'automne. Au cours de l'évolution, les arbres se sont adaptés à la saisonnalité des températures et paraissent même suivre, d'une année à l'autre, les variations de température [7]. Ce phénomène est lié à leur plasticité phénotypique, c'est-à-dire le fait que le [génotype](#) d'un individu présente des [phénotypes](#) différents selon les conditions environnementales. Les variations de [phénotype](#) dans ce cas précis sont les variations de dates d'apparition et de chute des feuilles et les variations de conditions environnementales sont les variations de température.



**Figure 6.10 :** Date d'apparition des premières feuilles selon les années. Les printemps les plus chauds, par exemple 2007 et 2011, sont aussi ceux pour lesquels les dates d'apparition des feuilles sont les plus précoces. Source : Jean-Yves Pontailler et Daniel Berveiller, CNRS.

À partir des photos de la [figure 6.10](#), qui ont toutes été prises à la même date du 12 avril pendant des années différentes, on constate que les printemps les plus chauds, par exemple 2007 et 2011, sont aussi ceux qui présentent les dates d'apparition des feuilles les plus précoces. De façon symétrique, les automnes chauds sont associés à des chutes de feuilles plus tardives. Cette capacité qu'ont les arbres à « suivre » les températures, de par leur plasticité phénotypique, se retrouve également sur des séries de données beaucoup plus longues.

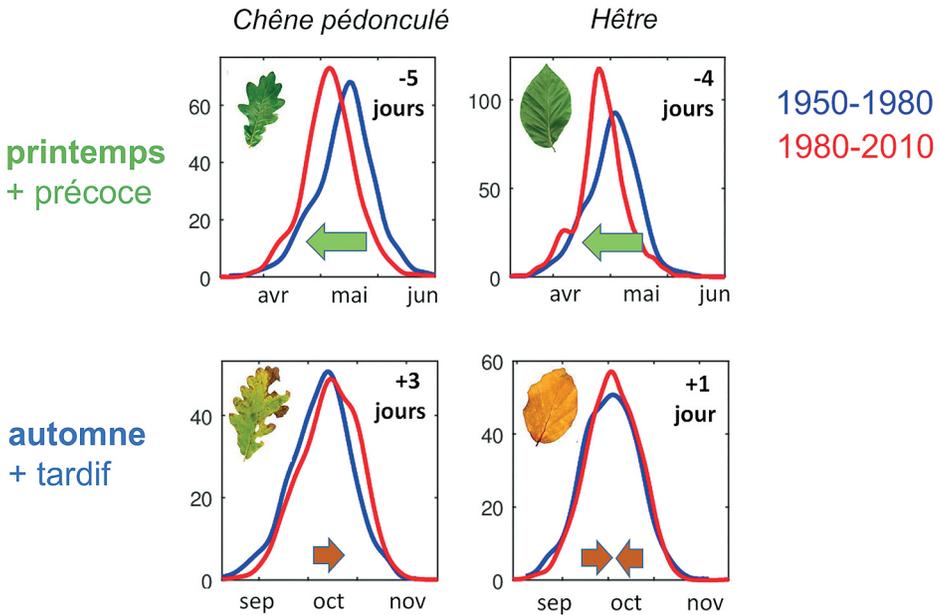
### 6.4.2. Adaptation des arbres au réchauffement climatique ?

Dans le cas du Chêne pédonculé et du Hêtre, on observe des apparitions de feuilles systématiquement plus précoces au printemps sur la période récente 1980-2010, par comparaison à la période précédente 1950-1980 ([Fig. 6.11](#)). On voit le phénomène symétrique à l'automne; les feuilles chutent de plus en plus tardivement, même si le signal est un peu moins prononcé qu'au printemps. Il s'agit bien de manifestations du réchauffement climatique.

Par ailleurs, les arbres répondent de moins en moins fortement à l'augmentation des températures au printemps [8]. Ainsi, dans les années 1980, un réchauffement atmosphérique de 1 °C entraînait une avancée de la date d'apparition des feuilles de 4 jours. Au milieu des années 2000, l'avancée n'était plus que de 2 jours et demi par degré de réchauffement. Ce même résultat marquant est observé sur de nombreuses [espèces](#) d'arbres.

La raison de ce phénomène n'est pas encore absolument claire, mais il est très probable que cette perte progressive de sensibilité des arbres aux températures élevées soit liée à un défaut d'exposition au froid, même si cela peut sembler paradoxal. En effet, les bourgeons d'où vont émerger les nouvelles feuilles au printemps, sont dans un état de dormance durant l'hiver. Cette dormance les empêche de se développer au moindre épisode plus chaud durant l'hiver. La dormance est un mécanisme subtil qui se réduit progressivement avec l'exposition des bourgeons au froid. Ainsi, on sait que les bourgeons, dont la dormance n'a pas été réduite par l'exposition au froid, vont être moins sensibles à l'influence des températures printanières élevées. En conséquence, ces bourgeons vont se développer plus lentement, ce qui conduira à une date d'apparition des feuilles qui sera plus tardive.

Avoir ses feuilles tôt pour un arbre n'est pas forcément un avantage. Considérons une année fraîche et une année chaude. Lors des années avec un printemps plutôt frais, la date d'apparition des feuilles est tardive et le début de [photosynthèse](#) est donc tardif également. Lors des années où le printemps est plus chaud, la date d'apparition des feuilles est avancée, la [photosynthèse](#) commence plus tôt et l'arbre acquiert donc plus rapidement des ressources. Mais la situation change durant la période d'été. En effet, la [photosynthèse](#) qui est un gain de carbone par l'arbre, donc un gain de ressources, se traduit aussi par une perte d'eau.



**Figure 6.11:** Le changement climatique a des conséquences sur l'apparition des feuilles au printemps dans le cas du chêne pédonculé et du hêtre (Données : [www.pep725.eu](http://www.pep725.eu)).

Ce dernier processus s'appelle le phénomène de transpiration des plantes. Si les feuilles de l'arbre arrivent plus tôt, l'arbre assèche le sol et cela induit un stress hydrique durant l'été, qui décroît la **photosynthèse**. Ce comportement – apparition des feuilles plus tôt – stress hydrique durant l'été – est loin d'être systématique, mais il survient certaines années. Il témoigne du fait que l'avancée de la date de **feuillaison** n'est pas forcément un avantage pour les arbres.

La variabilité d'une année à l'autre de la date d'apparition et de la date de chute des feuilles illustre la variabilité de la phénologie des arbres dans la durée, mais il existe aussi, pour une période donnée, une variabilité de la phénologie entre les individus d'une même population [9, 10]. Celle-ci atteint généralement trois semaines. Autrement dit, certains arbres d'une même **espèce**, dans une même forêt, peuvent mettre en place leurs feuilles trois semaines après les autres. Si cette arrivée tardive des feuilles avait été un désavantage, les arbres en question auraient été éliminés par sélection naturelle. Or, il n'en n'est rien, et ce peut même être un avantage lorsqu'il s'agit d'éviter un gel printanier, ou d'échapper à des chenilles prédatrices ou à certains **phytopathogènes**.

Pour suivre les dates d'apparition et de chute des feuilles, ce qu'on appelle la phénologie, mais aussi les dates de floraison, il existe un programme de **sciences participatives**, intitulé **Observatoire des saisons** qui est coordonné par des scientifiques et s'appuie sur des observations qui sont faites par des citoyens.

## 6.5. « Mesurer le souffle » des écosystèmes – N. Delpierre

Les questions relatives au changement climatique et à la dégradation des **écosystèmes** sont intimement liées. Pour l'illustrer, intéressons-nous au bilan carbone d'un **écosystème** forestier, c'est-à-dire la différence entre la quantité de gaz carbonique qu'il absorbe et la quantité qu'il rejette, ce que l'on détecte en mesurant le « souffle » de l'écosystème.

### 6.5.1. Bilan carbone des forêts

Comme l'ont déjà souligné les précédents chapitres de cet ouvrage, les émissions de gaz carbonique ou **dioxyde de carbone** (le CO<sub>2</sub>) produites par les activités humaines sont, pour une grande part, responsables du réchauffement actuel de notre planète. On estime que le CO<sub>2</sub> représente aujourd'hui 26% de l'**effet de serre** global (Section 7.2.1 et Fig. 7.5) et que sa concentration dans l'**atmosphère** a augmenté de plus de 40% depuis le XIX<sup>e</sup> siècle et le début de l'ère industrielle (Section 7.2.1 et Fig. 7.6). Si cette augmentation est principalement due à l'utilisation des combustibles fossiles tel le charbon, le pétrole et le gaz, la déforestation, principalement pour création de zones de pâturage, y participe également. Toutefois, seuls 45% du CO<sub>2</sub> que nous émettons se retrouve dans l'**atmosphère**, car les océans et les **écosystèmes** continentaux en absorbent plus de la moitié [11]. En absorbant le CO<sub>2</sub>, les **écosystèmes**, en particulier les forêts, atténuent le réchauffement climatique en cours, qui serait donc encore bien plus important si les **écosystèmes** ne jouaient pas ce rôle essentiel.

Comprendre comment l'absorption du CO<sub>2</sub> par les **écosystèmes** varie en fonction du temps nous permet de mieux prédire comment cette absorption peut être modifiée par les changements globaux en cours.

Le bilan carbone d'une forêt résulte des processus de **photosynthèse** et de respiration, qui permettent aux arbres et aux organismes « décomposeurs » (insectes saprophages, bactéries et champignons) de se développer (Fig. 6.12).

Le processus de **photosynthèse** assure la formation de sucres dans les feuilles des arbres à partir de lumière, d'eau et du CO<sub>2</sub> qui est présent dans l'air. Il contribue ainsi à l'absorption du CO<sub>2</sub> par l'**écosystème** forestier. Cependant, comme la plupart des êtres vivants, les arbres en forêt produisent aussi du CO<sub>2</sub> qui part vers l'**atmosphère**, car ils respirent par tous leurs organes, les feuilles, les branches, le tronc et les racines. Les décomposeurs, bactéries et champignons, qui se nourrissent des débris de feuilles et de bois produisent également du CO<sub>2</sub> qui part dans l'**atmosphère**. On appelle **productivité nette de l'écosystème**, cette différence entre **photosynthèse** et respiration qui peut être estimée en comparant l'absorption par **photosynthèse** et l'émission par respiration.

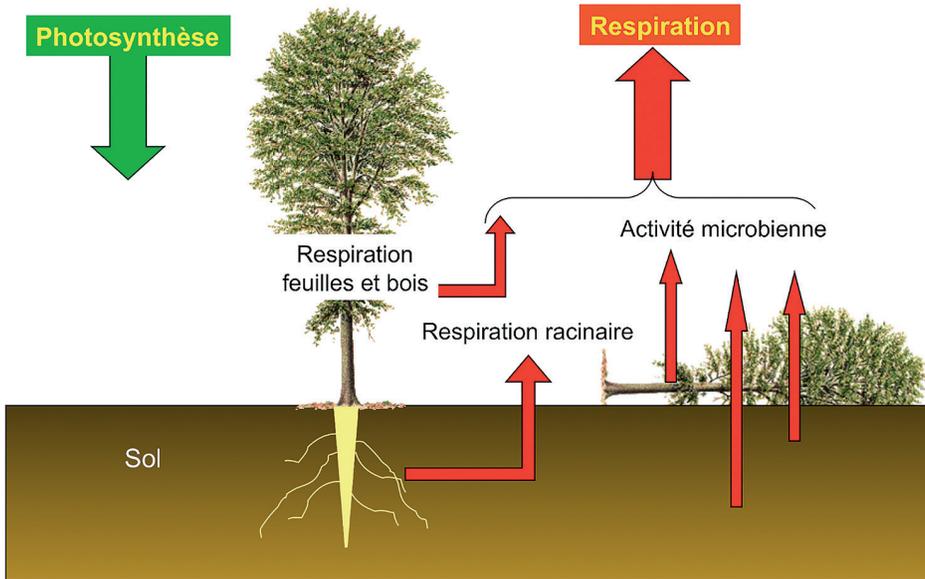


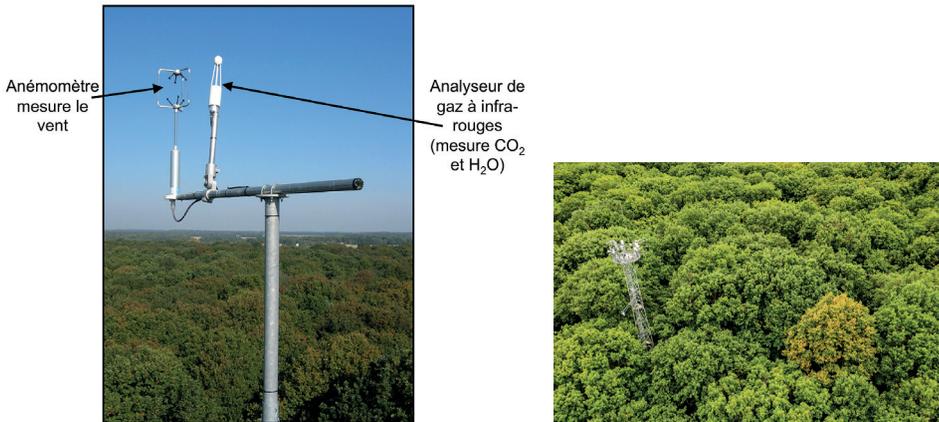
Figure 6.12 : Schéma du bilan carbone d'une forêt. Source : Nicolas Delpierre.

Le « souffle » de l'écosystème est donc, en fait, cette alternance entre absorption de  $\text{CO}_2$  par photosynthèse et émission de  $\text{CO}_2$  par respiration.

Lorsque la photosynthèse est plus intense que la respiration, la quantité de carbone dans l'écosystème augmente et celle dans l'atmosphère diminue. Dans ce cas, la productivité nette est positive. On dit que l'écosystème est un « puits » de carbone, car il absorbe plus de carbone qu'il n'en émet. Dans le cas inverse, lorsque la respiration est plus forte que la photosynthèse, on dit que l'écosystème est une source de carbone pour l'atmosphère. Il « fournit » du carbone à l'atmosphère. La productivité nette est négative.

### 6.5.2. Mesure du « souffle » d'un écosystème forestier

En pratique, pour mesurer le « souffle » d'un écosystème, forêt, prairie ou autres, on utilise un système de mesure *ad hoc* placé au sommet d'une tour, qu'on appelle « tour à flux » et qui domine en hauteur l'écosystème à étudier (Fig. 6.13). Parmi les nombreux instruments utilisés figurent, en particulier, un anémomètre qui mesure la vitesse du vent et un analyseur de gaz à infrarouges, qui mesure la concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'air ambiant. On mesure donc simultanément le déplacement de l'air (le vent) et le  $\text{CO}_2$ . Si les arbres absorbent du  $\text{CO}_2$  par photosynthèse, l'air s'appauvrit en  $\text{CO}_2$  lorsqu'il monte. Si les arbres émettent du  $\text{CO}_2$  par respiration, l'air s'enrichit au contraire en  $\text{CO}_2$  lorsqu'il monte dans l'atmosphère.



**Figure 6.13 :** Appareils de mesures, anémomètre et analyseur de gaz à infra-rouges, placés au sommet de la *tour à flux* en forêt de Barbeau, tout près de Fontainebleau. La *tour à flux* domine la couronne des chênes sessiles qui atteignent une trentaine de mètres de hauteur. La description complète de cette plateforme expérimentale de recherche est accessible sur le site : <http://www.barbeau.universite-paris-saclay.fr/index-fr.html>. Source : Jean-Yves Pontailier et Ivan Cornut.

Le dispositif de mesures, comme celui déployé en forêt de Barbeau (Fig. 6.13), est répliqué à l'identique sur plus de 700 sites dans le monde [12]. Est ainsi constitué un réseau de mesures qui permet aux scientifiques du monde entier d'enregistrer les « souffles » de différents **écosystèmes** et de suivre leurs évolutions avec les variations du climat. Grâce à ces mesures, on constate bien que durant le jour, les forêts sont des **puits de carbone** grâce à la **photosynthèse** provoquée par le rayonnement solaire, alors que durant la nuit, les forêts sont des sources de carbone, du fait de la respiration des arbres et des organismes qui la composent (rappelons que la respiration a lieu aussi bien le jour que la nuit).

On observe également des variations du souffle au fil des saisons. Sur les forêts à feuillage caduc, la **photosynthèse** commence au printemps avec la mise en place des feuilles (Fig. 6.14). Ce n'est qu'à partir de ce moment que la forêt devient un **puits de carbone** et qu'elle absorbe le  $\text{CO}_2$  de l'air. Durant la saison froide, au contraire, la forêt est une source de carbone : elle dégage par sa respiration du  $\text{CO}_2$  vers l'**atmosphère**. Finalement, lorsqu'on cumule les alternances jour/nuit et les saisons, on voit que la forêt est un **puits de carbone**.

Sur une année entière, un mètre carré de forêt fixe environ 300 grammes de carbone (gC) [13]. Cela correspond à la quantité de carbone émise par une petite voiture pour un trajet de 9 km. Si on étend ces calculs à l'ensemble de la forêt de Fontainebleau, qui fait environ 25 000 ha, on peut estimer que l'absorption de gaz carbonique par la forêt ne compense en moyenne que 4 % des émissions de  $\text{CO}_2$  produites lors des trajets routiers en Île-de-France.

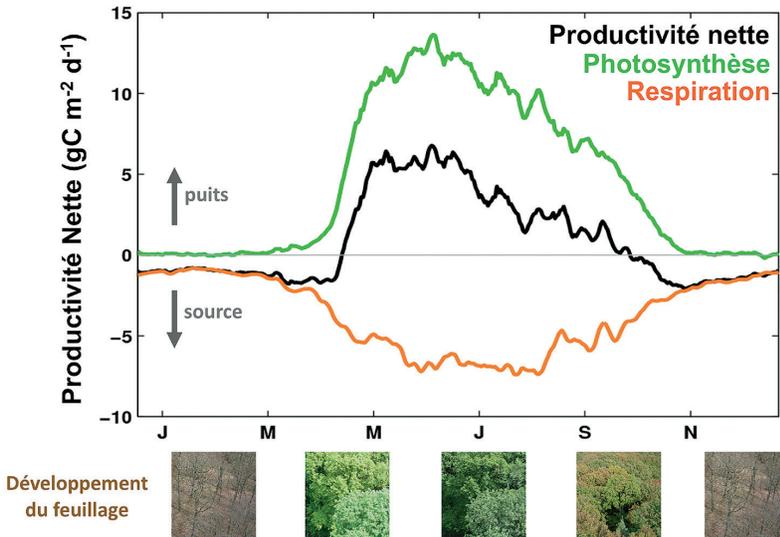


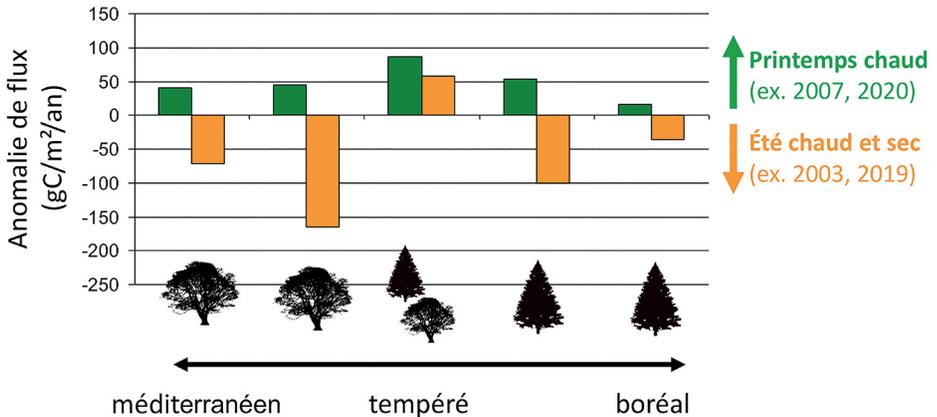
Figure 6.14 : Mesures des échanges de  $\text{CO}_2$  dans la forêt tempérée et caducifoliée de Barbeau près de Fontainebleau. Source : Nicolas Delpierre.

### 6.5.3. Importance des écosystèmes forestiers face au changement climatique

La figure 6.15 met bien en évidence que le changement climatique agit sur la capacité de **puits de carbone** des **écosystèmes**. Par exemple, les printemps chauds, comme celui de 2020, ont tendance à augmenter la fixation de carbone par les forêts ; ce sont les barres vertes sur le graphique. À l'inverse, les étés chauds et secs ont tendance à diminuer la fixation de carbone par ces mêmes forêts : ce sont les barres orange [14].

Les forêts restent, malgré tout, des **puits de carbone** de première importance. Elles absorbent plus de  $\text{CO}_2$  dans l'**atmosphère** qu'elles n'en émettent et contribuent à ralentir le réchauffement climatique en cours. Elles sont néanmoins vulnérables à différents facteurs tels que les émergences périodiques de populations d'insectes ravageurs, ou encore les incendies dont la fréquence et l'intensité augmentent avec le réchauffement climatique. Le réchauffement climatique lui-même provoque des **sécheresses** et **vagues de chaleur** à la fois plus intenses et durables.

Les forêts sont également vulnérables à l'action des humains qui déforeste actuellement des surfaces considérables. En une heure de temps, c'est une surface de forêt équivalant à 530 terrains de football qui disparaît sur Terre. Si nous voulons que les **écosystèmes** forestiers continuent à fixer efficacement du carbone atmosphérique et à atténuer ainsi le réchauffement climatique, il faut impérativement préserver les arbres des agressions et notamment de la déforestation. Pour faire face au réchauffement climatique, les forêts sont nos alliées. Préservons-les !



**Figure 6.15:** Représentation schématique des variations anormales de carbone fixé par les forêts suivant les aléas climatiques. Source : Nicolas Delpierre.

## Références

- [1] D. Couvet, F. Jiguet, R. Julliard, H. Levrel, A. Teyssedre. 2008. Enhancing citizen contributions to biodiversity science and public policy. *Interdisciplinary Science Reviews* **33**(1), 95-103.
- [2] D. Couvet, A.C. Prevot. 2015. Citizen-science programs: Towards transformative biodiversity governance. *Environmental Development* **13**, 39-45.
- [3] **IPBES**. 2016. *Summary for policymakers of the methodological assessment of scenarios and models of biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. S. Ferrier, K.N. Ninan, P. Leadley, R. Alkemade, L.A. Acosta, H.R. Akçakaya, L. Brotons, W. Cheung, V. Christensen, K.H. Harhash, J. Kabubo-Mariara, C. Lundquist, M. Obersteiner, H. Pereira, G. Peterson, R. Pichs-Madruga, N.H. Ravindranath, C. Rondinini, B. Wintle (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany, 32 p.
- [4] W. Thuiller, S. Lavorel, M.B. Araujo, M.T. Sykes, I.C. Prentice. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **102**, 8245-8250.
- [5] T. Newbold, L.N. Hudson, S.L.L. Hill, S. Contu, I. Lysenko, R.A. Senior, L. Borger, D.J. Bennett, A. Choimes, B. Collen, J. Day, A. De Palma, S. Diaz, S. Echeverria-Londono, M.J. Edgar, A. Feldman, M. Garon, M.L.K. Harrison, T. Alhousseini, D.J. Ingram, Y. Itescu, J. Kattge, V. Kemp, L. Kirkpatrick, M. Kleyer, D.L.P. Correia, C.D. Martin, S. Meiri, M. Novosolov, Y. Pan, H.R.P. Phillips, D.W. Purves, A. Robinson, J. Simpson, S.L. Tuck, E. Weiher, H.J. White, R.M. Ewers, G.M. Mace, J.P.W. Scharlemann, A. Purvis. 2015. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature* **520**, 45. <https://doi.org/10.1038/nature14324>.
- [6] Hof, *et al.* 2018. Bioenergy cropland expansion may offset positive effects of climate change mitigation for global vertebrate diversity. *PNAS* **115**(52), 13294-13299.

- [7] N. Delpierre, Y. Vitasse, I. Chuine, J. Guillemot, S. Bazot, C.B. Rathgeber. 2016. Temperate and boreal forest tree phenology: from organ-scale processes to terrestrial ecosystem models. *Annals of Forest Science* **73**(1), 5-25.
- [8] N. Delpierre, J. Guillemot, E. Dufrêne, S. Cecchini, & M. Nicolas. 2017. Tree phenological ranks repeat from year to year and correlate with growth in temperate deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology* **234**, 1-10.
- [9] R. Denéchère, N. Delpierre, E.N. Apostol, D. Berveiller, F. Bonne, E. Cole, ..., G. Vincent. 2019. The within-population variability of leaf spring and autumn phenology is influenced by temperature in temperate deciduous trees. *International Journal of Biometeorology*, 1-11.
- [10] Y.H. Fu, H. Zhao, S. Piao, M. Peaucelle, S. Peng, G. Zhou, ..., I.A. Janssens. 2015. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature* **526**(7571), 104-107.
- [11] P. Friedlingstein, M.W. Jones, M. O'sullivan, R.M. Andrew, J. Hauck, G.P. Peters, ..., S. Zaehle. 2019. Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data* **11**(4), 1783-1838.
- [12] D. Baldocchi. 2008. "Breathing" of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany* **56**(1), 1-26.
- [13] G. Pastorello, C. Trotta, E. Canfora, H. Chu, D. Christianson, Y.W. Cheah, ..., & Y. Li. 2020. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific Data* **7**(1), 1-27.
- [14] N. Delpierre, K. Soudani, C. François, B. Köstner, J.Y. Pontailleur, E. Nikinmaa, ..., E. Dufrêne. 2009. Exceptional carbon uptake in European forests during the warm spring of 2007: a data-model analysis. *Global Change Biology* **15**(6), 1455-1474.