



HAL
open science

Adaptations aux incertitudes climatiques de long terme : trajectoires socio-écologiques de la gestion forestière française

Timothée Fouqueray

► To cite this version:

Timothée Fouqueray. Adaptations aux incertitudes climatiques de long terme : trajectoires socio-écologiques de la gestion forestière française. Biodiversité et Ecologie. AgroParisTech, 2019. Français. NNT : . tel-02457016

HAL Id: tel-02457016

<https://hal.science/tel-02457016v1>

Submitted on 27 Jan 2020

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.

Adaptations aux incertitudes climatiques de long terme : trajectoires socio-écologiques de la gestion forestière française

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à AgroParisTech (l'Institut des sciences et industries du
vivant et de l'environnement)

École doctorale n°581 : agriculture, alimentation, biologie,
environnement et santé (ABIES)

Spécialité de doctorat: Écologie

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 3 décembre 2019, par

Timothée Fouqueray

Composition du Jury :

Sandra Lavorel Directrice de recherche, CNRS (UMR 5553 LECA)	Présidente
Olivier Barreteau Directeur de recherche, IRSTEA (UMR 183 G-Eau)	Rapporteur
Marc Deconchat Directeur de recherche, INRA (UMR 1201 Dynafor)	Rapporteur
Emmanuel Raynaud Directeur de recherche, INRA (UMR 1048 SAD-APT)	Examineur
Valentine van Gameren Docteure (Service public de Wallonie)	Examinatrice
Nathalie Frascaria-Lacoste Professeure, AgroParisTech (UMR 8079 ESE)	Directrice de thèse
Michel Trommetter Directeur de recherche, INRA (UMR 1215 GAEL)	Co-Directeur de thèse

Cette thèse n'aurait pas été possible sans une bourse doctorale financée par l'École Normale Supérieure de Lyon. Les frais de fonctionnement ont été financés grâce à une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'Avenir (LabEx BASC ; ANR-11-LABX-0034).

L'ensemble des travaux qui suivent ont été réalisés entre le 1^{er} septembre 2016 et le 20 octobre 2019. La thèse a eu lieu au sein de l'UMR 8079 Écologie, Systématique, Évolution (ESE, Université Paris-Sud, Agroparistech, CNRS) à Orsay.

Le bilan carbone des déplacements liés aux travaux, conférences et formations de la thèse (collègues et stagiaires inclus) est estimé à 2,1 tCO₂éq. Malgré les limites des démarches de neutralité carbone (Gren & Aklilu 2016), ces émissions ont été compensées par un don à l'association Sylv'ACCTES.

REMERCIEMENTS

Ma gratitude est grande envers toutes celles et tous ceux dont je suis devenu l'obligé, au cours de ces trois foisonnantes années.

Merci à Nathalie Frascaria-Lacoste, prolixie directrice de thèse et virtuose du renforcement positif. Merci d'avoir su aiguiller ma curiosité, de m'avoir ouvert ta porte et ton insondable réseau, et tout simplement de m'avoir offert un accompagnement laissant la place pour une grande liberté scientifique tout ce temps. Merci à Michel Trommetter, co-directeur de cette thèse, de t'être lancé dans une supervision depuis Grenoble, et pour nos discussions élargissant la réflexion aux champs économiques. Merci à Hélène Leriche d'avoir initié et cristallisé cette direction « bicéphale », et surtout pour ces réflexions « à la turque », toujours bienvenues, qui ont ponctué le doctorat.

Merci aux membres du jury de s'être rendus disponibles pour l'important travail que représente l'évaluation d'une thèse : Olivier Barreteau et Marc Deconchat en qualité de rapporteurs, et Sandra Lavorel, Emmanuel Raynaud et Valentine van Gameren comme examinateurs.

Merci à « mes » incroyables stagiaires Antoine Charpentier, Victoria Soubeiran, Émile Huguet et Lucile Génin. Merci d'avoir pris le pari de vous engager dans des projets aux contours parfois flous... Merci pour nos riches échanges, mais aussi pour ces moments absurdes de terrain : je n'oublierai pas l'itinéraire pour rejoindre Obersteinbach, les visites forestières en 4x4-caniche, ni les accents glanés ici et là.

Merci, merci aux forestières et forestiers, propriétaires privés, élu(e)s territoriaux, agents de l'Office National des Forêts sans qui cette thèse ne serait rien. Je me suis engagé à conserver votre anonymat, mais votre patience, votre sens de l'accueil et votre disponibilité à l'égard d'un jeune Parisien aux cheveux longs mériteraient largement que vous soyez cités ici. Merci à la famille Lesparre, ainsi qu'à Jacqueline et Tarek pour votre soutien logistique sur le terrain, ainsi qu'à Marc Kibloff, qui sait si bien parler des forêts qui le font vivre. Merci aux beaux réseaux des parcs naturels régionaux, des communes forestières et des CRPF : Thierry Mougey, Jean-Pierre Génot, Élodie Roulier, Laure Ferrier, Éric Hincelin, et tous les autres.

Merci aux nombreux contributeurs scientifiques des diverses parties de la thèse. Merci à Agnès Fortier : c'est seulement au bout de cette thèse que je commence à percevoir la portée des recommandations prodiguées en première année, qui m'ont fait forte impression. Merci aux membres du comité de suivi de thèse : François Bertrand (et un remerciement supplémentaire pour ce duo tourangeau autour du PNR Loire-Anjou-Touraine), Harold Levrel, Pierre Pech, Anne-Caroline Prévot. Merci à Bruno Villalba et Ambroise de Montbel pour leurs conseils avisés. Je tiens aussi à exprimer ma pleine reconnaissance à la communauté de la modélisation d'accompagnement pour son accueil. Plus spécifiquement, merci à Véronique Souchère pour les conseils sur *Foster Forest* : tu as parfaitement illustré l'aspect « accompagnement » de ComMod. Merci aux Montpelliérains Bruno Bonté, Géraldine Abbrami, Méline Aucante (qui aurait prévu qu'on se revoit ici ?) et Sarah Loudin, d'avoir gracieusement consacré du temps à me partager vos expériences de jeux sérieux. Et puis, merci à Pierre Bommel, ce *WonderCoder* de Cormas. **self cormas warn : 'je t'avais prévenu, à me partager ta joie devant la réussite d'un code parcimonieusement accompli, tu aurais ta place dans les remerciements.'**

Si la thèse est un exercice scientifique, elle n'en reste pas moins un cycle de trois années se déroulant dans un environnement académique. Merci à toutes celles et ceux qui en ont fait un espace bienveillant et très agréable à vivre. Merci à l'école doctorale ABIÉS pour son professionnalisme et la qualité de ses formations.

Remerciements

Merci aux équipes de la Maison d'Initiation et de Sensibilisation aux Sciences, Valérie Fortuna, Élisabeth Delbecq et Sylvie Sikora, ainsi qu'aux créatrices (Sophie Nadot, Hélène Courvoisier, Cécile Michel) des ateliers « Vie dans le sol », « À la découverte des insectes » (et des hexapodes, me dois-je de préciser pour les collemboles) et « Histoire des nombres et des calculs mathématiques ». Merci aux co-animateur(e)s : Aline, Héloïse, Ludmilla, Lydia, Miora, Raphaëlle, Sébastien. De la *masterclass* d'écriture cunéiforme à l'émerveillement des écoliers devant des arthropodes observés à la loupe binoculaire, ces moments à vos côtés ont été de vraies respirations durant la thèse – je paierais pour réentendre les clameurs des CE2 découvrant leurs lombrics.

Merci aux membres du laboratoire Écologie, Systématique, Évolution – et en particulier à Emmanuelle Jestin (grand prix de l'écoute et de la patience informatique), Nathalie Lecat et Sandrine Dessaints pour leur suivi logistique et financier.

Merci à l'équipe Trajectoires Écologiques et Sociétés, pour qui la réflexivité n'a plus de limites (sauf peut-être celle de l'ordre du jour des réunions ?). Vous avez su m'intégrer et m'épauler. C'était bien ! Merci aux permanents, Bruno, Jane, Juan « el Colombiano », Sébastien, Anne-Charlotte et Améline, et bien sûr Samuel, grand collectionneur de hache devant l'Éternel. À quand une démonstration de *Leveraxe*[®] ? Et bien entendu, merci aux « non-permanents » qui ont su créer et maintenir l'ambiance, même quand le RER-B faisait des siennes : Angevine (la musique adoucit les moeurs¹), Pauline aux-pouces-verts, Roxane, mentor forestière, scientifique et culinaire. Merci à Julie d'avoir joué le jeu, au sens propre, ce qui aura permis des déplacements uniques (qu'est-ce qui t'auras le plus marqué, entre la salade vosgienne, le saucisson de foie de Foix et le bison de 13000 ans ?), mais toujours pas de discriminer qui est le plus gourmand des deux. Merci à Pierre охотился, aux multiples facettes, dont le billard et l'interdisciplinarité ne sont pas les moindres. Et quel doctorant serais-je sans le bureau 320 et son tableau périodique des chocolats ? Merci à Antoine « el Galio », dont l'élégance dark-rock n'a d'égale que la grande culture. 谢谢 to Ying-Chu « Chouchou » for all the shared laughs and weird Taiwanese food items. Tack beaucoup à Sarah, a.k.a. “P-Kogz”, pour ses histoires creusoises, pour le compost (oui oui), pour les lectures damasioniques et cet avenir professionnel tout tracé vers un laboratoire interdisciplinaire alternatif. Mohamed, Samia, Pierre, Sarah, et un peu Antoine et Anaël : tout le meilleur pour la suite et la fin de vos thèses respectives.

Enfin, merci à celles et ceux qui ont été de ce drôle de quotidien de thésard.

Merci aux SPES (si je vous cite en premier, c'est par peur des représailles), aux Copainus, aux Lyonnais, aux Cartésiens, aux Tourangeaux, à toutes et à tous. Force & Honneur à Célian pour cette traversée rédactionnelle faite de mots fléchés, d'un plâtre, de kombucha et de bière sans alcool, et merci pour ces dix ans de *moneytime*. Merci à Simon pour ton recul et ta constructivité – sans parler des courges des Trois Parcelles. Merci à Matthias pour le martelage de l'Oursière. Merci à Pierre Candelon pour la fine relecture.

J'ai l'extrême chance d'avoir grandi dans une famille aimante, encourageante, et, osons le dire, pleine d'humour. Merci à mes parents, pour cette très bonne idée d'avoir eu un petit quatrième. Votre soutien m'est cher. Maud, Anna, Vic, je vous dois tant. Merci.

Jeanne, tant de chemin parcouru depuis ces premières explications hasardeuses sur la résilience des socio-écosystèmes. Qui m'aurait dit, il y a trois ans, que tu serais en dernière place dans les remerciements ? Merci de m'avoir partagé avec les forêts. Ta présence malicieuse et complice est une chance inestimable.

¹ Une *playlist* musicale dédiée aux thématiques de cette thèse est disponible à ce lien : https://www.deezer.com/fr/playlist/2756745004?utm_source=deezer&utm_content=playlist-2756745004&utm_term=6055489_1571597376&utm_medium=web

RÉSUMÉ

Les trajectoires socio-écologiques des forêts sont considérablement dépendantes des pratiques sylvicoles retenues par leurs gestionnaires. Or, ces choix de gestion sont susceptibles d'évoluer afin de prendre en compte les impacts des dérèglements du climat sur les milieux forestiers. L'objectif des travaux qui suivent est donc de comprendre les évolutions de la gestion forestière induites par les adaptations aux changements climatiques (ACC). Ils se concentrent sur la France métropolitaine, dont les forêts sont l'un des écosystèmes les plus importants – elles en couvrent un tiers de la surface.

Trois thématiques de recherche ont permis de décliner cette problématique : (1) la diversification des ACC (quels biens et services écosystémiques forestiers (BSE) ciblent-elles ?) ; (2) l'importance accordée par les forestiers aux approches techniques, en comparaison des réflexions portant sur l'organisation socio-économique de la gestion forestière ; et enfin (3) l'intégration des dynamiques écologiques dans la conception et la mise en œuvre d'adaptations aux changements climatiques.

Chapitre 1 : Recensement, par des enquêtes de terrain, des ACC en forêts privées et publiques. Les adaptations répertoriées concernaient seulement quelques-uns des nombreux BSE forestiers, au premier rang desquels la production de bois, le stockage de carbone et la préservation des habitats naturels. Ces adaptations étaient avant tout mises en place pour répondre à des aléas climatiques déjà vécus par les forestiers. Surtout, ces adaptations relevaient d'évolutions des techniques sylvicoles, où les humains interviennent sur le socio-écosystème forestier, en modifiant les composantes naturelles.

Chapitre 2 : J'ai étudié le financement public des projets de recherche portant simultanément sur les changements climatiques et sur la foresterie. J'ai montré qu'une des causes du manque de considération des aspects socio-économiques de l'ACC est la prééminence de recherches techniques, très peu tournées vers les services écosystémiques socio-culturels, de régulation ou de soutien.

Chapitre 3 : Retour au terrain, pour une étude de cas sur le paiement pour stockage de carbone. J'ai mis en relief comment la diversification des revenus engendrée par ce type d'innovation est un moyen indirect pour les forestiers de s'adapter aux changements climatiques, en diminuant leur dépendance à une production ligneuse fortement menacée par les dérèglements climatiques. Les atouts, mais aussi certaines limites techniques et conséquences socio-économiques de cette approche ont été soulignés.

Chapitre 4 : Synthèse des apprentissages des chapitres précédents, grâce à la création d'une simulation participative de gestion forestière. Dans *Foster Forest*, divers acteurs de la gestion forestière sont plongés dans un scénario de fort changement climatique. Pour mener à bien leur propre mission, ils disposent d'une panoplie de pratiques sylvicoles inspirée de pratiques usuelles, mais qui ne suffisent pas à faire face aux perturbations climatiques. Pour compenser, les participants ont toute liberté de proposer des changements des règles du jeu afin de faire évoluer l'organisation socio-économique de leurs activités forestières. La dizaine d'applications de cette simulation participative, dans différentes régions françaises, a permis de confirmer les résultats des chapitres précédents. Les parties jouées ont aussi apporté un éclairage sur l'importance des structures d'animation territoriale dans l'élaboration de projets d'adaptations, à des échelles complémentaires des seules visions « à la parcelle ».

SUMMARY

Adapting forest management to climate change (CC) is a key issue, as forests are crucial for mitigation policies and the provision of many ecosystem services (ES). Understanding the magnitude of the progress made in this respect can help shape further adaptation developments and avoid the putative maladaptive side effects of forest management evolutions. Here, I aim to bridge the knowledge gap of adaptation implementation in French forests.

Chapter 1: Based on semi-structured interviews with foresters, my findings highlight unprecedented aspects of adaptations: (i) a focus on productive ES at the expense of other essential services such as water supply or natural habitats; (ii) adaptations rely on technical changes in forest management and do not deal with climate impacts through organizational or economic tools; and (iii) envisaging ecological processes through adaptations is instrumental and limited to small spatial and temporal scales. My results also extend the existing body of knowledge to the framework of forest management: (i) CC is not the main driver of forestry changes; (ii) extreme events are windows of opportunity to stimulate adaptive changes; and (iii) proactive adaptation to unexperienced hazards is very weak.

Chapter 2: Assessment of the diversity of research projects in the forest sciences focusing on CC. I categorized projects according to discipline and main focus, using data from the online description of French public calls for proposals and from selected projects. Since 1997, mitigation research has gradually given way to adaptation. Despite pledges for the inclusion of social sciences, research rarely draws on the social sciences and focuses on ES of economic interest. Biomass production is paramount, being addressed either directly or through projects on tree species of industrial interest. Hence, instead of a diverse search for adaptation strategies, climate research is geared toward a few ES. Without denying the need for timber and biofuel production, I encourage public funders to complement current calls for proposals with more diverse approaches beneficial for both biomass production and other ES.

Chapter 3: I study how multiple mechanisms for the mitigation of CC have been developed, drawing on a combination of reducing and offsetting greenhouse gas (GHG) emissions. While mechanisms are mandatory for certain economic sectors, some business that are not required to mitigate their GHG emissions would nevertheless like to do so. I examine two study cases in France to analyze how public and private foresters seized this opportunity to obtain complementary funding from such companies for forestry operations. I focus on offset contracts issued by associations linking public sector forestry agencies, forest landowners, and offset funders. Carbon mitigation was a reason shared by all contractors to commit to the agreement, although it concealed multifarious motivations. Hence, I argue that voluntary offset contracts act like a Trojan horse by enabling foresters to dialogue with entities that would otherwise not be interested in supporting forest management. Regional embedding was crucial to overcoming the mitigation challenges.

Chapter 4: To gain insight on how can socio-economic adaptive tools complement technical evolutions of forestry, I designed *Foster Forest*, a participatory simulation of forest management. It combines a role-playing game, an agent-based model, and a scenario of CC with high uncertainties. Drawing from multiple applications in French regions, I show that climate change is not a short-term matter of concern for private and public foresters. I analyze the emergence of socio-economic changes (mainly payment for carbon storage) in the provision of ES, and participants' negotiations to spontaneously change the simulation rules. I also highlight how collective adaptive action was steered by stakeholders with a public interest role.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	3
RÉSUMÉ	5
SUMMARY	6
PRÉAMBULE	11
INTRODUCTION	15
1. Les forêts françaises & le paradigme gestionnaire	16
1.1. <i>La forêt en France métropolitaine</i>	16
1.2. <i>La foresterie, des interventions sur le vivant</i>	19
1.3. <i>La multifonctionnalité des forêts françaises, une forme de dissonance cognitive ?</i>	27
1.4. <i>Les forêts, des socio-écosystèmes</i>	32
2. L'adaptation aux changements climatiques	38
2.1. <i>Impacts des dérèglements climatiques sur les forêts</i>	38
2.2. <i>Adaptations biologique & stratégique, les deux côtés d'une même médaille</i>	44
2.3. <i>La gestion forestière, parangon de l'adaptation aux changements climatiques</i>	48
3. Objectifs scientifiques & structuration de la thèse	51
3.1. <i>Problématique & questions de recherche</i>	51
3.2. <i>Proposition méthodologique</i>	52
3.3. <i>Structuration de la thèse</i>	57
CHAPITRE 1 : THE CALM BEFORE THE STORM : HOW CLIMATE CHANGE DRIVES FORESTRY EVOLUTIONS	61
1. Introduction	65
2. Materials and methods	66
2.1. <i>Study cases</i>	66
2.2. <i>Data collection</i>	67
2.3. <i>Characterization of evolutions in forest management</i>	68
3. Forestry evolutions not driven by climate change adaptations	69
3.1. <i>Mainstreaming of forest management in the timber industry</i>	69
3.2. <i>Climate change adaptation: Reaction first</i>	70
4. A narrow focus of adaptation on timber production and technical changes	73
4.1. <i>Adaptation: Change of practices, continuity of objectives</i>	73
4.2. <i>Adapters differ in terms of the intensity of management</i>	75
4.3. <i>Foresters are between a rock and a hard place</i>	75

Table des matières

5.	Ecological processes are instrumental to adapt at small spatiotemporal scales _____	76
5.1.	<i>An instrumental vision of ecological processes in adaptive changes</i> _____	76
5.2.	<i>Impacts of climate change adaptations on ecological processes</i> _____	77
6.	Conclusion _____	79
 CHAPITRE 2 : BLIND SPOTS OF STRATEGY-ORIENTED FUNDING NARROW RESEARCH ON FORESTRY AND CLIMATE CHANGE _____		 83
1.	Introduction _____	87
2.	Material and methods _____	89
2.1.	<i>Contents of the calls for proposals</i> _____	89
2.2.	<i>Collecting data on funded projects</i> _____	89
2.3.	<i>Data categorization</i> _____	90
2.4.	<i>Social and economic approaches</i> _____	91
3.	Results _____	92
3.1.	<i>Catch-all calls for research projects</i> _____	92
3.2.	<i>Predominance of environmental science approaches</i> _____	93
3.3.	<i>Research projects prioritizing adaptation instead of mitigation</i> _____	94
3.4.	<i>Main focus of climate change and forestry research projects</i> _____	94
3.5.	<i>Temporal evolution of climate change-related forest projects</i> _____	94
4.	Discussion _____	95
4.1.	<i>Project funding as a proxy of research efforts</i> _____	95
4.2.	<i>Adaptation dominates climate and forestry research</i> _____	95
4.3.	<i>Social sciences: The blind spot of strategy-oriented research</i> _____	97
5.	Conclusion _____	98
 CHAPITRE 3 : VOLUNTARY CARBON OFFSET CONTRACTS: TROJAN HORSES TO FUND FRENCH FOREST MANAGEMENT _____		 105
1.	Introduction _____	108
2.	Material and methods _____	110
2.1.	<i>Selection of study cases</i> _____	110
2.2.	<i>Data collection</i> _____	111
2.3.	<i>Data analysis</i> _____	111
3.	Results and discussion _____	112
3.1.	<i>When carbon offsets fund forestry operations</i> _____	112
3.2.	<i>As many motivations as contractors</i> _____	114
3.3.	<i>Offset contracts tackling long-standing forestry and mitigation issues</i> _____	117
3.4.	<i>Scaling up: Mind the step</i> _____	121
4.	Conclusion _____	124

CHAPITRE 4: <i>FOSTER FOREST</i> , A PARTICIPATORY SIMULATION OF ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN FORESTRY	127
1. Introduction	132
2. Collective construction of the conceptual model	134
2.1. <i>A social-ecological framing of stakeholders' interdependencies</i>	134
2.2. <i>Building the conceptual model</i>	135
2.3. <i>A model restricted to five providers of ecosystem services</i>	136
3. The agent-based model behind <i>Foster Forest</i>	137
3.1. <i>Model classes and calibration sources</i>	137
3.2. <i>Computerized processes and players' actions</i>	139
3.3. <i>Testing the calibration and scenarios</i>	142
4. Foster Forest, a participatory simulation with a role-playing game	143
4.1. <i>Temporal organization of the participatory simulations</i>	143
4.2. <i>Spatial organization of the participatory simulations</i>	144
5. Preliminary results from the nine study cases	145
5.1. <i>Study cases analysis</i>	145
5.2. <i>Lessons learned from the study cases</i>	146
6. Conclusion	150
DISCUSSION	167
1. L'adaptation aux changements climatiques renforce le paradigme gestionnaire de la foresterie	169
1.1. <i>Trente ans de changements climatiques en forêt</i>	170
1.2. <i>Une diversification toujours plus technique</i>	174
1.3. <i>L'adaptation, révélatrice d'une foresterie xylophage</i>	177
2. Trois propositions pour diversifier l'adaptation de la gestion forestière aux dérèglements climatiques	183
2.1. <i>Distinguer gestion sylvoicole et gestion forestière</i>	183
2.2. <i>Faire de la rencontre avec les non-forestiers une chance, non pas un risque</i>	186
2.3. <i>Accompagner la gestion adaptative, au risque du politique</i>	188
3. Trois propositions pour étendre l'écologie de la conservation à une écologie de la conversation	195
3.1. <i>L'adaptation aux changements climatiques, un laboratoire à ciel ouvert pour l'écologie forestière</i>	195
3.2. <i>Relier le débat land-sharing/land-sparing à la multifonctionnalité</i>	197
3.3. <i>Les multiples propriétés du droit de propriété</i>	200
CONCLUSION	207
BIBLIOGRAPHIE	209
ACRONYMES	247
IMAGIER	248

Table des matières

LISTE DES FIGURES	249
LISTE DES TABLEAUX	250
ANNEXES	251
1. Un Parc Naturel Régional en apprentissage : enseignements d'une démarche d'adaptation aux changements climatiques des actions en faveur de la biodiversité	253
2. Managed retreat of settlements and infrastructures: ecological restoration as an opportunity to overcome maladaptive coastal development in France	269
3. La thèse interdisciplinaire en sciences de l'environnement, des défis à relever et des opportunités à saisir : regards de doctorants	277
4. Solutions Fondées sur la Nature (SFN)	291

PRÉAMBULE



Que faire, quand les certitudes vacillent : conforter ses points forts, travailler ses faiblesses ? Voici en quelque sorte le dilemme auquel les forestiers sont aujourd'hui confrontés, et qui vient ajouter un sujet de préoccupation à leurs deux problèmes les plus fréquents.

Le premier problème ne leur est pas spécifique, car il s'agit de tenir compte des contraintes économiques leur imposant un équilibre budgétaire. Le deuxième est de répondre aux demandes sociales en assurant la relative multifonctionnalité des espaces forestiers. Bien que ce deuxième sujet d'attention soit lui aussi connu de longue date, sa couverture médiatique s'est intensifiée ces dernières années (Figure 2).

Cependant, une troisième difficulté vient là encore troubler l'usuelle mise en retrait des gestionnaires forestiers à propos des questions sociales : les dérèglements du climat. L'expérience de la gestion forestière a pu être accumulée durant des siècles grâce, entre autres, à la constance du climat. Mais voici que les perturbations des régimes climatiques viennent bousculer les certitudes établies : comment favoriser les arbres les plus aptes à se régénérer et à croître dans les lieux que l'on croyait connaître, mais qui changent lentement ? C'est là l'une des nombreuses questions auxquelles les gestionnaires des forêts doivent aujourd'hui faire face, et en fonction de laquelle certains d'entre eux veulent, peuvent – et parfois ont déjà mené – une évolution de leurs pratiques de gestion. Tout porte à croire que la transformation de la foresterie, sous la contrainte mais aussi le prétexte de l'adaptation aux changements climatiques, ne sera pas sans conséquences sur ces milieux naturels.

La présente thèse délaisse l'étude des impacts directs des dérèglements climatiques sur les forêts. Elle s'intéresse plutôt à un sujet proche : les conséquences, sur la gestion forestière, des adaptations *des forestiers* aux changements climatiques. Considérant l'adaptation comme un mouvement et non pas un état de la gestion forestière, elle en explore l'origine, la dynamique, les fins, et les chorégraphes.

Plusieurs des propos qui suivent interrogent la place d'une approche de la foresterie qui se cantonnerait uniquement à la technique et à la production de bois. Le terme « uniquement » est ici essentiel. Je n'idéalise pas une forêt laissée à elle-même, dont la vocation productrice de bois serait reniée. La noblesse et la modernité des nouveaux usages de ce matériau en font l'une des plus pertinentes réponses aux préoccupations écologiques de notre époque.

Que le lecteur veuille bien me pardonner les détours historiques, politiques ou sociaux de l'introduction qui suit. À dresser la cartographie d'un sujet aussi riche que la foresterie, on encourt le risque d'en perdre un itinéraire lisible. Pour éviter cela, des encarts, régulièrement disposés, balisent les différentes sections et en restituent l'essentiel. Par ailleurs, et en cas de besoin, un imagier présente dans ses grandes lignes la diversité des peuplements forestiers abordés dans la thèse (Figure 32).

Figure 1. (En exergue) Des forêts qui se déplacent : l'inimaginable a bien lieu.

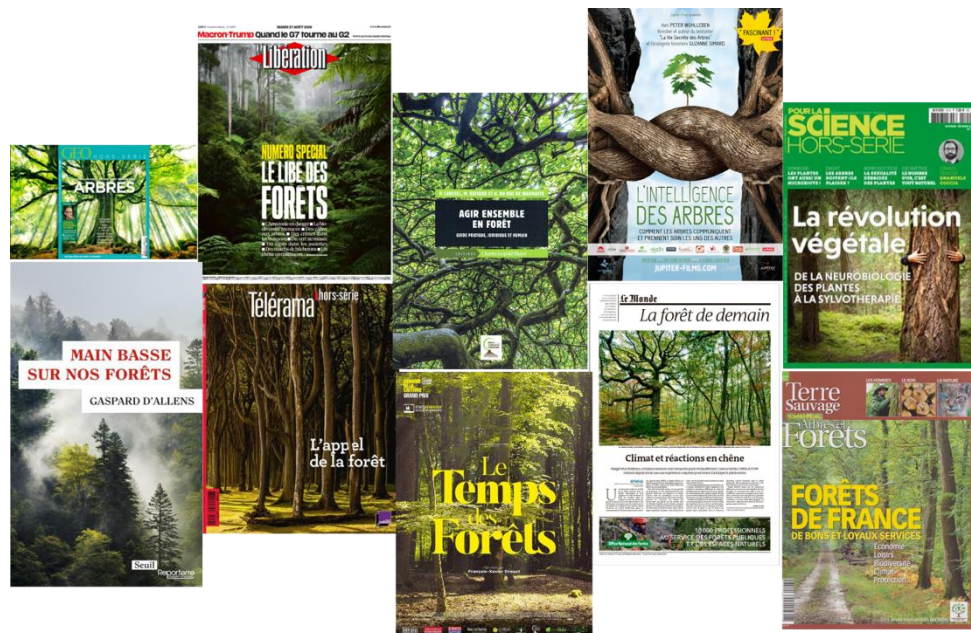
Macbeth, héros de la tragédie éponyme de Shakespeare, s'exclame à la scène 5, acte V : « *Je chancelle en résolution. Je commence / À soupçonner le double jeu de l'ennemi / Qui ment semblable à la vérité : « Ne crains rien / Jusqu'à ce que la forêt de Birnam / Arrive à Dunsinane » ; et voilà la forêt / Qui va vers Dunsinane. Armez ! armez ! sortez ! / Si cela qu'il s'annonce est en train d'arriver / On ne peut plus fuir d'ici, non plus rester ici. / Ah, je commence à être lassé du soleil, / Et je voudrais que tout l'état du monde fût défait.* ».

Image : contes d'Olaus Magnus.

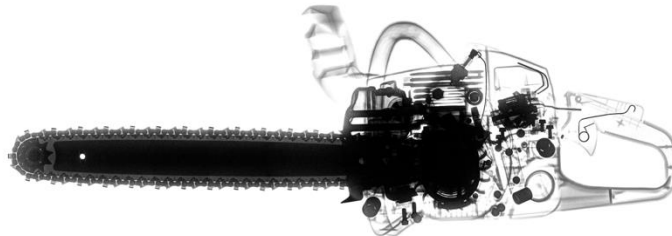
Figure 2. Échantillon de la couverture médiatique et audiovisuelle des thématiques forestières durant le doctorat.

Journaux de tous horizons, publications d'ouvrages, conférences grands publics et même films : s'ils n'indiquent pas rigoureusement l'intérêt de la société pour les thématiques forestières, les médias ont cependant le mérite d'en souligner les variations. De nombreux facteurs peuvent expliquer ce récent regain d'attention pour les forêts. Les réponses sont nombreuses et simultanées, et sont entre autres à chercher du côté d'une demande croissante de « milieux naturels » de la part d'urbains qui en sont souvent éloignés ; du développement des problématiques de stockage de carbone, dont la forêt est un des moteurs essentiels ; mais aussi du refus d'une mise en économie, parfois fantasmée, parfois fondée, des forêts.

Images tirées des sites internet des éditeurs et distributeurs (de bas en haut, de gauche à droite : geo.fr 2019, seuil.com 2019, liberation.fr 2019, telerama.fr 2018, alternativesforestieres.org 2018, kmbofilms.com 2018, jupiter-films.com 2016, lemonde.fr 2017, pourlascience.fr 2018, terre-sauvage.com 2011).



INTRODUCTION



La technique occupe une place prépondérante dans la gestion forestière et dans l'adaptation aux changements climatiques. Ici, la vision de l'artiste allemand Sebastian Wanke, issu d'une famille de bûcherons.

De haut en bas : hache, sapie, masse-merlin, tronçonneuse (vue de côté et de dessus).

Crédit photographique : S. Wanke, *You Can't Stop Steel* et *Husqvarna 445*.

1. Les forêts françaises & le paradigme gestionnaire

Forestry is not about trees, it's about men.

J. Westoby, cité par C. Barthod (2015)

1.1. La forêt en France métropolitaine

Pour l'écologie, la forêt constitue avant tout un continuum de micro-habitats s'étalant tout du long des strates forestières. Les racines, mais aussi la canopée, limitent l'érosion des sols et favorisent la constitution des horizons humiques, dont dépendent arthropodes, champignons, bactéries et autres vers. Troncs et branches fournissent cavités sèches et dendrotelmes aux oiseaux, insectes ou mammifères (dont les chauve-souris), tandis qu'une diversité végétale, de la pédoflore aux épiphytes, vient s'insérer dans ce réseau vivant (Kraus et al. 2016). La vision de l'écologie sur la forêt intègre donc bien les arbres comme espèce ingénieure, sans pour autant sous-estimer les autres compartiments. Le sol, en particulier, est trop souvent oublié dans les discours forestiers (Soulé 1985; van der Linde et al. 2018).

Si cette définition répond aux exigences des sciences écologiques, elle ne suffit pas pour aborder les multiples autres visions issues d'autres disciplines. Malgré sa rigueur, le droit français bute sur la complexité d'une définition de la forêt, au point de s'abstenir d'en donner une signification précise (Légifrance 2012b). En cas de besoin, les juges peuvent privilégier une approche pragmatique, en se référant à l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, qui déclare que « *La forêt est un territoire occupant une superficie d'au moins 50 ares avec des arbres pouvant atteindre une hauteur supérieure à 5 mètres à maturité in situ, un couvert boisé de plus de 10 % et une largeur moyenne d'au moins 20 mètres. Elle n'inclut pas les terrains boisés dont l'utilisation prédominante du sol est agricole ou urbaine.* » (Conseil Supérieur du Notariat 2018). On voit ici que les problématiques écologiques d'interactions entre strates, habitats ou espèces ne sont pas centrales pour la définition des politiques publiques touchant aux forêts. Faute de mieux, c'est pourtant cette définition que l'Inventaire Forestier National (IFN) a retenue pour cartographier l'immensité et la diversité des écosystèmes forestiers français.

En métropole², l'IFN répertorie 16,9 millions d'hectares de forêts (plus d'un tiers de la surface du territoire), ce qui fait de la France le 4^{ème} pays le plus boisé d'Europe (Figure 3). L'IFN distingue tout d'abord les forêts en fonction du type de la propriété : 9% de la surface sont la propriété privée

² Le propos ne portera pas sur les forêts ultramarines françaises, malgré leur richesse biologique et la multiplicité des usages et des risques dont elles font l'objet.

de l'État (forêts domaniales), 16% appartiennent aux collectivités publiques, le reste étant détenu par des propriétaires privés (personnes morales ou physiques). Les surfaces privées sont distribuées entre 3,5 millions de propriétaires ; trois quarts de ces forêts sont possédées par 10% des propriétaires. Au-delà des seules considérations foncières, les données de l'inventaire indiquent que 136 espèces différentes d'arbres sont recensées, la plupart feuillues, le chêne venant en tête des essences les plus répandues. Les peuplements mélangés constituent seulement près de la moitié des forêts. Une proportion considérable de la forêt française est jeune, 16% des surfaces ayant moins de trente ans. Le taux de boisement, lui, diffère selon les régions (Figure 4) (IFN 2018).

Cet état de fait est le produit d'une longue histoire durant laquelle des processus écologiques maintenant bien identifiés ont été les principaux facteurs de changement : cycles du carbone et de l'azote, isolements génétiques, spéciations sympatriques et allopatriques, *etc.* Les approches biogéographiques ont aussi mis en évidence comment les glaciations ont forgé le visage actuel des forêts européennes (Davis 1983). Sans remonter jusqu'à l'origine des forêts de progymnospermes, au Dévonien (400 millions d'années *Before Present*), il importe de reconnaître la place qu'occupent aujourd'hui encore ces considérations dans quelques-uns des débats entre forestiers. Revenir aux archives géologiques est en effet l'occasion de faire référence à un « état de nature » des forêts françaises, datant d'avant l'arrivée des humains en Europe il y a de cela plus de 40 000 ans (Higham et al. 2011). Cet état de référence des forêts a ainsi pu être mobilisé par les tenants du maintien de forêts dominées par le hêtre (*Fagus sylvatica*), sous prétexte de sa naturalité originelle.

Ces paramètres géologiques ou évolutifs de long terme ont cependant un bien faible impact sur les trajectoires actuelles des milieux boisés par rapport à la gestion forestière (Western 2001).

Les écosystèmes forestiers occupent une très grande place en France métropolitaine. La diversité des conditions spatiales et géologiques explique leur grande richesse biologique. La propriété, elle, est très majoritairement privée.

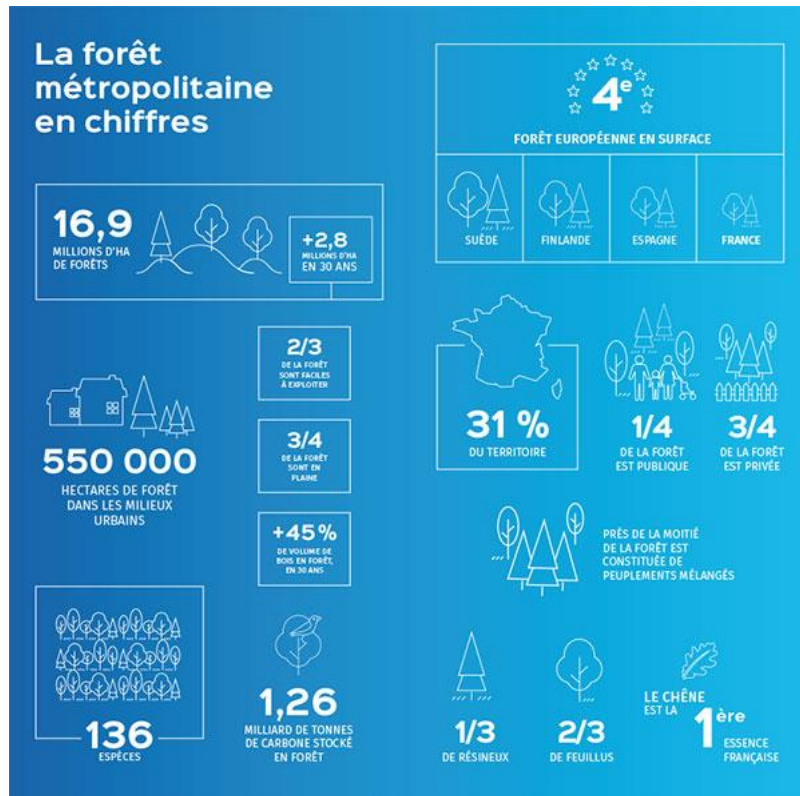


Figure 3. La forêt métropolitaine en chiffres.

Données pour l'année 2018. Source : site internet de l'Inventaire Forestier National, <https://inventaire-forestier.ign.fr>

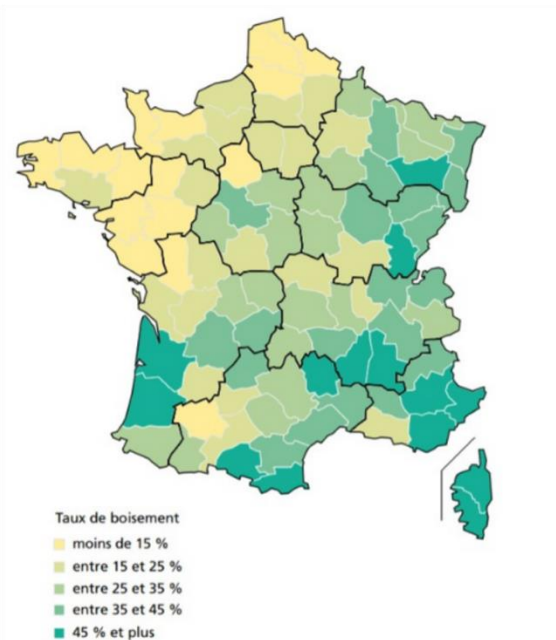


Figure 4. Taux de boisement des départements métropolitains.

Figure tirée et modifiée du *Mémento de l'Inventaire Forestier National* (IFN 2018).

1.2. La foresterie, des interventions sur le vivant

Cette section revient sur les liens unissant les humains aux milieux forestiers. Il précise ce qu'est la gestion forestière et en retrace les étapes historiques pour la France.

La gestion forestière est l'ensemble des décisions et activités ayant trait à la conduite, la conservation ou la création d'un peuplement forestier (Yousefpour et al. 2012; CNRTL 2019). Ces décisions convergent toutes sur deux caractéristiques communes : elles s'étalent tout au long de la vie des arbres et elles consistent à chaque fois en une intervention de l'humain sur les composantes biotiques ou abiotiques du milieu forestier. De nombreuses tentatives ont été menées pour dresser un résumé des modes de gestion forestière. Il me semble que la parcimonie de celle de Duncker et al. (2012) est la plus à même d'en décrire la diversité et les causalités (Figure 5). À moins d'indications plus précises, le terme « gestionnaire forestier » indiquera ci-après le principal décisionnaire des interventions techniques forestières : ONF et/ou élus locaux en forêts publiques, propriétaires ou leurs conseillers forestiers en forêts privées.

À l'instar d'itinéraires techniques agricoles, on peut désigner la succession des interventions sur une parcelle comme un itinéraire sylvicole. La plupart du temps, les différentes étapes techniques d'un itinéraire forestier sont interdépendantes : le fort travail du sol empêchera la régénération naturelle, et sera seulement privilégié en cas de plantation ; la pureté d'un peuplement (*i.e.* une monoculture) facilitera une coupe rase ultérieure – ceci évite en effet de devoir changer la tête d'abattages des engins sylvicoles, et de gagner en temps lors de la récolte.

Opter pour un itinéraire sylvicole ou un autre découlera de la combinaison de nombreux paramètres. Il s'agira de prime abord de tenir compte des contraintes biogéographiques locales (ou « station forestière ») qui permettent ou non la régénération et la croissance de certaines essences.

Introduction

	1. Passive	2. Faible	3. Medium	4. Haute	5. Intense
A. Composition spécifique			Essences en station		Toutes essences
			Essences natives		
B. Amélioration variétale				Sélection variétale	OGM
C. Mode de régénération			Plantation, semis		
			Naturelle		Taillis
D. Mécanisation			Oui, croissante		
E. Travail du sol		Si besoin	Possible	Oui	
F. Recours à des intrants chimiques			Amendement	Fertilisation	
			Possibilité de traitement pesticide		
G. Récolte des arbres	Aucune		Grumes	Houppiers	Rémanents
H. Type de sylviculture		Inspirée des régimes de perturbations naturelles		Futaie régulière	TCR TTCR
		Futaie irrégulière : furetage, par bosquets, ...			
I. Période de rotation (années)			> 80	Diminuante	15 -30

Figure 5. Typologie des gestions forestières selon leur intensité.

Les opérations sylvicoles interviennent à des moments différents de la vie des arbres. Elles concernent aussi leur environnement biotique et abiotique, et peuvent être différenciée selon leur degré d'intensité. L'intensité de la gestion s'étale d'un pôle où le laisser-faire domine, jusqu'à un pôle où l'humain intervient à toutes les échelles du vivant. OGM : organisme génétiquement modifié. T(T)CR : taillis à (très) courte rotation. Inspirée de Duncker et al. (2012).

Introduction

L'objectif recherché, ensuite, sera primordial dans la sélection d'un itinéraire ou d'un autre, tout comme les contraintes économiques. Il ne faut pas non plus négliger la grande place que prennent les valeurs personnelles des gestionnaires relatives aux paysages ou à la naturalité des procédés mis en place dans la gestion forestière.

La foresterie est un ensemble d'actions des humains sur les forêts, principalement sur les arbres et le sol. La première préoccupation de la plupart des gestionnaires forestiers est l'adéquation des espèces d'arbres à leur milieu pédologique et climatique (la « station » forestière).

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de revenir sur les implications d'une approche des milieux forestiers réduites aux seuls biens et services écosystémiques (BSE) – de riches articles en traitent ailleurs (*e.g.* Carnoye 2018 pour une perspective pratique de la question). Il s'agit de préférence de rappeler brièvement les motivations des humains à gérer les milieux forestiers. En effet, des facteurs jouant sur le choix d'un mode de gestion, celui de l'objectif poursuivi est déterminant : quels services, quels produits souhaite-t-on obtenir de la gestion forestière ? Depuis l'émergence de l'expression « BSE », les termes « d'usages » ou de « fonctions » forestiers sont moins usités ; ils seront ici considérés comme synonymes de biens et bénéfices que les humains *reconnaissent* tirer des écosystèmes (Harrington et al. 2010)³.

La production de bois d'œuvre, d'industrie, de papeterie et de bois-énergie est et reste l'incontournable fonction privilégiée des forêts (Brockerhoff et al. 2017). En France, la filière économique dite « forêt-bois » emploierait actuellement plus de 440 000 personnes, des entrepreneurs de travaux forestiers aux artisans du bâtiment⁴. Le bois coupé en forêt subira une première transformation en scierie, avant d'être transformé à nouveau pour produire charpentes, meubles, planchers, parquets, mais aussi manches de balais, fibres de masques de chantier ou même additifs alimentaires tirés de résines végétales, et finalement être brûlé pour produire de l'énergie. Au total, la filière forêt-bois française pouvait se targuer en 2014 d'un chiffre d'affaire s'élevant à 60 milliards d'euros.

³ La distinction essentielle opérée dans l'article de Harrington, par rapport à la définition de Costanza et al. (1997), est l'introduction de la « reconnaissance par les humains ». Cet apport constructiviste permet de souligner que les BSE n'existent que parce que des sujets humains les voient tels quels (Barnaud et al. 2018).

⁴ Ces chiffres, documentés par les acteurs de la filière forêt-bois eux-mêmes, doivent être nuancés par la difficile délimitation des métiers dépendant *nécessairement* du bois comme matière première, comme ceux du bâtiment par exemple : <https://www.metiers-foret-bois.org/metiers>.

Introduction

D'autres BSE productifs moins répandus, mais néanmoins importants, existent à travers la France comme l'apiculture ou les récoltes de toutes sortes (champignons, châtaignes, baies ou autres fruits, ainsi que les plantes à parfums, aromatiques ou médicinales).

Au rang des usages récréatifs de la forêt, on retrouve la promenade pédestre, cycliste ou motorisée, mais aussi la chasse. Reconnue comme loisir de plein air, la chasse est pratiquée par plus d'un million de personnes et surpasse ainsi le premier sport individuel en France, le tennis (FFT 2019). Elle représente aussi un poids économique considérable, avec la location des droits de chasse qui atteint annuellement 2,2 milliards d'euros (collectivités, État et privés confondus). Après la production de bois, c'est le deuxième poste de revenus forestiers. Les conflits opposant gestionnaires forestiers privilégiant la chasse, et ceux visant à produire du bois, sont légions. Ils sont enracinés dans le déséquilibre sylvo-cynégétique : la surpopulation de la grande faune sauvage (cervidés, sangliers en premier lieu) atteint de tels niveaux que les dégâts infligés aux arbres par l'abrutissement ou l'écorçage menacent grandement les semis naturels et plants, garants de la régénération forestière (Kuijper 2011). Pour nombre de forestiers, les chasseurs maintiendraient les populations de gibier artificiellement hautes, par l'agrainage ou en nivelant par le bas les quotas de chasse. Les chasseurs, quant à eux, soulignent l'aspect récréatif de leur pratique, fortement contrainte par des mesures de sécurité limitant les espaces et périodes de tir (Poinsot 2008). Ils peuvent faire entendre leurs revendications en s'appuyant sur une logique de « club » et de forts relais politiques, bloquant parfois toute instance de négociation à leur bénéfice (Traïni 2000).

En sus des BSE déjà recensés, les forêts sont une part essentielle des paysages, elles ont une fonction d'archivage climatique pour les scientifiques, *etc.*

D'autres BSE bénéficient grandement à nos sociétés, qui sont moins perceptibles pour les usagers des forêts. La régulation de l'érosion, l'épuration de l'eau (Ford et al. 2011), la défense contre les chutes de pierre ou les avalanches (Bebi et al. 2009) sont autant de rôles de protection des humains. Quelle que soit la motivation à profiter des forêts, tout un chacun y trouve un intérêt.

Un BSE dont l'intérêt s'est récemment accru est la capture et la séquestration du carbone atmosphérique, clef de la lutte contre les dérèglements climatiques. Ce BSE vient souligner que l'importance relative, pour les humains, des fonctions forestières dépend tout autant des lieux que des époques. À l'image des milieux dont ils dépendent, ces usages des forêts ont ainsi eux aussi connu une évolution historique.

La gestion forestière vise à la production de biens et services écosystémiques. L'expression répandue « Le bois paie la forêt » souligne l'importance de la production de bois, qui accompagne la fourniture des autres BSE.

La complexité de l'histoire de la foresterie ne permet pas d'en préciser ici les détails. Toutefois, il importe de resituer le cas français dans son évolution temporelle, pour saisir la portée des réflexions des forestiers rapportées dans les diverses parties de la thèse qui suivent⁵. L'histoire connue de la foresterie suit un cheminement s'inscrivant dans des paradigmes successifs : utilisation des ressources sans planification particulière, taylorisation et mathématisation des principes de récoltes, substitution du travailleur par le capital mécanique suite à la seconde guerre mondiale, et enfin vision systémique des opérations forestières (Heinimann 2007). Ces étapes se déclinent différemment selon les contextes nationaux de l'Occident (*e.g.* en Suède, Östlund, Zackrisson, et Axelsson 1997). Dans le cas de la France, ce sont une préférence pour les approches technicistes et une relative défiance envers les « non-initiés » qui tressent le fil de l'histoire forestière (Kennedy et al. 2001; Vidalou 2017; GHFF 2019).

S'il est vain de vouloir dater l'origine de la gestion forestière, l'année 1346 fait souvent figure de référence dans l'histoire française : c'est alors que Philippe VI de Valois décrète l'ordonnance de Brunoy stipulant que « *Les maîtres des eaux et forêts enquerront et visiteront toutes les forez et bois et feront les ventes qui y sont, en regard de ce que lesdites forez se puissent perpétuellement soustenir en bon estat* ». La gestion forestière prend ensuite forme au cours des siècles, dans une optique de production de bois et de constitution de territoires de chasse (Boutefeu 2005). Colbert, ministre de Louis XIV, est souvent cité comme figure de l'interventionnisme de l'État dans la gestion des forêts. La finalité était alors militaire : sécuriser l'approvisionnement en bois des chantiers navals de la Marine royale (Heinimann 2007).

On peut trouver dans les travaux des physiocrates et Duhamel du Monceau, au XVIII^{ème} siècle, l'amorce du rationalisme qui deviendra l'idéal de la foresterie française au siècle suivant. À partir de 1820, la gestion forestière commence à se structurer autour d'une administration, corps étatique d'ingénieurs forestiers ; autour d'un lieu de formation et de diffusion de ses valeurs, l'école forestière de Nancy ; et autour du code forestier comme référence législative. Lorentz et Parade, fondateurs de l'école forestière, décrivent leur idéal technique en une laconique formule : « *Imiter la nature, hâter son œuvre* ». La futaie régulière régénérée naturellement est alors le mode de gestion forestière plébiscité.

⁵ Ce paragraphe s'appuie sur les travaux du Groupe d'Histoire des Forêts Françaises (GHFF 2019).

Introduction

La situation de la forêt s'empire ensuite avec une industrialisation et une démographie croissantes et énergivores. La surexploitation pour la production de charbon et la pâture mettent en péril la régénération des forêts. On peut trouver ici des raisons de la défiance des forestiers à l'égard des « non-initiés » qui marquent encore la foresterie actuelle. Des conflits opposent les représentants de l'administration forestière, qui se posent en défenseurs des milieux naturels, les populations locales (Boutefeu 2005) et les milieux industriels craignant une gestion trop précautionneuse des peuplements (GHFF 2019). Il faut noter cependant que ce siècle a aussi mené aux développements de forêts privées, sous l'impulsion du gouvernement de Napoléon III (*e.g.* le boisement des Landes de Gascogne) ou encore du reboisement de nombreuses zones de montagnes pour limiter l'érosion.

Le passage au XX^{ème} siècle est marqué par l'exode rural et le remplacement du charbon par d'autres énergies fossiles. Les forêts perdent de leur importance stratégique et économique. La période qui s'ouvre modifie en profondeur la gestion forestière, dans un contexte où la relation directe des Français aux forêts s'estompe à mesure des progrès de l'urbanisation. Ce qui sera plus tard nommé « l'ère des technocrates » (Thoenig 1973) est en fait l'éclatement de la structure unique de l'administration des eaux et forêts en de multiples corps spécialisés dans l'un ou l'autre des aspects de la gestion forestière. L'appui aux activités forestières en forêt privée est territorialisé avec l'établissement en 1963 des Centres Régionaux de la Propriété Forestière (CRPF). Un an plus tard, la gestion des forêts publiques revient à l'Office National des Forêts (ONF) créé pour l'occasion.

Au-delà de ces restructurations, c'est la conception technico-économique qui frappe l'imaginaire forestier de ces décennies, que le premier directeur général de l'ONF brosse en quelques mots : « *produire plus, produire mieux, produire et récolter moins cher, vendre mieux* ». Les « sciences forestières » prédisent le référentiel techniciste à tous les niveaux de la gestion forestière, un héritage culturel encore d'actualité. Ce modèle productiviste se heurte néanmoins à des oppositions, dont les mouvements écologistes des années 70 en sont les signaux faibles (Figure 6).

Il faudra attendre les années 90 pour que les arguments écologiques soient entendus par la technocratie forestière – ce qui ne signifie pas pour autant que la gestion préalable était dommageable à l'environnement (Otto 1998). À la fin des années 70 déjà, la crise des pluies acides avait marqué le début des préoccupations relatives aux dérèglements climatiques. Le sommet de Rio, en 1992, signale l'arrivée des questions de développement durable comme un objectif important de nos sociétés. Les formations des ingénieurs forestiers passent progressivement d'une vision centrée sur l'arbre à une vision plus systémique, intégrant plus encore la pédologie, la phytologie, et ensuite la biodiversité. Malgré le fait que la production de bois reste l'objectif majeur de la gestion, la multifonctionnalité est

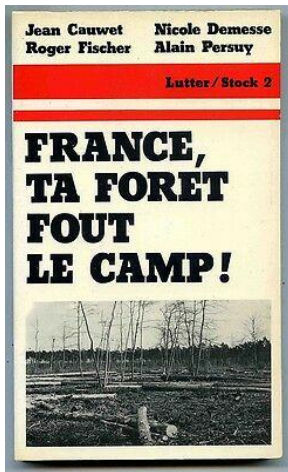


Figure 6. Première de couverture de l'ouvrage collectif *France, ta forêt fout le camp !*

Les questions forestières sont peu centrales dans les revendications écologistes de la décennie 1970. La parution de l'ouvrage collectif *France, ta forêt fout le camp* (Cauwet et al. 1976) les relie à des arguments esthétiques, quelque peu prolongés la décennie suivante.

plus régulièrement prise en compte, du moins dans les discours. La foresterie évolue vers le paradigme actuel de la « gestion forestière durable » (MCPFE 1993), ou plus généralement vers les considérations parfois très pratiques des *Sustainable Forest Operations* (SFO) (Rosensvald & Löhmus 2008; Marchi et al. 2018). La « gestion adaptative » est la variante la plus récente de la SFO qui intègre les incertitudes climatiques (Bolte et al. 2009). La gestion adaptative peut être définie comme un « processus systématique d'amélioration des pratiques et des politiques de gestion fondé sur un apprentissage basé sur la connaissance des résultats de stratégies ayant préalablement été mises en œuvre » (Pahl-Wostl et al. 2007).

Il serait illusoire de chercher à prédire le futur de la foresterie. La SFO et la gestion adaptative font néanmoins partie de ce qui pourra à l'avenir être qualifié de signaux faibles d'une vision cybernétique de la foresterie (Heinimann 2007). L'organisation de la gestion forestière serait caractérisée par la place prépondérante des technologies de l'information et de la communication (TIC). La recherche croissante de l'efficacité technique se fonderait sur le remplacement du travail de terrain par des inventaires forestiers menés au LIDAR par des drones (Dassot et al. 2011). Simultanément, le recours accru à des intelligences artificielles serait permis par l'installation *in situ* de télécapteurs nourrissant des algorithmes demandant toujours plus de données (Sadin 2015). Paradoxalement, le remplacement physique du forestier par la technologie se ferait en parallèle du retour, souvent médié par les TIC (Figure 7), des habitants dans une forêt vantée pour ses BSE esthétiques, environnementaux et récréatifs. Il s'agirait alors d'une nouvelle déclinaison du concept de multifonctionnalité, la foresterie tenant encore plus compte qu'aujourd'hui des demandes sociales.

Historiquement, les gestionnaires forestiers français sont caractérisés par une posture d'experts techniques agissant pour le maintien à long-terme des forêts. L'État a une forte influence sur les orientations sylvicoles retenues.

Introduction

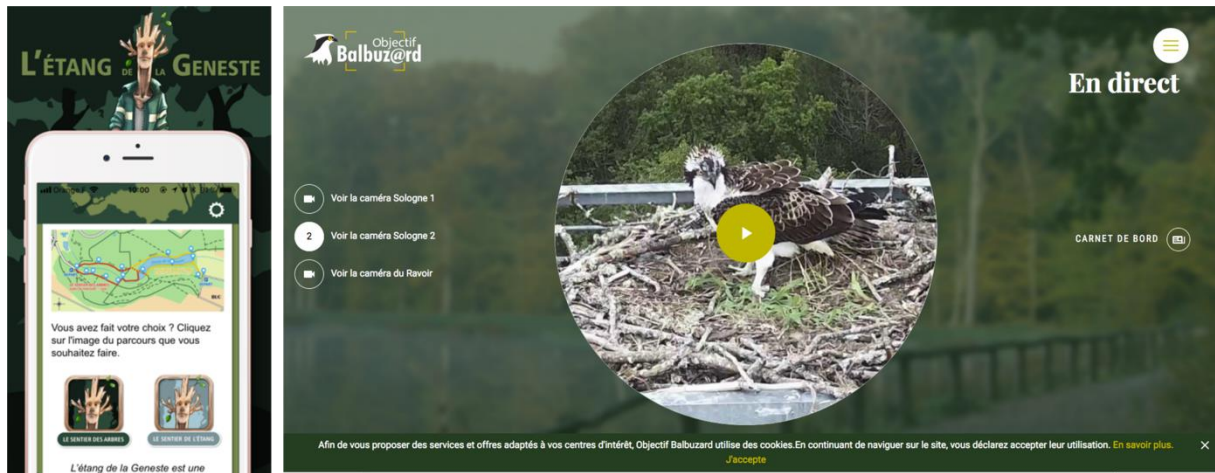


Figure 7. Médiation de l'expérience forestière par les technologies de l'information et de la communication.

À gauche : écran d'accueil de l'application « L'étang de la Geneste », proposée par l'ONF dans le cadre de la découverte d'un site en forêt domaniale à proximité de Versailles.

À droite : capture d'écran du site <http://www.objectifbalbuzard.com/en-direct/>, qui permet de suivre en temps réel la nidification de balbuzards pêcheurs en forêt domaniale d'Orléans.

1.3. La multifonctionnalité des forêts françaises, une forme de dissonance cognitive ?

« *Donnez-moi deux ou trois millions d'hectares des meilleures terres, et vous pourrez abandonner aux écologistes le reste de la forêt.* ». Cette boutade des années 70, imputée à l'ancien directeur général de l'association forêt cellulose, résume à elle seule deux attributs de la foresterie occidentale. Le premier a été souligné ci-dessus, il s'agit de la prédominance de la production de bois dans les objectifs sylvicoles de nombreux acteurs privés de la forêt –on retrouve toujours ce point de vue aujourd'hui à travers l'Europe (Orazio et al. 2017). Le second est la multifonctionnalité de la gestion forestière.

La gestion multifonctionnelle vise à la production simultanée de BSE différents (Bennett et al. 2009). La multifonctionnalité de la gestion est une exigence de la loi, sans que le terme en lui-même soit directement nommé (Légifrance 2012a). Forêts publiques et privées sont concernées, bien que dans les faits l'État ait un moindre pouvoir d'action dans les forêts dont il n'a ni la propriété ni la gestion. Malgré l'injonction législative, la multifonctionnalité soulève la question d'une forme de dissonance cognitive des forestiers : la plupart est fortement attachée aux BSE non productifs, mais d'un point de vue économique, c'est la production de bois qui est la première source de revenus des propriétaires et gestionnaires (Cinotti 2003). Le respect de cet équilibre délicat est fondamental dans les entretiens qui ont alimenté ces travaux de thèse.

Ces questions relatives à la multifonctionnalité se rapprochent du débat sur la dyade « land-sharing, land-sparing ». Les sciences de la conservation se sont ainsi longtemps interrogées sur l'efficacité relative, en termes de préservation des forêts, d'une intégration spatiale des zones de conservation et de production (le land-sharing), et d'une séparation de ces zones (le land-sparing) (Hector & Bagchi 2007; Fischer et al. 2014). Le débat prend tout son sens pour la gestion forestière : comme indiqué dans la section 1.2, les itinéraires sylvicoles varieront selon qu'on souhaite fortement privilégier la production de bois, ou qu'on préfère mêler les objectifs productifs à des considérations esthétiques, récréatives ou environnementales (Biber et al. 2015).

L'ONF est en fait le plus concerné des gestionnaires forestiers par la multifonctionnalité des espaces boisés. En effet, l'importance des surfaces dont il a la responsabilité ouvre la réflexion quant à leur spécialisation. L'opposition land-sharing/land-sparing conduit ainsi au débat sur une spécialisation de territoires récréatifs, la plupart du temps péri-urbains, de territoires productifs et de territoires de protection environnementale. Une prospective de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), menée en 1997-1998, proposait par exemple un scénario de cette teneur, qui s'est arrêté au stade de la scénarisation.

Qu'il s'agisse de forêts privées ou publiques, la multifonctionnalité de la gestion est parfois remise en cause ; elle est avant tout discutée sous l'angle de l'efficacité économique (Le Moguédec

Introduction

2010; Barthod 2015), sans que les biais méthodologiques de telles études ne parviennent à fournir des conclusions tranchées. En l'état actuel, le pragmatisme serait plutôt de rigueur : bien qu'elles soient multifonctionnelles, les forêts publiques fournissent tout de même 35% du volume de bois scié en France, pour seulement un quart des surfaces boisées. De plus, la spécialisation des espaces répond le plus souvent à des impératifs biogéographiques : les zones protégées sont à forts enjeux naturalistes, les zones plutôt axées vers la production sont constituées de peuplements adéquats à une station fertile ; et les zones intermédiaires mêleront plus ou moins fortement les pratiques de récolte et de conservation en tenant compte de leur accessibilité. C'est peut-être cette vision concrète qui différencie le débat de l'intégration ou de la séparation des BSE en forêt, de son application aux milieux agricoles. Les enjeux y sont plus forts, les terres plus fertiles, et c'est seulement le développement des agricultures biologiques et des initiatives d'agriculture urbaine qui ré-ouvre à l'agriculture la question de la multifonctionnalité.

La fourniture de plusieurs biens et services écosystémiques forestiers au sein d'un même massif est la grande ligne de conduite des gestionnaires français. Sur le terrain, la multifonctionnalité est appliquée de manière souple afin de tenir compte des particularités de chaque parcelle.

La mise en place concrète de la multifonctionnalité se heurte à une organisation de la gestion forestière française répondant à une double logique : la distinction entre propriétés privées et publiques, d'une part, et la régionalisation des centres publics de gestion d'autre part.

L'ONF a récemment été renouvelé comme le gestionnaire unique des forêts publiques domaniales et des collectivités (Dalle et al. 2019). Du fait de son statut d'établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), il dispose d'une autonomie de gestion et d'un budget propre affectant ses recettes à ses dépenses. Ses relations avec les élus des collectivités locales possédant des forêts sont encadrées par le régime forestier. Ce cadre juridique fait de l'Office un support technique à disposition des collectivités, mais souvent aussi le gestionnaire *de facto* de leurs forêts. L'État et l'ONF négocient puis contractualisent des objectifs pluriannuels réunis dans un Contrat d'Objectif et de Performance (COP) co-signé par la Fédération des Communes Forestières (COFOR). Le COP actuel court de 2016 à 2020.

Les propriétaires privés, eux, jouissent de tous les droits liés à la propriété, les plus grandes surfaces étant néanmoins encadrées par des mesures de contention des risques de pollution des eaux, d'incendie, d'érosion ou de menace sur les habitats protégés. Des documents de gestion

Introduction

durable (DGD) précisent les aménagements forestiers prévus (Figure 8). Le Plan Simple de Gestion (PSG), document obligatoire pour toute propriété atteignant 25 ha, décrit les objectifs forestiers du propriétaire et détaille le calendrier des travaux sylvicoles. L'État dispose d'un guichet d'orientation de la gestion des forêts privés par l'intermédiaire des antennes régionales du Centre National de la Propriété Forestière (CNPf, mais l'usage a conservé CRPF). Placés sous tutelle du ministère de l'Agriculture, en charge des forêts, les agents des CRPF ont pour mission principale de développer la fourniture de bois afin d'alimenter les filières locales. Aujourd'hui, leurs prises de contact avec les propriétaires passent le plus souvent par l'agrément des PSG. Jusqu'en 2000, ils pouvaient aussi échanger à propos du Fonds Forestier National (FFN), l'instrument du financement du (re)boisement pour le relèvement de la France d'après-guerre. La fin du FFN a laissé place à une myriade d'outils parafiscaux (aides régionales, étatiques, européennes) mais aussi privés (*e.g.* prêts à taux zéro de coopératives forestières) (Barthod 2001).

L'Office National des Forêts, unique gestionnaire des forêts de l'État et des collectivités, mène des activités de protection, production et mise en valeur. Son équilibre financier est assuré par la vente de prestations et de bois. Les propriétaires privés sont maîtres chez eux, dans la limite de la réglementation environnementale et paysagère.

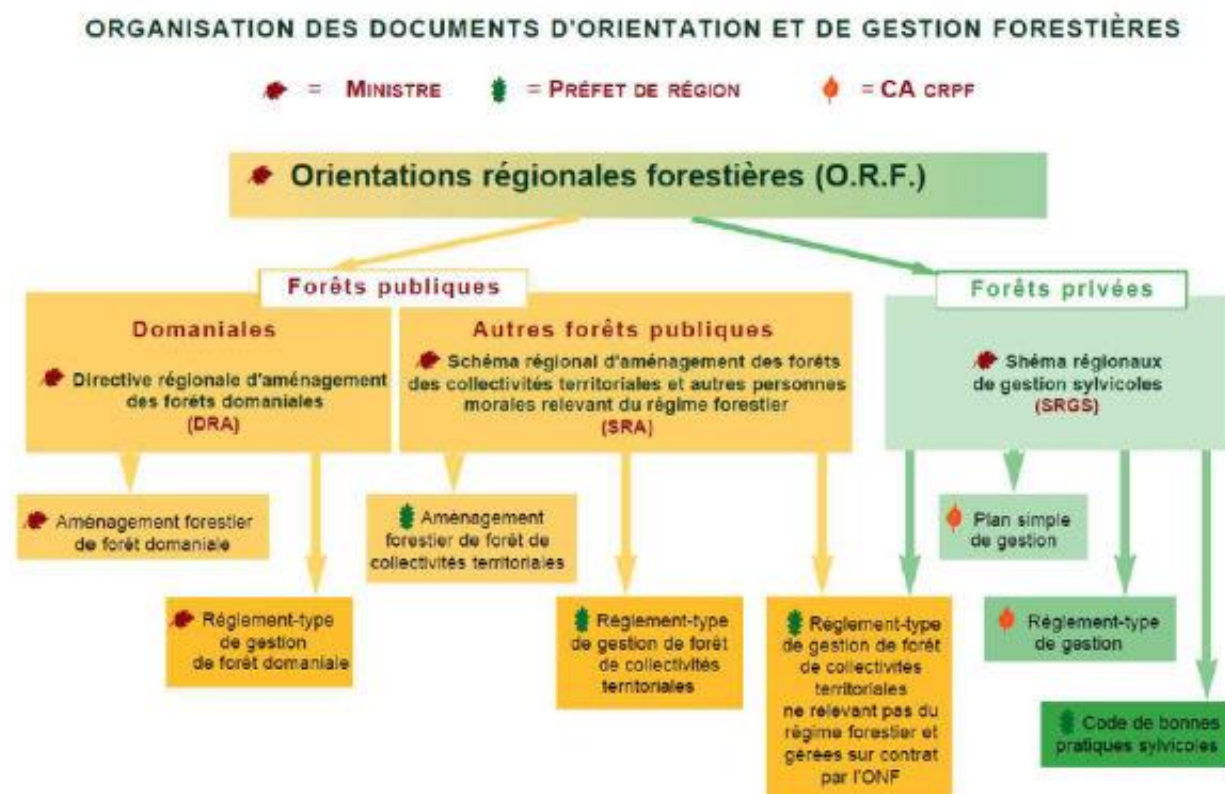


Figure 8. Transcription régionale des orientations forestières nationales et documents de gestion durable affiliés.

Figure tirée du site internet du ministère de l'agriculture et de l'alimentation, <https://agriculture.gouv.fr>

La délicate suppression du FFN illustre la difficulté, pour un État historiquement centralisé, de se munir de politiques publiques à même de piloter avec cohérence les multiples fonctionnalités des forêts. La Figure 9 les présente brièvement.

Les difficultés à concilier les diverses fonctions des forêts sont aussi illustrées par la répartition bicéphale des responsabilités régaliennes des forêts. Le ministère de l'agriculture et de l'alimentation a la tutelle de l'ONF et plus généralement des forêts. Il pilote nombre des politiques publiques énumérées précédemment, tandis que le reste est pris en charge par ministère de la transition écologique et solidaire. La scission des politiques publiques entre ces deux ministères est l'écho actuel de la réorganisation des affaires forestières opérée durant les décennies 1960-70.

La multiplication des arènes de décision nationale augmente encore, s'il le fallait, l'illisibilité de l'application des politiques publiques forestières. Il est ainsi parfois difficile pour les acteurs de la gestion forestière de distinguer les priorités de l'État, et par ricochet, où s'orientent les dispositifs d'investissement. Ce foisonnement permanent⁶ peut entraver l'action de territoires ruraux pour qui

⁶ Plus de 250 rapports commandés par l'État ont traité des thématiques forestières depuis 1984, comme l'indique le 251^{ème}, un « rapport sur les rapports » (Dereix, Vallance, et Demolis 2015).

Introduction

l'économie forestière est très importante (Sergent 2010; Biber et al. 2015), ce qui illustre comment les choix politiques, mais aussi sociaux et économiques, peuvent influencer la trajectoire écologiques des milieux forestiers.

Les très nombreuses politiques publiques liées à la forêt sont des investissements à long terme. Paradoxalement, malgré une planification sur le temps long, ces politiques changent régulièrement. La lisibilité des orientations de l'État en est grandement affectée.



Figure 9. Y a-t-il une stratégie des Stratégies ? Logo des politiques publiques françaises en lien avec la forêt.

Les politiques publiques relatives aux forêts sont aussi nombreuses que sectorialisées. Elles sont diverses, s'appliquant chacune à quelques-uns des nombreux BSE forestiers (Sergent 2010), mais aucune ne remet en cause la priorité donnée à la production de bois, essentielle pour l'économie de la filière forêt-bois.

On notera l'existence, entre autres, de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB), de la Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable 2015-2020, de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), de la Stratégie Bioéconomie pour la France, du Plan National d'Adaptation aux Changements Climatiques (PNACC), du Plan national d'action pour l'avenir des industries de transformation du bois, du Programme National de la Forêt et du Bois (PNFG) ou encore de la Stratégie Nationale pour la Mobilisation de la biomasse (SNMB), qui s'inscrit dans la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (*alias* Stratégie française pour l'énergie et le climat).

1.4. Les forêts, des socio-écosystèmes

Un socio-écosystème (SES) correspond au couplage entre un ou plusieurs systèmes sociaux et un système écologique (Westley et al. 2002; Liu et al. 2007). L'intérêt de cette proposition conceptuelle est de remettre les humains au cœur des écosystèmes comme composante active et interne de leurs dynamiques spatio-temporelles. Cette nouvelle perspective sur les interactions liant les humains et les non-humains connaît un succès singulier chez les écologues. Les praticiens et chercheurs des sciences de la conservation, entre autres, y voient l'occasion d'être en plus grande adéquation avec leur pragmatisme originel, orienté à la résolution des problèmes (Lagadeuc & Chenorkian 2009). Les SES ont aussi ceci d'intéressant qu'ils facilitent le dialogue entre cultures disciplinaires différentes comme illustré par exemple par l'idée d'« anthropogenic biomes » (Ellis & Ramankutty 2008).

Le terme de « socio-écosystème » rappelle toutefois sa paradoxale dénomination. Les socio-écosystèmes portent en effet en eux-mêmes, par le tiret, le schisme discriminant les vivants humains des vivants non-humains. Il est tout aussi curieux de constater que le concept émerge en même temps que celui d'Anthropocène, qui tente lui aussi de substituer au dualisme culture/nature un monisme unifiant l'*Homo sapiens* et son environnement. Avec les SES et l'Anthropocène, tout devient-il naturel ou culturel ? Privilégier la dénomination « cosmosystème », par exemple, aurait pu surmonter ces considérations étymologiques. Cela aurait également permis de sortir d'un point de vue anthropocentré des relations entre vivants, en reconnaissant aux autres espèces leur complexe faculté d'interaction. Les espèces ingénieuses seraient ainsi vues dans leurs cosmosystèmes respectifs, qu'il s'agisse des bien connus castors et arbres ou des tout aussi remarquables « fire spreading hawks » (Bonta et al. 2017).

Malgré ces limites et d'autres (Mermet 1992), c'est la vision socio-écologique des forêts qui prédominera par commodité de langage. Plus qu'une portée descriptive, les SES permettent de mieux comprendre la gestion des écosystèmes par les humains (Lescourret et al. 2015; Carnoye 2018).

Le fonctionnement et l'évolution des forêts résultent de processus écologiques et sociaux-économiques intimement liés. Les forêts, grandement influencées par la gestion forestière, sont des socio-écosystèmes.

Introduction

De ce point de vue-là, les forêts françaises sont des SES. Un des apports les plus évidents d'une vision socio-écologique des forêts est ainsi d'aller au-delà de la dualité d'une forêt « primaire » et d'une forêt « artificielle ». La première serait une zone dans laquelle l'humain ne serait intervenu que comme chasseur-cueilleur, et dont la biodiversité serait prétendument plus remarquable que la seconde, son opposée. Il n'y a en France métropolitaine ni forêts primaires ni forêts totalement artificielles, mais des situations différenciées par les (in)actions successives de l'humain. Le palimpseste forestier recouvre ainsi des propriétés dont la gestion a cessé depuis des décennies ou des siècles ; des propriétés travaillées depuis des siècles; des propriétés récemment (re)mises en gestion ; et des propriétés « férales », dont la gestion a récemment cessé. Tenter de classer les forêts selon des critères de naturalité nécessite de les définir, et la tâche est difficile. Par la suite, nous considérerons plutôt l'impact des humains sur les trajectoires des forêts selon l'intensité et l'ancienneté de la gestion actuelle (Chazdon et al. 2016).

Afin de compléter la présentation d'un SES forestier, il faut aussi s'attarder sur sa composante humaine. La gestion forestière peut ainsi être définie comme une arène d'action au sein de laquelle évoluent des fournisseurs et bénéficiaires de BSE (Barnaud et al. 2018).

Il est difficile d'identifier précisément les lieux, moments et personnes fournissant des BSE. Un BSE peut être clairement rattaché à une personne et à un lieu précis, comme les propriétaires privés acceptant le passage d'un sentier de randonnée sur leurs terres. Une même personne peut cesser de fournir un BSE au cours du temps (*e.g.* opposition de conscience d'un propriétaire privé à l'exercice du droit de chasse sur sa propriété). Un BSE peut être difficilement cartographiable, à l'instar de la contribution des forêts à la lutte contre les îlots de chaleur régionaux (et non pas urbains) (Perrin et al. 2017).

Cette diversité de situation se retrouve pour les bénéficiaires des BSE, plus ou moins nombreux et localisés. Il sera plus difficile de localiser les activités de plein air d'un groupe de randonneurs qu'une équipe scientifique suivant une placette expérimentale.

Pour compléter le tableau, les rôles de fournisseurs et bénéficiaires de BSE peuvent se confondre, comme dans le cas d'un propriétaire usant du droit d'affouage dans ses propres parcelles. Ils peuvent être antagonistes : une illustration récente est le cas d'un apiculteur ayant dû jeter l'ensemble de sa récolte de miel. Elle était contaminée par les pesticides épandus dans les parcelles forestières voisines (La Dépêche du Midi 2018). Ils peuvent être neutres : l'observation ornithologique ou ichnologique ne perturbe en rien la récolte de fruits. Enfin, les BSE peuvent être

mutuellement bénéfiques : pour l'association ProSilva par exemple, la gestion irrégulière se base sur les rétroactions positives entre diversité biologique et résilience aux maladies (de Turckheim & Bruciamacchie 2005).

Par conséquent, cette pluralité de cas de figure invite à bien préciser le ou les BSE qui font l'objet de la discussion. Omettre cette étape peut conduire à une incompréhension des relations changeantes entre deux mêmes acteurs selon l'arène d'action considérée. Des agents de l'ONF et des élus municipaux peuvent tout à fait s'entendre sur les conditions de mise en place d'une trame verte lors d'une réunion hébergée par un Parc Naturel Régional (PNR), et défendre des points différents quant aux quotas de prélèvements à retenir durant des commissions départementales de la chasse et de la faune sauvage.

À chacun des nombreux biens et services écosystémiques forestiers correspond un ensemble de personnes participant à leur production, et un ensemble de personnes en bénéficiant. Les relations entre toutes ces personnes fluctuent selon le BSE considéré, et le temps.

Les arènes d'actions de la gestion forestière sont nombreuses, mais relativement hermétiques aux non-forestiers. Naturellement, ce repli du monde forestier sur lui-même n'est pas représentatif de toutes ses parties prenantes. Néanmoins, deux facteurs historiques permettent de mieux comprendre les relations forestiers-société actuelles : une certaine défiance envers les populations locales (et plus généralement la société) et une forte technophilie (GHFF 2019; Vidalou 2017). Ces héritages historiques sont à prendre en compte pour comprendre leurs choix d'adaptations aux dérèglements climatiques.

En forêt publique, il a de cela deux à trois siècles, les forestiers se méfiaient des populations locales, les accusant de menacer le renouvellement des arbres par la vaine pâture dans les forêts. Du côté de la forêt privée, les propriétaires étaient des paysans ou des notables de la bourgeoisie et de l'aristocratie. Nul n'avait de compte à rendre à qui que ce soit, et les principales relations avec la société étaient d'ordre économique (GHFF 2019). Cette absence de lien fort entre les forestiers et le reste de la société a certainement contribué à la situation actuelle. Les conflits se sont effacés plus qu'ils n'ont disparu, et l'exode rural a transformé les usages des forêts, mais les stigmates d'une circonspection envers tout ce qui ne vient pas du corps des forestiers sont encore visibles.

Aujourd'hui, cette réserve est encore accentuée par les confusions répandues de « non-forestiers ». Il n'est pas rare d'entendre des amalgames entre les forêts tempérées françaises et les forêts équatoriales, ou des propos contradictoires refusant d'un côté la coupe d'arbres, mais réclamant de l'autre des produits bio-sourcés.

Malgré cela, le monde forestier essaie de renouer les relations avec le « grand public ». En forêt privée, la filière forêt-bois a lancé un grand plan de communication auprès de ses clients potentiels, appuyé par le Ministère de l'Agriculture en charge des forêts (Bardon & Dereix 2017; Nicolino 2018). En forêt publique, l'ONF tente de déconstruire la vision d'une gestion « top-down », qui excluait les citoyens de la décision (DREAL Île-de-France 2019). En 2007 déjà, la responsable de la recherche et de l'innovation à l'ONF était interrogée sur le besoin de développer les recherches en sciences économiques et sociales, en parallèle des projets d'écologie, pour la mise en place de stratégies d'adaptations aux changements climatiques. Sa réponse atteste de la lente (mais effective) évolution des mentalités forestières : « *Il va falloir maintenant intégrer les sciences économiques et sociales dans la réflexion, et des approches prospectives paraissent en effet incontournables.* » (Legay 2007).

Bien que la question des relations entre le monde forestier et la société soit de plus en plus importante, il ne semble donc pas que cela suffise à faire de la forêt un enjeu fortement politisé. Pas, en tous les cas, au moment de l'écriture de ces lignes, bien que des signes avant-coureurs préfigurent de futures tensions (Figure 10).

Figure 10. Incendie de l'entreprise corrézienne de travaux forestiers MECABIOFOR.



Source : La Montagne (2018).

L'incendie a eu lieu sur le plateau des Millevaches, sujet à une intensification des opérations sylvicoles mêlant monocultures de résineux et mécanisation accrue. Un message de revendication témoignait des tensions entre des visions opposées des socio-écosystèmes forestiers : « *Ni usine ni coupe rase/La forêt/L'extase. Coupe rase/La tristesse du paysage s'ouvre comme la gueule d'un mort/Une calme agonie/Sais tu ce que rumine la forêt cet hiver ? Les arbres/ Ils sont arrachés/La terre part/Le sol meurt/Et sur les cendres des machines brûlées cette nuit pousse la forêt/C'est le printemps. Farce doit rester à la justice/Force aux gilets jaunes/Fist à nos culs/Fustes aux forêts. CFBL dégage/SOMIVAL dégage/CIBV dégage/UNISYLVA dégage/Macron dégage/Fuck Google.* »

La deuxième caractéristique des arènes d'actions forestières est l'appétence des gestionnaires pour une vision technique. Cette appétence a été soulignée à la fois au niveau de la formation des ingénieurs forestiers (Innes 2005; Cheikho & Clément 2002) et des propriétaires privés (Marty 2000), et au niveau de leur culture professionnelle (Boutefeu & Arnould 2006).

Dans leur revue des questions que les forestiers européens se posent, Coll et al. (2018) ont listé les dix principaux sujets de préoccupations⁷ : tous sont relatifs à l'intervention des humains sur les forêts. Aucun ne porte sur le manque de connaissances sur la commercialisation des bois, les projections foncières, les outils assurantiels ou les dispositifs fiscaux. Ce n'est pas surprenant, du fait que les gestionnaires forestiers se concentrent d'abord sur le pouvoir d'action dont ils disposent, à l'échelle de la parcelle et des interventions sylvicoles. Cependant, une telle étude fait ressortir la technophilie dominante des milieux forestiers. Issue d'une longue histoire interventionniste, cette conception technique en forêt considère que les effets négatifs d'une intervention pourront toujours être compensés ultérieurement par un développement technologique (Marage 2018). Le privilège revient aux mesures qui viennent régler *a posteriori* les conséquences d'une mesure précédente. À son crédit, il faut reconnaître que cette forme de fuite en avant perpétuelle, que n'aurait pas reniée Ester Boserup⁸ a relativement bien fonctionné jusqu'ici dans le cas des forêts métropolitaines – la question se pose de savoir si des réponses techniques permettront aussi de surmonter les effets des changements climatiques, une question à laquelle les incertitudes des CC empêchent de donner une réponse.

Cette course en avant technique n'est par ailleurs pas sans conséquences sur les SES forestiers. Un cas concret permettrait probablement d'illustrer ce propos. En 2015, lors du colloque du réseau technologique mixte pour l'adaptation des forêts au changement climatique (AFORCE), des intervenants de l'ONF présentaient leur mise en pratique de l'adaptation. Leur propos portaient sur l'évolution génétique des arbres, en concluant par une diapositive intitulée « *Ne rien faire : la pire des solutions* » (Musch et al. 2015). Bien des raisons légitimes existent pour avancer cela. Ici, ce qui importe surtout est l'absence de la question des finalités dans leur discours, qui se concentrait sur les pratiques techniques. Ce cas est caractéristique d'un énoncé où la production de bois, légitime et nécessaire, est devenue une norme *implicite*. À elle seule, elle justifierait de se consacrer aux moyens techniques sans en réinterroger la finalité. La suprématie des fins sur les moyens, la recherche de l'efficacité absolue et non plus de l'efficacité relative d'une méthode par

⁷ Pour cela, Coll et ses collègues ont contacté 53 réseaux forestiers de 15 pays européens différents. Ils leurs ont demandé à quelles questions la communauté scientifique devrait répondre. 289 réponses ont été recueillies, puis triées par un échantillon de 168 professionnels publics et privés des 15 pays.

⁸ Économiste danoise, elle fut la championne du principe énonçant que « nécessité est mère d'invention ».

Introduction

rapport à une autre, tels sont les traits saillants de la définition de la technique pour J. Ellul (1954). Au vu de l'importance que prendra la vision ellulienne de la technique dans la compréhension des résultats de la thèse, il convient de s'arrêter sur la redéfinition proposée. On peut entendre la technique comme « *l'ensemble des relations entre les êtres humains et les choses, pour autant que ces relations prennent la forme de savoir-faire ayant pour effet la transformation du donné naturel* », ou dans un sens plus large comme « *l'ensemble des moyens par lesquels les vivants s'assurent une emprise sur leur milieu* » (2015). La proposition d'Ellul apporte une précision majeure à ces définitions des relations des humains entre eux et avec leur environnement : « *La technique n'est pas un ensemble d'objets (pas même de machines). Elle est un rapport au monde fondé sur une préoccupation propre à notre temps : celle de rechercher en toute chose la méthode absolument la plus efficace.* » (2015).

De fait, les contributions des techniques forestières à la gestion forestière actuelle sont immenses et ont permis de répondre à de nombreux enjeux sanitaires, démographiques, énergétiques. Il est d'autant plus intrigant que la foresterie n'en déconstruise pas un tant soit peu les conséquences. Ainsi, cet « oubli » des fins techniques va jusqu'à se constater en négatif dans les rares ouvertures des forestiers à des sciences humaines et sociales. Celles-ci sont pourtant propices à mettre en évidence comment la technique pure vient modifier les SES forestiers. Ironiquement, les rares approches économiques et sociales de la sylviculture disponibles dans la littérature se penchent principalement sur la perception de la technique qu'ont les forestiers (Kangas et al. 2006; Robinson et al. 2016; Seidl et al. 2016).

Par la suite, ce ne sont pas les adaptations techniques aux dérèglements climatiques qui seront critiquées *per se*. Elles sont, à mon sens une partie incontournable des solutions à déployer (voir section suivante). C'est plutôt l'absence quasi-totale de recherche de pistes d'adaptations *complémentaires*, non-techniques, qui fera l'objet du propos.

La maîtrise technique des gestionnaires forestiers français est remarquable. Revers de la médaille, leur appétence pour les approches techniques a pu les isoler des problématiques sociales, engendrant des crispations, voire des tensions avec les « non-forestiers ».

2. L'adaptation aux changements climatiques

2.1. Impacts des dérèglements climatiques sur les forêts

There are known knowns; there are things we know we know. We also know there are known unknowns; that is to say we know there are some things we do not know. But there are also unknown unknowns—the ones we don't know we don't know. And if one looks throughout the history of our country and other free countries, it is the latter category that tend to be the difficult ones.

Donald Rumsfeld, février 2002

Mis en évidence depuis maintenant deux décennies par les travaux récurrents du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les dérèglements climatiques ont nécessité la convergence de nombreux faisceaux d'indices différents (IPCC 2019). C'est seulement à un certain niveau de certitude établi que les changements climatiques (CC) ont mené à l'élaboration de politiques publiques internationales et nationales (Aykut 2012).

Trois sources irréductibles d'incertitudes persistent néanmoins à troubler les projections climatiques à venir. Les incertitudes scientifiques sont les plus évidentes aux yeux des climatologues ; elles proviennent de la limitation du pouvoir de calcul des équipements informatiques, ou encore des hypothèses initiales des modèles climatiques. Ces incertitudes tendent à être réduites du fait des améliorations informatiques et de la convergence à long terme des projections de modèles différents. La deuxième source d'incertitude est incompressible, car il s'agit de la stochasticité intrinsèque des phénomènes météorologiques et des évolutions climatiques. Enfin, la troisième source d'incertitude porte sur l'intensité des efforts de réduction des émissions de GES – d'atténuation – par nos sociétés.

Les bouleversements du climat sont sûrs, et déjà constatés (Lebourgeois et al. 2001). Plusieurs des impacts sur les forêts sont prévisibles (Trumbore et al. 2015). Il s'agit principalement de l'intensification en force, durée ou fréquence d'aléas connus. Les incertitudes, elles, ne concernent pas la survenue de ces aléas, mais les régionalisations et rythmes précis de leurs retombées.

Les sécheresses sont particulièrement préoccupantes, et sont souvent suivies de risques parasites (Bréda et al. 2006). Les arbres peuvent surmonter de longs épisodes chauds, mais au prix d'un affaiblissement général. La dégradation de leur état est liée à la redirection de leur énergie depuis la production de feuilles, de racines et de bois, vers la réparation des racines et des vaisseaux conducteurs de sève endommagés par la sécheresse (Bréda et al. 2006). Cette modification des priorités physiologiques se fait au détriment de la production d'une écorce robuste – elle tend

parfois à se fissurer sous l'effet d'un ensoleillement plus fort, causé par la chute des feuilles – ou de la production de molécules de défense. Ainsi affaiblis par les sécheresses, les arbres survivants sont plus vulnérables aux champignons ou insectes parasites des années qui suivent. Dans l'hémisphère nord, on estime ainsi qu'il faut plusieurs années après une sécheresse pour qu'une forêt retrouve sa vitalité habituelle (Bréda et al. 2006). Dans l'ensemble, il est difficile de qualifier précisément l'état sanitaire des forêts ou de définir les seuils d'états sanitaires préoccupants (Département de la santé des forêts 2018) ; pourtant, il est établi que les canicules à répétition peuvent mener un arbre à sa mort. Toutes les espèces ne sont pas affectées de la même manière ; certaines, comme l'aulne glutineux ou le bouleau pubescent, souffriront bien plus de la dessiccation que d'autres, à l'instar du pin sylvestre, du buis ou du chêne (Figure 11). Dans des cas extrêmes, des embolies peuvent aller jusqu'à causer l'éclatement des vaisseaux conducteurs de sève : faute d'avoir suffisamment d'eau dans le sol, certains arbres finissent par pomper de fines bulles d'air du sol (Anderegg et al. 2016).

Les sécheresses s'accompagneront de surcroît d'un risque renforcé d'incendies de forêts (Lindner et al. 2010).

Les tempêtes enfin, sont un autre aléa « ponctuel » menaçant les forêts, dont les bien connues Lothar (1999) et Martin (2009) ont marqué les forestiers français. Les tempêtes font souvent l'objet d'inquiétude pour la gestion forestière. À l'heure actuelle pourtant, les analyses des modifications des régimes de tempête indiquent seulement une remontée vers le nord des couloirs de tempêtes, sans augurer de changements de leurs intensités ou fréquences (ONERC 2015). Néanmoins, ces tempêtes ont habituellement lieu à la fin d'hivers que l'on attend plus humides : on s'attend donc à ce que les sols détrempés retiennent moins bien les arbres, et que les dégâts qu'elles causent aillent grandissants (Gardiner et al. 2010).

Les changements graduels ne sont donc pas à négliger, parmi les CC. Moins frappants aux yeux des humains que des aléas ponctuels souvent brusques, ils sont très probablement les plus forts vecteurs de perturbation des forêts.

Le décalage temporel des températures est un des changements graduels prévus qui va grandement perturber la phénologie des arbres, en modifiant leur enveloppe bioclimatique (Thuiller et al. 2005). Débourrement des bourgeons, établissement du feuillage, production de fleurs, *etc.* : chacune de ces étapes de la croissance et de la reproduction représente un investissement d'énergie et de réserves. Toutes sont affectées par la précocité des moyennes des températures. L'allongement de la période de végétation diminue la période de repos hivernal. Or, le bon développement des bourgeons des frênes, bouleaux, peupliers et autres espèces nécessite un laps de plusieurs semaines consécutives de froid. Le manque de froid, dans nos contrées, peut donc

être dommageable aux arbres, d'autant plus qu'il bénéficie à certains de leurs parasites (Williams et al. 2015).

Les changements graduels prévus ne concernent pas seulement l'échelle individuelle des arbres, mais aussi les populations et espèces dans leur ensemble. La distribution des zones viables pour les essences forestières s'étend au nord, via les transports éoliens et animaux de leurs graines. Les bordures sud de leur aire de répartition géographique, à l'inverse, devient trop chaude. Le phénomène a déjà été mis en lumière pour de nombreuses espèces (Cheaib et al. 2012). Le chêne vert par exemple est remonté depuis la Gironde jusqu'en Vendée en un peu plus d'un siècle, à des vitesses allant jusqu'à 57 m/an (Delzon et al. 2013). Les projections des modèles biogéographiques prédisent la poursuite de ce phénomène, au point qu'au rythme des CC actuels, le chêne pédonculé pourrait perdre jusqu'à 75% de ses habitats métropolitains d'ici 2055 (ONERC 2015).
















Enfin, les changements graduels doivent être présentés sous l'angle écosystémique. Les remaniements écologiques affectent les espèces ligneuses, mais aussi leurs prédateurs et parasites. Une espèce emblématique est la chenille processionnaire, dont les nids visibles sont devenus un des indicateurs nationaux des effets des CC en France. Atteignant désormais la moitié nord de l'Europe, la défoliation qu'elle engendre est un des fléaux liés aux CC (Netherer & Schopf 2010).

Les effets des perturbations climatiques sur les forêts sont relativement bien renseignés (Millar & Stephenson 2015). Deux précautions de taille doivent rester à l'esprit des gestionnaires qui souhaiteraient s'y adapter.

En premier lieu, l'ensemble de ces dérèglements est en interaction avec les facteurs de risques actuels des SES forestiers. Le nématode du pin *Bursaphelenchus xylophilus* en est un exemple, lié à la mondialisation des marchés du bois. Ce ver rond venu d'Asie dévaste actuellement les pins de la péninsule ibérique. En l'absence de moyen de lutte connu, la seule mesure de contention est une coupe rase dans un rayon de 500 m autour des foyers avérés. Le potentiel aggravateur du CC provient de ce que le vecteur du nématode est un coléoptère du genre *Monochamus*, dont la dispersion et la survie dépendent de la température (Futai 2013). Jusqu'ici, aucune occurrence n'a été décrite en France, mais l'industrie forestière landaise, entre autres, redoute un réchauffement des cols pyrénéens qui permette le passage du vecteur en France. De nombreux autres exemples d'interactions entre facteurs de risques pourraient être cités : la chalarose affaiblit les frênes, qui craignent d'autant plus les sécheresses (Bakys et al. 2009), la pollution, l'exploitation intensive, la surdensité du gibier empirent les effets des parasites, *etc.* (Van Gameren 2014).

En second lieu, des incertitudes inconnues peuvent, par définition, causer des inattendus aux effets délétères (Kerwin 1993). Les dérèglements climatiques apportent leurs lots de surprises qui permettent parfois de révéler des processus écologiques ou évolutifs insoupçonnés⁹.

Pour les forêts, les dérèglements climatiques vont intensifier des aléas connus, en amener de nouveaux, et les combiner tous de manière inédite. Les impacts les plus importants des changements climatiques ne seront pas forcément les plus brutaux.

	Espèce d'arbre	Sensibilité aux sécheresses	Température
FEUILLUS	 HÊTRE	+++	
	 CHÊNE PÉDONCULÉ	+	
	 CHÊNE SESSILE	++	
	 CHÂTAIGNIER	+++	
RÉSINEUX	 SAPIN PECTINÉ	+++	
	 ÉPICÉA COMMUN	+++	
	 PIN MARITIME	+	
	 PIN SYLVESTRE	+	



 Résiste au froid
  Supporte la chaleur

Figure 11. Sensibilité à la sécheresse et à la température des essences françaises les plus communes.

Données : fichier écologique des essences, <https://fichierecologique.be>
 Conception : Timothée Fouqueray
 Réalisation graphique : Revue *l'éléphant*.

⁹ À ce titre, je ne peux que recommander de visionner l'épisode 59 de la chaîne Dirty Biology, qui illustre les inconnus non connus dans divers domaines, comme par la découverte récente du lien de corrélation entre CC et hausse des attaques de requin. Pour en savoir plus, l'article de Chapman & McPhee (2016) ou <https://www.youtube.com/user/dirtybiology>.

Introduction

Pour la gestion forestière, l'impact des CC prend plus de consistance lorsqu'il est précisé à l'échelle des BSE.

La production de bois par les arbres diminue avec les sécheresses. À l'inverse, l'allongement de la durée de végétation et de la teneur atmosphérique en CO₂ la favorise, tant que la capacité en eau du sol le permet (Ciais et al. 2005). Une étude récente précise par ailleurs comment l'effet fertilisant du CO₂ a été surestimé dans les projections à venir (Yuan et al. 2019).

L'effet des sécheresses sera majeur dans la dégradation de l'état sanitaire des arbres. Il le sera aussi logiquement pour la provision et l'épuration d'eau par les milieux forestiers, un BSE de la plus haute importance mais souvent sous-estimé dans la littérature (Ford et al. 2011).

Des BSE forestiers concernant des massifs forestiers moins nombreux seront eux aussi affectés. Une étude de l'IRSTEA menée à Vaujany, en Isère, montre comment les rôles de la protection contre l'érosion, les avalanches et les chutes de pierre pourraient augmenter en montagne. En effet, les zones boisées pourraient remonter en altitude de 300 à 900 m d'ici la fin du siècle (IRSTEA 2019).

En ce qui concerne les activités récréatives en forêt, elles pourraient mener à une plus grande prévalence des infections véhiculées par les tiques, du fait de la modification de leur aire de répartition par les CC (Gray et al. 2009).

Pour mieux comprendre les impacts des CC sur les BSE, forestiers ou non, une nouvelle vague de projets scientifiques a émergé depuis une vingtaine d'années : les études d'attribution. Il s'agit de détecter statistiquement la part de variance due aux dérèglements climatiques dans l'occurrence ou l'intensité d'un aléa météorologique. Ces études sont les bienvenues pour relier le réchauffement moyen et planétaire du climat à ses conséquences sur les aléas météorologiques régionaux et ponctuels¹⁰.

Puisqu'ils portent atteinte au fonctionnement des forêts, les changements climatiques mettent aussi les BSE forestiers en péril. Les inquiétudes portent principalement sur les rythmes et volumes de production de bois.

¹⁰ À l'expression « réchauffement climatique », je préfère dans ce document celle de « dérèglements » qui souligne l'anormal écart à la « règle » du climat. Par convenance, elle sera considérée comme synonyme de « changements » climatiques, et employée de manière analogue.

Introduction

Pour lutter contre les causes de ces dérèglements climatiques, de nombreuses politiques publiques nationales et internationales d'atténuation ont été élaborées, auxquelles la France tâche de contribuer (Aykut 2012; Falkner 2016). Pour cela, le pays peut triplement compter sur ses forêts.

La capture et le stockage de carbone en forêt sont les propriétés des végétaux photosynthétiques. Ces phénomènes dépendent donc du bon état sanitaire des forêts (maladies, incendie, productivité), mais aussi du type de gestion forestière appliquée : une fois capturé par le feuillage des arbres, le carbone rejoint la litière lors de la caducité ou à la mort de tout ou partie de l'arbre. À long-terme, ce sont donc les opérations du sol (plantation, labour, drainage) et la récolte des rémanents qui vont déterminer l'efficacité du stockage de carbone (Harmon et al. 1990; Lal 2005; Guo et al. 2007). En sous-estimer l'importance revient à biaiser la contribution des forêts à ce BSE (Naudts et al. 2016).

Aux côtés de la capture et du stockage de carbone *in situ*, l'exportation du bois coupé concourt aussi à l'atténuation. La séquestration du carbone dans les matériaux de construction, le mobilier, les produits bois, permet de l'immobiliser de trois ans (durée de vie moyenne d'une feuille de papier) à plusieurs décennies (cas d'une poutre).

La substitution, enfin, du bois à des sources fossiles d'énergie garantirait une moindre empreinte carbone lors de la production d'énergie thermique ou électrique. La substitution soulève de nombreuses interrogations quant aux réels bilans carbone et biodiversité de la démarche (recours à une mécanisation intense pour le prélèvement de souches, rupture de la cascade des usages du bois¹¹, *etc.*) (Baral 2004; Walmsley & Godbold 2010; Lindholm et al. 2010; Bouget et al. 2012).

Une fois n'est pas coutume, le CC incite les communautés scientifique et forestière à mieux comprendre les mécanismes de croissance des arbres et à préciser le rôle du sol dans le cycle du carbone. L'importance relative de nombreux paramètres en sera mieux comprise, et pourrait aider à démêler des débats récurrents sur quelles forêts stockent le plus de carbone (les jeunes, en croissance, ou les plus anciennes, au fonctionnement écologique établi ?) (Luyssaert et al. 2008; Stephenson et al. 2014).

Les questions techniques autour de l'atténuation sont essentielles pour saisir la rhétorique de certains discours sur l'adaptation. Du fait de l'important rôle de puits de carbone des forêts, toute modification de la gestion forestière en vue de l'adaptation ne pourra en effet pas négliger les effets sur l'atténuation. De plus, dans un contexte d'incertitudes fortes, toute action d'atténuation sera, à sa mesure, un moyen d'allonger le délai d'adaptation biologique des arbres.

¹¹ Dans la mesure du possible, la coupe d'un arbre fournit d'abord du bois d'œuvre, puis d'industrie, et les résidus de coupe (copeaux, sciure) servent seulement ensuite de carburant.

2.2. Adaptations biologique & stratégique, les deux côtés d'une même médaille

**Aye une prévoyance sage,
Et des faits importants garde le souvenir,
Semblable au dieu Janus, dont le double visage,
Voit derrière et devant, le passé, l'avenir.**

Caton, *Distiques*

Pour les organismes inféodés aux SES forestiers, trois réactions sont possibles face aux dérèglements climatiques (Aitken et al. 2008). La première est l'extinction de la population locale, voire de l'espèce entière. La deuxième réaction est la migration ; des exemples en ont été donnés dans la page 38. La troisième possibilité est l'adaptation, au sens biologique.

Biologiquement, l'adaptation est un équilibre dynamique entre un état temporaire de spécialisation à l'environnement et une dynamique de suivi des changements de cet environnement. La spécialisation permet d'assurer les fonctions vitales de survie (nutrition, prédation) et de reproduction. L'*evolvability*, ou capacité d'adaptation, permet de suivre les modifications de cet environnement dans le temps ou dans l'espace (Lindner et al. 2010). La capacité d'adaptation se décline à l'échelle individuelle, par la plasticité phénotypique, via l'expression différenciée d'allèles contenus dans le pool génétique de l'individu. Elle a aussi lieu à l'échelle spécifique : lorsque les innovations issues de la dérive génétique (par mutation, stochasticité des recombinaisons alléliques, *etc.*) sont héréditaires, la sélection naturelle a alors lieu sur le temps long. Dans le cas des espèces d'arbres, la part de la diversité génétique dans l'adaptation pourrait être importante, car la forte polygénie des génomes connus offre un large ensemble de phénotypes exprimables face à des conditions bioclimatiques variables (Alberto et al. 2013). De nombreuses incertitudes persistent cependant quant à la capacité des espèces à répondre suffisamment vite à de si rapides changements.

Les processus adaptatifs biologiques évoqués ci-dessus ont eu lieu durant des temps géologiques, couvrant des centaines de milliers de générations d'arbres. Jamais, de connaissance scientifique, les espèces forestières n'ont été confrontées à des dérèglements aussi abrupts. Si les migrations d'espèces végétales vers le nord sont déjà effectives, les incertitudes inhérentes à la compréhension des CC, ainsi que les inconnues écologiques sur la capacité de réponse des arbres, ne permettent pas de savoir si l'adaptation biologique seule sera en mesure d'assurer l'adaptation des SES forestiers (Corlett & Westcott 2013). Il y a de cela plus de cinquante ans, Rachel Carson

Introduction

notait déjà que « *La rapidité actuelle des changements, la vitesse à laquelle se créent des situations nouvelles correspondent plus au pas de l'homme, impétueux et irréfléchi, qu'à l'allure pondérée de la nature. Pour s'adapter à ces éléments inconnus, la vie aurait besoin de temps à l'échelle de la nature: c'est-à-dire de siècles.* » (Carson 1963). Comme en écho, une responsable scientifique de l'ONF affirmait en 2018 à l'académie d'agriculture française que « *Personne n'a vraiment la réponse.* » à la question de savoir si le changement climatique n'est pas trop rapide au vu de la vitesse d'évolution des arbres.

Chercher à mettre en place des actions complémentaires d'adaptation « stratégique » semble donc opportun et non superflu dans un tel contexte.

L'adaptation des forêts aux changements climatiques s'est fondée sur des mécanismes évolutifs inscrits dans le temps long. Compte tenu de la rapidité des bouleversements actuels, des interventions stratégiques peuvent accélérer ou se substituer à ces adaptations.

Toute stratégie est un « *ensemble d'actions coordonnées, d'opérations habiles, de manœuvres en vue d'atteindre un but précis* » (CNRTL 2019). Les adaptations stratégiques seront ici définies comme tout changement de gestion forestière lié directement ou indirectement aux CC. Deux points sont à noter pour différencier les adaptations biologiques et stratégiques. Le premier les rapproche, le deuxième les discrimine.

Tout d'abord, l'adaptation stratégique peut elle aussi être comprise comme un équilibre entre spécialisation et capacité d'évolution. Cet équilibre penchera d'un côté ou de l'autre en fonction du régime de perturbations. Dans un environnement stable, les stratégies de spécialisation permettront d'optimiser des BSE d'intérêt. À l'inverse, la diversification sera le maître-mot dans un contexte d'incertitudes, à l'instar des stratégies de *bet-hedging* biologiques (Kennedy & Koch 2004; Naumann et al. 2011; Simons 2011).

Le deuxième point, majeur dans la construction des études de la thèse, est résumé par Jacobs et al. (2015) : « *Adaptation is a means-to-an-end, and not an end in itself* ». L'adaptation biologique conduit à la survie et à la diffusion des gènes, des individus et des espèces. L'adaptation stratégique, au contraire, ne peut faire l'économie des questions de ses finalités. Elle ouvre donc la porte à des problématiques propres à la composante « sociale » des socio-écosystèmes forestiers. Ces questionnements ressortent de manière saillante dans les politiques publiques d'adaptations aux changements climatiques (ACC), qui font face à la pluralité des valeurs sociales attribuées aux forêts, à des enjeux décisionnels élevés et à une localisation différente des lieux d'émissions des

GES et des lieux impactés par les CC. Pour le dire autrement, tous les ingrédients sont réunis pour faire de l'adaptation aux CC un *wicked problem*¹². Dès lors, il peut être utile de préciser diverses conceptualisations de l'adaptation stratégique qui existent.

Différentes visions de ce qu'est l'adaptation stratégique se sont cumulées dans le temps (Richard 2013).

Une première vision s'inscrit dans une logique de réduction de la vulnérabilité aux CC. Ce n'est pas l'approche privilégiée dans ces travaux, mais certains des forestiers enquêtés s'y réfèrent ; en voici donc les grandes lignes. Dans sa définition usuelle, la vulnérabilité est le croisement de la sensibilité, de l'exposition et de la capacité de s'adapter à un risque (ADEME 2012). L'exposition désigne la répartition spatiale et temporelle des impacts. Par sensibilité, on entend la propension d'un SES à être touché par les impacts climatiques – une forêt exposée à un parasite spécialiste du frêne, mais qui ne comprendrait pas de frêne, ne sera pas sensible au pathogène. Enfin, la capacité adaptative tempère les facteurs d'exposition et de sensibilité aux impacts du changement climatique. C'est grâce à cette adaptabilité que les acteurs des SES sont en mesure de diminuer leur sensibilité ou de réduire leur exposition.

La capacité d'adaptation a fait l'objet d'une deuxième vision de l'adaptation stratégique, face à l'impossibilité de réduire totalement les impacts des CC. La capacité d'adaptation a été le sujet de l'attention des politiques publiques, des projets territoriaux et des études scientifiques (Dhenain 2018). Une typologie basée sur la nature des adaptations distingue les mécanismes de résistance, de résilience et de transformation (Reghezza-Zitt et al. 2012).

L'adaptation par la résistance va principalement consister à diminuer l'exposition à un risque, ou sa sensibilité. Un cas caractéristique pour la gestion forestière est le recours au chêne sessile, plus tolérant à la sécheresse que le chêne pédonculé.

La résilience reviendra à réarranger les composantes de la gestion forestière pour ne pas en modifier les finalités (Holling 1973; Folke 2006). Le terme est à la mode (Folke et al. 2010), au point qu'il en est devenu peu lisible (Ionescu & Jourdan-Ionescu 2010). Dans le cas forestier, il pourrait être incarné par la prise en compte de l'allongement des périodes d'inaccessibilité des parcelles, qui résulte d'hivers plus humides et plus longs sous nos latitudes. Pour s'y adapter, les entreprises de travaux forestiers (ETF) réorganisent leurs calendriers de travail, réservant les

¹² Un *wicked problem* est un problème dont la résolution est compliquée par des causes multiples, interdépendantes et changeantes (Richard 2013).

formations ou entretiens mécaniques aux périodes creuses. Des critiques sont parfois émises sur la résilience, qui pourrait conduire à des maladaptations de long-terme (Nelson 2011). Accroître sa résilience peut en effet engager des ressources naturelles, des moyens humains, techniques et financiers qui manqueraient ensuite à la mise en place d'une adaptation transformative.

Avec la transformation, le troisième et dernier type de cette typologie de l'adaptation stratégique, il est question de modifier la structure même de la gestion forestière afin de l'orienter vers de nouveaux objectifs (pas forcément exclusifs des précédents) (Colloff et al. 2017). Un exemple extrême, et anecdotique en terme de surface, est le changement d'usage des terres dans certaines parcelles landaises qui a suivi la tempête de 1999. Dans de très rares parcelles, les propriétaires ont préféré cesser la production de pins maritimes et installer des centrales photovoltaïques, ou louer leurs terres à des producteurs agricoles.

Les adaptations stratégiques s'appliquent à rénover, modifier ou transformer la gestion forestière. L'intensité des changements appliqués affectera à long terme les trajectoires de ces socio-écosystèmes.

Présentées successivement, les adaptations biologiques et stratégiques pourraient paraître sans rapport. Pourtant, elles s'alimentent l'une l'autre.

L'adaptation stratégique peut se baser sur des adaptations biologiques. Dans les SES forestiers, la sélection variétale puise dans la biodiversité génétique, à l'instar des milieux agricoles (Coomes et al. 2015). Changer de gestion forestière pour privilégier les mélanges d'essences est une autre stratégie qui se base sur les avantages de la diversité spécifique d'une parcelle. Les mélanges spécifiques tireront profit de l'hypothèse d'assurance par exemple (Yachi & Loreau 1999). En occupant des niches écologiques différentes, les espèces présentes diminueront la compétition pour des ressources similaires (*e.g.*, les réseaux racinaires iront chercher l'eau à des profondeurs variables), et la productivité totale en biomasse de la parcelle sera plus résiliente à des aléas climatiques – bien que bien des facteurs complexifient ce simple propos (Pretzsch et al. 2010; Cavard et al. 2011). D'autres processus écologiques sont en jeu avec le mélange d'essences, tels que la redondance fonctionnelle ou l'*overyielding* (Toïgo et al. 2015).

Inversement, l'adaptation stratégique peut accélérer l'adaptation biologique, par exemple pour la conservation de dynamiques naturelles. Des programmes de migration assistée ont actuellement lieu, dont l'un des objectifs, écocentré, vise à compenser la faible vitesse de

déplacement des populations d'arbres. Pour cela, des plantations de semences issues de milieux arides sont effectuées dans des zones pour lesquelles on s'attend à une augmentation des sécheresses (Sansivestri 2015). Des réflexions pour d'autres propositions ont lieu, comme le maintien en non-gestion de parcelles forestières dans le but de disposer d'un point de référence en libre évolution qui permette d'évaluer l'efficacité de stratégies d'adaptation plus interventionnistes (Spittlehouse & Stewart 2004; Duncker et al. 2012).

2.3. La gestion forestière, parangon de l'adaptation aux changements climatiques

Les ambivalences de la notion d'adaptation sont une conséquence logique du grand nombre des manières de l'aborder (biologique/stratégique, proactive/réactive, prévue/spontanée, ...). Le flou qui règne autour de l'adaptation en fait un concept passe-partout, évident au premier abord, mais qui par l'apparence du politiquement correct dispense ses utilisateurs de préciser l'acception qu'ils en ont (Barthod 2007). Des éléments relatifs à l'adaptation sont parfois affirmés sans pondération par des forestiers qui y trouvent des arguments allant dans le sens d'une gestion qui leur convient – de la plus passive à la plus interventionniste. Sans remettre en question les causes des dérèglements climatiques, ils appuient leurs discours sur les manquements des alternatives qu'ils rejettent, tout en modérant les critiques sur l'efficacité des adaptations qu'ils soutiennent (Simonet 2009) (Figure 12).

L'étude de l'adaptation aux changements climatiques doit donc se faire en lien avec les préoccupations premières des gestionnaires forestiers, comme les considérations économiques (cours internationaux des marchés du bois, coût des opérations sylvicoles) ou les déséquilibres sylvo-cynégétiques. Puisqu'il ne s'agit pas de l'adaptation seule, mais de l'adaptation de la gestion, il faut aussi expliciter quels sont les buts de la gestion qu'elle accompagne.

S'intéresser aux objectifs des politiques publiques pourrait être un premier niveau d'analyse des relations entre l'ACC et la dynamique des SES forestiers. Néanmoins, ces politiques sont nombreuses et variables sur des pas de temps assez courts. Surtout, leur mise en œuvre bute sur les visions différentes ou les oppositions que des forestiers de terrain peuvent en avoir. Les travaux de Nathalie Carol, doctorante à l'université de Lorraine, portent ainsi sur la manière dont les responsables d'unités territoriales de l'ONF s'emparent concrètement du contrat d'objectifs et de performance.

De surcroît, les politiques publiques forestières changent plus vite que les facteurs de choix des modes de sylviculture (Buttoud 2007). Pour comprendre le lien entre les ACC et l'évolution de la

gestion forestière, il est donc plus pertinent de partir des mouvements de terrain, des évolutions concrètes des pratiques de gestion.



Figure 12. L'argumentaire du changement climatique, mobilisé à tout propos.

Deux exemples de discours intégrant des éléments d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques pour mieux défendre un type de gestion forestière.

À gauche : dans son *manifeste en faveur des forêts de plantation en France*, la coopérative forestière Alliance Forêts Bois affirme que « *La prise de conscience du changement climatique doit imposer des changements de gestion : on ne peut continuer à prôner comme voie royale la régénération naturelle et des révolutions longues en ayant connaissance de l'évolution inévitable de nos climats et de ses conséquences sur un grand nombre de forêts qui vont se trouver hors station.* » (Coopérative Agricole et Forestière Sud-Atlantique, COFOGAR - les Forêts du Sud, et FORESTARN - Coopérative des Sylviculteurs Tarnais 2012).

À droite : dans son best-seller *La vie secrète des arbres*, l'Allemand Peter Wohlleben recourt à des arguments écocentrés, voire biocentrés. Dans un chapitre consacré à l'atténuation, il défend une gestion très peu interventionniste en se fondant sur une lecture partielle et partielle de la littérature scientifique (Wohlleben 2017).

Les facteurs séparant les politiques publiques des choix finaux de la gestion forestière sont très nombreux. Pour comprendre les conséquences de l'adaptation de la foresterie aux changements climatiques sur les socio-écosystèmes forestiers, il est plus aisé d'observer directement les choix forestiers sur le terrain.

Introduction

On pourrait supposer que les ACC de la gestion forestière soient déjà relativement documentées. En effet, l'attention portée au temps long imprègne les décisions des forestiers, car le pas de temps de la croissance des arbres dépasse largement la durée d'exercice professionnel d'un gestionnaire¹³.

Alors que la littérature disponible abonde sur les adaptations possibles, elle est étonnamment peu disertée quant à l'évaluation de celles déjà réalisées¹⁴. À l'échelle européenne, une étude datant de 2011 avait dressé les grandes lignes des adaptations prévues ou opérées à l'aide d'un questionnaire (Kolström et al. 2011). La mise en place d'adaptation était uniforme à travers les écosystèmes forestiers boréaux, tempérés, continentaux et méditerranéens. Les changements reportés étaient de nature technique (régénération, infrastructure, mode de récolte, ...). De nombreux forestiers insistaient sur l'attente des conséquences des CC pour agir. Les risques les plus craints étaient aussi les plus fréquents dans chacun des écosystèmes : feux, sécheresses et parasites. La même année, une revue de la littérature, ne concernant pas seulement les SES forestiers, appuyait la plupart des conclusions de l'équipe de Kolström (Berrang-Ford et al. 2011). La seule étude laissant la part belle au terrain, plus fouillée, résulte des travaux de Valentine van Gameren. Ses enquêtes ont permis de disposer d'une typologie de l'adaptation chez les propriétaires privés forestiers en Belgique (Van Gameren 2014). Là encore, la priorité aux modifications techniques des opérations sylvicoles prédominait dans l'ensemble des entretiens menés.

L'absence d'informations publiées sur la situation française est d'autant plus étonnante que les forêts y occupent une surface significative et que la moitié des propriétés dispose d'un document de gestion (MAAF & IGN 2015). C'est sur ce constat que les travaux qui suivent ont débuté.

¹³ À titre d'exemple, on entretient encore aujourd'hui des parcelles vosgiennes contenant des douglas introduits par les Allemands. L'annexion de la Lorraine prit fin il y a un siècle exactement.

¹⁴ Depuis le début de la thèse fin 2016, seuls deux projets ont vu le jour pour recenser les adaptations au plus près du terrain : MACCLIF, coordonné par Annabelle Amm, et une enquête menée par l'économiste Antoine Leblois (communication personnelle).

3. Objectifs scientifiques & structuration de la thèse

3.1. Problématique & questions de recherche

L'objectif des travaux qui suivent est de comprendre les évolutions de la gestion forestière¹⁵ induites par les adaptations aux dérèglements climatiques. Ils se concentrent sur les forêts de France métropolitaine.

Il s'agit en particulier de recenser et d'analyser si, et en quelle mesure, l'adaptation modifie les modes d'utilisation (les BSE), les modes de gestion (la sylviculture) et les modes de conservation des socio-écosystèmes forestiers. Cette thèse ne porte donc ni sur les impacts directs des CC sur les socio-écosystèmes forestiers, ni sur les processus d'adaptations purement biologiques des forêts non gérées.

Par ailleurs, ce travail doctoral n'a pas pour but de qualifier le succès des ACC rencontrées, ni d'en lister les critères de réussite. Ceci dépasserait les possibilités et légitimités des attendus d'une thèse universitaire. Une évaluation rigoureuse des ACC nécessiterait d'être réalisée *a posteriori*, et non pas *a priori* ou *in itinere*. Or, le processus d'adaptation ne prendrait fin qu'une fois les aléas passés, ce qui impliquerait d'attendre (au moins) plusieurs siècles – sans parler du syndrome de la cible mouvante, qui veut que les objectifs d'une action puissent être revus en cours de route. Il incombera aux générations de scientifiques à venir de mener à bien cette délicate tâche. Par ailleurs, définir le succès d'une ACC induit d'en connaître les critères de réussite : or, l'enchevêtrement des valeurs, des contraintes et des objectifs de la gestion forestière teinterait d'une trop grande subjectivité une telle appréciation.

Faute de pouvoir s'attaquer à toutes les questions soulevées par la problématique, cette thèse en explore trois.

¹⁵ Pour rappel, la foresterie (ou gestion forestière) est comprise ici comme « l'ensemble des sciences, des arts et des activités ayant trait à la conservation, l'aménagement, la gestion et la création des forêts » (CNRTL 2019).

Pour la première, il importe de mettre les évolutions de gestions des forestiers en regard de l'injonction à la diversification : « *Ne mettez pas tous vos œufs dans le même panier !* ». Leitmotiv des forestiers pour faire face aux incertitudes, la diversification est le maître mot des discours des politiques publiques (*e.g.* ONERC 2017) et des littératures scientifiques (Dessai et al. 2009; Thompson et al. 2014) et grises (Orée 2015). La première question de recherche reviendra à comprendre de quels « œufs » et de quels « paniers » les ACC font l'objet. Elle visera en particulier à analyser les BSE ciblés par l'ACC, et les modes d'actions privilégiés (changements techniques, organisationnels, économiques). En d'autres termes : les gestionnaires forestiers diversifient-ils leurs activités ? Si oui, s'agit-il d'une diversification restreinte à la production de bois, ou englobe-t-elle aussi le rôle majeur des arbres dans l'approvisionnement en eau, ou dans l'atténuation des changements climatiques ? Les forestiers diversifient-ils leurs techniques sylvicoles seulement, ou élargissent-ils leurs réflexions à l'organisation des filières économiques ?

La deuxième question de recherche s'inscrit dans la continuité de la première, car elle interroge le prolongement de la technophilie des forestiers aux adaptations. Dans leurs prévisions et dans leurs implémentations d'ACC, les gestionnaires favorisent-ils les opérations techniques qui modifient la forêt ? Préfèrent-ils recourir à des adaptations en basculant la valorisation de leurs forêts à des BSE moins sensibles aux CC (*e.g.*, demande de paiements pour services écosystémiques (PSE)) ? Tentent-ils de combiner les deux ?

La troisième et dernière question de recherche contient les deux précédentes. Elle porte sur l'intégration du fonctionnement écologique des SES forestiers dans la conception et la mise en place d'adaptations. Les trajectoires écologiques des forêts font-elles partie du questionnement des gestionnaires ? Si oui, quelles sont les importances relatives des postures instrumentales, anthropocentrées, et écocentrées ? Comment les préconisations des sciences de la conservation sont-elles prises en compte pour maintenir la capacité d'évolution des espèces et écosystèmes forestiers ?

3.2. Proposition méthodologique

Dans une telle problématique, les humains ont une influence centrale sur les dynamiques spatiales et temporelles des milieux forestiers. Les forestiers orientent leurs choix d'adaptation de gestion en fonction de critères sociaux, politiques, économiques. L'écologie serait ici bien en peine

de s'attaquer seule à ces questions de recherche. S'ensuit une brève présentation de la conception de l'écologie défendue dans cette thèse : ouverte aux sciences humaines et sociales (SHS) ; ouverte à un « anthropocentrisme élargi » ; attachée à des choix méthodologiques pragmatiques, au risque d'un hétéroclisme théorique (Fabiani 2000; Casabianca & Albaladejo 1997). Cette dernière posture a été nourrie d'échanges et de discussions avec la communauté de la modélisation d'accompagnement (Barreteau et al. 2003).

En 1985, Michael Soulé dressait les grandes lignes de ce qu'il définissait comme la biologie de la conservation, « *une nouvelle étape dans l'application de la science aux problèmes de la conservation, qui concerne la biologie des espèces, des communautés et des écosystèmes soumis à des perturbations directes ou indirectes dues aux activités humaines ou à d'autres agents. Son objectif est de fournir les principes et outils pour la préservation de la diversité biologique.* » (Soulé 1985). Dans son article, le cofondateur de la *Society for Conservation Biology* décrivait la biologie de la conservation comme une discipline de crise, empirique, tolérante face à l'incertitude, s'inspirant de nombreux champs disciplinaires autres que la seule biologie, et dont le rapport à l'écologie est le même que celui de la médecine à la physiologie.

Plus de 30 ans plus tard, deux grands développements ont enrichi l'écologie de la conservation. Le premier est pour moi le renversement de valeur accordée à la biodiversité : d'une valeur fixe, de stabilité, de maintien « en l'état », les diversités génétiques, spécifiques, écosystémiques sont maintenant pensées (aussi) comme moteur de l'évolution du vivant (Fabiani 2000). L'heure est aujourd'hui à l'étude et à la mise en avant des dynamiques évolutives, spatiales et temporelles, du vivant à toutes ses échelles (Forest et al. 2007; Sarrazin & Lecomte 2016), allant jusqu'à la proposition du concept d' « *ecosystem services* » (Faith et al. 2010).

Le second essor de l'écologie de la conservation me semble être l'établissement du concept de SES (Western 2001), qui entérine l'ouverture aux SHS¹⁶. Cette ouverture ne se substitue pas aux recherches purement dédiées à l'écologie, et ne concerne bien sûr pas l'ensemble des écologues. Elle est cependant clairement affirmée, voire revendiquée jusque dans les éditoriaux du journal *Conservation biology* (Mascia et al. 2003). Aucune discipline ne semble exclue de cette ouverture aux SHS, comme en témoignent la psychologie cognitive (Lammel et al. 2012), la géographie (Lavie 2016), l'économie écologique (Douai & Plumecocq 2017) ou les sciences politiques (Turner &

¹⁶ Et la prise en compte des problématiques d'exclusion sociale ou de frein au développement des populations locales causées par une « protection de la nature » attachée à la séparation culture/nature (Christensen 2004).

Robbins 2008). Les milieux forestiers métropolitains, eux, y sont encore peu sensibles (Innes 2005; Bergès & Dupouey 2017).

Les avantages de cette ouverture sont triples pour l'écologie de la conservation, du fait de son orientation au *problem-solving*. Elle permet tout d'abord d'accroître la gamme des outils visant à conserver les dynamiques écologiques, en recueillant des informations socio-économiques complémentaires aux seules données spécifiques ou écosystémiques (Western 2001; Groffman et al. 2010). L'ouverture aux SHS permet ensuite de mieux appréhender les effets produits par les projets de l'écologie de la conservation, qui ne sont pas sans concerner les sociétés humaines (Arpin 2015). Enfin, et le nom même d'anthropocène en est la preuve, les humains sont devenus une des forces majeures de l'évolution des écosystèmes (Palumbi 2001) : les négliger serait faire preuve d'une forme d'aveuglement scientifique.

L'ouverture de l'écologie scientifique, et spécifiquement des sciences de la conservation, ne se fait pas seulement aux SHS. Elle concerne aussi un « anthropocentrisme élargi », défini ici comme la défense d'arguments ambivalents afin d'atteindre la conservation des dynamiques écosystémiques. Par arguments ambivalents, j'entends des propos ni tout à fait anthropocentrés (priorité aux BSE), ni parfaitement écocentrés (la soi-disant « mise sous cloche »), mais qui entrelacent les uns avec les autres (*e.g.* Morandin et Winston 2006). Le but est de s'adresser plus aisément à des interlocuteurs anthropocentrés en présentant les raisons de l'importance de conserver les dynamiques des milieux naturels. Les débats sur les postures retenues sont anciens. Ils ont aussi agité la gestion des forêts, comme en leur temps l'ont prouvé Muir et Pinchot aux États-Unis (Barthod 2015).

L'ouverture à un anthropocentrisme élargi est aussi une stratégie de se conformer au langage des décideurs politiques, que la conservation tente de toucher par des arguments utilitaristes – et souvent économiques, comme les calculs coûts-bénéfices (Naidoo & Ricketts 2006; Biache & Rouveyrol 2011). Pour autant, des difficultés surviennent vite avec la mise en économie de la conservation. De nombreux obstacles persistent, tels que l'impossible notion d'équivalence écologique (Godard 2005; Lombard Latune 2018) ou le glissement progressif de l'anthropocentrisme élargi vers l'intérêt financier, conséquence possible de dispositifs de PSE (Laurans & Aoubid 2012; Farley & Costanza 2010).

La double ouverture de l'écologie aux SHS et à un anthropocentrisme élargi induit de fait un « bricolage » théorique et méthodologique (Jollivet & Carlander 2008), renforcé par l'essor de l'approche socio-écologique.

De nombreux écologues se sont ainsi prêtés au jeu plus ou moins heureux d'une théorie unifiée des dynamiques spatio-temporelles des SES. La panarchie est un exemple nous venant de Suède (Gunderson & Holling 2002; Allen et al. 2014), dont la portée descriptive est plus évidente que sa force d'analyse. Il en va de même pour ses avatars (Collins et al. 2011). D'autres tentatives ont été menées, à l'instar du *Sustainable Rural Livelihood Framework* qui propose de comprendre le maintien de communautés rurales face à des changements globaux (Nelson et al. 2010). Pour ce faire, ce cadre d'étude catégorise les atouts et faiblesses d'un territoire en cinq grands types de capitaux, négligeant de reconnaître les spécificités de chacun d'entre eux – tous les capitaux (sociaux, écologiques, techniques, ...) ne sont pas interchangeables (Ponthieux 2004).

Inversement, les SHS proposent aussi des cadres d'analyse des liens unissant les humains au vivant non-humain, en anthropologie (Descola 2005), économie ou sociologie. Dans ce derniers cas, des propos sur les systèmes socio-techniques (Akrich 1989), la place de la technique dans nos sociétés (Ellul 1954), la sociologie des organisations (Crozier & Friedberg 1977; Friedberg 1997) ou encore des « science and technology studies » (Callon et al. 2014) ont pu nourrir certaines des réflexions qui suivent, mais ne doivent être perçues comme leur cadre d'analyse. La formation que j'ai acquise relève bien trop de l'écologie scientifique pour que je puisse me targuer d'une quelconque maîtrise de ces approches.

Démuni d'une approche conceptuelle unique, j'ai été séduit par le cheminement réaliste de l'équipe Trajectoires Écologiques et Sociétés du laboratoire Écologie, Systématique, Évolution (ESE 2019). Plutôt que de vouloir à tout prix défendre une vision théorique de l'interdisciplinarité, les membres de cette équipe s'appuient sur leurs socles disciplinaires (principalement l'écologie) pour se diriger selon les questions de recherche vers des partenaires scientifiques d'autres spécialités. Dans mon cas, il s'est agi de mes deux directeurs de thèse, l'écologue Nathalie Frascaria-Lacoste et l'économiste Michel Trommetter, ainsi que des membres de mes comités de suivi de thèse et du laboratoire d'excellence « Biodiversité, Agroécosystèmes, Société, Climat ».

Introduction

Pour toutes les raisons exposées ci-dessus, les outils méthodologiques utilisés pour répondre aux questions de recherche font la part belle à des approches qualitatives familières aux SHS. La chose est suffisamment rare pour que des écologues « monodisciplinaires » puissent en être dérouterés¹⁷. Je les invite à se laisser surprendre par de nouveaux régimes de charge de la preuve, dans lesquels la statistique et la répliquabilité cèdent le pas à « des monstrations » de faisceaux d'indices convergents (Busino 2003).

¹⁷ Le cas concret proposé par Bühlmann et Tettamanti (2007) permettra peut-être de mieux illustrer les défis soulevés des dialogues méthodologiques entre sciences biologiques expérimentales et SHS.

3.3. Structuration de la thèse

Au vu du faible nombre d'articles portant sur le sujet, il a fallu tout d'abord aller à la rencontre des gestionnaires forestiers pour recenser les ACC prévues ou mises en place en France. L'objectif de la première partie de la thèse est donc de rapporter les évolutions de la gestion forestière, observées en réaction ou en anticipation des CC. Pour ce faire, une enquête par entretiens semi-dirigés a eu lieu dans les PNR des Vosges du Nord et des Landes de Gascogne (les divers terrains de la thèse sont présentés dans la Figure 13). Elle a permis de confirmer les hypothèses de départ suivantes :

- les adaptations ciblent principalement des risques climatiques dont les enquêtés ont déjà fait l'expérience
- les adaptations sont principalement anthropocentrées, peu axées sur des BSE non marchands (aspects esthétiques, récréatifs ou environnementaux des forêts)
- lorsqu'elle a lieu, la diversification des adaptations est, de manière écrasante, la diversification des techniques de gestion forestière.

La deuxième partie de la thèse examine l'attention majeure portée à la diversification technique. Durant les entretiens de la première partie, un lien non-négligeable entre chercheurs et forestiers a été mis en avant par ces derniers, via des newsletters, des revues forestières, des conférences ou des programmes expérimentaux associant des propriétaires (privés ou publics) et des laboratoires de recherche. Dès lors, une des causes du manque de considération d'adaptations socio-économiques pourrait-elle être l'orientation des projets de recherche nourrissant les réflexions des forestiers ? N'avoir que des projets scientifiques financés sur des développements génétiques, mécaniques et forestiers pourrait expliquer une partie des observations de terrain. En conséquence, la partie deux brosse le portrait des efforts de recherche publique que la France a fournis sur les différentes facettes de l'atténuation et de l'adaptation. Là encore, le suivi des appels à projets de recherche souligne, en la nuanciant toutefois, la prééminence des recherches techniques pour la production de bois.

Introduction

La troisième partie de la thèse prend le contrepied de la précédente. Dans le cadre académique, les projets de recherche centrés sur des adaptations non techniques sont minoritaires. Pourtant, de nombreuses initiatives décrites en conférences, colloques, dans la presse spécialisée ou au travers de conversations florissent dans les régions françaises : labels de qualité ou appellations d'origine contrôlée, actions citoyennes de rachat de parcelles, contrats de paiement pour stockage de carbone, *etc.* Cette dernière initiative a retenu notre attention. Fournir des subventions pour des opérations sylvicoles propices à l'atténuation est d'abord un moyen de diversifier les revenus financiers des propriétaires en valorisant un BSE moins soumis aux fluctuations économiques que le bois. Ce pourrait aussi être un moyen indirect de s'adapter, en diminuant la dépendance à une production ligneuse fortement menacée par les CC. Néanmoins, la conception d'un contrat de paiement pour stockage de carbone peut être très variable : continue-t-on, à l'instar des enseignements des parties I et II, à globalement faire abstraction des BSE non productifs et des dynamiques écologiques des forêts ? Prend-on en compte les conséquences des CC qui sont encore peu présentes, mais iront croissantes ? Dans une initiative qui diversifie les ressources économiques des propriétaires forestiers, quelle est la diversité des modes retenus de sylvicultures ? Deux études de cas, les associations Sylv'ACCTES, en Auvergne-Rhône-Alpes, et Normandie Forêver, basée dans la métropole de Rouen, sont présentées.

La dernière partie tente de faire la synthèse des trois premières. Elle introduit, décrit et spécifie les conclusions de « *Foster Forest* », un jeu sérieux créé pour simuler et stimuler l'adaptation aux changements climatiques des forestiers. *Foster Forest* consiste en un atelier d'une demi-journée, réunissant des propriétaires privés, un agent de l'ONF, un élu municipal et un gestionnaire d'espace naturel protégé autour d'une simulation informatique d'un massif forestier. Durant l'atelier, chacun des joueurs devra prendre des décisions de gestion forestière, dans un contexte où chaque nouveau tour de jeu est le théâtre de dérèglements climatiques. L'intérêt était ici de confirmer, d'infirmer ou de nuancer les premiers résultats de la thèse, mais aussi de susciter et d'observer des réactions et adaptations non-techniques. Pour cela, le jeu sérieux permet de créer une situation dans laquelle les adaptations techniques sont nécessaires mais insuffisantes pour répondre totalement aux objectifs de chacun des participants. Au pied du « mur technique », comment les principaux intéressés diversifieront-ils leur gestion forestière ? Percevront-ils les dynamiques écologiques comme des outils permettant de s'adapter, ou des éléments à conserver des SES ? Auront-ils un penchant spontané pour des mécanismes d'ACC qui relèvent des politiques publiques, de logiques de marché

Introduction

ou d'action collective ? Telles sont certaines des questions auxquelles la partie quatre tente de répondre, après avoir présenté la conception et les choix méthodologiques aboutissant à *Foster Forest*.

Une discussion générale conclut le propos. Elle reprend et résume les résultats des quatre chapitres, et propose six pistes aux forestiers et aux écologues de la conservation pour ouvrir l'adaptation aux changements climatiques à des considérations autres que techniques et productives.

Deux premières annexes présentent des projets menés sur l'ACC dans des contextes non forestiers. On trouvera ainsi un article consacré à la démarche d'ACC du service biodiversité du PNR Loire-Anjou-Touraine et un article explorant la relocalisation stratégique, une méthode pour les humains d'adapter les SES littoraux aux CC. La troisième annexe est un article qui s'emploie à prendre du recul sur la situation des doctorants menant des thèses interdisciplinaires sur des thématiques environnementales. La dernière annexe présente succinctement le concept de « solutions fondées sur la nature ».

Introduction

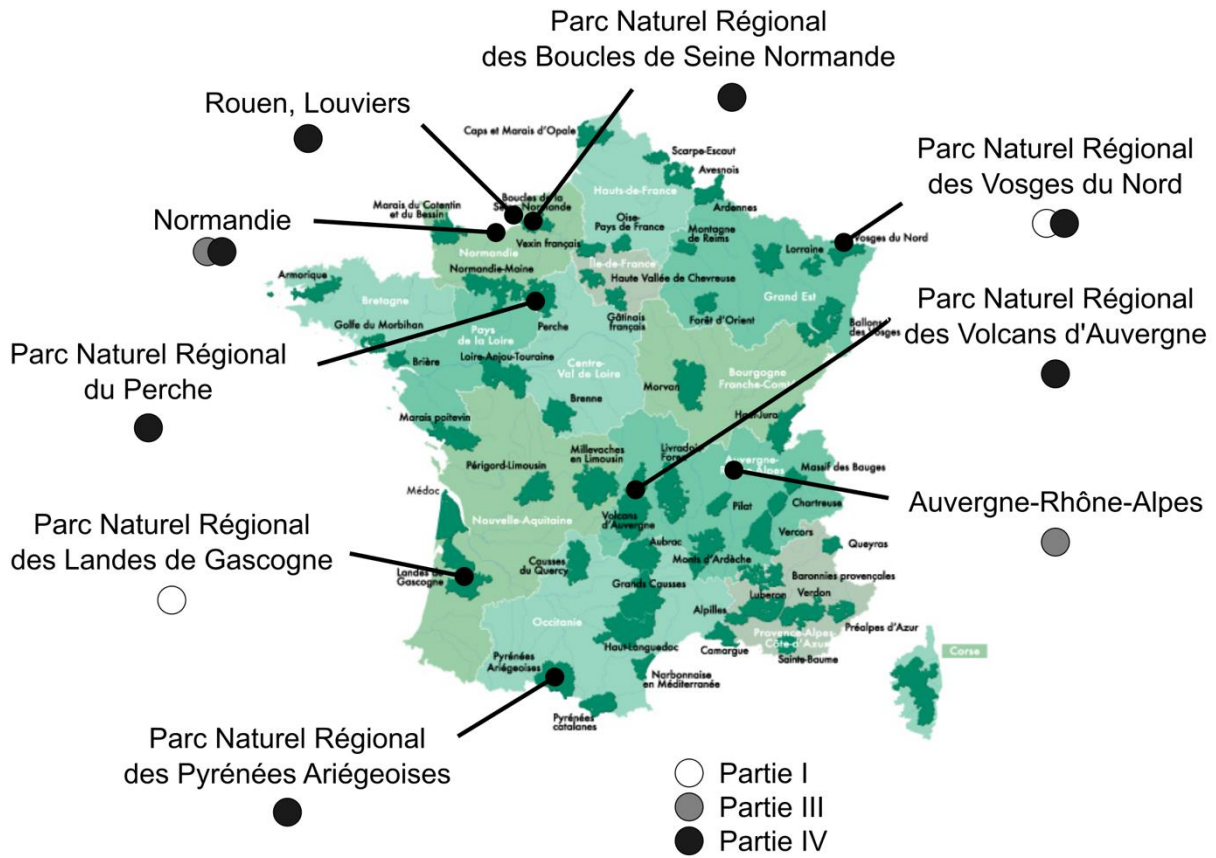


Figure 13. Terrains d'études des différentes parties de la thèse.

La deuxième partie de la thèse ne s'est pas basée sur un travail de terrain. Figure tirée et modifiée de la carte des 54 parcs naturels régionaux disponible sur le site www.parc-naturels-regionaux.fr.

CHAPITRE 1 :

THE CALM BEFORE THE STORM : HOW CLIMATE CHANGE DRIVES FORESTRY EVOLUTIONS



Le drone, une innovation technologique utilisée pour la télédétection des dégâts aux forêts.
Crédit photographique : ONF/Giada Connestari.

Chapitre 1

Cette première partie a pour objectif de rapporter les évolutions de la gestion forestière, observées en réaction ou en anticipation des CC. Elle fait suite à une série d'entretiens préparatoires qui se sont déroulés à Paris durant les premiers mois de la thèse, avec :

- un ancien directeur de l'ONF
- le directeur « Forêts et risques naturels » de la direction générale de l'ONF
- le directeur de l'institut de développement forestier (institut technique national de la forêt privée assurant la recherche et le développement pour le centre national de la propriété forestière)
- un membre du bureau « Gestion durable de la forêt et du bois » de la direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, au ministère de l'agriculture et de l'alimentation
- un membre de la section « Milieux, ressources et risques » du conseil général de l'environnement et du développement durable, au ministère de la transition écologique et solidaire.

Dans ces entretiens très libres, les personnes rencontrées ont principalement développé les sujets des politiques publiques et des programmes de recherche liés à l'ACC, sans parler de cas précis d'adaptations mises en place en forêt publique ou privée. C'est là la première raison ayant orienté la méthodologie du chapitre 1 vers un travail de terrain.

La seconde raison est le décalage qui existe entre une politique publique et son application concrète (Deuffic 2018). L'objectif des travaux qui suivent étant de comprendre l'évolution des SES forestiers sous l'influence de l'ACC, il m'a paru nécessaire de m'intéresser au dernier maillon de la mise en place des ACC (la gestion forestière « de terrain »), plutôt qu'aux politiques publiques.

La partie qui suit a été publiée, sous une forme préliminaire, en tant que chapitre de l'ouvrage collectif *Handbook of Climate Change and Biodiversity* (Fouqueray, Charpentier, et al. 2019). La version actuelle est actuellement examinée (*reviewed*) pour publication dans le journal *Forest Ecology and Management*. Elle a grandement bénéficié des retours des membres de mon comité de thèse (François Bertrand, Hélène Leriche, Pierre Pech et Anne-Caroline Prévot) ainsi que des remarques d'Agnès Fortier.

Contributeur : Antoine Charpentier, dont j'ai encadré le stage de géographie de deuxième année de master Bioterre (Université Paris I - Panthéon - Sorbonne).

The calm before the storm: How climate change drives forestry evolutions

Authors:¹⁸ Timothée Fouqueray^{a*}, Antoine Charpentier^b, Michel Trommetter^c, and Nathalie Frascaria-Lacoste^a

^aEcologie, Systématique, Evolution, AgroParisTech, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91405, Orsay, France

^bMaster Bioterre, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 75005, Paris, France

^cGAEL, INRA, CNRS, Grenoble INP, Univ. Grenoble Alpes, 38000, Grenoble, France

* Corresponding author: timothee.fouqueray@u-psud.fr

¹⁸ TF and AC collected data; TF conceived, designed, and wrote the paper; MT and NF edited the manuscript.

Highlights

- Climate change weakly modifies forestry compared to techno-economic evolutions.
- Most adaptations focus on technical operations and ignore organizational changes.
- Ecological processes are instrumental and applied at the forest stand scale.

Abstract

Adapting forest management to climate change is a key issue, as forests are crucial for mitigation policies and the provision of many ecosystem services. Understanding the magnitude of the progress made in this respect can help shape further adaptation developments and avoid the putative maladaptive side effects of forest management evolutions. Here, we aim to bridge the knowledge gap of adaptation implementation in French forests. To stay as close as possible to concrete changes, we conducted semi-structured interviews with foresters in two study areas that differed in the intensity of their forest management approaches. Our findings highlight unprecedented aspects of adaptations: (i) adaptation focuses on productive ecosystem services at the expense of other essential services such as water supply or natural habitats; (ii) adaptations rely on technical changes in forest management and do not deal with climate impacts through organizational or economic tools; and (iii) envisaging ecological processes through adaptations is instrumental and limited to small spatial and temporal scales. Our results also extend the existing body of knowledge to the framework of forest management: (i) climate change is not the main driver of forestry changes; (ii) extreme events are windows of opportunity to stimulate adaptive changes; and (iii) proactive adaptation to unexperienced hazards is very weak. We argue that to be as effective as possible, climate change adaptation in forestry should implement complementary organizational and economic changes in addition to the necessary technical evolutions.

Keywords: Adaptation, climate change, forest, social-ecological, biodiversity, France

1. Introduction

Forestry is the art of creating, restoring, or using forested areas in order to conserve them and benefit from their goods and services. By its very essence, forestry has undergone many evolutions relating to technical (e.g., mechanization of felling), social (e.g., increased demand for sustainable ecosystem management), and economic developments (e.g., changes in charcoal production) (MCPFE 1993; Mather 2001; Bolte et al. 2009). To keep up with these developments, foresters have developed different practices, often distinguished by the intensity of their management or the type of ecosystem goods and services (ES) favored (Duncker et al. 2012). Despite their wide variety, silvicultural treatments were implicitly considered to be climatically stable (to some extent) until the changes of the last few centuries (Millar & Stephenson 2015). In other words, climate change now calls into question forestry principles such as the choice of species suited to local biogeographical factors (Bolte et al. 2009).

Forest landholders and managers must now renew their forestry paradigms in order to tackle the intensification of stress factors brought about by climate change. In Europe, a decrease in forest health and productivity is expected to result from rarer cold extremes and more frequent and severe heat waves, followed by pathogen attacks (Ciais et al. 2005; Bréda et al. 2006). Biotic threats such as introduced pests (e.g., pine wood nematode *Bursaphelenchus xylophilus*) and spontaneously invasive species (e.g., ash fungi *Chalara fraxinea*) have already shown their huge potential for damage (Bakys et al. 2009; Futai 2013). Moreover, interactions between these many climate-related stress factors as well as other issues such as air and soil pollution increase concerns about the future of forest management (Paoletti et al. 2007; Keenan 2015). The outlook of climate change for temperate forests is somber, and even the beneficial side effects of climate warming in terms of increased forest growth are now moderated by recent research on the importance of vapor pressure deficit (Bolte et al. 2009; Yuan et al. 2019).

In this context, foresters should already account for adaptations to climate change, because of the large timescale of forest development. Adaptive processes occur at different levels when climate change does not lead to local forest decline or extinction. At the individual tree level, phenotypic plasticity and phenological changes can contribute to the tree's acclimatization (Aitken et al. 2008). At the population level, evolutive processes or migration toward suitable sites can occur (Noss 2001; Alberto et al. 2013; Bussotti et al. 2015). Ultimately, forest managers can set strategies to deal with climate change and increase the resilience of forest communities (Millar et al. 2007; Keenan 2015).

In line with the need to adapt, an abundant body of literature now confirms how “climate-proof” paradigms of forest management have arisen such as adaptive management (Linder 2000;

Noss 2001; Bolte et al. 2009) and the consideration of uncertainties by diversifying silvicultural practices and objectives (Keenan 2015; Augustynczyk et al. 2019). However, in comparison, very little research has explored how foresters currently handle the impacts and uncertainties of climate change in the field (Kolström et al. 2011; Van Gameren 2014). This is of the highest importance, because concrete changes drive forest ecological trajectories, and feedback from the field can help to improve public policies related to forest management (Brockerhoff et al. 2017).

Therefore, the rationale of this study is to describe the field adaptations and the drivers that could have been implemented in the temperate forest sector. It draws on interviews with French forest managers (owners, private forest advisors, or public practitioners). Three reasons motivate the choice of this country as a study case. First, the country has a vast forested area (169,000 km², the third largest volume in Europe; IFN 2018). Second, its timber industry is economically important for employment, which influences public policies for its adaptation to climate change (MAAF 2017). Third, France is expected to experience the impacts of climate change in all its forest ecosystems (ONERC 2015).

The paper is organized as follows. After presenting the methodological aspects of the research, we identify the importance attached to climate change adaptation in the evolution of forestry practices. Then, we analyze the objectives and means of adaptations. Finally, we investigate how foresters envisage the relations between adaptation and ecological processes.

2. Materials and methods

2.1. Study cases

Forest management couples human and natural systems in interaction and can therefore be considered to be a social-ecological system (Liu et al. 2007). From this perspective, social, economic, and ecological criteria oriented the selection of our study areas so as to retain French sites with opposing approaches to forest management in terms of objectives and technical interventions.

The “Vosges du Nord” (hereafter “Vosges”) is a sub-mountainous temperate zone lying at the northeastern border separating France and Germany. Dating back centuries (Jéhin 2005), this forest now features a species mixture dominated by European beeches (*Fagus sylvatica*) and oaks (*Quercus robur* and *Quercus petraea*). This mixture is said to be a natural forest vegetation, while managed forests significantly admix conifers and, to some extent, other broadleaved species (IFN 2018). Forest management culturally favors semi-natural processes such as natural regeneration,

multi-storied stand structure, and long-term tree development, similarly to what happens in the nearby German region of Baden-Württemberg (Duncker et al. 2012). Private ownership represents 15% of the total surface, with most forests being the property of municipalities or the French state.

The second study area, the “Landes de Gascogne” (hereafter “Landes”), is a human-made forest in southwestern France. After two centuries of intensive management, it expanded by draining the former marshlands (Deuffic et al. 2010). Nowadays, the monoculture of maritime pines (*Pinus pinaster*) requires the plowing of soil, the planting of selected seedlings, and the clearcutting of trees between their 30th and 40th year. Private ownership represents 95% of the total surface, making the Landes forest one of the largest privately owned forests in Europe (Deuffic et al. 2010).

Throughout the article, interview samples are referred to by their anonymization number (Table 1). They begin with “V” or “L” in reference to the Vosges or Landes region, respectively. When present, the bracketed text includes indications previously given by the interviewee.

The relevance of the contrasting characteristics of the study areas was later confirmed in many interviews. A Landes interviewee thus stated: “It is not the factory that adapts to the forest, it’s the opposite; it is the forest that adapts to the factory” (L12), while in the Vosges, another interviewee explained that “The sawmills have to adapt to what the forest produces; the forest does not adapt to the sawmills” (V13).

2.2. Data collection

To evaluate field adaptations to climate change, we carried out 27 individual semi-structured and open-ended interviews during June and July 2017. Interviews were quasi-equally distributed between the Vosges (n=13) and the Landes (n=14). Interviewees were selected to cover the range of forest stakeholders intervening on management decisions (Table 1). For private forests, we interviewed private owners and professional forest advisors; for state forests, forest managers from the National Forests Office (NFO; “Office National des Forêts” in French), the public agency responsible for their management; and for municipal forests, local officials and their advisors from the NFO. To benefit from the perspective of the timber industry, we completed the panel with interviews of professionals from forestry cooperatives (Table 1).

Each interview followed the same pattern: (i) a description of forestry practices used by the interviewee; (ii) a depiction of their evolution over time; and (iii) the interviewee’s viewpoint on the impediments and assets to reaching the desired silvicultural practices. If the interviewee did not spontaneously mention recent climatic events, we asked for his reactions to the recent windstorms known as Lothar (in 1999) and Martin (in 2003).

Every interview was recorded, fully transcribed, and qualitatively analyzed. Audio tracks and written transcriptions were analyzed using *Sonal*, an encoder software conducting audio-textual synchronization. *Sonal* allows for the identification of thematic and statistic discourse studies such as topic occurrences and/or co-occurrences (e.g., “logging practices” and/or “forest uses”) (Alber 2010).

2.3. Characterization of evolutions in forest management

Evolutions were identified by isolating interview samples that mentioned one or several changes made to forest management: for example, “In the past, there weren’t all these big machines” (V10). We specifically labeled as “adaptation” the evolutions triggered by the direct impacts of climate change: for example, “The next generation [of maritime pines] is under selection and should be more oriented toward... How to say it? Toward the consequences of global warming and a better resistance to drought” (L9). “Adaptations” did not include evolutions relating to the indirect impacts of climate change such as developing mitigation policies: “Harvesting the [forest] growth to supply the wood-energy sector, which will then replace hydrocarbons and nuclear energy – this is the French energy policy” (V7).

Using discourse analysis, two categories were then assessed for the drivers of adaptations. On the one hand, we explored goal-directed drivers, which are the adaptations focused on ES (timber production, water purification, hunting, carbon storage, etc.). On the other hand, we investigated risk-directed drivers, namely specific climate hazards to be prevented (storms, droughts, pathogens, etc.). Adaptations driven by risk aversion were also distinguished depending on whether they were already implemented or not. No consideration of the relative success of these different adaptations were made. We considered that our study is too premature for an *ex-post* evaluation, and we avoided any value judgment, as the definition of successful adaptation is personal and therefore subjective.

Analyses of adaptations were completed by a characterization of their management intensity based on Duncker et al. (2012) and Biber et al. (2015). This qualified whether the adaptive approaches drew on the ecological processes of forest growth and development (e.g., close-to-nature silviculture) or on a high degree of anthropization (e.g., artificial maintenance of a tree population through plantation despite declines following decreasing rainfalls) (Gamborg & Larsen 2003; Pramova et al. 2012; Brang et al. 2014). To gain insight into this issue, we also relied on the language elements found in the interviews, which related to the ecological processes such as “biodiversity,” “nature,” “sustainable management,” “wildlife,” or “fauna and flora.”

3. Forestry evolutions not driven by climate change adaptations

3.1. Mainstreaming of forest management in the timber industry

The last three decades have brought about common changes to the Vosges and Landes regions. All these evolutions have converged in the reinforcement of linkages between upstream and downstream forest-based activities.

Upstream activities include proper forestry operations such as the choice of forest regeneration and logging practices. Mechanization was by far the most cited evolution (9 interviews), with a more frequent use of harvesting machines and more powerful machines, as illustrated by interviewee L5: “There is a clear evolution. It is the acceleration of mechanization, of its intensity, and... It is the increase in the power of the machines.” The prevailing place of mechanization is a common evolution in forestry, which is also found in other national contexts (Heinimann 2007; Marchi et al. 2018).

On the downstream side of the timber industry – wood processing and organization between stakeholders of the forest sector –, evolutions mostly related to the industrialization and standardization of the production. Economic competition between sawmills spurred the transition from a network of small industrial units to fewer and larger plants: “It has already been 10 years, so unfortunately it’s a long-term trend that there are fewer and fewer [wood] processors” (L9). Seven interviewees observed that this growing industrial concentration went hand-in-hand with the replacement of timber auction sales by supply contracts. They pointed out that the aim is to secure timber-based resources for forest landowners and stabilize the supply of sawmill and paper industries. In addition to these industrialization processes, the standardization of forestry practices was fostered by the social demand for the certification of sustainable logging such as PEFC or FSC, a change once again observed in both the Landes (L8) and the Vosges (V5).

We argue that most forestry evolutions followed 1999, a critical year because of the Lothar windstorm (MTES 2017), with this *tabula rasa* being used by the forest industry to build up a “shock doctrine” (Klein 2008). As underlined by interviewee L2, “Before ‘99, timber exploitation was done by hand by lumbermen, and since around ‘99, there has been all this mechanization... Often the industries subsidized the firms to invest in these machines.” Subsequent catastrophes are frequently described as windows of opportunity to introduce innovations (Abel et al. 2006), as they provided the timber industry with a chance to ensure a business built on sowing, cultivation, and logging machines.

3.2. Climate change adaptation: Reaction first

In total, we identified 82 samples of interviews from 24 different interviewees (12 from the Landes and 12 from the Vosges) mentioning an evolution of forestry practices due to climatic risks. Even if they mentioned a climatic *risk*, 44 evolutions of forestry practices made no clear mention of their link to climate *change* (Figure 14), so they were not viewed as adaptations to climate change.

Overall, 38 evolutions of forest management distinctly responded to the intensification of hazards because of climate change (Figure 15). Among the 38 adaptations mentioned, 27 related to the hazards of severe droughts and windstorms, which worried many interviewees, as depicted by interviewees L4: “In this area, as soon as the wind starts blowing, people don’t sleep anymore, you know” and V2: “For this time of the year, not much water is flowing... There isn’t enough water here.”

Among the 14 foresters who associated these 27 adaptations to droughts and storms, 9 had already changed their forest management in order to account for such hazards, while another 2 had launched experiments on technical adaptations such as assisted migration. The 11 other adaptations to climate change mentioned by 6 different foresters related to a mixture of different sources of stress (parasites, phenological changes, etc.) or parasite attacks (n=3) (Figure 14) and were partially operational in the field.



Figure 14. Climate-related drivers of forestry evolutions and their implementation.

Interview samples labeled as “climate hazards” differ from those mentioning “climate change,” as the evolution of forestry practices does not result from a change in the climate. The rising demand for fuelwood due to public policies on mitigation was the only indirect driver of forestry evolutions found in the interviews. The external ring indicates the implementation status of a forestry evolution. Please note that the counts refer to the number of interview samples and not to the number of interviewees, as one interview potentially contains several samples relating to an evolution of forestry practices.

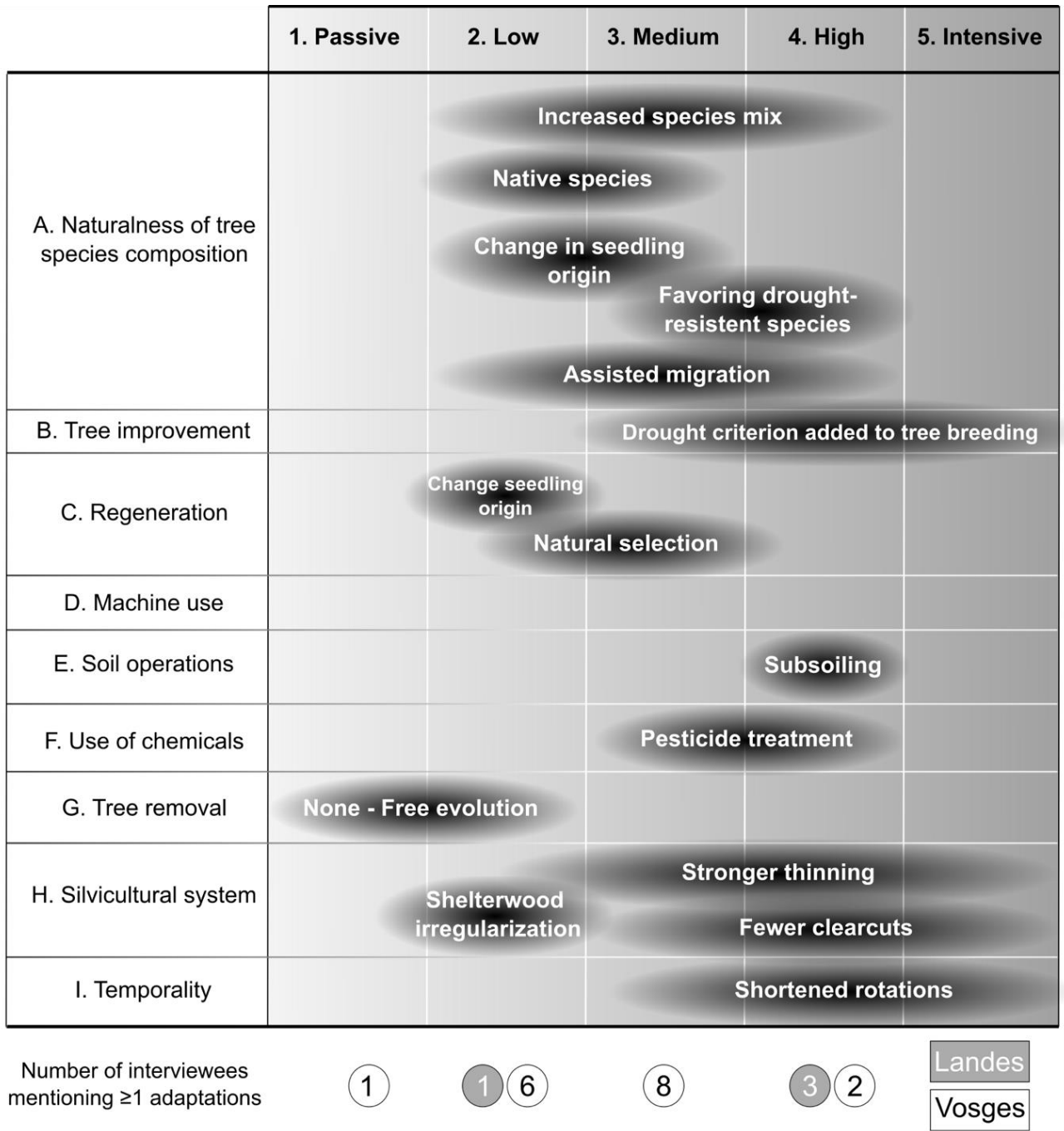


Figure 15. Climate change adaptations rely on technical operations at different decision stages of forest management.

Columns: the five forest management approaches are taken from Duncker et al. (2012) and ranked by the intensity of forest management. “Passive”: unmanaged forest nature reserve; “Low”: close-to-nature forestry; “Medium”: multifunctional forestry; “High”: intensive even-aged forestry; “Intensive”: short rotation forestry. *Lines:* adaptive changes in the major decisions involved in forest management, inspired by Duncker et al. (2012). *D:* progress of machine usage was evoked, but not in relation to climate change. *Bottom:* Vosges interviewees were overrepresented among those speaking of adapting to climate change.

This situation is the paragon of reactive adaptations, defined by Adger et al. (2005) as “adjustments in ecological, social, or economic systems in response to observed or expected changes in climatic stimuli and their effects.” As found in the literature, the experience of a natural disaster enhances risk perception (Berrang-Ford et al. 2011; Rey-Valette et al. 2012). In line with this, interviewees generally evoked the exceptional heat waves experienced in 2003 as well as the devastating Lothar and Martin windstorms (in 1999 and 2009, respectively). The infrequent mention and operational implementation of the other repercussions of climate change can be qualified as a wait-and-see attitude, an example of which is seen with forest advisor V1: “There are no easy answers to give to private owners, but what’s important today is to limit damage.” We thus argue that focusing on past hazards could be detrimental to a proactive adaptation to other impacts (e.g., development of parasite attacks, phenological changes) (Engle 2011).

Compared to the 82 changes in forestry practices driven by climate risks, the indirect driver of the rising demand for fuelwood, triggered by public policies in favor of mitigation, was mentioned 10 times (Figure 14): 9 interviewees cited their interest in supplying fuelwood to diversify their income sources, while 7 reported a prior change in this direction such as slash and/or stump removal. This can be considered to be a weak modification of forestry practices, although it indicates how the indirect impacts of climate change can have important consequences in the field. It also raises the issue of how climate change modifies the prioritization of ES resulting from forest management.

4. A narrow focus of adaptation on timber production and technical changes

4.1. Adaptation: Change of practices, continuity of objectives

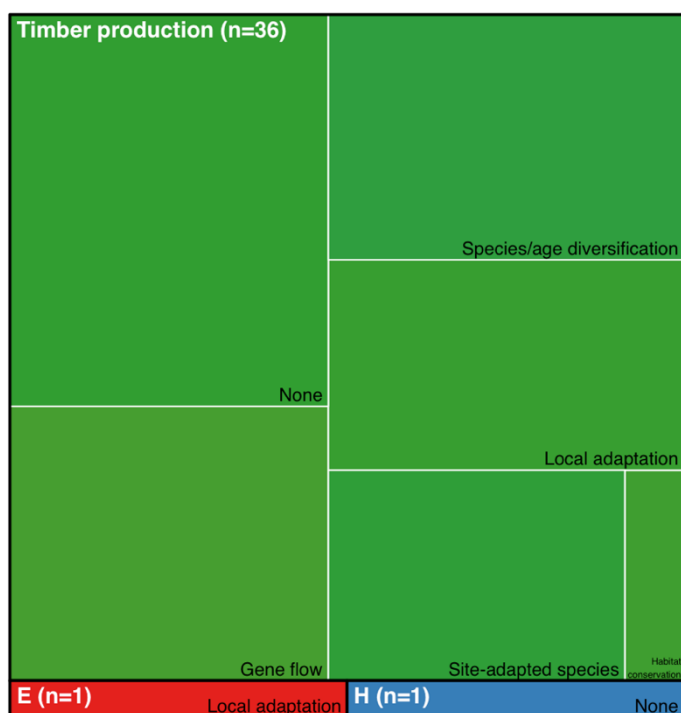
A complementary perspective on climate change adaptations is found when looking at the type of ES favored. Among the 38 interview samples referring to adaptation, 36 focused on timber production (Figure 16). Only one mentioned biodiversity conservation (V8 interviewee wished to leave up to 10% of the forested area in free evolution), while another related to sanitary issues for local populations: “Climate regulation [of the processionary moth] barely exists, and besides, there are all the consequences on parasitoids, viruses, bacillus” (V7).

This finding was expected, as productive ES contribute the most to forest-based revenues (Cinotti 2003), as stated by interviewee V13 regarding water epuration and carbon storage: “The owner only makes money from timber sales, being about 90% of revenues, with only 10% coming

from hunting leases. Up to now, what's left is for free, a gift to society!" Adapting for timber production is of great interest, as it encourages the use of wood as a renewable and potentially sustainable source of material and energy (Baral 2004). However, losing sight of non-productive ES in climate change adaptation could have dramatic effects, as climate change also affects forest-based water supply (Ford et al. 2011) and local or regional climate cooling (Ellison et al. 2017). This could have adverse effects on forest leisure services (Gray et al. 2009) or biodiversity functioning in forest ES (Brockerhoff et al. 2017).

The limited vision of adaptation regarding timber production is also shown by the lack of “soft” evolutions of forestry (Figure 15). Only 3 interviewees alluded to adaptations not related to technical changes. These non-technical adaptations included the development of an insurance system against frost (L10), the launch of mycosilviculture (Savoie & Largeteau 2011) as a way to balance forest incomes threatened by climate change (L7), and the creation of stories about forest and climate hazards to monitor climate change among the local population. These three adaptations were not planned despite their potential to diversify forest management at a scale other than forestry practices alone, as highlighted in forest economics literature (Keenan 2015; Brunette, Couture, et al. 2017).

Figure 16. Forestry adaptations to climate change focus on productive ecosystem goods and services.



In a treemap, the size of the cells is proportional to their importance. In white, the objectives of climate change adaptations, as expressed by the interviewees: E = ecological conservation (conservation of natural habitats in an unmanaged area); H = human health (limiting the sanitary effects of processionary moth on hikers). When they were considered, ecological dynamics and biodiversity were quasi-systematically seen in a utilitarian light. Most interviewees relied on the complementary effect caused by diversifying species composition through, for instance, the introduction of exogenous populations or species or the selective adaptation to local climate conditions.

4.2. Adapters differ in terms of the intensity of management

The abovementioned focus on technical adaptations has been identified in other European situations (Van Gameren 2014). Interestingly, the 15 different interviewees who spontaneously addressed adaptation (4 from the Landes and 11 from the Vosges) presented a strong differentiation in the way in which they envisaged adaptations based on their native regions.

In the Landes, all but two interviewees (L3 and L5, interested in close-to-nature forestry) had faith in forestry progress in order to overcome the impacts of climate change. After the two windstorms, they witnessed the resilience of the monoculture of maritime pines with increased interventionist operations (Figure 15). Indeed, it was mostly after the Lothar damage that regeneration by planting superseded seeding and natural regeneration, with the rocketing of mechanization and increase in tree breeding. This “return to normalcy” by the intensification of the former forestry system is characteristic of this region, which has historically used anthropization processes (saltmarsh draining, firebreak grids, etc.) to adjust to local biogeographical constraints (Deuffic et al. 2010). However, strong technical framing that focuses on only a few environmental variables might lead to detrimental maladaptation. As an example from the Landes, a forest landowner detailed how he deepened subsoiling to facilitate water pumping by the roots of maritime pines. Subsoiling caused undesired draining of the stand and lesser resistance to windstorms. During a windthrow, instead of falling at once to the ground, the trees would break into two pieces because of their deeper rooting, thus limiting the subsequent use of harvest machines.

The Vosges “adapters” were less dependent on intensive forestry practices such as planting, fertilization, and plowing in their silvicultural systems. In the adaptations mentioned, they mostly resorted to ecological processes such as local acclimatization and adaptation to recurrent droughts, or to the complementary effects (e.g., overyielding, parasite dilution effect) of mixed species stands. While this approach is closer to a bet-hedging strategy through species diversification (or “insurance hypothesis”; Yachi et Loreau 1999), it might also lead to maladaptation because of the lag between rapid climate change and lengthy forest dynamics (Aitken et al. 2008).

4.3. Foresters are between a rock and a hard place

A very striking feature of the discourses of “adapters” was the lack of shared understanding on how to efficiently counter the impacts of climate change. Many foresters expressed a feeling of powerlessness to deal with the “injunction to adapt,” given the current economic constraints: “The

problem today is that we have no information and we cannot afford to wait 30 years to make decisions” (V7).

In this highly uncertain context of climate change, foresters do their best to prepare to future climate hazards, but they especially favor these adaptations addressing their current concerns. This fuzziness led to the use of technical arguments in order to legitimate their own preference for a particular kind of forest management, as phrased by interviewee V1 with regard to shortened rotations: “Under the pretext of climate change, the timber industry could sneak in.” In the case of windstorms, for instance, the Vosges interviewees insisted on irregular shelterwood and species mixtures, thus rejecting even-aged silviculture: “The cathedral forest, it’s over! It is way too vulnerable to windstorms” (V5). However, in the Landes, many interviewees were convinced of the opposite: “There’s not many solutions. We need an even-aged treatment, where we control the harvest, so that we have thick stems allowing for the individual stability” (L9). Other examples of technical discussions exist such as the use of exogenous species to cope with parasite attacks and changes in the thinning intensity. Arguments in favor of more biodiverse forests were also used in discourses on adaptation to climate change, especially by the interviewees most attached to ecological conservation.

5. Ecological processes are instrumental to adapt at small spatiotemporal scales

Almost all the interviewees regarded ecological processes as the utilitarian tools to adapt, whatever their preference for forestry evolutions in terms of the intensity of management. Some tried to set “safeguard” measures to reduce the potential deleterious effects of adaptive changes on these ecological processes.

5.1. An instrumental vision of ecological processes in adaptive changes

Ecological conservation was not the predominant matter of concern for interviewees when modifying their forest management (Figure 15). More specifically, discourses on “biodiversity,” “nature,” and “the environment” almost always accompanied considerations of other ES, mostly timber production, but also forest scenery or hunting: “These is spontaneous growth, with biodiversity being much more important than in an even-aged forest regularly managed by a state forester. So here it’s the habitat for game” (V12).

The consideration of ecological processes as a tool for forestry and biodiversity conservation as a by-product of instrumental evolutions of forestry was also true in the discourses on adaptation to climate change. Biodiversity was often cited as a key to cope with climate change at the genetic level (V6: “It’s supposed that the genetic pool is strong enough to absorb major shocks”), within stands (L5: “In my opinion, the more complex the whole is, the more resistant it is to hazards, to accidents, to parasites. So I want it to be complex”), or at a wider regional scale (V10: “I think that [Douglas fir] is the species that will resist if problems occur, and so it’s good that a few are spread all over”) (Figure 15).

However, it is not because climate change adaptations prioritize the intrinsic value of biodiversity and natural habitats that they necessarily involve a higher intensity of forest management (Figure 15). Even if it was not prevalent in the interviews, the growing recognition of ecosystem-based adaptation to climate change resonates with the development of close-to-nature forestry (Gamborg & Larsen 2003; Naumann et al. 2011). Two interviewees, both prominent members of the French ProSilva branch (ProSilva 2017), stressed the long-term ecological and economic resilience to climate change provided by irregular shelterwood, selective thinning, and species mixture: “A diverse system is more stable, as it lasts better than a ‘house of cards’ system” (V13). It must also be said that intensive management should not be banned from adaptations aimed at ecological conservation: it can be a prerequisite for operations focused on ecological restorations or rehabilitation (e.g., Fouqueray, Trommetter, et Frascaria-Lacoste 2018), all the more in a rapidly changing context (Aitken et al. 2008).

5.2. Impacts of climate change adaptations on ecological processes

Whatever their level of management intensity, many of the adaptations cited in the interviews were not easily reversible or required great effort and time. Therefore, questions arise concerning their impact on forest ecological processes in the medium and long term, as well as the basic principles of sustainable forestry that can be called on to assess them (Lindenmayer et al. 2006; Brang et al. 2014).

Adaptation to climate change could increase the standardization of forest ecosystems by neglecting mixtures of tree species and/or ages and skipping forest successional stages. An example is assisted migration: while species translocation or species introduction can accelerate gene flow (Sansilvestri et al. 2015), they should not ignore key ecological features such as extended phenotypes (Frascaria-Lacoste & Fernández-Manjarrés 2012) or bypass the monitoring of potentially unwanted genotypes or invasive species (Lefèvre et al. 2014).

Adaptation by shortening rotations and harvesting more biomass could threaten the maintenance of natural habitats and lead to intensified forest use. Rotation shortening diminishes the number of cavity trees (Fan et al. 2004), but compensatory measures exist to balance its consequences: “We have old-growth tree plots, a network of plots that we develop across the territory, which is supposed to compensate the fact that we, as foresters, cut the trees before they die” (V7). Concerns were raised regarding aboveground habitats, but almost none of the interviewees addressed soil ecology. Soil processes are affected by discarding broadleaved species in adaptations to climate change (in the Landes) and by harvesting tree tips, slash, and stumps to respond to the rising demand for fuelwood. Such adaptations do not account for repercussions on soil fauna, which could have long-term effects on soil fertility and ripple effects on forest productivity (Walmsley & Godbold 2010; Henneron 2014). However, the intensification of forest use is to be balanced by the low and long-term return on investment following forestry operations (e.g., storage platforms), which tends to deter private owners from intensifying tree removal: “I’m 70 years old now, so I don’t want to make an investment that would be profitable in perhaps 50 years” (V11).

With respect to ecological processes, the most noticeable output of the interviewees was the lack of focus on the landscape scale. Almost all adaptations were applied to the tree or stand level, whereas ecological and evolutive processes occur at much wider spatial scales. This discrepancy was obvious in the Landes, with all but two interviewees considering the role of biodiversity to be an external variable of forestry and adaptation. In this forest heavily constrained by soil conditions and economic pressure, the changes in practices relating to biodiversity were confined to the borders between forest stands: “We know that broadleaved trees resist better [to windstorms], that they have advantages in terms of humus, parasite resistance, etc. So yes, we’re pushing ourselves to create wooded corridors along roads and ditches” (L11).

The interviewees most concerned with sustainable forest management were mostly municipal officials and regional representatives from the Ministry of the Environment, who felt committed to multifunctional forestry for multiple ES at the same time. They also worried about a lack of support from public policies that, in their eyes, did not have a strong endorsement regarding sustainable practices. As a matter of fact, it is only in the last few years that the national plan for adaptation to climate change prompted the development of nature reserves and the consideration of biodiversity issues (ONERC 2017).

6. Conclusion

This article shows that adaptation to climate change is not a major driver of French forestry changes either in the direct management of forest ecosystems or in the organization of how forest-based ES are used and supplied. Among the many technical, organizational, and economic adaptations found in the literature, the interviews showed that only some of them were implemented in the Vosges and Landes regions. Overall, implementation focused on technical changes fostering timber production and considered ecological processes to be instrumental features of forestry.

Methodological choices aimed to reflect the intrinsic complexity of forested socio-ecosystems, envisaging forestry as a complex system embedded in an ever-changing world. It should be reiterated that the two study cases were selected because of their opposing forest management approaches in terms of their intensity of management. Complementary research is ongoing (personal communication) in order to fill the knowledge gap for adaptive changes occurring in intermediary forest approaches from other regions.

Nevertheless, our findings raise two concerns in terms of how foresters currently apply adaptation decisions. First, we underlined how foresters displayed a preference for slowly reversible changes and how they discarded landscape ecological processes in their management changes. This can lead to adaptations suitable for a specific time and place at the expense of adaptations for the future or at another spatial scale (Carpenter et al. 2001). In a context of high uncertainties, no-regrets and reversible solutions are a way to avoid potential collateral damages to the current adaptations, either later or elsewhere. Ecosystem-based adaptations and nature-based solutions have been depicted as emerging adaptation mechanisms that account for these limitations of the current adaptation (Balian et al. 2014; Eggermont et al. 2015). Second, the lack of regional concertation around adaptations (especially in private forests) hinders the elaboration of complementary regional approaches that could integrate ecological issues. If set up, this could support learning exchanges by distributing experimental stands at the regional scale. It could also be a way to tackle other forest hazards associated with climate change and amplify them such as the overload of wild grazers.

Faced with the uncertainty and urgency of climate change, we argue that the time has now come to invest more time. We acknowledge the crucial role of technical changes in forestry and the need to upgrade their design at a wider spatial scale. However, a complementary way to adapt is to reconsider *why* forests are managed and not only *how*. Nowadays, foresters supply wood to respond to societal timber demands and balance their forest budgets. While our societies will very likely still require timber, the way in which climate change challenges financial equilibriums can also

be worked on with organizational and economic tools. For instance, the current literature proposes the inclusion of adaptation planning in forest certification (Spittlehouse & Stewart 2004), while projects flourish with the payment for ES (e.g., carbon storage (Gren & Aklilu 2016)) and the revaluation of timber by quality labels (e.g., <http://bois-de-chartreuse.fr/>). To some extent, such initiatives can contribute to climate change adaptation by decreasing the economic pressure put on timber production. By opening up many possibilities, these projects also broaden the principle of “not putting all your eggs in one basket,” as they diversify not only the practices of timber production, but also the plurality of other forest ES and downstream forestry organization.

To end with a practical proposal, we suggest that the collective design of complementary adaptations could draw on serious games, a promising means to develop prospective simulations (Reckien & Eisenack 2013; Wu & Lee 2015; Garcia 2019). These represent riskless opportunities for foresters to try to design non-technical tools prone to contribute to their adaptation to climate change along with technical evolutions.

Acknowledgments

Our warmest thanks go to the interviewees for the time spent in the interviews and to Agnès Fortier for her very constructive remarks. This work was supported by a grant overseen by the French National Research Agency (ANR) as part of the “Investments d’Avenir” Programme (LabEx BASC; ANR-11-LABX-0034). The funding source had no involvement in this research.

Declarations of interest

None.

Chapitre 1

Table 1. Anonymized list of interviewees, identified by region and connection with forestry.

Anonymization identifier	Region	Connection with forestry
V1	Vosges	Public advisor of CRPF*
V2	Vosges	Elected official of a municipality owning communal forests
V3	Vosges	Former National Forests Office agent
V4	Vosges	Elected official of a municipality owning communal forests
V5	Vosges	Retired public advisor of CRPF* Private forest landholder
V6	Vosges	Public advisor at the Chambers of Agriculture**
V7	Vosges	National Forests Office regional manager
V8	Vosges	Forest specialist at the Regional Directorate for Environment, Development and Housing (RDED***)
V9	Vosges	Environment specialist at the RDED Elected official of a municipality owning communal forests Municipalities delegate at the natural regional park "Vosges du Nord"
V10	Vosges	Former National Forests Office agent Private forest landholder
V11	Vosges	Private forest landholder
V12	Vosges	Public advisor of chambers of agriculture**
V13	Vosges	Private forest advisor
L1	Landes	Private forest landholder
L2	Landes	Public advisor of CRPF*
L3	Landes	Agent of the natural regional park "Landes de Gascogne"
L4	Landes	Public advisor of CRPF*
L5	Landes	Private forest advisor
L6	Landes	Private forest landholder
L7	Landes	Public advisor of CRPF*
L8	Landes	Branch director, forestry cooperative
L9	Landes	Private forest advisor
L10	Landes	Private forest landholder
L11	Landes	Responsible for timber sales at the National Forests Office
L12	Landes	Private forest landholder

CHAPITRE 2 :

BLIND SPOTS OF STRATEGY-ORIENTED FUNDING NARROW RESEARCH ON FORESTRY AND CLIMATE CHANGE



Le projet GIONO, une expérimentation de la migration assistée pour le chêne et le hêtre. Ici, une pépinière de l'ONF impliquée dans le projet, à Guéméné-Penfao. Crédit photographique : ONF/Nathalie Pétreil.

Chapitre 2

La première partie de la thèse a montré la prépondérance d'une vision technique de l'adaptation aux changements climatiques. Elle a aussi mis en avant que cette vision est partagée à la fois par des « adaptateurs » aux profils interventionnistes que par les tenants d'une foresterie proche de la nature.

Des réserves peuvent être émises sur le seul recours à la technique¹⁹ : nécessaire, elle n'est pas pour autant suffisante pour surmonter les conséquences directes (productivité des peuplements, santé des forêts) et indirectes (principalement le cours du bois, mais aussi l'optimisation des longueurs des rotations) des perturbations du climat (Ancori et al. 1983; Mermet 1992).

Des raisons diverses et non-exclusives peuvent être invoquées pour comprendre la prépondérance de la technique : une formation initiale et continue des professionnels forestiers et des propriétaires privés qui fait la part belle aux aspects techniques de la foresterie (Marty 2000; Cheikho & Clément 2002; Innes 2005), l'héritage d'une culture professionnelle technique (Boutefeu & Arnould 2006), etc.

Une autre cause du faible nombre d'adaptations socio-économiques pourrait être l'orientation des projets de recherche nourrissant les réflexions des forestiers. En effet, de forts liens ont été perçus, durant les entretiens de la première partie, entre chercheurs et forestiers²⁰ : des réunions et conférences sont organisées entre chercheurs et gestionnaires pour préparer des expérimentations, ou restituer des résultats de recherches ; les forestiers publics et privés sont inscrits à des listes de diffusion de méls résumant des programmes de recherche ; etc. Disposer principalement de résultats de recherche portant sur des développements génétiques, mécaniques et forestiers pourrait expliquer une partie des observations de terrain. C'est l'objet de la deuxième partie de la thèse, qui s'intéresse au financement, par appels à projets, de la recherche mêlant foresterie et changements climatiques. En plus d'un tropisme pour la technique, cette étude est l'occasion de vérifier l'attrait des milieux forestiers pour la production de bois.

Le chapitre qui suit a été soumis pour publication dans le journal *Annals of Forest Science*. Pour cette raison, le format en reprend les instructions de mise en page. Les figures se trouvent donc en fin de chapitre.

¹⁹ Pour rappel, la technique est comprise ici dans un sens large, comme « *un rapport au monde fondé sur une préoccupation propre à notre temps : celle de rechercher en toute chose la méthode absolument la plus efficace.* » (2015).

²⁰ Un des items de la grille des entretiens du chapitre 1 portait sur le lien des interviewés avec les milieux forestiers : étaient-ils abonnés à des newsletters ou des magazines forestiers, assistaient-ils à des conférences sur la gestion forestière, etc. ?

Blind spots of strategy-oriented funding narrow research on forestry and climate change

Timothée FOUQUERAY^{1*}, Michel TROMMETTER², Nathalie FRASCARIA-LACOSTE¹

* Corresponding author, timothee.fouqueray@u-psud.fr

¹ Ecologie, Systématique, Evolution, AgroParisTech, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91405, Orsay, France

² GAEL, INRA, CNRS, Grenoble INP, Univ. Grenoble Alpes, 38000, Grenoble, France

Keywords Forest sciences, adaptation, mitigation, academics, research policies, France

Contributions of the co-authors

TF conceived, designed, and wrote the paper and figures; MT, NF made additional contributions and edited the manuscript.

Acknowledgements

TF is grateful to Annabelle Amm for valuable insights on ECOFOR research programs.

Funding

This work was supported by a grant overseen by the French National Research Agency (ANR) as part of the “Investments d’Avenir” Programme (LabEx BASC; ANR-11-LABX-0034).

Data availability

All data generated or analyzed during this study are included in the main text of the article and in its supplementary information files.

Declaration on conflicts of interest

The authors have no conflict of interest to declare.

Key message

This article analyzes the topics of research projects in the forest sciences focusing on climate change, with France used as a study case. Based on the projects funded by calls for proposals, the results show that forest research on climate change focuses on the adaptation of productive ecosystem services from a technical perspective to the potential detriment of complementary approaches.

Abstract

Context: Authorities rely on forestry research to meet the public policy targets of climate change mitigation and adaptation. They often favor environmental sciences at the expense of social sciences, which could provide complementary insights to address climate uncertainties.

Aims: Our goal is to assess the diversity of research projects funded during the last two decades in France. We categorize projects according to discipline and main focus.

Methods: We used data from the online description of French public calls for proposals and from selected projects.

Results: We identified 163 funded projects on climate change and forests since 1997. Over this period, mitigation research has gradually given way to adaptation. Despite pledges for the inclusion of social sciences, research rarely draws on the social sciences and focuses on ecosystem services of economic interest. Biomass production is paramount, being addressed either directly or through projects on tree species of industrial interest.

Conclusion: Instead of a diverse search for adaptation strategies, climate research is geared toward a few ecosystem services. Without denying the need for timber and biofuel production, we encourage public funders to complement current calls for proposals with more diverse approaches beneficial for both biomass production and other ecosystem services.

Keywords: Forest sciences, adaptation, mitigation, academics, research policies.

1. Introduction

Never before has there been so much research on the linkages between ecosystems and climate change. For forests especially, numerous studies have generated substantial knowledge on the contribution of managed and unmanaged forests to the mitigation of and adaptation to climate change (Lindner et al. 2010). Publications to date have reviewed the physiological and evolutive impacts of climate change on trees (Aitken et al. 2008) and associated organisms (Thompson et al. 2014), the contribution of forests to carbon sequestration, storage, and substitution (Bouget et al. 2012), management practices in favor of mitigation (Jandl et al. 2007) and adaptation (Keenan 2015), or evolutive processes favoring adaptation (Bussotti et al. 2015).

The majority of research on mitigation and adaptation underlines the importance of forestry diversification in the context of high climate uncertainty. Indeed, uncertainty makes it necessary to tackle climate change impacts from a wide range of perspectives by following a bet-hedging strategy (Thompson et al. 2014). Most often, technical approaches are emphasized such as shortening rotation periods (Noss 2001; Spittlehouse & Stewart 2004; Lindner et al. 2014). However, while the diversification of adaptation strategies could benefit from perspectives from disciplines other than the environmental sciences alone, forestry research is rarely extended to the socio-economic background of the timber market (Keenan 2015; Dobbertin & Nobis 2010; Brunette, Foncel, et al. 2017).

The diversification of research topics on mitigation and adaptation can partially be narrowed when they are driven by social and economic policies. For climate change especially, the mutual influence of research projects and policies is well documented, a paragon of which is heralded by the Paris agreement (Falkner 2016). Nevertheless, this mutual influence is unbalanced. On the one hand, researchers and scientific knowledge play a role in framing and designing public policies that often remain top-down (Lepori et al. 2007). For instance, many of the abovementioned authors expressed their intention to inform public policies, which is no secret in the academic field with its contribution to the emergence of climate policies (Aykut 2012). On the other hand, public policies directly coin research agendas through public funding (Geuna 2001; Lepori et al. 2007). A first type of funding is the annual allocation of money to research institutes, essentially devoted to “curiosity-oriented” projects. Curiosity-oriented research aims at producing general knowledge, potentially leading to further developments and responding to practical problems; it is often seen as complementary to strategy-oriented research, which is geared toward problem-solving (Rip et al. 2000). A second source depends on the mechanism of project funding, with public state agencies issuing calls for proposals. The proposals describe the type of research activities to be performed with a limited budget and time (Meyer & Molyneux-Hodgson 2010), how they comply with the

stated scope, and how they correspond to the expected outcomes. Applicant researchers then compete for the awarded funds, independently of their institutional affiliation (Geuna 2001). This system of project funding currently prevails and is used by governments to favor “strategy-oriented” projects targeting social and economic needs at the expense of “curiosity-oriented” science (Rip et al. 2000), although this situation is balanced by the way in which scientists can build their own research by combining funding from different projects (Shove 2003).

A depiction of the research effort devoted to diversifying mitigation and adaptation strategies cannot rely exclusively on the study of research fostered by project funding, as research also stems from institutional allocations. Yet the objectives of funding programs can reflect if and to what extent the socio-economic drivers of research in forestry and climate change reflect the need for diversified strategies. Following Saetren (2005), we argue that studying research projects is crucial to understanding the potential gap between the establishment of research objectives in public policies and their actual implementation in funding programs.

For this purpose, we suggest a typology of research projects on forests and climate change that were funded by the French state. Our specific objectives were to understand: (i) the relative importance of mitigation compared to adaptation research, (ii) the narrow or diverse focus of adaptation projects, and (iii) if and how this focus has evolved over time. To address these issues, France was used as our study case, because of its many research teams devoted to forestry issues, but also because it has one of Europe’s largest areas of forests (165,000 km²) on which numerous jobs and forested habitats depend (MAAF 2017). Moreover, it is one of the European countries that legally guarantees the tradition of multifunctionality in public forests, which are simultaneously used for timber production, leisure activities, and biodiversity conservation (Barthod 2015). The numerous French policies on forests illustrate the importance of multifunctionality and the diversity of objectives: national plan for the adaptation to climate change, national mitigation strategy, national strategy for biomass mobilization, national strategy for biodiversity, national forest and wood program, and so on. This makes France a relevant case to study the importance of policies in research program funding.

2. Material and methods

To test if and in which domains the range of research topics is directed, two selection processes will be assessed. An initial filter operates when funding bodies issue their selection criteria, thus potentially excluding new approaches to existing research. A second selection filter arises when researchers themselves restrict their proposals to topics considered more likely to obtain funding in a self-censorship process. A combination of both filters is also possible. Hereafter, we present our methodology to evaluate these two selection filters.

2.1. Contents of the calls for proposals

To identify where research efforts are directed, we gathered the online contents of the calls for proposals issued by French public bodies that fund research on climate change *or* forests: the Ministries of Forests, Research, and the Environment; the Agency for the Environment and Management of Energy (ADEME); and the National Agency for Research (ANR). We also investigated the websites of research networks such as the public interest group “Forest Ecosystems” (ECOFOR), the scientific interest group “Climate, Environment and Society,” the transdisciplinary public network for the “Adaptation of Forests to Climate Change” (AFORCE), and the Programs for and on Regional Development (PSDR).

ADEME, PSDR, and ECOFOR published online information on their calls for proposals. ADEME had three calls for proposals relating to forests and climate change, PSDR had four, and ECOFOR had nine. We read each call for proposals in its entirety to identify its funding priorities. Data were lacking for the candidate proposals not retained for funding and on the composition and deliberation of the selection committee. No information was found on the open-data websites of the government (open.data.gouv.fr) and the Ministry of Research (data.enseignementsup-recherche.gouv.fr).

2.2. Collecting data on funded projects

We collected data on research projects funded by public calls for proposals relating to forests and climate change mitigation and/or adaptation. To this end, we developed a two-step methodology limited to French mainland forests.

First, we compiled a list of French research laboratories targeted by calls for proposals and thus potential beneficiaries of research funding on forests and/or climate change. We identified the following research institutes: National Center for Scientific Research (CNRS), National Institute

for Agricultural Research (INRA), National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture (IRSTEA), National Museum of Natural History (MNHN), National Institute of Geographic and Forest Information (IGN), and Forestry Development Institute (IDF). We used the search engines of each institute to separately look for one of the following keywords: “climat” (French for “climate”), “climatique” (“climatic”), “forêt” and “forest*” (“forest,” as a noun and an adjective). Overall, we identified 32 research units.

Second, we compiled a list of funded projects hosted in 32 research units. We used the website search engines to compile the research projects using the same keywords as before. Following the definition of a forest based on the United Nations Food and Agriculture Organization (IFN 2017), we excluded from our analysis research solely focusing on agroforestry and hedgerows. As our basic unit of observation, we retained projects specified by a relevant name, website, and description. At this point, data was extracted from the websites of each compiled research project. In a spreadsheet, we recorded the project name, start year, end year, and description (e.g., using the “overview,” “objectives,” or “work packages” sections). Because of the lack of data, we were unable to assess the amount of financial funding for all the projects.

We crosschecked the validity of the two-step methodology using the search engines of the research project funders mentioned in section 2.1 using the same keywords.

Data collection took place in April 2018. We rejected projects funded in 2018. In the end, we obtained a list of 163 research projects funded via the public calls for proposals, funded between 1997 and 2017.

2.3. Data categorization

We thoroughly investigated the content of the 163 research projects to identify their two most important focuses (“main focus,” hereafter “MF”). To this end, an inductive approach was used to construct MF classes based on the information retrieved. The objective was to cover the variety of components and linkages between forest socio-ecosystems and climate change. Each project was consequently assigned two of the following MFs: “Climate change-related risk,” “Forest compartment,” “Forest ecosystem,” “Ecosystem goods and services” (ESs), or “Forester.” For instance, the two MFs of the ACOUFREEZE project are “Climate change-related risk” and “ESs” (Table 2). One project could have two MFs of the same class, although sometimes only one MF could be determined, as the projects mentioned only one objective (e.g., “AFORCE-Contrainte hydrique” on drought hazards) or explored a MF that was too broad to be classified (e.g., INFORMED “INtegrated research on FOrest Resilience and Management in the mEDiterranean”).

Each MF was further subdivided into categories, as presented below and summarized in Figure 17.

“Climate change-related risk” projects focused on natural hazards with impacts enhanced by climate change; categories included “Temperature shift,” “Drought,” “Fire,” “Windthrow,” “Frost,” “Invasive species” (animals or plants), “Phytopathogens” (insects or fungi with ranges or impacts positively correlated with climate change), and human “Health hazard.”

“Forest compartment” corresponded to projects targeting “Soil,” “Trees” (when focused on a given set of species or trees as an assemblage), and “Forest biocenosis” (e.g., projects on saproxylic, mycorrhizal, or epiphytic species).

“Forest ecosystem” projects included “Riparian forests,” “Mediterranean forests,” “Mountain forests,” and “Mountain and Mediterranean forests.” Importantly, it was insufficient for a project to simply indicate its study area to include this category, as this would have resulted in the miscategorization of certain projects (e.g., DONON focuses on the interference of large herbivores and forest viability in a context of climate change, and not on the particular study area of “Donon forest”).

“Ecosystem goods and services” included projects with a specific emphasis on “Non-timber forest products” (NTFP, honey, aromatic and medicinal plants, mushrooms, etc.), “Water purification,” “Landscape,” “Hunting,” “Recreation” (non-hunting activities), “Protection against soil erosion,” “Carbon mitigation” (projects on carbon storage, sequestration, and substitution of fossil fuels), “Ecological conservation” (projects on species conservation), “Scientific knowledge” (improving knowledge of ecological processes, without a stated conservation goal). A final category of “Biomass production” (timber and fuelwood) was selected if “managed,” “planted,” or “fast-growing” species, “forestry practices,” or “even-aged forests” were emphasized.

The “Forester” MF was defined as either “Owners” or “Managers.”

For every project, we also assessed if mitigation issues were accounted for, even if they were not detailed in the two selected MFs.

2.4. Social and economic approaches

We searched the website of each research project to determine whether social and economic approaches were used (questionnaires, surveys, interviews, economic calculation, econometrics, serious games, etc.). We verified whether geographers, sociologists, or economists were part of the research teams.

3. Results

Overall, 163 research projects were identified. Two were missing data for the start year and 21 for the end year (see supplementary Table S3 in the Annex)²¹.

3.1. Catch-all calls for research projects

The contents of the calls for projects were available from the ADEME, PSDR, and ECOFOR research funders. The ADEME budget line dedicated to “Research on climate change mitigation by agriculture and forests” (REACTIFF, in French) funded eight research projects on forestry and climate change in 2011 (BICAFF, EMEFOR, GESFOR, CESEC, INSENSE, PICASO, RESPIRE, and EVAFORA) and two in 2015 (CAPSOL and SATAN). PSDR funded five projects in 2007 (BENEFITS, PHENOLOGIE, OPTMix, TSAR, and P-CHENE) and four in 2014 (OUI-GEF, DEFIFORBOIS, TREFFOR, and LidarForFuel). ECOFOR managed two lines of funding. The first, known as “Biodiversity and forest management” (or BGF in French) and supported by the French Ministry of Forests, funded six projects (GeForHet, IMPREBIO, AMII, BIOPICC, DISTIMACC, PotenChene). The second funding line managed by ECOFOR is called “Management and impacts of climate change” (or GICC in French). It funded eight projects on forestry and climate change (“Carbone-privés,” CARBOFOR, “Carbone-sol,” REFORME, FAST, and GRAAL).

Funding priorities were not restrictive but were rather broadly defined for each funder. The ADEME consistently focused on four themes over the years: carbon storage, agriculture and forestry production chains, regional strategies, and social and economic approaches to the ecological transition. As suggested by its name, the PSDR (Programs For and On Regional Development) funds research projects on regional development relating to agricultural or forest environments. ECOFOR’s BGF targets research projects that address the interdependencies of forest biodiversity and forests, with no greater restriction within this framework; as an example, the 2014 call was entitled “Biodiversity, forest management, climate change, public policies.” ECOFOR’s GICC concentrates on climate change rather than forests. Calls for proposals had a wide range of eligible themes such as carbon storage (2002), regional approaches and biodiversity (2003, 2011, 2014), coupling of climatic hazards (2008), and adaptation to climate change (2016).

²¹ Cette table n’est pas incluse dans le manuscrit pour des raisons de longueur. Elle est disponible sur demande à l’auteur, en écrivant à timothee.fouqueray@u-psud.fr (note non incluse dans la version soumise au comité éditorial du journal).

In all the available calls for proposals, an important selection criterion was to inform public policies. In its 2015 call, the ADEME indicates that the selection criteria will be based on “the adequation of the themes and priorities of the calls for projects, and the stakes and interest related to public policies” with no specific details provided on the cited policies. The PSDR calls should “respond to the current issues of rural, agricultural, territorial, and regional development and the evolution of public policies” (e.g., 2014). ECOFOR’s BGF also aims to inform public policies, especially in terms of biodiversity issues, as stated in the 2000 call for research projects: “The government has decided that biodiversity should be a priority research theme in the coming years.” In BGF, projects fostering productive needs are often connected with the research priority of biodiversity: “a place is reserved in the call for proposals for projects studying simplified ecosystems (production plantations)” (also in the 2000 call). In line with this, approaches examining ESs are important in BGF: “Biomass production” is a MF in the GeForHet, IMPREBIO, and BIOPICC projects. Climate change is later given full consideration for BGF. The term “Climate change” is mentioned only once in BGF’s 2005 call for proposals. In 2014, however, it was intended to inform the first French national strategy for adaptation to climate change. Even so, ECOFOR’s GICC budget line expresses the strategy-oriented characteristic of climate change most clearly. In 2003, for instance, the call for projects is turned toward “the aftermath of international negotiations following the Kyoto Agreement, the implementation of the measures of the National Climate Change Plan, and the establishment of the missions of the National Observatory of Climate Warming Effects.” The European context of research funding first emerges as one of the specificities of GICC’s 2005 call for projects, which cites the “rising synergy between the GICC program and its European homologues through concerted action such as ERA-NET.”

3.2. Predominance of environmental science approaches

In the available calls for proposals, interdisciplinarity and social sciences were emphasized as important approaches, as illustrated in the call for projects of ADEME in 2013 and 2015, PSDR in 2007 and 2014, ECOFOR’s BGF after 2005, and ECOFOR’s GICC in 2003. However, none of the 10 forestry projects funded by the ADEME over the years has included social or economic analyzes. Social sciences were included in only four of the nine projects funded by the PSDR, one out of six for BGF, and one out of eight for GICC.

Overall, only 25 out of 163 projects explicitly mention social or economic tools, 16 of which were funded after 2012 (Table S3). The predominance of projects based on the environmental sciences using ecology, climatology, pedology, forestry, physiology, or genetic sciences was consistent over time (Table S3).

3.3. Research projects prioritizing adaptation instead of mitigation

Carbon mitigation was the MF in 28 projects (Table S3), 15 out of which had “biomass production” (of fuelwood, as a substitute for fossil energies) as the other MF category (Table S3).

In addition to these 28 projects with a MF on carbon mitigation, seven other projects mentioned carbon mitigation as part of their description without stressing its importance.

3.4. Main focus of climate change and forestry research projects

MFs were distributed among “Ecosystem goods and services” (n=137), “Forest compartment” (n=87), “Climate change-related risks” (n=55), “Forest ecosystem” (n=18), and “Foresters” (n=12) (Figure 17, Table S1). Only 17 projects had a single MF.

In decreasing order of frequency, MF categories related to “Trees” (n=69), “Biomass production” (n=66), “Carbon mitigation” (n=27), “Drought” (n=27), “Scientific knowledge” (n=20), “Soil” (n=16), “Ecological conservation” (n=10), “Owners” (n=9), “Temperature shift” (n=7), “Mountain forests” (n=7), “Mediterranean forests” (n=7), “Invasive species” (n=5), “Phytopathogen” (n=5), “Forest biocenosis” (n=3), “Windthrow” (n=3), “Mountain and Mediterranean forests” (n=3), “Managers” (n=3), “Fire” (n=2), “Health hazard” (n=2), “NTFP” (n=1), “Riparian forests” (n=1), “Protection against soil erosion” (n=1), and “Frost” (n=1) (Figure 17, Table S3). For the MF class “Ecosystem goods and services,” three categories were not attributed to a project: “Landscape,” “Hunting,” and “Non-hunting recreation.”

For projects with two MFs (see the pairings in Table 3), the most frequent pairing of MFs were ESs/Forest compartments (48 projects), ESs/ESs (24 projects), Climate change-related risk/Forest compartments (22 projects), and Climate change-related risk/ESs (19 projects) (Table 3).

3.5. Temporal evolution of climate change-related forest projects

The number of projects has progressively increased over the years, with a peak of 64 ongoing research projects reached in 2014 (Figure 18). Since 2009, “ESs,” “Forest compartment,” and “Climate change-related risks” have been relatively important MFs (Figure 18). The relative importance of projects on mitigation began to decrease in 2006 (Figure 19).

4. Discussion

This paper proposes a qualitative review of French research projects focusing on climate change and forestry issues. The discussion is organized as follows. We begin by discussing our findings in the light of our methodology. Next, we present the predominance of adaptation research compared to mitigation projects. The discussion then concludes with the prevalence of environmental sciences in strategy-oriented research and public policies.

4.1. Project funding as a proxy of research efforts

Project funding has already been used as a proxy of research effort (García & Sanz-Menéndez 2005). In our study, the number of funded projects was taken to indicate the importance of a research focus. We considered this to be a more pertinent proxy of time and material allocations than the number of publications. In our view, the latter better quantify the academic popularity of a topic rather than the effort invested by research authorities. Indeed, the number of publications can be biased by those undertaken with no or limited funding or by a lack of publishable results, while a funded project systematically relates to a funding program. Nevertheless, we should acknowledge two methodological limitations. First, we did not investigate the amount of funding allocated to projects. Following García and Sanz-Menéndez (2005), we wanted to avoid distortions due to variable research costs between disciplines (e.g., genetics vs sociology) and the distribution of funds over several years. Further, the unavailability of data on the annual distribution of funding often impeded the reconstruction of funding amounts from the websites, while the diversity of funders and co-funding between EU and French research agencies made it impossible to track the funding amounts allocated in France alone (see, for instance, the description on the website of the TreePeace project; Table S3) (Lepori et al. 2007). Second, we could not complete our findings with the proposals rejected by research authorities or with an analysis of the selection committee, because these data were unavailable. Despite these potential limitations, we are confident that our analysis reflects French trends in the funding of projects on climate change and forestry. Nevertheless, any readers interested in economically analyzing our data should carefully crosscheck it with other information.

4.2. Adaptation dominates climate and forestry research

Climate change research consistently focused on mitigation issues, although its importance decreased over time. As adaptation has gained growing recognition in climate change policies

(Falkner 2016), we expected a switch of funding from mitigation-centered research toward projects focusing on risk prevention and ESs.

Our results accordingly indicate a substantial decline of projects on mitigation since 2006. They instead emphasize the different aspects of adaptation from 2007 onwards: climatic hazards (especially drought), climatic vulnerability (e.g., mountain and Mediterranean forests), and the physiological and evolutive responses of tree species and populations to climate change. This may be in response to the severe drought in 2003, with a delay of three years necessary for the authorities to launch calls for proposals on such topics.

The prevalence of research funding on adaptation responds to the needs of the forestry sector to develop resilient forest management, which would receive little benefit from projects focused on mitigation alone. Timber production is an ES of the utmost importance for this economic sector in France (Fouqueray et al. 2018), which correlates with the overarching place accorded to “Biomass production” projects. The priority given to adaptation and the co-occurrence of two ESs as the MFs comes as no surprise, as seen in other ecosystems impacted by climate change such as coastal or crop lands (Füssel 2007). This also complies with the Lisbon strategy for growth and employment devised by the EU in 2000, which indicates that strategy-oriented research should aim to support sustainable economic growth (European Commission 2004). To account for the sustainable aspect of development, many projects addressing biomass production (or carbon mitigation) made mention of ESs such as ecological conservation (e.g., GeForHet; Table S3 in Annex). For instance, genetics were often considered to be a tool for both ecological conservation and varietal selection relating to biomass production.

This priority of productive ESs in climate change research is even reflected in projects that do not focus on ESs. Projects frequently focus on the forest compartment of “Trees” (e.g., ARCHI in Table S3) or on a climate change-related risk (e.g., ACOUFREEZE) while using tree species of economic interest as study cases (e.g., *Picea abies* or *Quercus robur*). The importance of productive ESs is also highlighted by the absence of other potential research targets. “Trees” was the main category of projects focusing on forest compartments, which is a logical result given that trees are the very basis of forests, although this is also a reminder of the lesser importance accorded to forest soils despite their key role in forest functioning (Jandl et al. 2007; Bouget et al. 2012). Similarly, not a single project focuses on forest scenery or leisure activities – not even hunting, despite the economic weight of expensive leases of hunting rights (Cinotti 2003).

Exhaustive expenditure data from forestry research institutes, arranged according to funding source (calls for proposals or annual allocations of institutes), would be appropriate in order to further analyze the predominance of ESs as the MF of projects. They could reveal whether the

prevalence of social and economic needs in “strategy-oriented” funding is balanced by additional research in “curiosity-oriented” projects.

4.3. Social sciences: The blind spot of strategy-oriented research

Most projects combining biomass production and (to some extent) non-productive ESs such as ecological conservation overlook social sciences, a similar result to that found by Dobbertin and Nobis (2010). The vast majority of projects tackles adaptation to climate change from the narrow perspective of biological mechanisms through assisted migration (e.g., AMTools in Table S3), species introduction (NOMADES), species mixes (ROOTMIX), or soil preparation (PILOTE, MECABIOFOR). Only 15% of projects explore the direct and indirect consequences of climate change on forests using an economic or social approach such as the NEWFOREX project that aims to assess forest externalities such as carbon sequestration (Table S3). The low proportion of projects using social sciences (only seven projects with a MF on foresters) and their late arrival in the field of forestry underline that social drivers are not given full consideration in forestry research. Although further research on genetics, physiology, ecology, and climate sciences is required to improve our knowledge of forestry and forest functioning under a changing climate, there are inevitable uncertainties that could be partially handled by complementary approaches (Spittlehouse & Stewart 2004; Dessai et al. 2009). In our opinion, it would be beneficial for forest sciences and sound forest policies to support additional projects based on social sciences. In particular, social sciences may be able to identify levers for biomass production based on economic stakeholder organizations that are more resilient to climate impacts (e.g., AFFORBALL in Table S3) (Brunette, Couture, et al. 2017). Social sciences could cast light on local knowledge suitable for further research, as found in the field of ecosystem management (Bousquet & Le Page 2004), and thus diversify solutions to tackle challenges raised by climate change (Cubbage et al. 2007).

The seeming restriction of projects to the environmental sciences is not apparent in the contents of the calls for projects, which nowadays promote interdisciplinary proposals that incorporate the social sciences. Due to the lack of data on the rejected proposals as well as the selection processes and committees, it is virtually impossible to estimate at which point in the funding allocation process this preference for environmental sciences occurs. Part of the response certainly lies in researchers’ technical vision of forestry despite the slow incorporation of social sciences into research projects (Kennedy et al. 2001; Kennedy & Koch 2004). Interdisciplinary findings could provide more effective inputs for policymakers (Naumann et al. 2011), and this process is certainly promoted in France by research institutes. As an example, INRA is legally mandated to “provide support to public policies that respond to social challenges, especially

economic, social, and environmental needs related to sustainable development” (Légifrance 2018b).

5. Conclusion

This article aims to describe the research efforts funded by the French authorities over the last two decades with regard to climate change and forests. In particular, it questions whether the frequent call for diversified mitigation and adaptation strategies in forestry studies is reflected in the funding of research projects.

We stress how the number of research projects on climate change in the field of forest sciences increased in the second half of the 2000s. More precisely, the focus of these projects evolved from mitigation to adaptation, with a strong focus on ESs and the functioning of trees, hence the prevalence of environmental science methodologies despite the low but increasing usage of social and economic tools. Biomass production for timber or fuelwood was the paramount study topic of all the projects, even if biodiversity was often considered in association with it as a support for productivity and/or conservation reasons. Despite the lack of data on funding amounts, our results support other findings on research issues explored in forest journals between 1979 and 2008 (Dobbertin & Nobis 2010). They also correspond to our experience of European research networks, for which we would expect similar results.

Several follow-ups to this paper appear to be of interest. First, in the field, there are no guarantee that public and private forest owners and managers apply the recommendations of funded projects: the results of implementation research show that research efforts geared toward certain directions are not necessarily implemented as such (Saetren 2005). Field implementation may therefore bypass the efforts made by France’s centralized research administration to align project-oriented research with public policies. On this topic, we expect complementary insights from field studies that are currently assessing the concrete adaptation choices made by foresters (e.g., MACCLIF, Act-Lab in Table S3). Second, we believe that a comparative study of each project’s content description and their related publications could be of interest to assess how researchers attempt to influence the direction of strategy-driven research policies, especially if this analysis also investigates how forest scientists are involved in national scientific committees. As a matter of fact, it is findings, not funding, that feed back into forest policies dealing with climate change issues.

Chapitre 2

Project name	Full title	Start	End	Social or economic approaches?	Main focus 1 (MF1)	MF1 category	Main focus 2 (MF2)	MF2 category	Mitigation
ACOUFREEZE	Monitoring of cold stress in trees by acoustic emission technique, thanks to waveform feature analysis	2012	2015	No	Climate change-related risk	Frost	Ecosystem goods and services	Biomass production	No
Act-Lab	Adaptation to climate change linked with biodiversity	2016	2018	Yes	Ecosystem goods and services	Scientific	Forester	Owners	No
AFFORBALL	Adaptation of the timber industry in the natural regional park of Ballon des Vosges in a context of global changes	2016	2018	Yes	Ecosystem goods and services	Biomass production	Ecosystem goods and services	Ecological conservation	No
AFORCE-“Contrainte_hydrigue”	Mapping of water stress	2010	2011	No	Climate change-related risk	Drought	Ecosystem goods and services	Biomass production	No
AMTools	Ecological and legal tools for the assisted migration of forests in France	2012	2016	Yes	Forest compartment	Trees	Ecosystem goods and services	NA	No
ARCHI	Architectural indicators of tree responses to climate change	2011	2012	No	Forest compartment	Trees	Climate change-related risk	Temperature shift	No
CATS	Integrated monitoring of carbon allocation in tree and soil	2007	2011	No	Ecosystem goods and services	Carbon mitigation	Ecosystem goods and services	Scientific	Yes
FunDivEUROPE	Functional significance of forest biodiversity	2011	2014	No	Forest compartment	Trees	Ecosystem goods and services	NA	No
GeForHet	Mixed species forest management	2014	2020	No	Ecosystem goods and services	Biomass production	Forest compartment	Trees	No
INFORMED	Resilience and adaptive management of Mediterranean forests: An integrative approach	2015	2017	Yes	Forest ecosystem	Mediterranean forests	Ecosystem goods and services	NA	No
MACCLIF	Forest managers’ consideration of adaptation to climate change measures	2016	2018	Yes	Forester	Owners	NA	NA	No
MECABIOFOR	Mechanization and optimization of techniques for the production and harvest forest biomass coming from specific cultures	2010	2012	No	Ecosystem goods and services	Biomass production	Ecosystem goods and services	Carbon mitigation	Yes
NEWFOREX	New ways to value and market forest externalities	2009	2014	Yes	Forester	Owners	NA	NA	No
NOMADES	New acclimatization methods of forest trees	2011	2014	No	Forest compartment	Trees	Forester	Owners	No
PILOTE	Evaluation of new planting techniques to limit water competition in prevision of drier future conditions	2012	2013	No	Ecosystem goods and services	Biomass production	Climate change-related risk	Drought	No
ROOT-MIX	Are positive diversity-production relationships mediated by root interactions? A study with different forest mixtures	2014	2016	No	Forest compartment	Soil	Ecosystem goods and services	Biomass production	No
TreePeace	From Holocene to Anthropocene: The pace of microevolution in trees	2014	2019	No	Ecosystem goods and services	Scientific	Forest compartment	Trees	No

Table 2. Sample list of 17 research projects funded by strategy-oriented programs.

For the exhaustive list of the 163 projects used in the analyses, their French name, and their website references, please refer to Table S3 in the Annex.

Table 3. Pairing of the two main focuses for the research projects funded by strategy-oriented programs.

	Climate change-related risk	Ecosystem goods and services	Forest compartment	Forester	Total
Climate change-related risk	3				3
Ecosystem goods and services	19	24			43
Forest compartment	22	48	3		73
Forest ecosystem	4	10	4		18
Forester	2	6	1		9
NA	2	6	6	3	17
Total	52	94	14	3	163

Figure 17. Main focuses (MFs) of research projects funded by strategy-oriented programs and their categorization.

The inner circle shows the distribution of the two MFs of 163 projects (as 17 projects had only one MF, the total number of MFs in the inner circle is less than 326). The outer circle details the categories of each MF; three categories of the MF class “Ecosystem goods and services” were not attributed (“Landscape,” “Hunting,” and “Non-hunting recreation”). Abbreviations: Forest ecosystem (F. ecosystem), Temperature shift (Temp. shift), Non-timber forest products (NTFP).



Figure 18. Cumulative number of projects per year, with main focuses indicated.

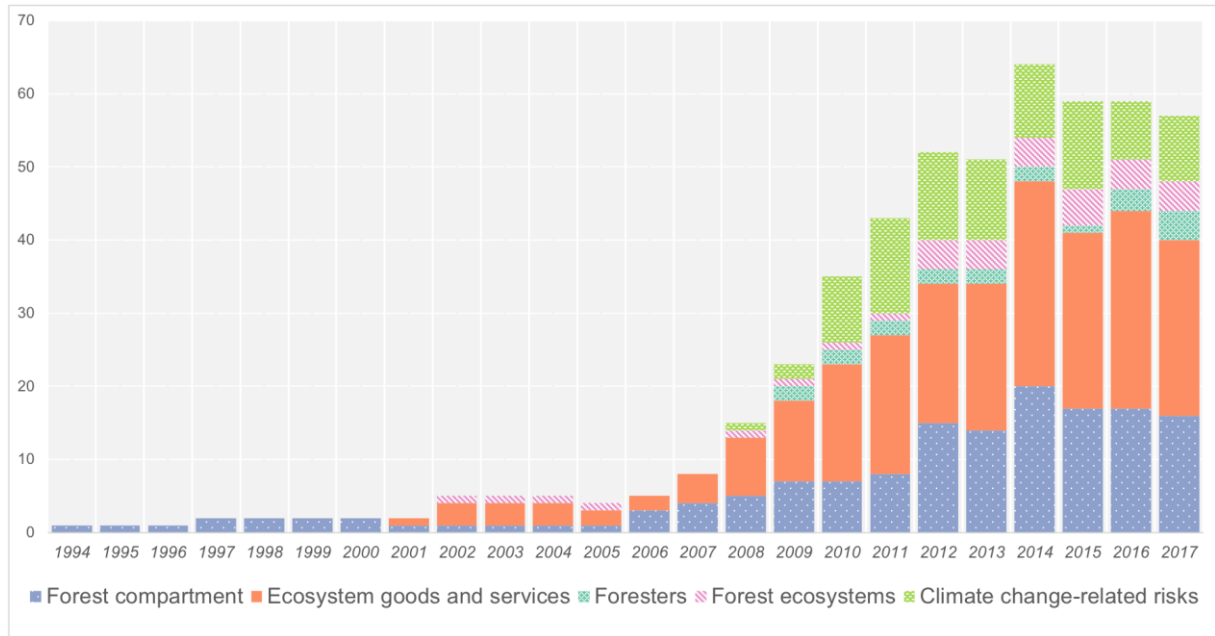
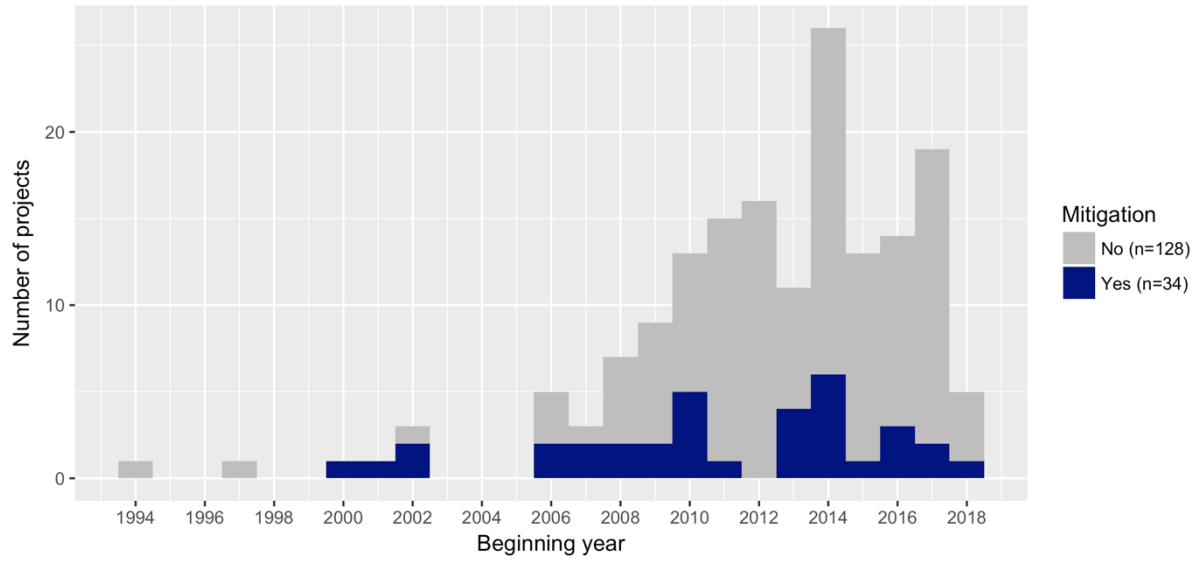


Figure 19. Evolution of the number of projects explicitly mentioning mitigation in their content description.



CHAPITRE 3 :

VOLUNTARY CARBON OFFSET CONTRACTS: TROJAN HORSES TO FUND FRENCH FOREST MANAGEMENT



Avec les politiques publiques d'atténuation des changements climatiques, certains forestiers adaptent leurs pratiques pour anticiper la hausse des cours du bois-énergie. Ici, dans les Landes, le prélèvement des souches permet de vendre plus de biomasse.

Crédit photographique : Timothée Fouqueray.

Chapitre 3

Dans le chapitre deux, le financement des projets de recherche mêlant foresterie et changements climatiques (en général, *i.e.* compréhension des CC, atténuation et adaptation) a proposé une explication, parmi d'autres possibles, de l'importance des visions techniques et de la production de bois des milieux forestiers. La recherche scientifique ne se cantonne cependant pas aux seuls projets financés suite à appels à candidature ; des recherches plus inductives, exploratoires, proposent d'ouvrir des pistes nouvelles aux réflexions en cours dans un champ thématique (Ancori 2017).

C'est ce que se propose de faire la partie qui suit. En lieu et place du panorama des projets de recherche du chapitre précédent, le chapitre trois revient au terrain. Il explore comment les paiements pour stockage de carbone pourraient être un moyen de diversifier les revenus financiers des gestionnaires forestiers. Il s'agit certes d'une forme d'opportunisme économique, dans un contexte où émergent des subventions pour des opérations sylvicoles propices à l'atténuation. Toutefois, ce peut être aussi un moyen indirect de s'adapter, en diminuant la dépendance financière à la production de bois qui est fortement impactée par les dérèglements climatiques.

Deux études de cas sont abordées, à travers deux associations tissant des liens entre des acteurs du monde forestier et des financeurs privés et publics, nouvellement venus dans la gestion forestière afin de compenser leurs émissions carbone.

Contributeurice : Lucile Génin, étudiante de l'Institut d'Études Politiques de Paris (« Sciences Po »), dont j'ai encadré le stage de sciences politiques de son année de césure.

Voluntary carbon offset contracts: Trojan horses to fund French forest management

Timothée Fouqueray^{1*}, Lucile Génin¹, Michel Trommetter², Nathalie Frascaria-Lacoste¹

¹Ecologie, Systématique, Evolution, AgroParisTech, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91405, Orsay, France

²GAEL, INRA, CNRS, Grenoble INP, Univ. Grenoble Alpes, 38000, Grenoble, France

*Corresponding author (timothee.fouqueray@u-psud.fr; +33 1 69 15 56 62; Université Paris-Sud, Bâtiment 360, 15 rue du doyen André Guinier, Orsay 91405, France)

ABSTRACT

Multiple mechanisms for the mitigation of climate change have been developed, drawing on a combination of reducing and offsetting greenhouse gas (GHG) emissions. While mechanisms are mandatory for certain economic sectors, some business that are not required to mitigate their GHG emissions would nevertheless like to do so. Companies wishing to voluntarily apply carbon offsetting turn toward managers of carbon sinks such as forests. Though initially focused on rainforests, mitigation programs are now found in temperate and boreal forests. In this article, we examine two study cases in France to analyze how public and private foresters seized this opportunity to obtain complementary funding for forestry operations. We focus on offset contracts issued by associations linking public sector forestry agencies, forest landowners, and offset funders. Carbon mitigation was a reason shared by all contractors to commit to the agreement, although it concealed multifarious motivations. Hence, we argue that voluntary offset contracts act like a Trojan horse by enabling foresters to dialogue with entities that would otherwise not be interested in supporting forest management. Regional embedding was crucial to overcoming the mitigation challenges such as additionality and impediments to forestry operations. The recent creation of a national “Low Carbon Certification” will scale up this system, although it may be more of a burden than an asset in terms of developing bottom-up voluntary carbon offsets.

KEYWORDS

Mitigation, forestry, payment for ecosystem services, carbon offset, region, funding

LENGTH OF THE MANUSCRIPT

Number of words: 8063

Number of figures and tables: 1

1. Introduction

The last two decades have witnessed a growing interest in the mitigation of climate change, which has become one of the most pressing global issues. Consequently, the Kyoto Protocol released a reference manual on the accounting of emissions in order to set the stage for the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions (IPCC 2014b). To keep the pace with the Kyoto Protocol and later Paris Agreement, regional multilateral organizations transcribed these international mitigation standards into their own legislations, an example of which is the European Union's (EU) "cap and trade" emissions system (Ellerman et al. 2010). Voluntary mitigation measures were also supported by countries or regional organizations in order to make additional efforts (Gren & Aklilu 2016), often appealing to private companies for funding. In 2017, worldwide voluntary carbon projects were estimated to save an unprecedented 62.7 MtCO_{2e} (equivalent to approximately 150 million barrels of oil) (Hamrick & Gallant 2018).

In this context, the private sector looked for solutions to compensate its emissions in the form of "carbon offset" projects. Among others, it turned to the sustainable management of forests for two main reasons. First, forests represent a powerful lever to mitigate climate change, as they are one of the most important carbon sinks for GHG removal from the atmosphere (IPCC 2014b) and represent 14.5% of the volume of GHG emissions saved on voluntary markets since 2005 (Hamrick & Gallant 2018). Despite uncertainties surrounding the exact processes involved, carbon mitigation in forests can be outlined in three specific patterns: (i) direct carbon sequestration in standing trees by afforestation, reforestation, and improved forest management; (ii) carbon storage in forest-based products; and (iii) use of fuelwood as a substitute for fossil fuels (Baral 2004; Jonard et al. 2017). Second, forests benefit from a highly natural perception in civil society (Bertolas 1998) and hence a company's potential customers. Assigning shares of a company's revenues to sustainable forest management is therefore a way to respond to the rising social demand for businesses to assume part of the fight against global warming. It strengthens the corporate social and environmental responsibility (CSR) of companies, while simultaneously preparing them for future legal constraints in terms of GHG emissions (Hommel & Godard 2009).

Initially, offset projects were commonly geared toward compensation in tropical forests, but as the location of the reduction is irrelevant, projects are now developing in temperate and boreal forests (Cooley et al. 2012). This even allows companies to align their environmental and social commitments. Moreover, offset projects in temperate forests often occur in places with sound property rights, thus favoring local governance and employment and avoiding the pitfalls of remote and potentially illegible operations, as observed with REDD+ programs (Phelps et al. 2010; Corbera 2012). Some foresters consider CSR funding as a form of payment for ecosystem services

and an opportunity to achieve financial equilibrium thanks to the different sources of income as opposed to timber production revenues alone.

France is an interesting regional study case of this renewed interest in local forests from the private sector. In terms of voluntary mitigation, France organized cross-sectional meetings in 2007 with businesses, public collectivities, and civil society stakeholders in order to promote GHG mitigation (Boy et al. 2012). Some recommendations were later implemented by the passing of a law on corporate social and environmental responsibility (CSR), including mandatory carbon assessments (Boy et al. 2012; Légifrance 2012c). In terms of forests, France has Europe's fourth largest surface (165,000 km²), most of which is deciduous (MAAF 2017). Overall, 74% of the country's forests are privately owned but distributed across countless tiny plots that are rarely or never managed (IFN 2017). In managed forests, a customary tradition of multifunctionality has been legally embedded, with pledges for the simultaneous provision of various ecosystem services such as timber production, recreational activities, and biodiversity conservation (Barthod 2015). Despite its size, the French forestry sector faces remnant and new challenges. First, both public foresters and private owners struggle to balance their management expenses with timber incomes. Public foresters working for the National Forests Office (ONF in French) are in charge of the management of national forests but have to reduce their expenditure (ONF 2016). Concerning private forests, landowners do not strive for profit at any cost, and in the past, they relied on a subsidies system known as the National Forest Fund to keep their budget balanced (Cinotti 2003). The Fund was launched in the aftermath of World War II to boost wood production in order to rebuild the country. However, after years of functioning, the program stopped in 2000, inducing a loss of financial incentives for private owners (Barthod 2001). Second, public and private forest stakeholders must deal with climate change, which is interfering with their habit of long-term planning. Indeed, ecological, sanitary, and physiological hazards amplified by climate change disturb the functioning of forest ecosystems (Millar et al. 2007). Adaptation strategies try to optimize the situation, but they mostly rely on the anthropogenic modification of forests such as favoring drought-resistant species during the regeneration phase or shortening rotation turnovers (Kolström et al. 2011; Fouqueray, Charpentier, et al. 2019). This context might be of broader interest, since such climatic and economic uncertainties are shared in a wide variety of temperate countries (Yousefpour et al. 2012).

In this paper, we explore how foresters, faced with the uncertainties of future forest management, have created organizations to structure monetary flows from the CSR policies of businesses toward forestry operations to enhance GHG mitigation. Our objectives are thus threefold: (i) to outline the local forestry sector concerns that have given rise to offset contracts

that, at first sight, seem focused on carbon mitigation; (ii) to highlight how these unusual partnerships between foresters and private sector stakeholders try to overcome long-standing impediments to forestry operations and mitigation measures; and (iii) to discuss the importance of regional embedding in light of an official “Low Carbon Certification” (LCC) recently launched by the French Ministry of the Environment.

To assess how financial resources from offset contracts became a “Trojan horse” to fund the management of other forest ecosystem services, our study uses semi-structured interviews with forest and mitigation stakeholders. We selected two study cases, namely Sylv’ACCTES and Normandie Forêt, two non-profit and non-governmental organizations that have succeeded in raising funding from private and public sources.

2. Material and methods

The research combines semi-structured in-depth interviews and documentary analysis. Throughout the article, interview samples are referred by their anonymization number preceded by “S” or “NF” for Sylv’ACCTES and Normandie Forêt, respectively.

2.1. Selection of study cases

The selection of study cases was guided by three steps so as to retain initiatives occurring in forest-related carbon offsetting. We restricted the area to a single country, namely France, to allow for comparisons in the same legal and institutional context. First, we listed French carbon mitigation projects linked to forests. We conducted an internet survey using all possible combinations of the French keywords “forêt,” “compensation carbone,” and “climat” (respectively meaning “forest,” “carbon offsetting,” and “climate”). We cross-checked the list with records of conferences on forest-based carbon mitigation. Second, we screened the list to target unprecedented partnerships linking foresters (owners, forestry experts, timber industry professionals) with entities seeking to compensate their GHG emissions. Third, the selection of study areas was guided by social-ecological considerations so as to retain two local initiatives that were similar in terms of scope, partnership structure, and objectives. We did not aspire to span the entire range of French forested regions or carbon offset organizations.

We chose two associations from two different regions: Sylv’ACCTES (hereafter, SACCTES) founded in 2015, and Normandie Forêt (hereafter, NF) founded in 2017. The study

area of SACCTES is in the Auvergne-Rhône-Alpes region, which has a long history of fuelwood exploitation. As one of the regions with the highest standing volume, it is dominated by a mixture of coniferous species in the mountains and common beech (*Fagus sylvatica*) and chestnut (*Castanea sativa*) in the plains (IFN 2017). By contrast, the second study area in Normandy is a coastal and hilly territory with few forested patches of broadleaved beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur* and *Quercus petraea*).

2.2. Data collection

To analyze the two associations, we carried out 14 face-to-face semi-structured, and open-ended interviews in November and December 2018. The interviews took place in Auvergne-Rhône-Alpes and Normandy. We tried to maintain a representative and proportional set of interviews for each study case, balanced by their regional weight and level of activity. For both SACCTES (11 interviews) and Normandie Forêver (3 interviews), interviewees included forest managers, scientific committee members, financial partners such as public bodies and state agencies officials, and forestry experts. Interviews lasted between 1 and 2.5 hours and were recorded and fully transcribed. Each interview followed a similar grid consisting of (i) a general description of the interviewee's role, objectives, and experience in the association, (ii) the interviewee's opinion about the association's ability to create bonds between its stakeholders, and (iii) the interviewee's vision about the impact and potential development of the association in the future. If not spontaneously mentioned, we also asked about the implementation of the national LCC and its effect on the association.

We completed these sources with a review of the forestry press with a focus on mitigation projects, the websites of the associations, and the preliminary reports for carbon accounting, operational charters, partnership leaflets, or financial information of SACCTES and NF.

2.3. Data analysis

Our goal was to understand the content of the offset contracts and their framework. By framework, we mean the regional constraints of the associations, how they developed organizational processes (distribution of decisional power between stakeholders, jurisdictional form, spatial and temporal scales, financing, etc.), and the importance given to carbon mitigation by the contractors (e.g., methodological soundness accounting for GHG mitigation). We thus

developed a qualitative analysis grid to tag and evaluate the transcription of each interview depending on the items above. Once completed by one author, the characterizations were cross-checked by a second author to avoid arbitrary classifications.

3. Results and discussion

The present section considers the different components of a contract, namely its content, contractors, outcomes, and future developments. We start by discussing the content and framework of the offset contracts of NF and SACCTES. Next, we present the rationale behind the founders, funders, and contractors' involvement in the two associations. This leads to considerations regarding the ability of offset contracts to overcome long-standing forestry and mitigation issues. The section ends with an analysis of the opportunity created by the recent national LCC to scale up regional initiatives such as NF and SACCTES.

To facilitate the comprehension of the different sections, Figure 20 summarizes the general functioning of the two associations.

3.1. When carbon offsets fund forestry operations

A contract for forestry operations

The offset contracts of SACCTES and NF are signed between the association and the forest landholder. As offsetters provide upstream funding, they are not required at the time of contractualization (Figure 20).

To be eligible, forest landowners must comply with environmental prerequisites. As proof of commitment to biodiversity, NF and SACCTES require an official document certifying that the landholders comply with a mandatory measure in France for properties exceeding 25 ha (and optional below); this document proves the sustainable management of the target stand. As an additional environmental condition, NF requires a sustainable management certification delivered by the Program for the Endorsement of Forest Certification (PEFC) or by the Forest Stewardship Council (FSC). SACCTES does not use environmental certifications but instead includes two additional measures. The first is for at least 30% of the forest surface to have a species mixture, and the second is to retain at least five old-growth trees per hectare. Neither of these measures proves to be challenging for forest owners, as many forest stands meet these requirements in the Auvergne-Rhône-Alpes region.

After agreement, the SACCTES contract contributes up to 40% of the forestry operations costs, provided that the operations correspond to technical specifications jointly agreed with the association. Afforestation, deforestation, or reforestation are not eligible as technical itineraries. Contracts favor an evolution toward improved forest management (e.g., introduction of species mixture instead of monospecific stands). The minimum engagement period for an owner is 10 years, with a minimum forested surface of 2 ha (Sylv'ACCTES 2018b).

Contrary to SACCTES, NF restricts its focus to forest stands where timber sales do not cover the cost of forestry operations. This can result from the inappropriate planting of tree species given the local conditions, previous parasite attacks decreasing the value of the trees, and so on. NF aims to pay up to 30% of the costs of the forestry operations on a stand to encourage clear-cut and replanting. To do so, NF calculated that each hectare replanted after clear-cutting could store a certain amount of carbon, equivalent to 2,000€ per hectare considering the market price of a carbon ton at the time of calculation. Payment is then submitted to a 20-year engagement.

In both cases, the contracts' funding amount is considered to be an incentive for forest landowners to set up forestry operations, but it is not intended to fully cover the costs, as underlined by interviewee NF3: "The amount was evaluated so that it would be large enough to commit to the program."

In terms of results, SACCTES already collected a mixture of private and public funding for an annual total of 700,000€. It has participated in forestry operations over a surface of 1,800 ha since 2016, split across 9 different forest stands in Rhône-Alpes. Despite its later start in 2018, NF's contracts have already supported forestry operations over 20 ha. NF now aims to reforest 1,000 to 2,000 ha of forests per year.

Search for funding

To provide appropriate financing for its contracts, NF relies on two mechanisms that are open to any private or public structure. A first source of funding stems from a membership fee of 150€ (Figure 20). The new member then assesses its carbon emissions and contributes to NF for 14€ per carbon ton. The first year of NF was a test, but it turned out to be very successful with NF now meeting a growing demand from companies.

SACCTES uses three different public and private financial sources. First, the association benefits from the monetary support of its funding members at a regional scale: the Auvergne-Rhône-Alpes region, the city of Lyon, and a bank. Second, at a smaller scale, local businesses contribute to funding local forestry operations by giving to SACCTES (Figure 20). Third, a membership fee ensures another source of income and underlines the willingness to contribute

accordingly to the association's decisions. Despite the shared features with NF, SACCTES benefits from an asset that NF does not have. While both are non-profit associations recognized by the French law of 1901, only SACCTES is recognized to be of general interest by the State thanks to its commitment "to the defense of the natural environment" (Sylv'ACCTES 2018a). Consequently, SACCTES gained access to a system of tax exemption delivered by the fiscal administration. It allows the association to deliver tax receipts that provide a 60% tax exemption for any donation. In other words, a company giving 100,000€ only incurs a 40,000€ expenditure after the tax credit. We argue that such a tax exemption is a strong lever to ensure the funding of SACCTES subsidy system.

3.2. As many motivations as contractors

Carbon offsetting: A consensual objective

Increasing carbon storage and sequestration in forests was an objective shared by all members of the associations. It is emphasized in an leaflet of NF, which includes many such expressions – "A concrete and guaranteed commitment to reducing CO₂ emissions by local reforestation" – and by the very name of SACCTES. Indeed, Sylv'ACCTES stands for "*Sylviculture d'Atténuation du Changement Climatique et Services Ecosystémiques*" (French for "Silviculture for the Mitigation of Climate Change and Ecosystem Services").

Public funders such as towns, cities, and regional councils also expressed their interest in participating in forestry operations to increase GHG mitigation: "Sylv'ACCTES has another advantage: working with carbon throughout the entire wood lifecycle, and in addition to the societal demands, this is a strong political objective at every level" (S3).

In the same vein, companies pushed for the creation of associations to mitigate their carbon emissions, as illustrated with NF: "the sustainable development club – for companies that are very involved in CSR, it is a network. They wondered how they could reduce carbon emissions, and they were looking for local mitigation solutions" (NF1).

However, while carbon mitigation was important for bringing together various private and public entities, it was not the only objective – as illustrated by the inclusion of "Ecosystem Services" in the name of SACCTES.

Offset contracts: Improved incentives for forestry agencies

In France, the "Regional Centers for Privately Owned Forests" (CRPF in French) are public bodies that promote the indirect stimulation of the timber industry through increased wood

mobilization. CRPFs focus especially on private forests, because they comprise up to 75% of French forested areas (IFN 2017). To carry out their task, the CRPFs can advertise public financial incentives such as the partial refund of management costs. However, administrations have set minimum surface thresholds of 4 ha to be eligible for the subsidies (at the time of SACCTES and NF's creation). This entails a disparity between the incentive system and the private forest ownership structure: 89% of owners possess less than 4 ha of forests, which is equivalent to 25% of private forests (CNPf 2019). As a result, many private owners do not meet the subsidy conditions, and when they do, they often find the application processes to be long and dissuasive, as highlighted by interviewee NF1: “There are already existing EAFRD allocations [EU subsidy system (authors' note)], and these subsidies are very complicated. We don't want to keep this model at an administrative level, as at least 80% of landowners don't want to apply again.”

Compared with the national tax exemption known as DEFI piloted by the Ministry of Agriculture, which is also in charge of forests, SACCTES contributes twice as much to the costs of silvicultural operations. Its engagement period is five years shorter (10 years vs 15 years for DEFI), and its minimum surface is half the size (2 ha vs 4 ha for DEFI) (Sylv'ACCTES 2018b). Despite its 20-year contract, NF also simplified the funding requirements compared to public subsidies: “It has to be simple and not supported by EAFRD, relatively fast in reaching a decision, and exploitable for the landowner” (NF2).

The creation of NF and SACCTES for carbon offsetting was therefore an opportunity for Normandy and Auvergne-Rhône-Alpes CRPFs to accomplish their objective of wood mobilization. Both CRPFs participated in the creation of SACCTES and NF in order to design a complementary subsidy system accounting for regional specificities, as highlighted in their leaflets: “Sylv'ACCTES enables companies and local authorities to locally fund forestry operations to make the forests of tomorrow” (available at www.sylvacctes.org), and “By making a financial contribution to planting and maintenance works in unproductive wooded plots, you contribute to securing, improving, and conserving the local forest heritage, developing renewable energies through the wood-energy sector, and reducing the impact of global warming” (available at www.normandieforever.org).

Public funders bolster their local policies

The two regional councils share the view of the CRPF, namely that NF and SACCTES are an opportunity for economic development based on the mobilization of underused wood resources in private forests: “If the sector is well established in our territory or nearby, jobs are not relocated” (S9).

Furthermore, NF and SACCTES open an additional avenue for regional and local authorities to reinforce their forest-based policies such as the economic development of the timber industry, the reinforcement of the renewable energy sector, the promotion of open-air leisure activities, and so on. The regional branch of the Agency for the Environment and Management of Energy (ADEME), instrumental to the launch of NF, explained: “In the end, mitigation is not everything. For us, it’s just a good reason to influence other fuelwood policies” (NF3).

Producing wood is a key issue for NF, since regionalized forest growth models predicted a gap in wood production due to the unbalanced age structure of forest stands. One of the reasons leading to the creation of NF was thus to avoid a potential problem linked to timber and fuelwood provisioning in the coming decades. To supply the missing age category, NF was considered to be a relevant interface to pay for the clear-cut and replanting costs of decaying and unproductive stands. This provided an important motivation for cities in Normandy to join NF, as they are currently developing collective heating facilities: “We wanted to mobilize a lot of extra wood, mobilize wood-fired heating plants in private forests.”

Likewise, for SACCTES, the regional need for fuelwood heating was a reason for public funders to become involved. The Auvergne-Rhone-Alpes region has a strong culture of fuelwood heating that continues to develop, and it encouraged an organization that secured the local and sustainable production of fuelwood: “The ‘Grand Lyon’ metropolis had an issue with provisioning their wood-fired heating plants. We were also working with territories on timber production, so there was this interesting rural-urban link” (S10).

Along with fire heating, the rural-urban link was depicted by both associations as a communication support that strengthened the relationships between forest operators, local companies, and inhabitants: “From the perspective of Sylv’ACCTES governance, its major interest is the creation of a local dialogue” (S7).

Private funders reinforce their social and environmental responsibilities

Business funders saw SACCTES and NF as an opportunity to offset their carbon emissions and simultaneously strengthen their social and environmental responsibilities at a local level.

SACCTES corporate funders were most motivated by the positive social and economic side effects of forestry operations, emphasized as one of the reasons to participate in the regional development of the forestry sector: “Bringing together private firms in or within territories: this is a stronger message than saying ‘you love forests, so give to forests’” (S11) or “What we want to do is a short circuit. We have the local authorities, local foresters, and in proximity, the companies accompanying the management of a natural resource toward something more virtuous” (S1).

In Normandy, private funders prioritized carbon mitigation over other considerations. The aim here is to stay as effective as possible and avoid interference from other issues, because when there are “expectations other than carbon such as biodiversity, environment, landscape, or satisfying locally elected officials, it becomes much more political. By staying focused on carbon, we favored it – without removing the rest, we just favored carbon.”

3.3. Offset contracts tackling long-standing forestry and mitigation issues

As illustrated by NF and SACCTE, offset contracts have succeeded in bringing together different types of members in the associations. However, while they share the same interests, this is also true for the issues faced by all the stakeholders. Forestry operations should adequately direct funding toward landholders struggling with the management of their forest stands. With respect to mitigation measures, funders require sound safeguards to avoid the reputational risks of “greenwashing,” which means that they should pay special attention to common mitigation difficulties.

Obstacles to sustainable forest management

Subsidies for forestry operations can be scarce and sometimes so complex that they deter many forest owners to apply for them. The solution of offsetting contracts proposed by NF and SACCTES partially overcomes this impediment to forest management.

Concerning the issue of ensuring funding, we argue that framing subsidies around carbon mitigation was key for both NF and SACCTES. Indeed, neither of the associations tried to gain support from the classical operators of forest management. Instead, they unlocked additional financial sources based on mitigation purposes, which widened the range of potential funders to reach businesses and public entities. In the case of SACCTES, this can be seen through the recognition of general interest, which does not acknowledge forest management but is rather motivated by the “defense of the natural environment.” To the best of our knowledge, this type of financial organization is unknown in the forestry sector and may successfully be expanded, as underlined by the desire of NF to also be recognized to be of public interest.

Concerning the funding distribution to landowners, the success of the offset contracts must be assessed in the light of the recipient owners. In France, public forests are split between State forests, public entity forests (e.g., communal forests belonging to municipalities), and private forests, which cover 16%, 9%, and 75% of forested areas, respectively (IFN 2017). Sylv’ACCTES targeted private forests, but they only represented 20% of grantees, with the remaining 80% for

communal forests. In spite of the attractive conditions, it appears that subsidy contracts are not given full consideration by private owners. One explanation may relate to the reluctance of private owners to engage in long-term contracts even for 10 years, as observed in other voluntary forestry programs such as conservation programs (Primmer et al. 2014). A second non-exclusive explanation is that the French forest owners most interested in carbon mitigation also tend to be the youngest and most educated ones (Tronquet et al. 2017). This mismatch between the intended and actual recipients of contracts may be due to the over-representation of owners aged over 60 years who represent two-thirds of forest owners (CNPFF 2019), as pointed out by interviewee NF2: “We are among relatively old people, so it is difficult to speak of 20, 30, or 100 years with someone who is 80.”

By contrast, municipalities owning communal forests find the offset contracts to be efficient, as stressed by the overrepresentation of public structures as beneficiaries. This additional funding source is well received by municipalities, which often struggle to balance their forest budgets.

Four challenges of carbon offsetting

Any offset contracts should deal with four issues of mitigation measures (Gren & Aklilu 2016). The most important is that the contracts should be supplementary in order to prove their added value, meaning that the forestry operations would not have occurred without the funding covered by the contract (UNFCCC 2007; IPCC 2014b). Second, the permanence risk refers to the potential carbon leakage during the duration of the offset contract (Cooley et al. 2012). Third, the uncertainty of forest growth makes it difficult to predict the mitigation outcome of forestry operations (Porté & Bartelink 2002). Finally, the heterogeneous capacities of forests to store carbon complicates the calculation of their expected mitigation success.

Two approaches dealing with the issue of non-additionality are found in the literature (Gren & Aklilu 2016). One is to accept the extent of non-additionality in the design of mitigation measures by using “non-additionality buffers,” for instance. Buffers can be material, with the reduced counting of the carbon stored by the mitigation project, for instance by setting aside 20% of GHG emissions of an offset project. Otherwise, they can be based on an insurance system: in the case of the disclosure of a non-additionality flaw, a saved part of the credits is dedicated to implementing complementary mitigation projects. The second approach to secure additionality is to have a contract framework allowing for a case-by-case analysis of non-additionality risks. NF took the second option and added an additionality clause in the offset contracts: “I hereby certify to the best of my knowledge that the funding provided by Normandie Forêver had an active and incentivizing

role in my reforestation action for this stand caught in a forestry deadlock.” SACCTES adopted a different approach in terms of additionality, as it attaches great importance to maintaining multifunctional forests. Making carbon mitigation the only legitimate reason to engage in an offset contract could contravene the vision of multifunctional forestry operations. Hence, the association chose a case-by-case grant of funding assessed by its scientific committee.

The heterogeneity of forests’ capacities to store carbon was a prevailing issue that required the development of a reporting method applicable to all the contracts in each association. A common methodology was required to gauge how much carbon would be stored by forestry operations. Usually, the amount of carbon saved is calculated as the difference of carbon stored between a reference scenario and a baseline scenario (no offset contract). This amount therefore depends on the baseline and reference scenarios. To arbitrate between the many possible scenarios, SACCTES and NF anchored their own scenario choices in regional considerations. Baseline scenarios corresponded to the management practices currently in place in the forest stands. For NF, this related to the non-management of decaying stands. The reference scenarios of SACCTES were chosen among local forestry practices. Forest experts and ecologists selected practices with an added value for carbon mitigation such as the transition from even-aged forests to species- and age-mixed forests. For NF, the reference scenario was the management of even-aged plantation.

Along with heterogeneity, the calculation of the amount of carbon saved by the offset contracts is surrounded by uncertainties. Uncertainty applies to the selection of calculation parameters due to a lack of reliable data (e.g., soil condition, browsing pressure), their inherent stochasticity (e.g., local climate), their entanglement (e.g., tail dependence effects strengthened by climate change; Cooley et al. 2012), not to mention the knowledge gap regarding phenomena only now coming to light (e.g., storage capacity of soil upper horizons or old-growth versus recent forests; Luyssaert et al. 2008; Stephenson et al. 2014; Jonard et al. 2017). To account for calculation uncertainties and the stochastic natural hazards that might result in carbon mitigation losses, SACCTES and NF relied on a “physical” buffer system. SACCTES retained estimations issued by the best climate scenarios. Once calculated, only 80% of the carbon storage estimation was considered: in this case, if a project suffers from unexpected carbon leakage, it is assumed that the 20% uncounted carbon from all other projects can balance the mitigation shortfall. This methodology was patented under the name “Potential Mitigation Gain” (www.sylvacctes.org/les-indicateurs-sylv-acctes/). NF adopted a similar strategy: to compensate the potential carbon losses, 15 to 20% of the carbon stored is set aside in every calculation.

Impermanence can be due to natural hazards (e.g., parasite outbreaks, fires) or contract violation by a forest owner harvesting trees before the term of the contract. In both associations,

contracts stipulated the length of time that the forestry operations had to be carried out, and contractors acknowledged the possibility of verifications. Such verifications induce transaction costs that are commonly included in voluntary offset projects abroad, either to fund an external certifying body such as the Verified Carbon Standard (Fortmann et al. 2014) or to pay for verification by the organization issuing the contract. NF decided to take responsibility for the verification process, because it considered external certification to be too expensive: “For us, the certification costs were too high to certify a project on the voluntary mitigation market” (NF3). SACCTES dedicated a specific budget to conduct verifications itself or seek outside expertise. In both cases, financial penalties were imposed in case the contracted activities were not properly completed, but these did not apply when the impermanence was due to natural hazards. Only NF introduced a clause of replanting in its contract in case of destruction following a natural hazard, which was certainly motivated by its objective to prepare the timber production of future decades.

Avoiding reputational risks

The private sector had a form of insurance against potential greenwashing allegations thanks to its original clustering with public entities and CRPFs. Known for their forestry skills, CRPFs were qualified to design offset contracts accounting as much as possible for the challenges of carbon offsetting. Furthermore, to avoid other reputational risks, NF and SACCTES included environmental and social issues into their development phase.

SACCTES began early discussions with environmentalists, inviting them to be part of its scientific councils. Environmentalists participated in the design of the environmental specifications of the association’s offset contracts. Moreover, SACCTES patented an indicator named “Potential Biodiversity Gain” (www.sylvacctes.org/les-indicateurs-sylv-acctes/) to monitor the ecological impact of its offset contracts. NF also has its own scientific committee in order to ensure the liability of their carbon storage calculation method: “Lastly, we have the scientific committee whose job is more to make calculations and validate them, but also to confirm or refuse the proposals of forestry sites” (NF1). To avoid greenwashing or conflicts of interest, membership is submitted to an ethical statement and the decision of the NF ethical committee: “As the firms are very invested in CSR, they wanted it to be a real process of carbon mitigation, so we established rules to join Normandie Forêver” (NF1). Establishing such environmental safeguards strengthens the communication strategy around carbon mitigation for the members of SACCTES and NF. In both study cases, the associations could recruit new funders such as local companies, a task eased by the support of other businesses and local public entities (e.g., mayors) and not only by the “usual”

foresters. Additionally, having the association as the only contact facilitated the arrival of new funders.

Social pressures also exist in terms of forestry operations, commonly expressed by inhabitants in their rejection of tree harvesting, as illustrated during a public conference on forestry held in Normandy: “Several people showed their feelings for the trees, and we saw that many people were there to defend the trees and stop an overly interventionist approach, trying not to cut too many down” (NF2). In anticipation of such claims, the communication of NF stressed the outcomes of forestry operations for carbon mitigation or local employments, and not only the technical arrangements. Explanatory boards were displayed at the site of each supported operation. Forest owners who signed offset contracts also had to acknowledge the right of funders to visit the forest stand.

SACCTES had a broader and more inclusive approach toward the social aspects of forests that encompassed both the elaboration and content of a contract. Regarding the elaboration of a contract, the association tried to avoid a “convenience store” logic by promoting the participatory writing of contracts with its members. Regarding the content of a project, it surveilled the inclusion of local hazards in order to exclude any detrimental effects on the local populations. In a flood-prone area, for instance, the funding of a project was subjected to the conservation of a continuous forest cover.

3.4. Scaling up: Mind the step

The attention paid to the different interests of NF and SACCTES founders and the care shown to overcoming long-standing forestry and mitigation issues in the offset contracts were key factors for the successful launch of the associations. The question of securing the projects and expanding them now arises, especially since a national LCC was portrayed as an incentive for voluntary mitigation projects.

Further developments of NF and SACCTES

Many NF and SACCTES stakeholders expressed different points of view regarding future developments, but they consistently agreed on first consolidating the achievements. Indeed, the winning combination of various interests was the key to ensuring stability for the launch of the associations, as shown for SACCTES. A political shift at the head of the region at the very beginning of the project could have halted the contribution of the regional council, but the newly elected regional officials maintained their support. The main concern of many interviewees was

therefore not the relevance of the offset contracts but rather the need to engage enough forest landowners: “If many people wanted to give, but there aren’t enough owners, then we would go straight into the wall ” (NF2). Thus, both associations are in the process of hiring a permanent employee devoted to contacting landholders, which emphasizes that the main obstacle to their activities is not the lack of voluntary offsetters but rather the ownership structures of private forests.

Some consideration is being given to the different ways to develop further, although a consensus is emerging regarding the importance of regional embedding: “By scaling up, we must not lose this highly efficient aspect” (S4). Caution is advised in terms of expanding to other regions so as not to lose operationality: “There could be regional branches, this issue was once raised, but with what working time dedicated to them? Is working at an inter-regional scale even interesting? I don’t know” (S10). This opinion is shared by other members of SACCTES, to whom future efforts should concentrate on the social aspects of offset contracts to establish “a possible dialogue in the field for a change of attitudes” (S7). For NF, offset contracts should first aim at solving the regional timber issue; hence, development further afield is not given much attention, or at most, in neighboring regions. More interest is given to temporal rather than spatial development: NF aims at funding 20 more years of activity, a period considered necessary to achieve its objective of a balanced age structure in the regional forest structures.

In this context, the recent launch of a national certification for voluntary mitigation projects is not seen as the key to persisting problems.

Low carbon certification: Much ado about nothing?

At the national level, SACCTES and NF members were invited to participate in the creation of the LCC. Prior to 2018, no official French norms described how voluntary mitigation efforts should be monitored, reported, or verified. This lack of GHG mitigation standard was lamented by the “carbon club,” a national think-tank driven by the semi-public Institute for Carbon Economics (I4CE). Members of the Carbon Club pushed for the creation of a reliable tool for voluntary carbon offsetting in order to meet the societal expectations of their customers and shareholders. Inspired by other EU initiatives such as the woodland carbon plan in the UK (Konadu et al. 2015), the Ministry of the Environment seized this opportunity to move toward its carbon neutrality policy for 2050. Drawing on previous discussions, the Ministry of the Environment tasked I4CE with creating a voluntary mitigation certification. Importantly, the LCC had to encompass sectors outside of the mandatory EU Emission Trading System (e.g., forestry or agricultural operations) in order to increase the number of mitigation projects. Officially released

in November 2018 by the Ministry of the Environment, the LCC consists of a checklist of general features similar to international standards (Hamrick & Gallant 2018). According to the LCC, offsets must be real, measurable, verifiable, and supplementary (Légifrance 2018a). Based on its official description, the certification is also supposed to comprise a section on the economic and environmental side effects to be evaluated. Surprisingly, the decree lacks this section and only indicates that certified projects should “prevent potential significant negative impacts from an environmental and socio-economic perspective” using “simple indicators” (Légifrance 2018a).

Broadly, the LCC encourages bottom-up initiatives. For the forestry sector, any field practitioner can launch a project. Yet three major limitations in the certification arise from the splits made between top-down international mitigation standards and field-based indicators. First, as with SACCTES and NF, the results-based additionality, exactitude, and exhaustivity principles are too demanding in the face of the many knowledge gaps and uncertainties surrounding carbon mitigation: “The problem with carbon projects is that we must do what is called a proof of additionality, to prove that we do better than baseline. And in forests, well...” (S1). Second, the engagement period of 30 years was chosen to fit with the 2050 target for carbon neutrality, but this does not align with the temporality of foresters. This also corresponds to the need for businesses to assess the impact of their funding in timeframes that are compatible with their CSR policies. This is a problem for a founder of NF, because the association strongly encourages the combination of clear-cut and replanting operations when relevant. After 30 years, the carbon balance of such operations is only slightly positive, and results would be better with a duration of 70 years, for instance. Third, as explained in its official description, there are no financial incentives guaranteed by the certification (Légifrance 2018a). The only incentive for using the LCC is gaining a good reputation once granted. Paradoxically, the certification encourages bottom-up approaches that build the mutual trust between a project’s participants, the same trust that absolves them from relying on external certification. Similar observations have been made in other national contexts (Fortmann et al. 2014).

Only the coming years will tell if local-based mitigation projects will require the LCC, providing a guarantee for potential corporate funders with little knowledge about offset processes.

4. Conclusion

By accounting for the many forest ecosystem services other than carbon mitigation, offset contracts have managed to cement bonds between forest professionals tasked with the development of forestry operations, business and public structures interested in GHG mitigation, and landowners struggling to fund the management of their forests. The efficiency of the methodology has gained national and international recognition, as shown by the presentation of SACCTES as a “nature-based solution” by the International Union for Conservation of Nature (UICN France 2018).

In our view, a key feature of the associations was to intensify efforts on the limiting factors, namely the tendency of landholders to accept or reject an offset contract. Conditioning the aid to an obligation of means (technical specifications) and not to an obligation of results (a given amount of stored carbon) certainly helped enhance the number of landholders ready to participate. However, this could also hinder the potential integration of such voluntary offset processes into broader mitigation policies. The EU, for instance, puts a strong emphasis on reporting the results obtained from a subsidy, with less importance given to the means used (Barthod 2007).

Another key feature of the offset contracts was to abide by the financial concern of landowners and base the amount of the subsidy on the cost of forestry operations. Strictly correlating an aid to international market prices for a ton of carbon dioxide would have created uncertainty and impeded the engagement of landowners, as found in many REDD+ projects (Fortmann et al. 2014). The means-based design of the offset contracts of NF and SACCTES ensured their legitimacy and visibility, thus increasing their appeal to forest owners.

The support of public and private funders made all this possible, but it is still double-edged. First, concerns can be expressed regarding the gradual shift of forestry funding from the EU and State-based subsidies to private and regional-based funding. Voluntary contributions to the funding of forest management should not exceed a certain threshold in the eventuality of a funder withdrawal, because it cannot or does not wish to maintain its support. Second, the current configuration of offset contracts rewards the “black sheep,” or in other words, the prevailing funding of forest stands that have the worst practices of GHG mitigation. Eligibility criteria might progressively change to follow the evolution of mitigation policies, which could subsequently lessen forest owners’ interest in this type of incentive.

Indeed, the interest of foresters is great in terms of financial initiatives for environment services, especially in a context of rising climatic hazards. Currently, French forest landholders generate most of their forest-based revenues from timber sales (and for some, the lease of hunting

rights), but these are at risk with the increase in climate hazards. Hence, there are substantial expectations for technical adaptations that could secure timber production and favor the financial equilibrium of forest management. These adaptations often try to comply with the conventional wisdom of “not putting all your eggs in one basket,” but they also stay focused on technical changes (Fouqueray, Charpentier, et al. 2019). Diversification could be further extended with non-technical forestry evolutions such as payments for ecosystem services. As illustrated throughout this article, complementary funding of forest management through carbon offsetting could reduce the pressure on timber production.

Voluntary offset contracts do not solve all the issues faced by foresters. If regional embedding is a key to their success, it also has the merit of acting like a Trojan horse to establish contact with parts of society that are usually not involved in forestry. Perhaps one of the greatest achievements of the associations favoring mitigation is their participatory organization, underlining the overarching importance of local, social, economic, and environmental specificities in the success of forest-based carbon offset projects.

ACKNOWLEDGMENTS

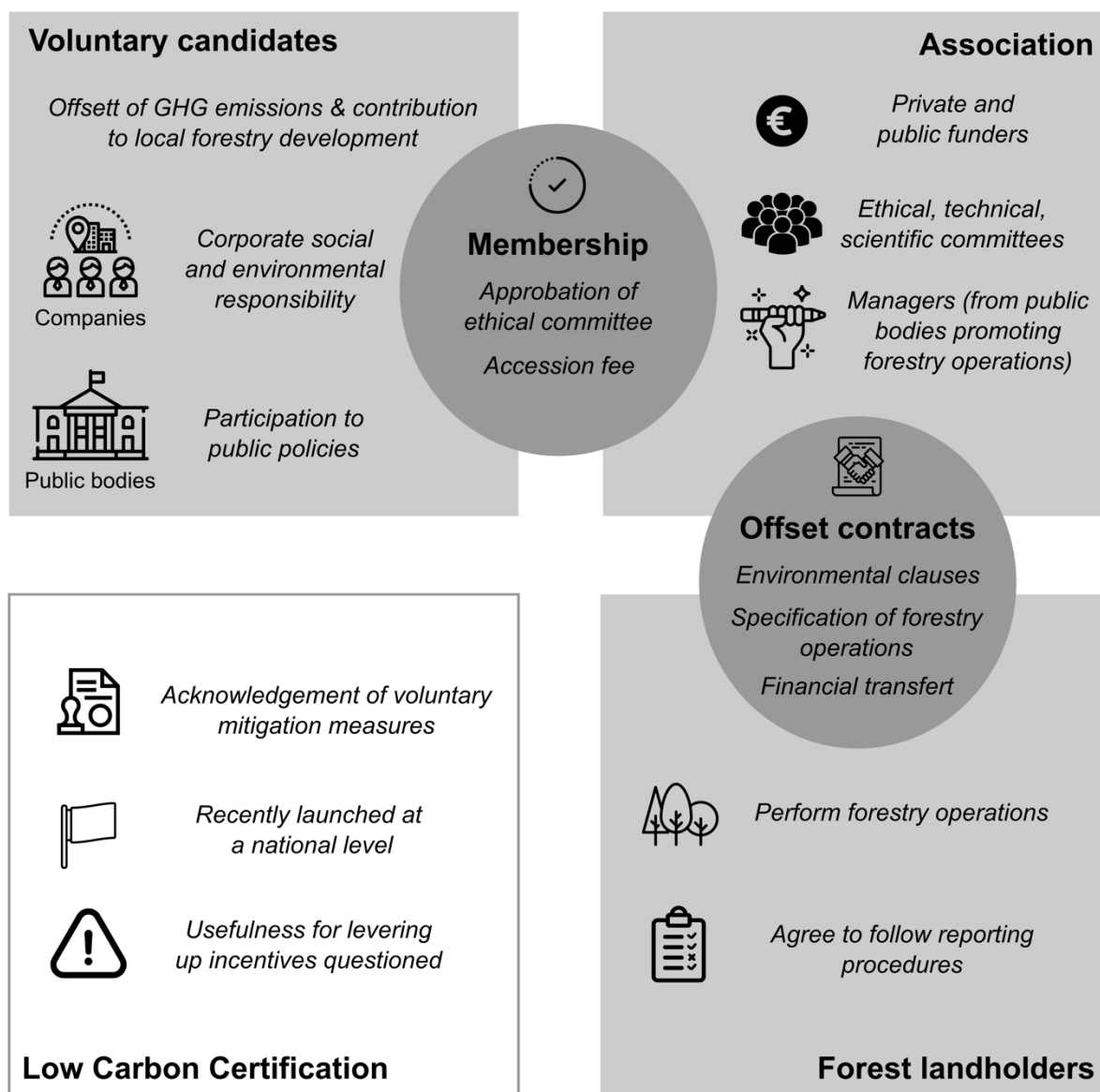
The authors are grateful to the members of Sylv’ACCTES and Normandie Forêt for their willingness to share their knowledge. They also thank the Excellence Laboratory “Biodiversity, Agro-ecosystems, Society, Climate” (LabEx BASC) for its financial support.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

The authors declare that they have no conflict of interest. This work was supported by a grant overseen by the French National Research Agency (ANR) as part of the “Investments d’Avenir” Program (LabEx BASC; ANR-11-LABX-0034).

Figure 20. Framework of voluntary carbon offset contracts.

Voluntary candidates, either companies or public bodies, become members the carbon offset association after agreeing to the ethical conditions. They provide funding to the associations managed by forest practitioners. The associations then contract offsets with forest landholders. A national certification of voluntary mitigation measures has been launched by the French Ministry of the Environment to promote such initiatives.



CHAPITRE 4 :

FOSTER FOREST, A PARTICIPATORY SIMULATION OF ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN FORESTRY



Les dérèglements des régimes de précipitations risquent de diminuer le nombre de jours de travail des entreprises de travaux forestiers – celles-ci doivent tenir compte de l'engorgement des sols pour éviter la création d'ornières et le tassement. Cette situation pourrait se répercuter par une augmentation du coût des chantiers forestiers.

Crédit photographique : Frédéric Glon/Giada-Connestari/ONF.

Durant les entretiens des parties 1 et 3, des forestiers ont formulé à plusieurs reprises l'idée d'une forme de compensation financière pour services rendus à la société (certains allaient jusqu'à parler directement de « paiement pour service écosystémique » (PSE)). Ainsi, le président d'un syndicat des eaux vosgien espérait « *qu'avec monsieur Nicolas Hulot, maintenant notre ministre là, on puisse imaginer que ceux qui possèdent un petit peu des sources et les protègent aient un peu une certaine rémunération de l'État parce qu'on contribue quand même à une qualité de l'eau. On n'a pas, nous, de centrale de traitement d'eau ! On ne puise pas l'eau dans la nappe phréatique donc quelque part on pourrait être aussi récompensés de maintenir ce patrimoine vital en parfait état pour qu'il soit véritablement utilisé.* ». C'est cette idée de PSE qui a été étudiée dans la partie 3, avec un système de diversification des revenus économiques des forestiers qui les allège d'une pression économique portant sur la seule production de bois.

Suite aux résultats des trois premiers chapitres, j'ai souhaité disposer d'un outil qui plonge collectivement des gestionnaires forestiers dans une simulation de gestion forestière, avec un scénario de très forts changements climatiques. Le parti pris est d'intégrer dans la simulation des ACC techniques qui ne suffisent pas à répondre aux objectifs attribués aux participants, afin de les inciter à imaginer d'autres formes d'ACC. Il était pour cela nécessaire que l'outil soit à la fois :

- une plateforme de négociation collective de l'usage des terres (Röling & Maarleveld 1999)
- ouvert à des idées émergentes, des changements de stratégies des participants ; ces stratégies ne sont pas forcément stables ou définies *a priori* (contingentes, elles se forment dans l'interaction avec le socio-écosystème et ses parties prenantes (Friedberg 1997))
- participatif, un parti pris relativement rare pour ce milieu professionnel, malgré quelques projets de recherches participatives²².

La quatrième et dernière partie de la thèse présente la création, la formalisation et l'application de cet outil. Elle correspond au formalisme du journal *Environmental Modelling and Software*, afin d'y être proposée pour publication d'ici la fin de l'année 2019.

Contributeur : Émile Huguet (École Polytechnique – Corps des ingénieurs des eaux, des ponts et des forêts), alors étudiant ingénieur de la spécialité « Sciences Politiques, Écologie, Stratégie » d'Agroparistech, dont j'ai encadré le stage de fin d'étude.

²²Le projet SURVIVORS de l'INRA de Nancy-Champenoux en est un exemple, associant des scolaires à des tests de réponse physiologique du hêtre à un stress hydrique. Le « jeu de territoire » de l'UMR Métafort est un autre exemple, centré sur la prospective (Chambon et al. 2014).

Foster Forest: A participatory simulation of adaptation to climate change in forestry

Authors: Timothée Fouqueray^{a*}, Julie Latune^a, Michel Trommetter^b, Nathalie Frascaria-Lacoste^a

^a Ecologie, Systématique, Evolution, AgroParisTech, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91405, Orsay, France

^b GAEL, INRA, CNRS, Grenoble INP, Univ. Grenoble Alpes, 38000, Grenoble, France

* Corresponding author (+33169155662; Université Paris-Sud, Bâtiment 360, 15 rue du doyen André Guinier, Orsay 91405, France)

Email addresses: timothee.fouqueray@u-psud.fr, julie.lombard-latune@u-psud.fr, michel.trommetter@inra.fr, nathalie.frascaria@u-psud.fr

Abstract:

The adaptive capacity of forests and foresters to overcome the adverse effects of climate change remains highly uncertain despite intense research on the issue. While foresters are often invited “not to put all their eggs in one basket,” adaptation strategies to climate change almost solely rely on silvicultural diversification (e.g., rotation periods, species replacement). To study if and how socio-economic adaptive tools can complement these technical evolutions in forestry, we designed *Foster Forest*, a participatory simulation of forest management. It combines a role-playing game, an agent-based model, and a climate change scenario with high uncertainties. Drawing on multiple case studies in French regions, we show that climate change is not a short-term matter of concern for private and public foresters. We analyze the emergence of socio-economic changes (mainly payments for carbon storage) in the provision of ecosystem services as well as participants’ negotiations to spontaneously change the simulation rules.

Highlights:

- Foresters are more concerned about short-term issues than climate change.
- Participatory simulations successfully foster non-regret and economic adaptations.
- Economic adaptation consists of shunting climate uncertainty about timber incomes.
- Economic adaptation relies on commodifying non-provisioning ecosystem services.
- Collective adaptive action is steered by stakeholders with a public interest role.

Keywords: participatory simulation, forest management, adaptation, climate change, social-ecological, prospective.

Software availability:

Software name: Foster Forest. *First available:* 2019. *Program size:* 2.3MB. *Program language:* SmallTalk.

Developer: Timothée Fouqueray (see contact information in the authors' section).

Hardware: PC platforms supporting VisualWorks (VW7.6). *Software:* Cormas platform, version 2018.5.30 (download from <http://cormas.cirad.fr/en/outil/download/>). *License:* CORMAS is an Open Source Software licensed under the MIT License. *ODD+D description:* see Appendix A.

1. Introduction

The onset of climate change is now certain, although the magnitude of its spatial and temporal impacts on the environment is not (IPCC 2014a). As one of the most important ecosystems of the planet, forests will face more intense risks such as severe droughts, frequent parasite attacks, and reconfigurations of species assemblages to an extent that is still unpredictable (Lindner et al. 2010; Millar & Stephenson 2015). In Europe, forest productivity is expected to worsen because of the decreased sanitary state of forests caused by rarer cold extremes and more frequent heat waves (Ciais et al. 2005; Bréda et al. 2006). The interaction of these hazards with introduced and native pathogens is another matter of concern, with a great potential for damage (Bakys et al. 2009; Futai 2013). Hence, it is unclear whether forest species will have sufficient adaptive capacity to cope with climate change (Aitken et al. 2008; Corlett & Westcott 2013). For instance, the ability of tree populations and species to overcome climate hazards is still being discussed (Alberto et al. 2013). As a result, forest managers are trying to develop complementary adaptation strategies (Millar et al. 2007; Keenan 2015) in order to maintain the many ecosystem services (ES) provided by forests such as timber production, leisure activities, carbon storage, and water epuration (Brockerhoff et al. 2017). A key feature of robust anthropogenic adaptation is to account for the uncertainties of climate change: in a highly uncertain context, foresters can favor risk dilution by using different tree species, ages, and silvicultural systems (Kennedy & Koch 2004; Naumann et al. 2011). Instead of optimizing the performance of a forest stand, this “bet-hedging” approach aims at minimizing ES loss (Spittlehouse & Stewart 2004).

The issue of climate change is taken seriously in the field of forest sciences, and multifarious research projects aim to develop a series of readily available adaptation options (Bolte et al. 2009; Fouqueray, Trommetter, et al. 2019; Keenan 2015; Millar et al. 2007). To assess the operability of these innovations, researchers can draw on an active network of forest landholders and managers eager to participate in experimental tests, as proved by many studies conducted in France (CNPFF 2016), Europe (Kolström et al. 2011), and the United States (Nagel et al. 2017). However, there is a difference between research that expands existing knowledge on the potential range of adaptation strategies and studies that explore what is currently being undertaken in the field. The available literature on what foresters are really doing to prepare for climate change is scarce. Based on individual interviews and questionnaires, it shows that field practitioners do not wait for research outcomes to change their management practices (Fouqueray, Charpentier, et al. 2019; Kolström et al. 2011; Van Gameren 2014). It also points to the focus given to timber production and forestry technical changes such as species replacement or the tree density of forest stands, which is a typical trend in forestry (Dobbertin & Nobis 2010).

Two conclusions arise from this state of the art. First, the importance of the interactions between the different forest stakeholders in the process of adaptation has been scarcely examined. When adapting, forest managers gear their silvicultural practices toward the provision of one or multiple target ES (Duncker et al. 2012), which can in turn positively or negatively affect the management success of the neighboring stands: for instance, a preference for hunting in one place can threaten the regeneration of trees in another. A forester can also be inspired by management changes made by another forester, or they can develop ideas together that otherwise would not have emerged. Second, several articles stress the value of thinking outside of the box and considering non-technical changes as complementary mechanisms to adapt (Hallegatte 2009; Jacobs et al. 2015; Naumann et al. 2011). For instance, as foresters draw most of their financial resources from timber production, they will be at risk from climate hazards threatening the productivity of their trees. To balance their sources of revenue, foresters can adopt economic tools regarding timber sales by adding value to timber products through quality labels or turning toward insurance and supply contracts with climate-related clauses, for instance. Foresters can also diversify their income by investing in ES other than timber production such as carbon storage contracts (Tronquet et al. 2017).

To the best of our knowledge, no research on forest management has addressed the issue of adaptation to climate change with these two questions in mind. Consequently, the objective of this paper is to describe the development of a method that addresses this knowledge gap and to present the results drawn from its application in nine different study cases. The first step was to develop a methodological tool able to do the following: (1) be prospective and rooted in foresters' decisions at a regional level, because it is the scale at which most forest public policies are negotiated – at least in France, the country of the study cases (MAAF 2017); (2) incorporate technical adaptations but artificially limit their effectiveness because of a strong climate change scenario encouraging foresters to develop complementary organizational or economic tools for the evolution of their silvicultural management; and (3) allow the emergence of spontaneous and/or collective designs for adaptations to climate change in forestry.

For all these reasons, we created *Foster Forest*, a participatory simulation combining a computerized agent-based model (ABM) and a role-playing game (RPG) as defined by Barreteau et al. (2001). Participatory simulations and RPGs tend to focus on existing forest issues, examining non-temperate ecosystems or the interaction between forestry and other land uses (e.g., Etienne et al., 2008; Étienne, 2003; Fauvelle and Garcia, 2018), instead of adaptation to climate change. However, RPGs are relevant for the study of adaptation to climate change (Reckien & Eisenack 2013; van Pelt et al. 2015) and global changes associated with forests (Garcia 2019). We decided to

use the companion modeling (ComMod) approach (Barreteau et al. 2003; Étienne 2010), a relevant methodology to develop a participatory simulation on forestry in temperate ecosystems. Indeed, it is used for research, training, or negotiation purposes and is of particular interest when studying social-ecological ecosystems (SES) (Bousquet & Le Page 2004). ComMod relies on the involvement of stakeholders to define and develop a model of the SES of interest. Finally, participants are invited to partake in a participatory simulation, since their involvement in the design of the model does not necessarily entail their participation (Hassenforder et al. 2016). They make management decisions in a simulated hybrid environment that reproduces social, economic, and ecological processes (Becu et al. 2016). Some of these processes can be computerized (most often in an ABM): in the case of *Foster Forest*, this includes indicators of social satisfaction, prices for hunting rights, or forest growth. Lastly, ComMod complies with our methodological requirements, because it can model SES at a regional scale, allow spontaneous changes to emerge in the “rules of the game,” and explore scenarios of future forest management.

In the following sections, we introduce the conceptual framework used to decide modeling choices. We then present the ABM and RPG behind *Foster Forest*'s participatory simulations. We conclude with the description and discussion of the results stemming from nine French study cases. France was used as our study area, because its forestry situation is particularly at stake in terms of climate change adaptation: the country has the fourth largest area of forests in Europe (165,000 km²) (MAAF 2017). As encouraged by the law and numerous public policies, the multifunctional management of forests aims at the simultaneous provision of timber production, leisure activities, and biodiversity conservation (Légifrance 2012a). Forest management and the timber industry offer numerous jobs, either in private stands (75% of the surface) or in public forests (MAAF 2017). Thus, adaptation is of great importance and is acknowledged in public policies (MAAF 2017; ONERC 2015) and research projects (Fouqueray, Trommetter, et al. 2019).

2. Collective construction of the conceptual model

2.1. A social-ecological framing of stakeholders' interdependencies

The design of *Foster Forest* was inspired the analytical conceptual framework developed by Barnaud et al. (2018) for studying ES, social interdependencies, and collective action in SES. ES are at the core of this framework, which stresses the synergetic, antagonistic, or neutral relationships between ES providers and beneficiaries and their intermediaries (Figure 21). The interdependencies can relate to different ES providers (e.g., private landholders and managers of

public forests), ES providers and beneficiaries (e.g., forest managers whose stand regeneration suffers from overgrazing by boars and deer, and hunters who are responsible for avoiding the overpopulation of game animals), and ES beneficiaries (e.g., motorcyclists and hikers). These interdependencies are reshaped by changes in management decisions that modify ES and by new trade-offs between forest stakeholders' interests. Intermediaries promoting collective actions such as the natural regional parks (NRP) also contribute to the permanent rearrangement of these social relationships.

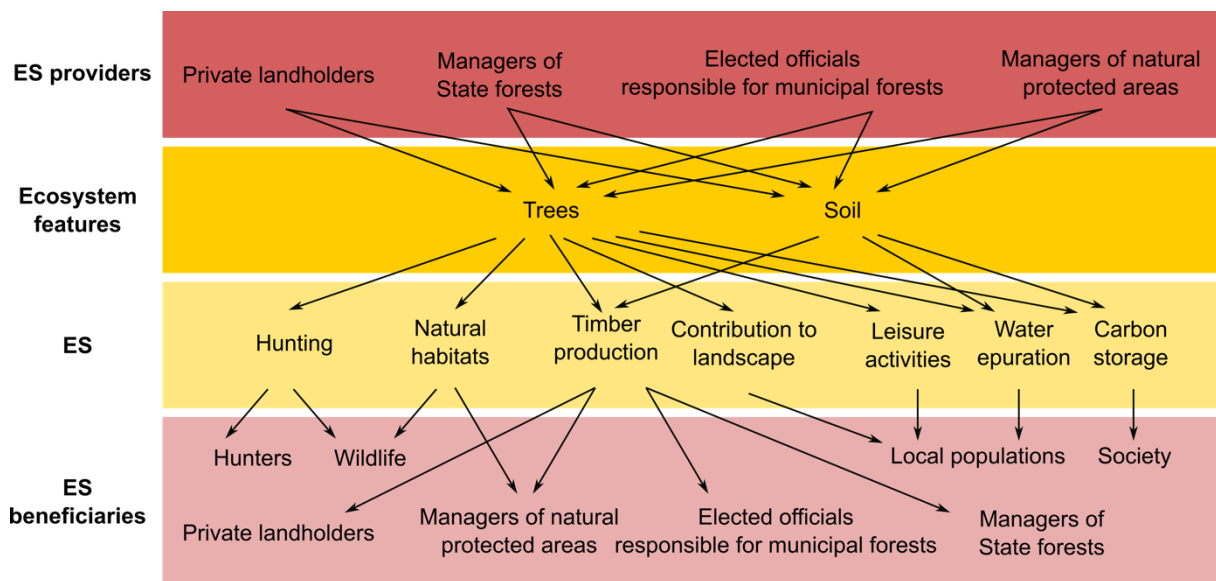


Figure 21. A simplified version of Foster Forest conceptual model.

A simplified version of *Foster Forest* conceptual model. ES: ecosystem services. Forest ES not relating to adaptation issues such as erosion control were not included in the model.

2.2. Building the conceptual model

The conceptual model (Figure 21) required the reduction of forest management complexity to its minimum features of interest. A major challenge was to balance this reduction with our objectives of studying adaptations to climate change, which potentially affects every single aspect of forestry. Another difficulty was to create an intermediate model of forestry: not too specific to a given region, but also not too broad so that foresters could easily connect it to their reality.

Because of our specific requirements, we applied a shortened version of the ComMod approach to build the conceptual model. As we needed a generic tool applicable to any French temperate forest and not to a precise regional case, we did not involve stakeholders during the earliest stages of the modeling process. Instead, we completed a first version of the model using previous analyses of foresters' decision-making (Fouqueray, Charpentier, et al. 2019). Then, as a

first step, we interviewed different forestry experts to gain complementary insights to develop an improved version. A second step led to the final version of the conceptual model, conceived during a workshop hosted by the NPR of the “Vosges du Nord”, which gathered public and private foresters in September 2018.

The inclusion of forest stakeholders greatly improved the model. One interviewee suggested discarding abrupt climate risks in order to better reflect climate projections. Fires, droughts, or windstorms are non-negligible, but cognitive biases increase the chances that they lead to adaptations compared to the incremental impacts of climate change (Morin et al. 2015; Weinstein 1984). Foresters are used to thinking in the long term, so we tailored *Foster Forest* to progressively integrate the evolution of mean annual temperatures and precipitations among others. The second step was also valuable in order to legitimate certain biases such as making the participants the ultimate decision-makers of forest management. Intermediary bodies were not included as agents of the model; only their influence was considered in the evolutive processes of objects in the model. For instance, forest cooperatives can modify timber prices, but this effect is encompassed by random variations in timber prices around a fixed mean.

2.3. A model restricted to five providers of ecosystem services

The final conceptual model of *Foster Forest* includes five ES providers. Three are forest managers representative of publicly owned forests: an elected official of a municipality owning communal forests (“mayor”), a National Forests Office manager (“public forester” managing state forests), and a manager of a natural protected area (“protected area manager”). Two private forest landholders (“landowners”) complete the group. However, as it can be difficult to recruit such players, they could be replaced by a private forest advisor or a public advisor from the Regional Centers for Privately Owned Forests (regional public bodies aiming to increase wood mobilization among private landowners in order to indirectly stimulate the timber industry). During the participatory simulation, foresters play their own role.

In accordance with the conceptual model, each player is attributed objectives. The mayor must avoid the deterioration of water quality and promote forestry operations that positively contribute to the esthetic value of the forest landscape. The public forester must harvest 70% of the volume of the decadal tree production. The area manager must convince the other participants to subscribe to a program for the conservation of old-growth forest in order to reach a total of seven plots at the end of the simulation. She/he must also provide any relevant information likely to favor carbon storage. Like all the other players, the landowners must maintain a balanced budget and avoid the detrimental effects of overgrazing.

A facilitator animates the participatory simulations to explain the rules and play the role of a climate expert or state official to respond to participants' questions about any climate, forest, or regulatory issue. She/he is accompanied by an observer in charge of noting information (discussions, behaviors, decisions, etc.) relevant to the research question.

The “Overview, Design Concepts, and Details” framework summarizes *Foster Forest's* features in Appendix A (Müller et al. 2013) in order to simplify its comparison with other ABM including human decision-making.

3. The agent-based model behind *Foster Forest*

Foster Forest is a hybrid composite simulation (Le Page et al. 2011), which combines features of both ABM and RPG. It is both hybrid and composite because of its combination of autonomous avatars of agents, humans controlling non-autonomous avatars (or their computerized representations), and semi-autonomous agents (humans with limited options of control). Here, we present the ABM on which *Foster Forest* relies.

3.1. Model classes and calibration sources

Foster Forest's ABM includes spatial entities (plots and properties), semi-autonomous social entities (foresters), and physical entities (trees) (Figure 22). The simulation environment is stylized, which means that the characteristics of each of the classes are proportional to French temperate forests (Le Page & Perrotton 2017). For instance, the initial distribution of pure or species-mixed forest stands is based on empirical data taken from the National Forest Inventory (IFN 2017). Abstract and representative environments were discarded for two reasons. First, we needed a prospective tool to allow for comparisons between different regions in the same legislative and economic context, namely France. Abstract or representative environments could not lead to comparisons of regional social-ecological frameworks, *ceteris paribus* (Barreteau et al. 2001). Second, a stylized environment distances participants from the issues that they face on a daily basis and facilitates their reflective behaviors during the participatory simulation (Étienne 2010).

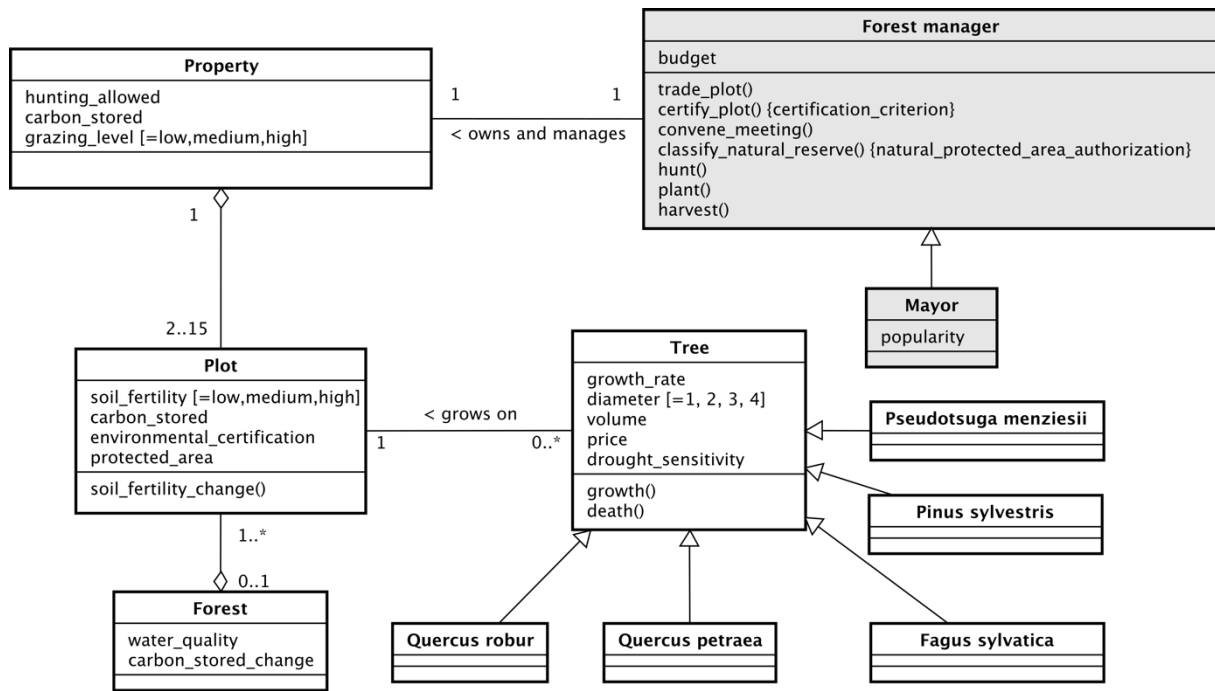


Figure 22. UML overview of the Foster Forest agent-based model.

Gray: non-autonomous agents controlled by *Foster Forest* participants.

Forest plots are the basic units of spatial entities. Plots have one parameter for soil fertility and another for carbon storage. Soil fertility, a combination of natural soil fertility and artificial soil compaction, is important for the calculation of tree growth. Updating soil fertility and aboveground carbon storage occurs at the plot scale. Depending on their tree species mixture, plots can be eligible for the old-growth conservation program. Plots are grouped in properties and distributed among foresters according to the mean proportions of the French ownership structure, as taken from the National Forest Inventory (IFN 2017). Properties are characterized by a level of grazing in order to account for the grazing pressure placed on tree regeneration by boars and deer (not represented in the ABM).

In the ABM, foresters are semi-autonomous social entities: participants control pre-determined actions of the “forest manager” class. Forest managers are characterized by forest ownership and a budget. They can trade forest plots or timber and decide on the intensity of hunting.

The only physical entities of the model are trees. Trees are located on plots and are categorized by species and diameter. The parameters of each species differ in terms of growth rate, wood price, and sensitivity to drought. We retained five different species in order to span a range of timber productivities, prices, and drought sensitivities similar to what foresters face in the field. For instance, beech was the most drought-sensitive species, while Douglas fir was the most profitable. Four categories of diameters were chosen to mimic the distinction of wood products used in the

timber industry and refine the ecological parameters depending on the development of trees (e.g., young and old trees differ in terms of their survival, growth, and reproduction rates).

Appendices B and C present the parameter choices and data sources for the initial situation.

3.2. Computerized processes and players' actions

In *Foster Forest*, computerized processes calculate the successive stages of the spatial, social, and physical entities. Most operate according to the decisions taken by participants, but some form part of a fixed climatic or economic scenario.

3.2.1. Simulation of forest growth

The survival, reproduction, and growth of trees are simulated at the stand (plot) level and not at the tree level in order to avoid cumulated model errors from the tree to the stand level (Porté & Bartelink 2002). The inclusion of ecological processes such as asymmetric competition, the increased impact of grazing on seedlings, and so on (Figure 23) was an important requirement in the selection process of a forest growth model for *Foster Forest*. The level of accuracy was less essential, because precise outputs would be overwhelmed by the large uncertainties of the climate scenario used in the participatory simulations. Nevertheless, the level of accuracy and the limitations of the growth model were communicated to participants during an introductory briefing.

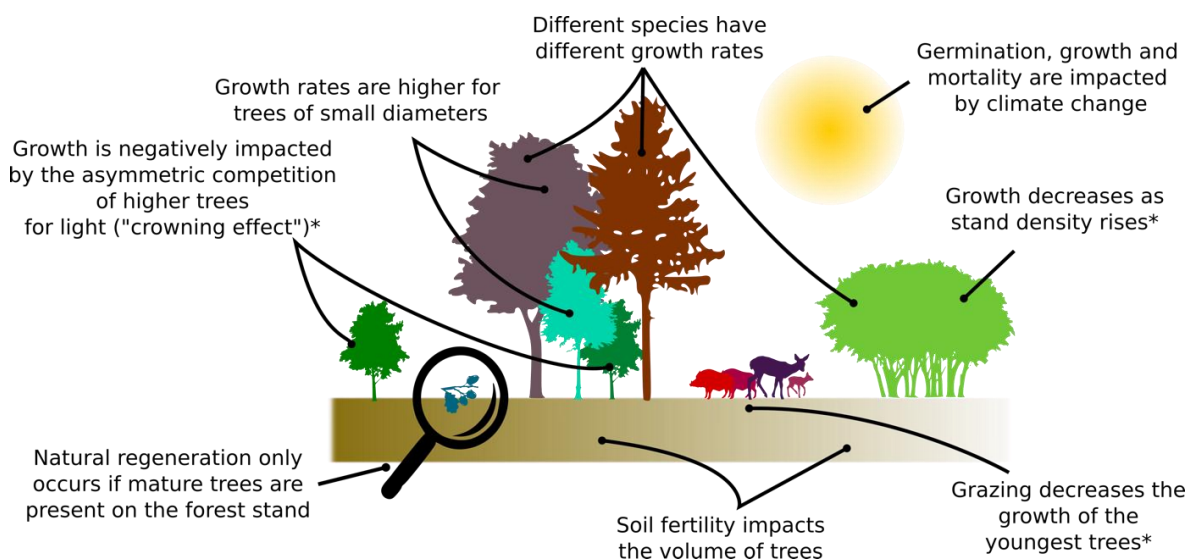


Figure 23. Parameters modulating the growth of trees in Foster Forest.

*These parameters are species-specific. For instance, the crowning effect is higher for oaks than for beeches (Appendix B).

The forest growth model used in *Foster Forest's* ABM is inspired by Kohyama and Takada (2012) as well as Mathias et al. (2015). The growth model, presented in Appendix B, simulates the dynamics of 1 ha of uneven-aged forest stands containing five different tree species of four diameters. Its execution by CORMAS was operating in a very short time, which avoided interruptions during the participatory simulations.

The computational timestep was fixed at 10 years. After discussions with private and public foresters, this was considered to be a plausible balance between the 10-to-20-year duration of private forests' management plans (mandatory for forest estates larger than 25 ha), the updating of climate parameters and economic prices, and the turnover rate of silvicultural operations in even-aged stands.

3.2.2. Computerizing participants' decisions and their effects on the agent-based model

Attendees can choose between many actions specific to forest management such as tree harvesting or hunting. During a participatory simulation, players have two information sources at their disposal to reach their objectives. First, a personal booklet lists the different silvicultural actions (Figure 22) and their consequences on social (inhabitants' satisfaction), ecological (soil fertility, water quality, grazing rates), and economic (personal budget) indicators. Second, two maps of the simulation environment are projected (Figure 24). One is projected onto a vertical screen; it shows the 50 plots of the simulation, with a background map of the property boundaries and a forest inventory of each plot's forest (number of trees per hectare, by species and diameter). The second map is displayed horizontally on a table close to the players using an ultra-short throw projector. It is used at the request of participants to show them any information of interest. For instance, the protected area manager can ask for the location of plots eligible for the conservation program.

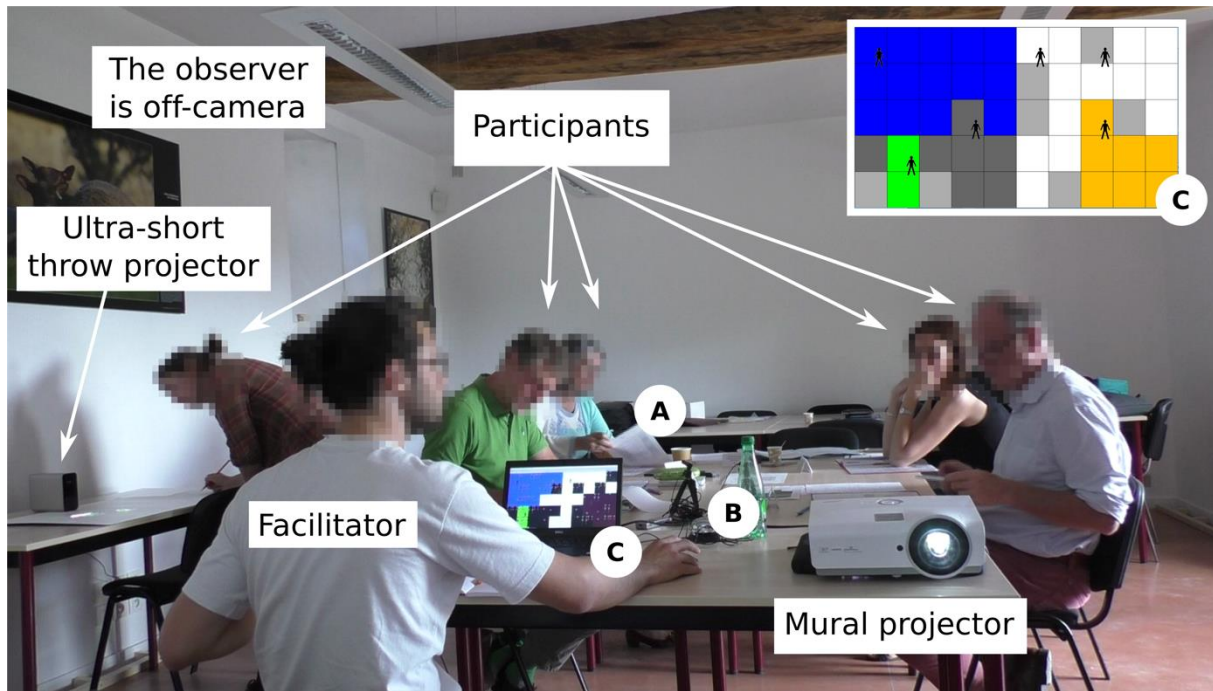


Figure 24. Set-up of a participatory simulation of Foster Forest.

A: The participant reads the explanatory booklet. B: Sound recording system (the photograph was taken from the video recording system). C: Background map of the simulation with colored properties. This main map is duplicated by a vertical projection onto the wall.

As soon as they decide on their forest operations, the participants go to the facilitator who implements their decisions on the computer.

Participants first specify their preferred contract for hunting leases, geared toward either hunting (a lower hunting intensity entails a higher presence of game with a higher grazing rate but also a higher lease payment) or timber production (lower lease payment, but increased hunting and therefore lower grazing intensity affecting planted and natural seedlings) (Appendix B).

Participants then give instructions for the forest operations to take place on every plot of the estate that they possess or manage: voluntary or paid participation in the fake “PFSC” certification system – an *ad hoc* mixture of the Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC) and the Forest Stewardship Council (FSC) –, number of trees harvested (detailed by species and diameters), slash removal, and plantation if needed. The foresters’ budgets are directly modified according to the implemented silvicultural actions in order to reflect the costs (workforce wages, nursery seedlings, skidding, taxes, etc.) and benefits (timber revenues) of the forestry operations. Ecological indicators also evolve in relation to the participants’ silvicultural choices: the soil fertility decreases in the case of slash removal, clearcutting of an entire plot, or softwood planting, but it increases when nothing happens (Appendix C). Slash removal also lessens the belowground carbon

stock (Appendix C). Water quality, measured at the whole forest scale, depends on the mean soil fertility, the proportion of coniferous species, and the number of clearcut plots (Appendix C).

In a last step, participants state their potential interest in selling or buying forest plots or in engaging in the old-growth conservation program. Land transactions occur at the end of the round, once all participants have computerized their decisions. The conservation program targets the protection of old-growth trees and is operated by the protected area manager. Conservation contracts last for 30 years, and during this time, contractors engage not to cut the oldest trees. In compensation, they benefit from a payment proportional to the financial shortfall.

3.3. Testing the calibration and scenarios

It was extremely complex to configure the calibration, scenarios, and rules to obtain a participatory simulation that was plausible, playable, and open to the spontaneous and novel ideas of participants. Therefore, the parameters and scenarios used in *Foster Forest* were tested during two preliminary sessions held with students and researchers in February and March 2019 (prior to the nine study cases). The two test sessions brought about three major changes.

First, they highlighted the importance of an exhaustive introductory brief to justify the simplifications made to the conceptual model. For instance, the facilitator subsequently qualified that land prices would not evolve and that the mayor's role would not be affected by municipal elections that would "occur" during a simulation.

Second, the test sessions emphasized the usefulness of pre-coded functions in the ABM, which were not communicated to participants. As one of the objectives of *Foster Forest* is to encourage foresters to suggest organizational or economic changes in their forest management, it helped the facilitator to have pre-coded, ready-to-use processes at his disposal to implement the players' ideas. They were only revealed if the foresters explicitly asked for them so as not to impede any spontaneous innovations that they could generate. Such functions included the calculation of carbon flows in every participant's property or the possibility for protected area managers to create a subsidy system to reward forestry practices that they considered sustainable.

Third, feedback also contributed to improving the graphical display of the available information sources as well as the spatial and temporal configurations of the simulations.

4. Foster Forest, a participatory simulation with a role-playing game

4.1. Temporal organization of the participatory simulations

The participatory simulation follows five steps: (1) a pre-simulation questionnaire; (2) a briefing; (3) different rounds of the simulation; (4) a post-simulation questionnaire; and (5) a collective debriefing.

The pre-simulation questionnaire aims to gauge the participant's sensitivity to climate change (e.g., if they had already experienced a climate catastrophe) and the multiple issues affecting forest management (e.g., the most important forest ES addressed). The questionnaire also includes a "participation contract," which details the context of the study and its funding (public research, with no declared conflict of interest). By signing the contract, the foresters acknowledge that their participation is not binding. They give their authorization to the authors to use their image and voice for the purpose of the research project.

During the introductory brief, the facilitator presents the different roles and their objectives, the information sources (booklets, mural and horizontal projections, and economic and climatic information posted on a wall), the list of possible actions, and the implementation process in the computer.

The simulation only begins after these two initial steps are completed. It consists of three to five similar steps, each corresponding to a 10-year period (step 1: 2020-2029, step 2: 2030-2039, etc.). Each step starts with announcements concerning decadal projections for climate change as well as timber and carbon prices. The players can then freely talk with each other and approach the facilitator at any time to implement their decisions of forest management, with no predefined order for taking turns. A ringtone announces the end of the action period and the launch of the computerized updating of the spatial, social, and physical entities. At this point, the facilitator provides a collective overview of the forest, property, and stand parameters (see Figure 22), and communicates the climate record of the last decade. The end of a step is also the appropriate moment for participants to ask for the organization of a meeting on any issue of importance to them – for instance, a meeting was once requested by a mayor to elaborate a collective strategy to reinforce the social acceptability of tree removal. Overall, each step lasts 20 to 40 min, except for the first one (1 h) to account for the learning phase.

The post-simulation questionnaire aims to compare the strategies adopted during the game with the real-world choices operated by the foresters. It also asks participants what they learnt from the workshop and includes time for the suggestion of improvements.

Finally, at least one hour is dedicated to a collective debriefing. Debriefing is crucial, because it allows participants to provide feedback on the conceptual model and its implementation, which enables its validation and further improvements (Guyot & Honiden 2006). The first part of the debriefing is inspired by the “most significant change” method (Perez et al. 2010): participants are successively encouraged to express one or two changes considered to be of particular importance to the simulation. This is experienced as a sort of emotional relief for the speaker, while it reminds other players what happened and provides insights into the speaker’s forest priorities for subsequent analysis. It is also useful for the facilitator during the second part of the debriefing, which involves a roundtable discussion focusing on three topics. First, we ask participants how they tried to reach their objectives and what obstacles they encountered. Second, we return to the thought-provoking elements of the discussions or the spontaneous collective behavior relating to the issue of climate change adaptation. Third, we steer the discussion toward participants’ reactions to the strong climate scenario, which often ended in a general discussion on the limitations and merits of participatory simulations.

4.2. Spatial organization of the participatory simulations

Seat distribution is consistent throughout the simulations in order to facilitate the later video comparison of strategies designed by different participants with the same role. The spatial configuration of seats also mimics real-world patterns of interactions between participants. For instance, it is legally embedded that the National Forests Office must provide technical assistance to elected officials of municipalities that own communal forests; hence, the public forester and the mayor are always placed next to each other.

Once seated, all participants can see the vertical projection of the main map. They must move to see the horizontal screen, most often placed on a smaller support isolated from the central table, while the economic prices are pinned on a wall. This enables us to refine our observations regarding the information searched by the participants (who they are, when they need the information, etc.). Participants can also move throughout the simulation space to communicate with each other or with the facilitator. The computer on which the facilitator inputs the players’ decisions is located on one side of the room. The observer does not interact with the participants.

To allow for the later analysis of the workshops, every simulation is recorded using a video camera and two voice recorders placed on the main table.

5. Preliminary results from the nine study cases

5.1. Study cases analysis

5.1.1. Presentation of the study cases

Nine workshops, conducted following the methods described in section 3, occurred between May and July 2019. In chronological order, the simulations took place in the NPR of the “Vosges du Nord,” in Rouen (Normandy, two sessions), in the NPR of the “Pyrénées Ariégeoises” (two sessions), in the NPR of the “Perche,” in the NPR of the “Boucles de Seine Normande,” in Louviers (Normandy), and in the NPR of the “Volcans d’Auvergne.” The same facilitator-observer duo was present for the nine study cases.

Natural regional parks and the regional community forest federation of Normandy were essential intermediaries to recruit players and host the simulations. Workshops were programmed to last four hours in order to facilitate the recruitment of participants who often have busy schedules. Organizers’ knowledge of local foresters and their involvement in the organization of the simulations greatly increased the legitimacy of the research team in the eyes of participants. Their interest in the tool was motivated by its potential use as a support for collective decision-making or awareness-raising on climate change; this was yet another demonstration of the joint use of ComMod approaches for research, training, or negotiation purposes (Barreteau et al. 2003).

5.1.2. Methodological approach

The analysis was based on the observer’s notes, the questionnaires, and the audio and video content collected during the workshops. Any moments of interest (e.g., discussions, negotiations) identified in the simulations were transcribed, as were all the debriefing sessions. Audio tracks and written transcriptions were analyzed using Sonal, an encoder software that conducts audio-textual synchronization (Alber 2010). Sonal allows for thematic and statistic discourse studies such as topic occurrences and co-occurrences (e.g., “climate change” and/or “timber production”). For our analysis, we coded the informative segments of each participatory simulation with thematic tags. These tags related to the components of the conceptual framework (ES providers and beneficiaries, ecosystem features, ES, as detailed in Figure 21), climate change features, and *Foster Forest* as a participatory simulation (Table 4).

Table 4. Analytical focus of the participatory simulations.

The list is not exhaustive.

Analytical focus	Categories	Examples
Conceptual model	Provider of ecosystem services	National Forests Office Municipality owning communal forests Managers of natural protected areas Forest landholders
	Beneficiaries of ecosystem services	Same as the providers Local populations
	Ecosystem services	Timber production Water epuration Hunting Hiking, bike riding, etc. Carbon storage
	Interaction between ES stakeholders	Intermediary bodies (natural regional parks, etc.) Contractualization, public policies, collective action
	Forest management approach, <i>sensu</i> Duncker et al. (2012)	Free evolution Low to intense interventions Short term/long term
Adaptive change in forest management	Adaptation implementation	Effectiveness of the adaptation Cause of adaptation (incremental changes, climate projections, etc.)
Participatory simulation	Structuration and biases of the model	Climate forcing Hidden functions encoded in the ABM Individual/collective gaming
	Suggested improvements	Ergonomics Model reductionism Calibration

5.2. Lessons learned from the study cases

5.2.1. Climate change adaptation: Technical, timber-focused, and of secondary importance

Despite a strong emphasis placed on the impacts of climate change through announcements of decadal climate projections, participants' two primary matters of concern were the balance between forest regeneration and game animals, and the local population's perception of forest

operations. This feeling of social pressure was consistent throughout the study cases but was most prominent in the “Volcans d’Auvergne” NPR, a very touristic region listed as World Heritage (UNESCO 2019). The issue was such that players in the “Boucles de Seine Normande” simulation spontaneously called a meeting to create an awareness program, which the facilitator then directly encoded into the program by decreasing inhabitants’ satisfaction threshold.

In comparison to these two issues, participants’ verbal reactions to climate change were lower than expected, and overall, they focused on the low rate of natural regeneration. We assume that this originates from the climate scenario, centered on incremental changes (less prone to trigger reactions) and not on strong climate events – by contrast, participants spoke at length about the disease outbreaks and windthrows that they had experienced, but this was not reflected in the simulations. Nevertheless, in all the participatory simulations, adaptive changes were notable in participants’ forest management decisions. In coherence with the findings outlined in the introduction, these changes concentrated on species replacement and stand density in order to maintain timber production. The essence of this belief in the potency of technical developments is epitomized as the search for “the right tree at the right place, even in future conditions,” as repeated in seven different workshops. Its best illustration is the search for a turnkey solution: private foresters turn to public foresters to ask for “ready-to-plant” species; public foresters turned to foreign experiences for feedback or to the facilitator to “call the national scientific research center” in order to find drought-resistant tree species; and the facilitator aims to foster non-technical adaptations to climate change.

The search for adapted species was frequently shared by both public and private foresters, but some foresters considered that achieving such outcomes would take decades and that monospecific stands would not be resilient to parasite outbreaks. Hence, they favored risk-dilution through species mixtures. Even though this adaptation strategy was tailored to the stand scale, it was tree-centered, as virtually no forester spoke of forest fauna, flora, or fungi – the only mention of soil fungi was made by a naturalist who was not trained in forestry.

5.2.2. Socio-economic changes in the provision of ecosystem services

While the abovementioned adaptations were common to all workshops, innovative approaches to the conceptual framework of *Foster Forest* emanated from the study areas of Rouen, the “Pyrénées Ariégeoises,” and the “Perche.” The changes stemmed from the observation that foresters’ revenue sources mainly derive from two ES, namely timber production and hunting, which are both threatened by climate change. Indeed, the climatic scenarios introduced considerable uncertainty in terms of the ability of these ES to balance foresters’ budgets. In response, participants developed

a system of payment for ecosystem services (PES) to attain financial equilibrium through other ES (in all three study areas, this related to carbon storage). As explained by the “Perche” private forest advisor, “I relied on [carbon] contracts to diversify my income and try not to be too dependent on timber prices.”

Interestingly, PES were chiefly instigated by participants who were protected area managers but not professional foresters in real life. Based on the debriefings and their questionnaire responses, we may argue that they were inspired by PES pilot projects conducted in French regions, a knowledge that they obtained from forestry newsletters and professional meetings. Collective negotiations addressed three of the four potential flaws of carbon contracts (i.e., heterogeneity of stand conditions, uncertainty of storage due to stochastic weather conditions, additionality of the project, but not permanence of carbon storage) (Gren & Aklilu 2016). Heterogeneity and uncertainty were addressed by designing financial incentives with an obligation of means but not of outcomes – most often, remuneration for species mixtures and irregular shelterwood forest management. As a consequence, permanence was not considered in the contracts, because the financial compensation related to the duration of the change in forest management and not to the duration of carbon storage. Additionality was evaluated on a case-by-case basis through discussions between protected area managers who oversaw payments for carbon storage and candidates for the contracts.

In the three workshops, the design of the payment for carbon storage allowed us to clearly distinguish between ES providers. Some private foresters adopted an economic approach by switching from being an ES provider to an ES beneficiary: “The day that I’m paid 50€ per hectare annually, I will plant beeches, hazel trees, and even banana trees if you want me to!” Alternatively, the rest of the private foresters relied on carbon contracts as transitional funding to adapt their forest stands to climate change, for instance, by planting drought-resistant species. Mayors and public managers regretted that carbon contracts primarily targeted private landholders, a choice that the protected area managers justified by the importance of private forests (they represent 75% of forest surfaces in France and also in the model). Mayors and public managers stated their preference for the large-scale collective planning of forest management. Regarding spatial scales, they suggested the common management of hunting or water quality. Regarding temporal scales, protected area managers relied on carbon contracts as a stepping stone to make forest stands eligible for a conservation program aiming to establish a network of old-growth trees. During the debriefings, two protected area managers insisted on the long-term effect of carbon or conservation contracts. In their eyes, even an unsuccessful contract negotiation provides an opportunity, because it raises owners’ awareness about conservation issues.

Spontaneous rule changes aiming to adapt to the scenario's uncertainties mostly related to PSE. Non-economic narratives exist to provide complementary adaptive tools (Röling & Maarleveld 1999), but they did not lead to any evolution in the roles of ES providers and beneficiaries, or their interactions. A first lever of change that was discussed was raising awareness about climate change, as acknowledged by private foresters: "The ideal thing is to apply [the clauses of the contract] but without a contract." Legal tools were another lever of change. The recent possibility for any private landowner to engage in conservation easements (Légifrance 2016) was briefly discussed but only on one occasion.

5.2.3. Participants' feedback on Foster Forest

Feedback was gathered from the debriefing sessions and the post-simulation questionnaires. Overall, participants appreciated the workshops and validated the conceptual model. Despite lengthy debates on soil, growth, and the calibration of climate parameters, they found the reductionist level to be appropriate: "It's not just a game with fancy hypotheses, it's quite realistic and corresponds to reality." They enjoyed the hidden functions and the facilitator's ability to dig into the source code when required.

They also proved that strategical choices are not predetermined. Despite playing with the same tool (conservation program), protected area managers adopted different strategies in the study cases. Some initially negotiated conservation contracts with private owners, because they considered that they would be more responsive to the economic argument, while others engaged in discussions with public foresters, as they managed larger forests. We observed a third strategy, with managers applying the conservation program to themselves in order to receive financial income. The revenues were subsequently reinjected into the acquisition of forest plots for new conservation programs.

Most of the improvement requests related to the implementation of the ABM and RPG. Some of the biases voluntarily introduced into the simulations were relevant (e.g., spatial configuration of participants' seats). However, participants found that other biases interfered with the simulations such as the high amount of technical information in the introductory booklets, which aimed at reproducing the asymmetrical understanding of forest functioning, since professional foresters, unlike mayors and some private owners, are used to dealing with a lot of technical information. But one mayor summed up the situation: "We're not technicians!" By contrast, this technical bias highlighted the importance of sensory perception for forest management. A forest manager stated that graphical projections were "very mathematical, with colors and figures. [I was] very disturbed at the beginning, [as I] don't see forests in this way." Similarly, participants partially explained their

lack of reaction to climate announcements by the absence of pictures or drawings exemplifying abrupt climate change, a deliberate choice made in order to focus on slow-pace climate change.

The sessions demonstrated the importance of collective discussions to open up perspectives on the incorporation of climate change in forest management. “We need everybody to face this challenge,” said a Pyrenean landowner, a conclusion that is consistent with similar findings on environmental issues (e.g., Redpath et al., 2018). Most importantly, the simulations emphasized the prominent role accorded to the intermediaries in designing and promoting collective adaptation to climate change. In *Foster Forest*, the rearrangement of the relationships between ES providers and beneficiaries was always guided by protected area managers and mayors. From a reflective point of view, the organization of collective workshops in the “real world” has also been endorsed by federations of community forests and natural regional parks, as detailed in Bertrand and Fouquerey (2017).

6. Conclusion

In *Foster Forest*, forest stakeholders interact with each other in participatory simulations combining an RPG and an ABM in order to achieve multifunctional objectives of forest management. To overcome the adverse effects of a highly uncertain climatic and economic scenario, they can rely on a fixed set of technical tools with limited effectiveness and/or develop collective forms of socio-economic action based on their discussions.

A major difficulty in the design process was to find an appropriate balance between the reductionism of the conceptual model and its implementation in the ABM and RPG so as to allow players to act on any ES that they would find of interest. As shown by the spontaneous development of game changes in the four workshops, this balance was achieved. Being able to experimentally test changes in forest management, with no real risk of financial or temporal loss, is one of the most appreciated features of *Foster Forest* and ComMod approaches in general (Étienne 2010). Yet this type of simulation could benefit from improved graphical displays and an enhanced presentation with (less) information.

Several questions still deserve further investigation, especially in terms of the role of participation-based learning. Because of the uncertain nature of climate change, learning by trial and error is not feasible. Participatory simulations can compensate the impossibility of learning by doing by means of learning by simulating (Barreteau et al. 2001). We now aim to monitor whether *Foster Forest*'s participants developed other kinds of learning after contributing to such a serious game (i.e., normative, relational, or cognitive learning, as reported in den Haan and van der Voort,

2018). While it is not possible to assume that simulation-based learning will have tangible effects on participants' forest management (Mermet 1992), it is nevertheless worth investigating. Furthermore, organizers from the federations of community forests and some natural regional parks already stated that they gained experience in the use of participatory simulations. Their willingness to collaboratively develop a simpler version of *Foster Forest* would enlarge their toolbox for adaptation and foster collective responses to the effects of climate change on forest management.

Acknowledgements: The authors are specifically grateful to Émile Huguet for his calibration assistance; to Bruno Bonté for sharing his knowledge on the forest growth model; to Pierre Bommel for his advice in using CORMAS; to the members of the French National Federation of Forest Communities (FNCOFOR), France Nature Environnement, and French Union of Forest Cooperatives for discussing the modeling choices; to Véronique Souchère, Géraldine Abbrami, Mélaïne Aucante, Sarah Loudin, and Ambroise de Montbel for their constructive criticism of the conceptual model; and to all the participants of the test sessions. The authors especially thank Laure Ferrier, Éric Hincelin, Élodie Roulier, Luc Bélenguier, Jean-Claude Génot, Caroline Salomon, Thierry Mougey, and Pierre Paccard who made the regional workshops possible and the many participants of the game sessions without whom nothing would have been possible. Author contributions: T.F. designed the research and coded the model; T.F. and J.L. performed the research; T.F. and J.L. analyzed the data; T.F. wrote the paper; and M.T. and N.F.-L. made additional contributions and edited the manuscript.

Funding source: This work was supported by a grant overseen by the French National Research Agency (ANR) as part of the “Investments d’Avenir” Program (LabEx BASC; ANR-11-LABX-0034). The funding source had no involvement in any of the research.

Declarations of interest: none.

Appendix A: ODD+D description of *Foster Forest* participatory simulations.

The “Overview, Design Concepts, and Details” (ODD+D) template was proposed as a standard protocol to describe and compare agent-based models that include human decision-making (Müller et al. 2013). Table 5 is directly taken from the supplementary data of Müller et al. (2013).

Table 5. ODD+D description of *Foster Forest* participatory simulations.

Italic font denotes the text related to *Foster Forest* that was added to the original template.

Outline (→ template)		Guiding questions	Examples	Foster Forest ODD+D Model description
D)	I.i Purpose	I.i.a What is the purpose of the study?	Research question incl. test of hypothesis, system understanding, theory development, quantitative predictions, management or decision support, communication and learning (participatory modeling)	<i>In forestry, adaptation to climate change mostly focuses on timber production and technical changes. What complementary adaptations can emerge from situations in which forest stakeholders are collectively confronted with the limitations of technical adaptations in a very pessimistic climate change scenario?</i>
		I.i.b For whom is the model designed?	Scientists, students/teachers, decision makers, stakeholders	<i>Scientists, but it can also be used for educational or awareness-raising purposes by others.</i>
	I.ii Entities, state variables, and scales	I.ii.a What kinds of entities are in the model?	Agents / individuals (humans, institutions): types and subtypes, spatial units (grid cells), environment, collectives (groups of agents)	<i>Agents > five forest managers (one public forester from the French National Forests Office; one elected official of a municipality owning communal forests; two private landholders; one protected area manager. Spatial units > 5-ha forest plots, grouped in properties. Environment > trees are located on plots.</i>
		I.ii.b By what attributes (i.e. state variables and parameters) are these entities characterized?	<u>Of Agents</u> : identity number, age, sex, maximum age, memory, location, level of resources, ownership of land, (political) opinion, occupation, decision model (only mention the name of the strategy, which is explained later on), one agent represents one individual / one household / one farm / all individuals of one specific type, <u>of spatial units</u> : location, a list of agents in a cell, land owned by farmer, descriptor of environmental conditions (elevation, vegetation cover, soil type), current land use <u>of collectives</u> : list of agents, specific actions Units of measurement	<i>Cf. Figure 22 in the main text.</i>
		I.ii.c What are the exogenous factors / drivers of the model?	Disease, climate, lake water level, land cover change, tectonic disturbances, invasive species, legislation	<i>Climate change, economic variations of the timber market.</i>

Chapitre 4

		I.ii.d If applicable, how is space included in the model?	Not included, spatial implicit, spatial explicit, georeferenced (GIS)	<i>Spatial explicit, or “stylized” sensu (Le Page & Perrotton 2017).</i>	
		I.ii.e What are the temporal and spatial resolutions and extents of the model?	One timestep represents one year and the simulations were run for 100 years, one grid cell represents 1 ha and the model landscape comprises 1000 x 1000 ha	<i>One timestep represents 10 years, and the simulations were run for three to four timesteps. One grid cell represents 5 ha, and the model landscape comprises 5 x 10 cells (250 ha).</i>	
		I.iii Process overview and scheduling	I.iii.a What entity does what, and in what order?	Self-explanatory names of the model’s processes, including decision making processes, pseudo-code of the schedule, synchronous / asynchronous update	<p><i>For each timestep:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) <i>Foresters harvest and/ or plant trees on each of their plots. They choose the hunting pressure to apply to their property.</i> 2) <i>Once all five foresters have managed their properties, the protected area manager indicates the newly registered plots under a conservation program.</i> 3) <i>Land transactions can occur at the demand of participants.</i> 4) <i>Computerizing the impacts of climate change.</i> 5) <i>Calculating forest growth.</i> 6) <i>Updating soil fertility.</i> 7) <i>Updating carbon storage.</i> 8) <i>Computerizing the impacts of game grazing.</i> 9) <i>Updating agents’ budgets.</i> 10) <i>Updating global parameters (standing volume, water quality, inhabitants’ satisfaction level).</i>
			II.i.a Which general concepts, theories or hypotheses are underlying the model’s design at the system level or at the level(s) of the submodel(s) (apart from the decision model)? What is the link to complexity and the purpose of the model?		<p><i>Companion modelling, adaptive management, ecosystem-based adaptation, social-ecological thinking.</i></p> <p><i>A forest growth model simulates the dynamics of 1-ha uneven-aged forest stands containing five different tree species of four diameters.</i></p>
II) Design Concepts	II.i Theoretical and Empirical Background	II.i.b On what assumptions is/are the agents’ decision model(s) based?	<p><u>Established theories</u> (micro-economic models: homo oeconomicus, full / bounded rationality; cognitive models: social psychology, mental models; space-theory based models)</p> <p><u>real-world observations</u> (mechanistic explanations / process-based understanding available; black-box, use of heuristics, statistical regression methods)</p> <p><u>ad-hoc rules</u> (dummy rules, e.g. constancy assumption)</p> <p><u>combinations</u> of theory and observations</p>	<p><i>Agents’ decisions are all taken by the human participants. Agents are bounded rational, use a form of inductive reasoning, and rely on heuristics (Crozier & Friedberg 1977).</i></p>	
		II.i.c Why is a/are certain decision model(s) chosen?	Data (non-) availability, pattern-oriented modeling, reference to other studies, theoretical considerations	<i>Lack of available data on how adaptations occur in the field.</i>	
		II.i.d If the model / a submodel (e.g. the decision model) is based on empirical	Participatory approaches (role playing games), household surveys, interviews, direct observations, statistical census, archives, GIS, field or lab experiments	<i>Data derive from previous field work (Fouqueray, Charpentier, et al. 2019). Other data sources are described in Appendices A and B.</i>	

Chapitre 4

		data, where does the data come from?		
		II.i.e At which level of aggregation were the data available?	Household / individual level, group level	<i>Individual level (informed by the participant in a pre-simulation questionnaire).</i>
II.ii Individual Decision Making	II.ii.a	What are the subjects and objects of decision-making? On which level of aggregation is decision-making modeled? Are multiple levels of decision making included?	Name subjects (individuals agents / households, on communal level, top down decision maker) and objects of decisions, e.g.: Form of land use, distribution of labor, choices of buying and selling	<i>Foresters individually decide on tree removal and planting on each of their plots. They decide on the possible sale of a plot, and if they engage in a conservation program applicable to any eligible plots.</i>
	II.ii.b	What is the basic rationality behind agents' decision-making in the model? Do agents pursue an explicit objective or have other success criteria?	Rational choice (classical optimization approach, utility maximization), bounded rationality (satisficing approach), no objectives (routine based, trial and error)	<i>Agents pursue personal objectives fixed in the game and presented during the introductory brief.</i>
	II.ii.c	How do agents make their decisions?	Decision tree, utility function, random choice	<i>They compare their ecological, social, and economic indicators step-by-step. They compare their current situation with past decisions as well as their neighbors' strategy.</i>
	II.ii.d	Do the agents adapt their behavior to changing endogenous and exogenous state variables? And if yes, how?	Adaption of resource extraction level in dependence of ecological state of resource	<i>Yes. They use basic detailed budget information provided by the ABM, or a basic heuristic to decide if they continue with their current forestry operations.</i>
	II.ii.e	Do social norms or cultural values play a role in the decision-making process?	Cultural norms, trust	<i>Yes. Private foresters most often describe their forests as a legacy transmitted by their elders and to be transmitted to future generations.</i>
	II.ii.f	Do spatial aspects play a role in the decision process?	Space-theory based models	<i>Yes. Private foresters tend to group their plots through land transactions.</i>
	II.ii.g	Do temporal aspects play a role in the decision process?	Discounting, memory	<i>Yes. Agents have a memory of past climate catastrophes.</i>
	II.ii.h	To which extent and how is uncertainty included in the agents' decision rules?	Not at all / stochastic elements mimic uncertainties in agents' behavior / agents explicitly consider uncertain situations or risk	<i>Uncertainty of future climate conditions is accounted for by favoring drought-resistant species.</i>
	II.iii Learning	II.iii.a	Is individual learning included in the decision process? How do individuals change their decision rules over time as consequence of their experience?	Change of aspiration levels depending on past experiences
II.iii.b		Is collective learning implemented in the model?	Evolution, genetic algorithms	No.
II.iv Individual Sensing	II.iv.a	What endogenous and exogenous state variables are individuals assumed to sense and consider in their decisions? Is the sensing process erroneous?		<i>Decadal projections of climate conditions and timber prices.</i>

Chapitre 4

	II.iv.b	What state variables of which other individuals can an individual perceive? Is the sensing process erroneous?	(Multiple) resources (including working power, monetary resources, other income resources) and behavior of other agents	<i>Behavior of other agents is visible.</i>
	II.iv.c	What is the spatial scale of sensing?	Local, network, global (whole model space)	<i>Local (properties).</i>
	II.iv.d	Are the mechanisms by which agents obtain information modeled explicitly, or are individuals simply assumed to know these variables?	Sensing is often assumed to be local, but can happen through networks or can even be assumed to be global.	<i>All mechanisms are described in the participant's role booklet.</i>
	II.iv.e	Are costs for cognition and costs for gathering information included in the model?		<i>No.</i>
II.v Individual Prediction	II.v.a	Which data uses the agent to predict future conditions?	Extrapolation from experience, from spatial observations	<i>Data on decadal climatic and economic conditions.</i>
	II.v.b	What internal models are agents assumed to use to estimate future conditions or consequences of their decisions?		<i>/</i>
	II.v.c	Might agents be erroneous in the prediction process, and how is it implemented?	(External) uncertainty, (internal) capability of the agent	<i>External uncertainty.</i>
II.vi Interaction	II.vi.a	Are interactions among agents and entities assumed as direct or indirect?	Direct interactions, indirect interactions (mediated by the environment / the market, auction)	<i>Indirect interactions (e.g., movement of game, water quality, landscape esthetic value).</i>
	II.vi.b	On what do the interactions depend?	Spatial distances (neighborhood), networks, type of agent	<i>Networks.</i>
	II.vi.c	If the interactions involve communication, how are such communications represented?	Explicit messages (Matthews et al., 2007)	<i>/</i>
	II.vi.d	If a coordination network exists, how does it affect the agent behaviour? Is the structure of the network imposed or emergent?	Centralized vs. decentralized, group based tasks	<i>No initial coordination network exists, but it can be created on the demand of participants</i>
II.vii Collectives	II.vii.a	Do the individuals form or belong to aggregations that affect, and are affected by, the individuals? Are these aggregations imposed by the modeller or do they emerge during the simulation?	Social groups, human networks and organizations	<i>No.</i>
	II.vii.b	How are collectives represented?	Collective as emergent property vs. as a definition by the modeler (separate kind of entity with its own state variables and traits)	<i>/</i>
II.viii Heterogeneity	II.viii.a	Are the agents heterogeneous? If yes, which state variables and/or processes differ between the agents?	Would an exchange of one agent with another at the beginning have an effect on the simulation?	<i>Yes. Property size (number of plots), objectives, possibility to lease hunting rights, possibility to sell private plots (impossible for plots located in state, communal, or protected areas)</i>

		II.viii.b Are the agents heterogeneous in their decision-making? If yes, which decision models or decision objects differ between the agents?		No.
	II.ix Stochasticity	II.ix.a What processes (including initialization) are modeled by assuming they are random or partly random?		<i>The evolution of soil quality and belowground carbon storage are partly randomized. Initial distribution of tree volumes is partly random.</i>
	II.x Observation	II.x.a What data are collected from the ABM for testing, understanding, and analyzing it, and how and when are they collected?		None.
		II.x.b What key results, outputs or characteristics of the model are emerging from the individuals? (Emergence)		<i>A pattern of monospecific or species-mixed forest plots emerge depending on the economic and climatic risk-aversion of the agents.</i>
III) Details	II.i Implementation Details	III.i.a How has the model been implemented?	Computer system, programming language / simulation platform, simulation runtime, development time	<i>In CORMAS, with SmallTalk language. See also the main text.</i>
		III.i.b Is the model accessible and if so where?	Homepage? (link)	<i>Please contact the author</i>
	III.ii Initialization	III.ii.a What is the initial state of the model world, i.e. at time $t=0$ of a simulation run?	Types and numbers of entities including the agents themselves, values / random distribution of their state variables	<i>Five foresters with the same initial budget but unequal forest properties.</i>
		III.ii.b Is initialization always the same, or is it allowed to vary among simulations?		Yes.
		III.ii.c Are the initial values chosen arbitrarily or based on data?	References to data if any, stakeholder choice	<i>Based on data. See Appendices A and B.</i>
	III.iii Input Data	III.iii.a Does the model use input from external sources such as data files or other models to represent processes that change over time?	Observed time series e.g. annual rainfall, time series generated by other models, <u>not</u> : parameter values, initial values of state variables	<i>Yes. See Appendices A and B.</i>
III.iv Submodels	III.iv.a What, in detail, are the submodels that represent the processes listed in 'Process overview and scheduling'?	Equations, algorithms, additional information	<i>For the forest growth model, see Appendix A. For social, ecological, and economic processes, see Appendix B.</i>	
	III.iv.b What are the model parameters, their dimensions and reference values?	Tables of parameters	<i>See Appendices A and B.</i>	
	III.iv.c How were submodels designed or chosen, and how were they parameterized and then tested?	Justifications, references to literature, independent implementation, testing, calibration, analysis of submodels	<i>See Appendices A and B.</i>	

Appendix B: Foster Forest's forest growth model

1. A simplified forest growth model

Here, we consider a simple aggregated model of forest dynamics inspired by the articles of Kohyama and Takada (2009, 2012) and Mathias et al. (2015). Forest dynamics are modeled at a 1-ha scale, and tree competition for light is based on perfectly one-sided competition. The forest is made of four strata (x_1, x_2, x_3, x_4) composed of trees of the same diameters at breast height (DBH) (respectively, 7.5 cm, 25 cm, 45 cm, and 60 cm; hence x_1 is the lowest stratum and x_4 the highest). Contrarily to Mathias et al. (2015), in our model, trees can be harvested in any of the four strata.

The dynamics of species i is expressed in number of trees x_i in each stratum:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_{4,i}}{dt} = h_{3,i}x_{3,i} \left(1 - u_i \sum_{i=a}^e g_{4,i}x_{4,i} \right) - x_{4,i}d \\ \frac{dx_{3,i}}{dt} = h_{2,i}x_{2,i} \left(1 - u_i \sum_{k=3}^4 \sum_{i=a}^e g_{k,i}x_{k,i} \right) - h_{3,i}x_{3,i} \left(1 - u_i \sum_{i=a}^e g_{4,i}x_{4,i} \right) - x_{3,i} \left(d + z_i \sum_{i=a}^e g_{4,i}x_{3,i} \right) \\ \frac{dx_{2,i}}{dt} = h_{1,i}x_{1,i} \left(1 - u_i \sum_{k=2}^4 \sum_{i=a}^e g_{k,i}x_{k,i} \right) - h_{2,i}x_{2,i} \left(1 - u_i \sum_{k=3}^4 \sum_{i=a}^e g_{k,i}x_{k,i} \right) - x_{2,i} \left(d + z_i \sum_{k=3}^4 \sum_{i=a}^e g_{k,i}x_{k,i} \right) \\ \frac{dx_{1,i}}{dt} = b_i(g_{3,i}x_{3,i} + g_{4,i}x_{4,i}) \left(1 - s_i \sum_{k=2}^4 \sum_{i=a}^e g_{k,i}x_{k,i} \right) - h_{1,i}x_{1,i} \left(1 - u_i \sum_{k=2}^4 \sum_{i=a}^e g_{k,i}x_{k,i} \right) - x_{1,i} \left(d + z_i \sum_{k=2}^4 \sum_{i=a}^e g_{k,i}x_{k,i} \right) \end{array} \right.$$

(Eq. B.1)

where

- i is one of the five species of interest (a : *Quercus robur*, b : *Quercus petraea*, c : *Fagus sylvatica*, d : *Pinus Sylvestris*, and e : *Pseudotsuga menziesii*);
- k is the mean DBH of each stratum;
- $g_{k,i}$ is the basal area of a tree of diameter k and species i ;
- $h_{k,i}$ is the temporal rate at which a tree of stratum k switches to stratum $k+1$; it is reduced by asymmetric competition with higher strata expressed by parameter u (ha.m⁻²);
- d_i is the parameter related to species intrinsic mortality (t⁻¹); mortality is increased by asymmetric competition modeled by parameter z_i (t⁻¹.ha.m⁻²)

- b_i is the intrinsic recruitment rate (expressed in the number of individuals.m⁻².ha.t⁻¹); recruitment only occurs if there are trees of strata 3 and/or 4 on the stand; recruitment is sensitive to light interception by higher strata, as modeled by s_i (ha.m⁻²).

2. Effects of participants' actions on forest growth and other indicators

The growth model described by Eq. B.1. does not account for all the ecological or technical processes included in the simulation. For instance, it does not take tree removal into account or the detrimental effects of grazing by wild animals on the recruitment rate in stratum 1. These effects were additionally fixed by the authors so as to obtain analogous results in terms of what is actually depicted in the field or described in gray literature.

Harvesting. During a round, the participants can harvest trees from the different categories of diameters and species of each plot. The number of trees was then retrieved from the plot. For instance, if the participant harvested 50 sessile oaks of diameter 3 on plot 42, the number of sessile oaks $x_{4, b}$ of that plot decreased by 50 before implementing a new run of the ABM.

Hunting. Hunting modifies the intensity of grazing by boars or deer. A high, medium, or low grazing rate induced the death of 30%, 10%, and 0% of trees of stratum 1, respectively. This outcome is calibrated by forestry reports and newspapers (FIBOIS Alsace 2014; Odermatt 2015; Saint-Andrieux 1994) and from previous interviews conducted with foresters in the “Grand Est” and “Nouvelle-Aquitaine” regions (Fouqueray, Charpentier, et al. 2019). Death processes are operated before performing a new run of the ABM.

Soil fertility. The growth model does not account for growth variation linked to the fertility of the soil (Eq. B.1.). Soil fertility is only accounted for during the initialization and update of the water quality indicator. In the ABM, the initial volume of trees located on medium fertility stands is the same for each category of diameter and species (e.g., every sessile oak of diameter 2 has the same volume). In low fertility stands, this initial volume was modified by a factor randomly chosen from 0.9 to 1, and high fertility stands from 1 to 1.1.

3. Including the effects of climate change

After each step, the growth, recruitment, and death parameters were modified according to a very strong climate change scenario that was predetermined. The scenario did not relate to the existing forest scenarios for French regions but was created *ad hoc* for the needs of *Foster Forest*. In the climate scenario, the impacts of climate change are species-specific and especially account for the different sensitivities of tree species to

Chapitre 4

drought. Species were ranked from the most sensitive species (beech, *Fagus sylvatica*) to the intermediate drought-averse species (pedunculate oak, *Quercus robur*) and then the least sensitive species (sessile oak, *Quercus petraea*; pine, *Pinus sylvestris*; and Douglas fir, *Pseudotsuga menziesii*) (Direction des Ressources Forestières et al. 2017). The scenario is presented in Table 6.

Table 6. Temporal evolution of recruitment, growth, and death parameters per species.

	<i>Quercus petraea</i>			<i>Quercus robur</i>			<i>Fagus sylvatica</i>			<i>Pinus sylvestris</i>			<i>Pseudotsuga menziesii</i>		
	b	<i>b</i>	d	b	<i>b</i>	d	b	<i>b</i>	d	b	<i>b</i>	d	b	<i>b</i>	d
Round 2, compared to round 1 (2020-2030 > 2030-2040)	-3%	-3%	+3%	-3%	-3%	+3%	-3%	-3%	+3%	-3%	-3%	+3%	-3%	-3%	+3%
Round 3, compared to round 2 (2030-2040 > 2040-2050)	-7%	-3%	+5%	-9%	-5%	+7%	-17%	-12%	+12%	-12%	-10%	+10%	-7%	-8%	+10%
Round 4, compared to round 3 (2040-2050 > 2050-2060)	+5%	0%	-3%	+5%	0%	-3%	+5%	+7%	-3%	+5%	+5%	0%	+5%	+7%	0%
Round 5, compared to round 4 (2050-2060 > 2060-2070)	0%	+2%	0%	0%	+2%	0%	0%	+2%	0%	0%	+2%	0%	0%	+2%	0%

4. Model parameters

Eq. B.1. was solved as a system of difference equations using one-tenth of a year as the temporal step (i.e., $\Delta t = 0.1 \text{ year}$). As the virtual length of a round was 10 years in the participatory simulation, 100 iterations occurred between 2 rounds. The temporal parameters were first calibrated to fit to an annual reference and then brought back to one-tenth of a year. Similarly, the spatial parameters used in Eq. B.1. were first calibrated at a 1-ha scale and then revised to fit the 5-ha spatial scale used in the participatory simulation.

The initial parameters used in the growth model are displayed in Table 7.

Table 7. Parameters used in the forest growth model and the initialization of the Foster Forest agent-based model.

Class	Attribute	Value	Unit	Reference
Trees, regardless of species and age	b: intrinsic recruitment rate	Random float:] 0.05 ; 0.08 [Number of individuals.m ⁻² .ha.t ⁻¹	Redon et al., 2014
Trees, regardless of species and age	d: intrinsic mortality	8.0e-4	Number of individuals.t ⁻¹	Csiléry et al., 2013
Trees of diameter 1	g: hectare basal area strata 1	0.004	m ² .ha ⁻¹	(IFN 2017) Data selection was restricted to the following administrative regions: Bretagne, Pays de la Loire, Normandie, Centre Val de Loire, Île de France, Hauts de France, Grand Est, Bourgogne-Franche-Comté.
Trees of diameter 2	g: hectare basal area strata 2	0.049		
Trees of diameter 3	g: hectare basal area strata 3	0.159		
Trees of diameter 4	g: hectare basal area strata 4	0.283		
Fagus1	h: rate of switchover from strata 1 to strata 2	0.00281	t ⁻¹	
Pinus1		0.0022		
Pseudotsuga1		0.003		
QuercusP1		0.005		
QuercusR1		0.0044		
Fagus2		0.00458		
Pinus2		0.0028		
Pseudotsuga2		0.0042		
QuercusP2		0.01		
QuercusR2		0.0088		
Fagus3		0.00769		
Pinus3		0		
Pseudotsuga3		0.0071		
QuercusP3		0.013		
QuercusR3		0.0117		
Fagus1		Mean volume of a single tree		0.09
Fagus2	0.75			
Fagus3	2.96			
Fagus4	4.75			
Pinus1	0.1			
Pinus2	0.69			
Pinus3	1.5			
Pinus4	2.4			
Pseudotsuga1	0.09			
Pseudotsuga2	0.99			
Pseudotsuga3	3.17			

Chapitre 4

Pseudotsuga4		5.07	
QuercusP1		0.08	
QuercusP2		0.75	
QuercusP3		2.27	
QuercusP4		4	
QuercusR1		0.09	
QuercusR2		0.87	
QuercusR3		2.63	
QuercusR4		5.25	
Foster Forest ABM	Number of monospecific plots	25	/
Fagus1		760 in pure stands, 58 in mixed stands	
Fagus2		500 in pure stands, 21 in mixed stands	
Fagus3		110 in pure stands, 7 in mixed stands	
Fagus4		80 in pure stands, 4 in mixed stands	
Pinus1		1000 in pure stands, 43 in mixed stands	
Pinus2		600 in pure stands, 16 in mixed stands	
Pinus3		300 in pure stands, 3 in mixed stands	
Pinus4	Number of trees of a given species and diameter on a forest plot	/	ha ⁻¹
Pseudotsuga1		200 in pure stands	
Pseudotsuga2		190 in pure stands	
Pseudotsuga3		170 in pure stands	
Pseudotsuga4		/	
QuercusP1		84 in mixed stands	
QuercusP2		400 in pure stands, 27 in mixed stands	
QuercusP3		250 in pure stands, 9 in mixed stands	
QuercusP4		300 in pure stands, 2 in mixed stands	
QuercusR1		600 in pure stands, 47 in mixed stands	

(IFN 2017)
Data selection was restricted to the following administrative regions: Bretagne, Pays de la Loire, Normandie, Centre Val de Loire, Île de France, Hauts de France, Grand Est, Bourgogne-Franche-Comté.

Chapitre 4

QuercusR2		400 in pure stands, 25 in mixed stands		
QuercusR3		250 in pure stands, 7 in mixed stands		
QuercusR4		300 in pure stands, 2 in mixed stands		
Fagus	s: recruitment sensitivity to light interception	0.0167	ha.m ⁻²	Thomas Cordonnier (personal communication) and Mathias et al. (2015)
Pinus		0.0222		
Pseudotsuga		0.0182		
QuercusP		0.0182		
QuercusR		0.02		
Fagus	u: growth reduction by asymmetric competition from higher strata	0.02	ha.m ⁻²	Thomas Cordonnier (personal communication) and Kunstler et al. (2011)
Pinus		0.0286		
Pseudotsuga		0.0222		
QuercusP		0.0222		
QuercusR		0.025		
Fagus	z: death increase due to asymmetric competition from higher strata	1.0e-4	ha.t ⁻¹ .m ⁻²	Mathias et al., 2015
Pinus		0.00143		
Pseudotsuga		0.00111		
QuercusP		0.00111		
QuercusR		0.00125		

Appendix C: Consequences of participants' decisions on ecological and social processes

1. Soil fertility

Soil fertility is considered at the stand level. It increases in the absence of silvicultural operations during one step; it decreases in the case of clearcutting, slash removal, or monospecific planting of Scots pines or Douglas fir; otherwise, it remains constant (Figure 25).

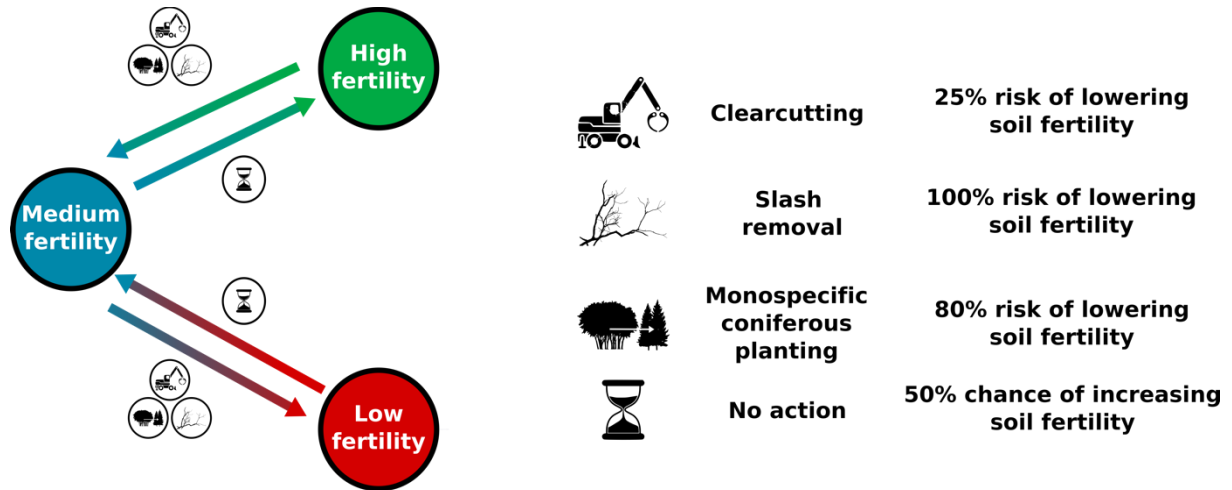


Figure 25. Evolution of a plot's soil fertility.

2. Water quality

Water quality is calculated at the end of a round before launching the calculations of tree growth (see Appendix B). The initial water quality is taken as a reference. Water quality is then arbitrarily calculated as follows (weighting results from discussions with foresters and mayors in charge of water syndicates):

$$w_j = \frac{2m_j - 2c_j - q_j}{w_0} \quad (\text{Eq. C.1.})$$

where:

- w_j is the water quality at the beginning of round j ;
- m_j is the proportion of mature trees in the whole forest at the beginning of round j ;
 $m_j = \frac{x_3 + x_4}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}$ where x_k is the number of trees of diameter k in the whole forest;
- c_j is the proportion of coniferous trees in the whole forest at the beginning of round j ;

$c_j = \frac{x_{3,d}+x_{4,d}+x_{3,e}+x_{4,e}}{x_2+x_3+x_4}$ where $x_{k,i}$ is the number of trees of diameter k and species i in the whole forest (d : *Pinus sylvestris* and e : *Pseudotsuga menziesii*), and x_k is the number of trees of diameter k in the whole forest;

- q_j is the proportion of the 50 plots with low soil fertility.

3. Carbon storage and flows

Carbon flows were calculated as the difference in carbon stocks between two consecutive time steps at the plot level. Total carbon storage on a plot was the sum of aboveground and belowground carbon stocks. Aboveground carbon was approximated as the standing volume of trees for all four strata (discarding deadwood) and evolved according to the growth model detailed in Appendix B. The initialization of belowground carbon stocks was inspired by Jonard et al. (2017) and Lal (2005). It randomly diminished from 5 to 10% in the case of slash removal, clearcutting, or planting in order to reflect soil disturbances provoked by logging machines and soil preparation.

4. Inhabitants' satisfaction level

Inhabitants' level of satisfaction was incorporated as a proxy of the esthetic value of the forest landscape. It draws on discussions with public and private foresters of the natural regional park of the "Vosges du Nord" in September 2018. In the ABM, the satisfaction indicator v is calculated at the whole forest level:

$$v = \frac{1-(p_{pure}+p_{Douglas\ fir})}{p_{tot}} \quad (\text{Eq. C.2.})$$

where:

- p_{pure} is the number of monospecific plots;
- $p_{Douglas}$ is the number of monospecific Douglas fir plots; Douglas fir, an exogenous species in France, is often despised by local populations (Ferron 2014) and was consequently counted twice in v ;
- p_{tot} is the total number of plots ($p_{tot} = 50$).

5. Initialization of social and ecological parameters

The initial parameters used in the growth model to set up the parameters of the other classes of the ABM are displayed in Table 8.

Table 8. Ecological and social parameters used in Foster Forest.

Class	Attribute	Value	Unit	Reference
-------	-----------	-------	------	-----------

Chapitre 4

Forester managers	Budget	0	/	Fixed by authors
<i>Foster Forest</i> ABM	Number of plots	50	/	Fixed by authors
<i>Foster Forest</i> ABM	Inhabitants' satisfaction level	0.5	/	Fixed by authors
<i>Foster Forest</i> ABM	Initial number of plots with a conservation program of old-growth trees	0	/	Fixed by authors
Plot	Aboveground carbon storage	Sum of tree volumes	MgC.ha ⁻¹	Jonard et al., 2017
Plot	Belowground carbon storage	91.2 if pure <i>Pseudotsuga</i> stand, 96.0 in the presence of <i>Pinus</i> , otherwise 72.6	MgC.ha ⁻¹	Jonard et al., 2017
Plot	Certificate of sustainable management	0	Initial number of plots with ongoing certification	Fixed by authors
Plot	Soil fertility	9 in low fertility, 36 in medium fertility, 5 in high fertility	/	Fixed by authors
Property	Grazing rate	High (private owner 1), medium (private owner 2, mayor, protected area manager), low (public forester of the National Forest Office)	/	Fixed by authors

DISCUSSION



De trop fortes densités d'ongulés mettent en péril la régénération forestière, menaçant la réussite d'adaptations aux changements climatiques. Les négociations des plans de chasse sont une source fréquente de tensions entre chasseurs et forestiers. Crédit photographique : Timothée Fouqueray.

L'objectif des divers travaux de cette thèse a été de comprendre comment l'adaptation aux dérèglements climatiques a pu influencer l'évolution récente de la gestion forestière en France métropolitaine, et participera à ses futurs développements. Trois thématiques de recherche ont permis de décliner cette problématique : (1) la diversification des adaptations aux changements climatiques par les gestionnaires forestiers ; (2) l'importance accordée par les forestiers aux approches techniques, relativement aux réflexions portant sur l'organisation socio-économique de la gestion forestière ; et enfin (3) l'intégration des dynamiques écologiques dans la conception et la mise en œuvre d'adaptations aux changements climatiques.

Pour explorer ces thématiques, il a d'abord été question, en s'appuyant sur des enquêtes de terrain, de recenser des adaptations en forêts privées et publiques (chapitre 1, page 61). Les adaptations répertoriées concernaient seulement quelques-uns des nombreux biens et services écosystémiques forestiers, au premier rang desquels la production de bois, le stockage de carbone et la préservation des habitats naturels. Ces adaptations étaient avant tout mises en place pour répondre à des aléas climatiques déjà vécus par les forestiers. Surtout, ces adaptations relevaient d'évolutions des techniques sylvicoles, où les humains interviennent sur le socio-écosystème forestier, en modifiant les composantes naturelles.

Dans une deuxième partie, nous avons souhaité savoir si les focales productives et techniques des adaptations décrites en première partie pouvaient être alimentées par des projets de recherche eux aussi centrés sur la production de bois, sous un angle technique. Pour cela, nous avons étudié le financement public des appels à projets de recherche portant simultanément sur les changements climatiques et sur la foresterie (chapitre 2, page 83). Nous avons montré qu'une des causes du manque de considération des aspects socio-économiques de l'ACC est la prééminence de recherches techniques, très peu tournées vers les services écosystémiques socio-culturels, de régulation ou de soutien.

L'approche du chapitre 3 (page 105) a consisté à revenir sur le terrain à travers une étude de cas – en l'occurrence, le paiement pour stockage de carbone. Nous avons mis en relief comment la diversification des revenus engendrée par ce type d'innovation est un moyen indirect pour les forestiers de s'adapter aux changements climatiques, en diminuant leur dépendance à une production ligneuse fortement menacée par les dérèglements climatiques. Les atouts (contribution à l'atténuation, valorisation d'une sylviculture résiliente aux aléas climatiques, etc.), mais aussi certaines limites techniques et conséquences socio-économiques de cette approche (risque de

substitution, à long terme, aux financements publics, difficile comptabilité du carbone additionnellement stocké, ...) ont été soulignées.

La quatrième et dernière partie a été voulue comme la synthèse des apprentissages des chapitres précédents, grâce à la création d'une simulation participative de gestion forestière (chapitre 4, page 127). Dans *Foster Forest*, divers acteurs de la gestion forestière sont plongés dans un scénario de fort changement climatique. Pour mener à bien leur propre mission, ils disposent d'une panoplie de pratiques sylvicoles inspirées de pratiques usuelles, mais qui ne suffisent pas à faire face aux perturbations climatiques. Pour compenser, les participants ont toute liberté de proposer des changements des règles du jeu afin de faire évoluer l'organisation socio-économique de leurs activités forestières. La dizaine d'applications de cette simulation participative, dans différentes régions françaises, a permis de confirmer les résultats des chapitres précédents. Les parties jouées ont aussi apporté un éclairage sur l'importance des structures d'animation territoriale dans la proposition de projets d'adaptations socio-économiques, à des échelles complémentaires des seules visions « à la parcelle ».

Dans la discussion qui suit, les trois questions de recherche sont reprises à la lumière des apports de ces quatre chapitres. La première section discute comment les adaptations aux changements climatiques, qu'elles soient prévues ou déjà mises en place, viennent renforcer le paradigme gestionnaire de la foresterie (section 1 de l'introduction). La deuxième section présente trois propositions pour stimuler la diversification socio-économique de l'adaptation. Enfin, la troisième et dernière section explore l'intérêt, pour l'écologie de la conservation, de poursuivre des échanges avec les gestionnaires forestiers.

1. L'adaptation aux changements climatiques renforce le paradigme gestionnaire de la foresterie

We two foresters see no other choice for natural resource managers but to be this humble and conservative in ecosystem management—especially of public land and water ecosystems (Kennedy et al., 1998). For if we cannot confidently predict human values and behavior as simple as (say) USA or European men's hair styles in 2010, how can we confidently predict human-ecosystem relationships in 2050 for which to plan or manage? Kennedy et Koch (2004)

1.1. Trente ans de changements climatiques en forêt

S'il est une évidence aux yeux de la centaine de forestiers rencontrés durant la thèse, c'est que les dérèglements climatiques sont véritablement un sujet de préoccupation. Qu'elle émerge plus ou moins rapidement selon les sensibilités et expériences personnelles, la question de l'adaptation aux changements climatiques a le plus souvent été abordée spontanément dans les échanges.

Le sujet est d'une brûlante actualité (Figure 26), mais ce n'est pas pour autant qu'il est récent, comme en témoigne son institutionnalisation progressive depuis la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, adoptée lors du sommet de la Terre à Rio en 1992 (Falkner 2016). Trente ans déjà ont permis aux gestionnaires forestiers d'y consacrer des efforts de recherche et d'essais pratiques. Il est ainsi tout à l'honneur du milieu forestier d'avoir su intégrer les défis posés par les changements climatiques, que ce soit au niveau des politiques publiques (cf. la Figure 9 de l'introduction), de la recherche (cf. chapitre 2, page 83), ou dans les réflexions pratiques de la gestion forestière à long-terme. Cette intégration des problématiques posées par les changements climatiques a suivi plusieurs phases²³ : comprendre les causes, puis les impacts sur les forêts des dérèglements climatiques ; prendre part aux efforts d'atténuation des émissions de GES ; avec des effets de plus en plus visibles depuis quelques années (Figure 26), il s'agit désormais de lutter contre les conséquences des changements climatiques (adaptation).

Pourtant, comme le relèvent les chapitres 1 et 4, malgré trente ans de réflexions, formations, recherche, et qui plus est des aléas climatiques qui se font plus fortement ressentir, les évolutions de la gestion forestière ne semblent pas tellement régies par les efforts d'adaptation. Il apparaît que les considérations économiques, sociales et cynégétiques de plus court-terme orientent les décisions de gestion (chapitres 1, 2, 3, 4). Cette « inertie » des milieux forestiers n'est d'ailleurs pas sans rapport avec le maintien de fortes incertitudes relatives à l'intensité et au rythme des effets des changements climatiques (Richard 2013; Sansilvestri 2015).

²³ Pour une présentation plus précise, revenir au chapitre 2, page 82.

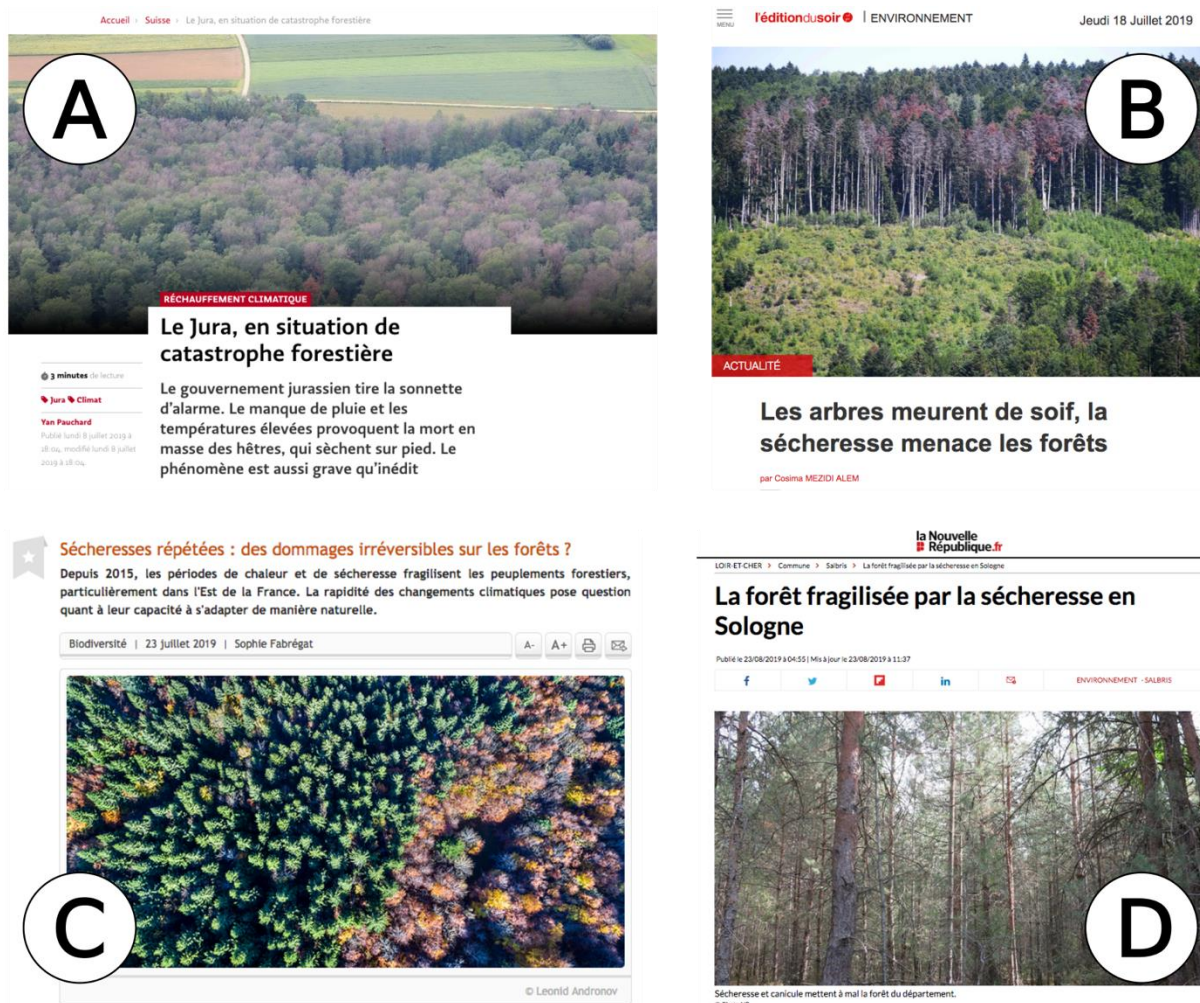


Figure 26. La presse régionale, relai des inquiétudes pesant sur l'avenir des forêts.

Ici, le cas des sécheresses à répétition. A : Article en date du 8 juillet 2019, tiré du quotidien suisse *Le Temps*. B : Article en date du 18 juillet 2019, tiré du quotidien français *Ouest France*. C : Article en date du 23 juillet 2019, tiré du site d'information *Actu-Environnement*. D : Article en date du 23 août 2019, tiré du quotidien français *La Nouvelle République*.

La foresterie française s'est renouvelée depuis les premières politiques publiques climatiques, dans les années 1990. Toutefois, ses évolutions sont principalement dues à la mécanisation, à l'écologisation des pratiques, et à une plus grande attention prêtée aux considérations sociales.

Si la recherche sur les adaptations techniques est nécessaire, elle se heurte à deux obstacles aujourd'hui non surmontés. Le premier est l'absence de retours sur l'efficacité à long-terme des mesures techniques d'adaptation (e.g., le travail sur la densité des parcelles forestières), pourtant essentiels pour une gestion forestière qui s'étale sur des décennies. Le deuxième est l'impossibilité de savoir, pour les chercheurs et les gestionnaires forestiers, si les adaptations techniques actuelles

seront suffisantes à maintenir dans les décennies qui viennent la production des biens et services écosystémiques (BSE) forestiers désirés, ou s'il faut les doubler d'adaptations socio-économiques « sans-regrets ». À la question de savoir s'il mettait une stratégie d'adaptations aux changements climatiques en place, un directeur d'unité territoriale de l'ONF vosgien répondait : « *Aujourd'hui on n'a pas de billes pour faire cela par contre, donc en fait c'est... On tâtonne ! Le problème c'est qu'aujourd'hui on n'a pas d'informations et que l'on ne peut pas se permettre d'attendre encore 30 ans pour prendre des décisions.* »

Pour l'adaptation aux changements climatiques, une recherche focalisée sur les composants naturels des socio-écosystèmes forestiers est donc essentielle, mais non suffisante. Une manière de faire face aux incompressibles incertitudes climatiques et techniques consiste alors à décaler le cadrage du problème. Pour cela, passer d'incertitudes de premier rang (techniques) à des incertitudes « de second rang » (socio-économiques et politiques) ouvre la réflexion à de nouvelles options d'adaptation (Friedberg 1997). Une illustration concrète – mais peu fréquente dans le milieu forestier – est de développer de nouveaux systèmes assurantiels pour contrer les risques de pertes financières en cas de catastrophe climatique (Brunette, Couture, et al. 2017). Dans ce cas, l'outil économique vient pallier l'impossibilité de surmonter les incertitudes écologiques et climatiques – pour les forestiers, mais pas pour l'industrie dépendant de la production de bois.

Toutefois, basculer vers un cadrage socio-économique d'un problème considéré jusqu'ici surtout sous l'angle technique n'est pas la panacée pour surmonter les incertitudes des changements climatiques. À l'instar des approches techniques, les recherches en sciences humaines et sociales sur le sujet sont confrontées à des inconnues (connues ou inconnues, cf. section 2.1 de l'introduction). Pour exemple, même les études les plus abouties des SHS ne peuvent générer une connaissance exhaustive de l'ensemble des mécanismes sociaux en jeu dans une stratégie d'adaptation (e.g., la transition d'une sylviculture régulière à irrégulière ou la décision de ne recourir qu'à des essences natives). Les mécanismes sociaux qui ont été auscultés peuvent aussi avoir révélé leurs incertitudes intrinsèques : dans le cas de la gestion forestière, on pensera par exemple à la manière dont les propriétaires privés déterminent un mode de gestion plus ou moins intensif (Petucco et al. 2015). Si de nombreux facteurs sociaux y afférents sont connus (âge, formation, influence de la famille, importance accordée aux bénéfices économiques escomptés ou à la valeur écologique, paysagère de la propriété, etc.), leur poids respectif dans le choix d'un mode de gestion ou d'un autre ne l'est pas forcément pour autant (e.g., Brunette, Foncel, et Kéré 2017; Polomé 2016). De plus, des mécanismes sociaux jusqu'ici peu étudiés peuvent entrer en ligne de compte dans de tels choix (à l'instar de la plus ou moins grande prise en compte du changement climatique, e.g., Yousefpour et al. 2012). Pour tenir compte des difficultés relatives à un nouveau cadrage de l'adaptation aux dérèglements climatiques, il nous a fallu clarifier deux choix de travail.

Le premier choix de travail a été de baser les études à l'échelle territoriale. Le parti pris a été d'évacuer la question d'une définition du terme « territoire », pour à la place se référer à la manière dont les forestiers eux-mêmes définissent le socio-écosystème dans lequel ils évoluent :

- du point de vue de ses composantes écologiques (« *le massif forestier* », « *les stations à chênaie-hêtraie normandes* », « *le bassin versant* »)
- du point de vue de ses composantes humaines, à l'instar des départements (« *au niveau de la préfecture* ») ou des unités territoriales de l'ONF (« *à l'époque on disait des districts* »)
- ou enfin du point de vue du couplage des systèmes naturels et humains ; dans ce dernier cas, il a principalement été fait mention des parcs naturels régionaux, comme dans le Perche : « *Y'a quelques années, le parc du Perche avait dit, vous plantez des haies et ça vous coûte un euro du mètre linéaire. À l'époque, combien y'a eu de kilomètres de haies de plantés ? Tous mes voisins ont planté des haies, tout le monde a planté des haies.* ».

Plus encore que la littérature (Sergent 2010; Deuffic 2018), ce sont les retours des participants lors des ateliers *Foster Forest* qui ont permis de confirmer le bien-fondé de ce parti pris au regard de notre problématique. Une alternative à l'approche territoriale aurait pu être de comprendre l'ACC à une échelle nationale, par exemple en se basant sur les politiques publiques ou sur les discours des instances décisionnaires de l'ONF ou de coopératives forestières. Cela n'aurait cependant pas permis d'être aussi près des évolutions concrètes des pratiques de gestion forestière. La meilleure illustration de la pertinence de ce choix méthodologique est encore la déclaration d'un chargé de mission Natura 2000, lors d'une séance de débriefing faisant suite à une simulation participative : « *Il y a un décalage entre ce qui peut se faire aux niveaux administratifs dans lesquels nos structures respectives peuvent siéger, quand c'est au niveau de la DREAL, de la préfecture, et nous après ce qu'on applique que le terrain. [...] L'échelle de la décision elle est très très éloignée dans nos structures, l'ONF, il y a un décalage évident entre l'application locale et les décisions au-dessus.* »

Le deuxième parti pris méthodologique a été de s'engager dans une démarche interdisciplinaire résolument pragmatique. *De facto*, les sciences forestières dépassent les seules frontières de l'écologie (Hickey & Nitschke 2005). Inversement, des disciplines autres que la

climatologie s'intéressent aux problématiques de l'adaptation aux dérèglements climatiques (Lammel et al. 2012).

Cette situation incite au dialogue interdisciplinaire et à une forme d'humilité sur ses propres cadres disciplinaires. Trois ans de thèse m'ont par exemple permis de relativiser la trop rapide universalisation de certains travaux de l'écologie scientifique, alors même que de nombreux écologues reprochent aux sciences sociales de trop dépendre du contexte dans lequel elles s'inscrivent (Moon & Blackman 2014). Les retours d'expériences, travaux et discussions partagés avec l'actif réseau de la modélisation d'accompagnement ont grandement contribué à assumer de s'affranchir d'une approche théorique unique. Naturellement, les développements théoriques avancés par la littérature propre aux notions de socio-écosystèmes (e.g., Liu et al. 2007), de solidarité écologique (Mathevet et al. 2010) ou d'intendance (Mathevet et al. 2018) ont largement bénéficié à nombre des analyses de cette thèse.

L'annexe 3 revient plus en détail sur les défis qu'a posés la pratique de l'interdisciplinarité durant le doctorat, tout comme le cheminement méthodologique et personnel qui en a résulté. Cette annexe permet aussi de discuter la triple proposition méthodologique de l'introduction (section 3.2) : une approche de l'écologie de la conservation dynamique, ouverte aux sciences humaines et sociales, et qui adopte une vision anthropocentrique « élargie ».

Pour compléter les recherches mêlant adaptation aux changements climatiques et foresterie, nous avons privilégié une démarche interdisciplinaire de terrain. Les approches retenues (focale sur l'échelle territoriale, simulations participatives) ont permis de rester au plus près de la prise de décision des pratiques de gestion, malgré d'indéniables défis méthodologiques.

1.2. Une diversification toujours plus technique

En tardant de quelques instants, c'était retarder la certitude en se cramponnant à l'espérance.

A. Dumas, *Le comte de Monte-Cristo*

S'il est clairement un apprentissage issu des diverses études de terrain, c'est que la diversification des adaptations aux changements climatiques se fait majoritairement sur un plan technique. La vigueur des débats sur les adaptations à retenir illustre comment les changements climatiques renforcent le technicisme des forestiers.

En grossissant le trait, l'idéal-type de l'adaptation technique fait fi des dynamiques temporelles, comme celle de l'évolution biologique des populations d'arbres. Il se concentre sur le consensus technique de « la bonne essence au bon endroit », qui répondrait une fois pour toutes aux menaces de sécheresses ou d'attaques parasitaires. Bien qu'il les contredise, cet idéal adaptatif emprunte pourtant aux connaissances écologiques des milieux forestiers. Ainsi, la « bonne essence » peut être cherchée à l'échelle des matériels forestiers de reproduction, en testant des semences de provenances géographiques variées ou en menant des programmes de migration assistée (Sansilvestri 2015). Cet objectif de trouver une essence ou une provenance parfaitement adaptée à la station forestière d'intérêt prend en compte les particularités pédologiques et climatiques locales. Cette recherche n'induit pas forcément qu'une seule essence répondra à toutes ces particularités : à chaque station forestière sa recherche d'une essence « adaptée ».

La version interventionniste de ce mode d'adaptation est particulièrement bien représentée par la sélection variétale du pin maritime (chapitre 1, page 61). En effet, les pins de quatrième génération ont entre autres été retenus pour leur capacité à surmonter les stress hydriques (Jambois et al. 2013). Cependant, cet imaginaire d'une forêt « adaptée » grâce à la bonne configuration génétique n'est pas l'apanage des tenants de pratiques forestières fortement interventionnistes (cf. Figure 5). Il en va exactement de même du côté des partisans d'une foresterie prônant un plus grand laissez-faire. En cherchant à s'appuyer sur la plasticité phénotypique et la sélection naturelle des arbres locaux, ceux-là ne font rien d'autre que chercher à atteindre le même objectif par une voie différente, soulignant là encore une réflexion technique à des échelles spatio-temporelles qui n'est pas forcément la plus appropriée pour faire face aux CC.

Si la démarche de régénérer « le bon arbre au bon endroit » est techniquement pertinente d'un point de vue écologique, tout porte à croire que son efficacité ne sera que meilleure si elle se renouvelle à deux niveaux. En premier lieu, il importe de prendre en compte l'évolution temporelle – inédite pour les forestiers – des conditions climatiques locales, pour ne pas chercher à avoir une forêt « adaptée », mais à continuellement participer à l'adaptation des peuplements. En second lieu, il importe pour les forestiers « passifs » de reconnaître que la célérité des dérèglements climatiques fait peser un lourd risque d'échec sur la démarche d'une adaptation purement biologique. Il faut noter le mérite qu'ont des approches fondées sur les processus écologiques de ne pas se cantonner à une vision fixiste des peuplements forestiers. Cependant, pour augmenter les chances de succès de cette démarche, il peut être approprié de s'inspirer de la migration assistée afin d'enrichir les viviers génétiques locaux par l'introduction d'allèles exogènes (Bauhus et al. 2017; Sansilvestri et al. 2015). En tous les cas, si l'objectif est l'adaptation à long terme des forêts aux changements climatiques, les réponses techniques ne relèveront ni d'un extrême interventionnisme, ni d'une

extrême passivité, mais devront perpétuellement être remises en question au cours du temps, et dans des contextes géographiques variés²⁴.

En plus d'inhiber la réflexion sur des adaptations politiques, économiques et sociales, la surenchère technique qui prédomine dans les réponses aux dérèglements climatiques (chapitres 1, 2 et 4) préoccupe de nombreux gestionnaires forestiers qui en pressentent les limites. Pour ces derniers, les adaptations techniques permettront d'allonger encore un peu une phase de « délai » durant laquelle ils pourront surmonter les changements climatiques (Villalba 2015). Cela étant, ces ACC ne seraient pas de taille face aux conséquences des dérèglements climatiques sur le long terme (Semal & Villalba 2013). Sans pousser jusqu'au catastrophisme, les mentions régulières des interactions des problèmes sanitaires avec les changements climatiques (maladie des bandes rouges (Woods et al. 2005), chenilles processionnaires (Netherer & Schopf 2010), scolytes de l'épicéa, etc.) vont dans le sens des inquiétudes des propriétaires et gestionnaires forestiers. À titre d'exemple, l'idée que le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*, essence reine de la production de bois) puisse être un jour atteint par une maladie ou un parasite a été l'objet de plusieurs échanges, comme ici dans les Pyrénées : « *On sait qu'à long terme on va dans le mur, on le voit aujourd'hui avec la crise des épicéas. Si demain il y a quelque chose sur le Douglas ce sera une catastrophe.* »

Qu'elles soient interventionnistes ou pas, les techniques d'adaptation qui sont mises en place étendent le besoin de gérer les forêts. Un aperçu en est donné par un forestier de l'ONF qui expliquait son choix de diminuer la densité de certaines parcelles de son unité territoriale. Le but était d'obtenir des arbres plus trapus, dont le rapport hauteur-diamètre confère une résistance accrue aux coups de vent (Gardiner et al. 2010). En ayant moins d'arbres à l'hectare, l'intéressé présumait d'une moindre sensibilité aux stress hydriques, la pression sur la ressource étant diminuée. Cela permettait aussi de diminuer les périodes de rotation, en coupant les bois plus tôt pour une mise sur le marché avancée des volumes produits. La conséquence de cette adaptation était donc de rajeunir les peuplements, en réduisant le nombre de vieux arbres. Or, ce sont les arbres les plus âgés dont l'intérêt écologique est le plus fort : présence de cavités, de dendrotelmes, etc. (Kraus et al. 2016). Pour remédier à la diminution des habitats naturels que cela causait, il a alors fallu élargir le champ de l'intervention forestière, et mettre en place et suivre des réseaux de vieux arbres, à travers l'établissement de normes sur les arbres « bios », vieillissants ou sénescents – une norme émanant des préconisations de l'ONF pour assurer la multifonctionnalité des milieux

²⁴ La section 2.3 de la discussion examine les intérêts de soutenir la gestion adaptative.

forestiers (ONF 2008). Une autre conséquence de la diminution des périodes de rotations est la hausse des phénomènes de lixiviation des sols (Bauhus et al. 2017), qui peut là encore conduire à des réponses techniques comme le recours à la fertilisation.

Cet auto-accroissement de la gestion technique est une donnée négligée des problématiques de la gestion des milieux naturels (Ellul 1954), dont les conséquences inconnues pourraient peser sur les trajectoires adaptatives des socio-écosystèmes forestiers.

La diversification de l'adaptation de la foresterie est un thème majeur des discours des forestiers rencontrés. Dans les faits, il s'agit principalement de la diversification des techniques de gestion forestière, comme en témoigne l'ensemble des terrains de la thèse. L'ouverture de la réflexion a surtout relevé de l'initiative de structures d'animation territoriale, qu'il s'agisse d'associations agissant dans des contextes régionaux spécifiques, ou des PNR et COFOR lors des simulations participatives.

1.3. L'adaptation, révélatrice d'une foresterie xylophage

« *Ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier* », voilà donc le mot d'ordre des forestiers face aux changements climatiques, maintes fois entendu lors des études de cette thèse. Pourtant, la majeure partie des adaptations relatées se rapportait à la production de bois. Ce constat, mené tout au long des chapitres 1, 2 et 4, est tout aussi logique que légitime. Il est logique, car la vente de bois est la première source de revenus des propriétaires privés et publics de forêts en France (Cinotti 2003). Il est aussi légitime, car les besoins en matière première bio-sourcés vont croissants (MAAF 2017), qu'il s'agisse du bois construction ou du bois-énergie – tous deux contribuant de surcroît aux efforts d'atténuation, par leurs effets de stockage et de substitution (Baral 2004). Cette prédominance du discours technique dans l'adaptation aux changements climatiques a en partie été expliquée par le chapitre 2 (page 83). Toutefois, l'analyse proposée ne saurait être complète sans revenir sur l'injonction économique.

Le poids économique de la filière forêt-bois dans la prise de décision des modes de gestion était déjà esquissé dans l'introduction. Ainsi, nous avons vu comment, suite à la grande tempête de 1999, la mécanisation engagée s'était encore accélérée au profit non pas des propriétaires forestiers,

publics ou privés, mais des fournisseurs de matériel de reproduction ou des machinistes forestiers (chapitre 1, section 3.1). De manière similaire, tout porte à croire que l'inclination techniciste des forestiers est nourrie et encouragée par les acteurs de l'industrie de la forêt et du bois, soucieux de sécuriser l'approvisionnement rapide et standardisé de leur ressource primaire. Pour ces derniers, l'adaptation aux changements climatiques est un argument de plus mobilisé pour assurer leur développement économique. Suite aux propos d'un syndicaliste de la fédération des propriétaires privés sur le virage capitalistique des coopératives forestières²⁵, un agent de l'ONF ariégeois développait : « *Il y a une difficulté aussi aujourd'hui, c'est de trouver des opérateurs qui proposent des itinéraires résilients et raisonnés en termes d'investissement* ».

En consultant les recommandations d'ACC de la filière forêt-bois, il est ainsi remarquable de voir comment elle ne reprend que les arguments techniques confortant ses positions. Le manifeste en faveur des forêts de plantation en est le plus pur exemple (Coopérative Agricole et Forestière Sud-Atlantique et al. 2012). Ce n'est pas le seul, comme le montrent les divers sites internet des acteurs de la filière. Sur le site de la Fédération Nationale du Bois, le seul exemple d'adaptation de la section « Forêt et changement climatique » est le reboisement (FNB 2019)²⁶ : « **Le reboisement** avec un choix d'essences qui anticipent et tiennent compte des effets du changement climatique (face à une régénération naturelle qui campe sur les acquis génétiques) est également **une solution** qui répond par ailleurs aux enjeux de production de la forêt française. » De même, sur le site de l'union des coopératives forestières, on peut lire que « *le renouvellement des forêts doit s'accroître et être plus rapide, mais aussi plus pérenne* » pour faire face aux conséquences des changements climatiques (UCFF 2019). Ces arguments sont recevables du point de vue de ces structures industrielles soumises à des impératifs économiques, à condition qu'ils prennent en compte l'ensemble des résultats de la recherche, et non pas les seules connaissances étant à leur avantage.

De tels propos, avancés sous le couvert des problématiques climatiques, apportent surtout leur concours aux revendications récurrentes de la filière forêt-bois : besoins d'investissement en forêt (plantation, entretiens des plantations, ...) et meilleure valorisation économique des bois. Ainsi, on entend le même discours des acteurs de la filière forêt-bois à toutes les échelles possibles de la prise de décision de la gestion forestière²⁷ : les seules (ou en tout cas les meilleures) adaptations possibles sont aussi celles qui sont favorables à la production de bois. Le but est ici d'orienter les décisions

²⁵ « *On voit [des conneries faites] dans les coopératives, de plus en plus grosses et ça devient des machines énormes qui ont besoin de fonctionner et qui ont besoin d'argent.* »

²⁶ L'accentuation des passages en gras n'est pas l'œuvre de l'auteur, mais du site internet.

²⁷ Un récent rapport de l'INRA et de l'IGN décrit quatre scénarios pour le rôle de la filière forêt-bois dans l'atténuation aux changements climatiques (Roux et Dhôte 2017). Avec pour seule justification des « *questions de dimensionnement de l'exercice* », seul le scénario d'intensification et d'augmentation des prélèvements est présenté dans l'analyse économique du rapport.

des propriétaires vers des adaptations assurant un approvisionnement rapide en matière ligneuse. Ces discours sont aussi l'occasion de (re-)créer une connexion entre « l'amont et l'aval », en insistant sur les essences à courtes rotations (résineux, peupliers) comme solution optimale d'ACC.

Pourtant, à l'inverse de ce que les industriels de la filière forêt-bois avancent, les forestiers ne sont pas aussi intéressés que ceux-ci à aller vers des adaptations aux changements climatiques menant à une intensification des récoltes. D'un point de vue économique, un propriétaire forestier n'aura pas grand intérêt à opter pour une intensification de la sylviculture, comparée à la vente de feuillus de qualité à l'export. L'atout de cette stratégie de vente est double. Il est d'abord économique, à court terme : il sera plus intéressant pour un propriétaire de produire et de vendre à l'export de beaux feuillus – chênes en tête – dont la valeur ajoutée est plus haute que les résineux souhaités par l'industrie française en termes de qualité technologique du bois, ou de stockage de carbone par exemple. L'atout est ensuite écologique, à long terme, du fait des dommages aux sols que créent l'intensification d'une production centrée sur les résineux (Jandl et al. 2007; Walmsley & Godbold 2010; Hornung 1985; Schrijver et al. 2012).

L'absence de lien fort entre les producteurs de bois métropolitains et les industries de la première transformation n'est pas étonnant, du fait de la mondialisation du sourçage des matières premières utilisées par le secteur secondaire (Levet et al. 2014). Ainsi, en Italie, la florissante industrie de l'ameublement ne dépend en rien de la faible production nationale de bois (Colautti et al. 2014). Ce phénomène s'illustre dans d'autres domaines, comme celui de la filière nucléaire française dont les résultats économiques sont fondés sur une matière première minée dans d'autres pays (Harris 2009).

Si la filière forêt-bois cherche tant à faire ce lien entre amont et aval en promouvant des essences résineuses à croissance rapide, c'est peut-être aussi du fait d'un phénomène de « dépendance au chemin »²⁸. Dans le passé, de lourds investissements ont été réalisés dans un outillage spécifique ne facilitant pas le sciage des bois de grands diamètres (Denormandie et al. 2004). Pour amortir ces investissements, il est nécessaire de maintenir un approvisionnement en bois de faibles diamètres. Dès lors, on comprend mieux la volonté de la filière forêt-bois à adapter les forêts, pas l'industrie, comme le résumait la déléguée interministérielle pour la forêt et le bois nommée par le ministère en charge de l'environnement : « *On peut adapter l'industrie mais aussi la forêt, et en particulier il faut mieux documenter la substitution pour mieux inventer un modèle bas-carbone en substitution bois dans la construction.* » (colloque « Comment optimiser la contribution des forêts et de la filière

²⁸ La « dépendance au chemin » décrit comment un choix passé pèse sur les choix présents, ce qui peut expliquer pourquoi, face à un problème, une solution plus efficace qu'une autre n'est pas forcément adoptée. Un exemple classique est le clavier AZERTY, utile pour le bon fonctionnement des machines à écrire, et qui a persisté jusqu'aux ordinateurs pour lesquels il n'a plus lieu, techniquement, d'être (Palier 2010).

bois à l'atténuation du changement climatique ? » organisé par l'ADEME le 11 décembre 2017, à Paris). Si l'on peut regretter les difficultés éprouvées par les industries de transformation, il convient toutefois de relativiser la portée de ces arguments climatiques. Fournis « clef en main », ils orientent artificiellement une vision de la gestion forestière durable qui serait seulement dévolue à produire du bois (Barthod 2007).

Assurer le maintien et le développement d'une filière économique de la forêt et du bois est important au regard des emplois et co-bénéfices (e.g., atténuation) qui en découlent. Néanmoins, il importe de ne pas dévoyer les arguments de l'adaptation aux changements climatiques pour soutenir une vision de la gestion forestière seulement tournée vers la production de bois. Cela mènerait à l'adoption d'adaptations calibrées pour le temps court de l'économie, là où les échelles temporelles des forêts s'étalent sur plusieurs décennies, voire siècles.

Cette priorité accordée à la production de bois dans les adaptations aux changements climatiques a été communiquée aux propriétaires privés et aux gestionnaires des forêts publiques, qui en sont bien conscients. Les rares fois où ils en parlent, les forestiers font valoir que : « *Sous un prétexte de changement climatique, les industriels peut-être vont se faufiler là-dedans* » (dixit un agent du CRPF), ou encore qu'on « *profite du prétexte que [le hêtre] boit²⁹ pour le faire sauter partout, alors que c'est parce que ça vaut rien* » (dixit un chargé de mission d'une zone Natura 2000).

Pourtant, il y a comme une gêne pour les forestiers à expliciter cette pression économique. D'habitude si prompts à discuter *l'ensemble* des tenants et aboutissants de *nombreuses* pratiques sylvicoles différentes (taux de prélèvement ou périodicité des éclaircies, choix des modes de régénération, etc.), la plupart des forestiers évoquait seulement les évolutions confortant la production ligneuse, quitte à n'aborder qu'une partie du raisonnement. Il importe ici de souligner que cette observation s'applique aussi bien aux partisans d'une foresterie gourmande en interventions qu'à ceux s'inspirant de processus « naturels ».

Un des exemples illustrant ces propos est celui de l'adaptation au risque de tempête³⁰, pour laquelle au moins deux approches coexistent. La première consiste à diminuer la densité des peuplements afin d'obtenir des arbres plus trapus. Du fait d'une moindre compétition pour la

²⁹ Le hêtre est une essence dont la croissance et le développement nécessitent beaucoup d'eau (Lendzion & Leuschner 2008).

³⁰ Rappelons que les risques de tempête, à ce jour, n'ont pas été corrélés aux dérèglements climatiques pour la France métropolitaine (ONERC 2015).

lumière, leur croissance est plus rapide, ce qui offre l'espoir d'éviter les occurrences de tempêtes grâce à une récolte avancée. Ce faisant, la probabilité d'avoir des dégâts décroît, mais s'ils ont lieu, les pertes engendrées peuvent être élevées. La deuxième approche repose sur l'irrégularisation des âges et des espèces et le maintien d'un couvert continu. En cas de tempête, les risques que des dégâts aient lieu sont plus élevés que dans la première approche, mais leurs conséquences sont moins importantes. En effet, du fait d'un sous-étage déjà établi, la continuité de la production n'est pas menacée. Alors que les deux approches sont valables, c'est principalement la première qui a été mise en avant lors des entretiens. Naturellement, les arguments mobilisés ne peuvent être comparés sans tenir compte des contextes climatique, pédologique et écologique locaux, et sans prendre note de la complexité de la gestion forestière. Il n'en reste pas moins que l'intercalation des valeurs et des contraintes propres à chaque forestier est partie prenante des choix d'adaptations – tout comme il l'est des itinéraires sylvicoles ou du choix des essences favorisées dans les peuplements. Le cas du Douglas est emblématique de l'immixtion du débat sur la naturalité dans la gestion des socio-écosystèmes forestiers. À l'instar des discussions sur l'adaptation aux changements climatiques, les arguments techniques sont principalement tournés vers la défense des propos soutenus. Dans l'exemple qui suit, un propriétaire privé, dont les parcelles sont situées dans un PNR attaché à la naturalité des peuplements, reformule à sa manière l'indigénat du Douglas : « *Moi je plantais toujours [du Douglas], normalement j'aurais dû aller en prison, parce que... Non, mais le parc régional était contre. Ils étaient systématiquement contre. Bon, moi j'ai eu une fois une réunion au parc et j'ai défendu ma thèse. Premièrement il faut savoir que le douglas existait avant la dernière glaciation... Donc, dans les, dans les, dans les alluvions anciennes du Rhin, on retrouve des pollens de douglas, donc le douglas existait.* »

Cela étant dit, d'où vient alors que les forestiers n'assument pas plus clairement la priorité accordée à la production de bois ? Deux réponses, non exclusives, permettent à mes yeux d'expliquer pourquoi tant de circonvolutions techniques cachent la prépondérance de la production de bois.

Il s'agit pour l'une de l'appréhension du regard du public porté sur les coupes destinées à la production de bois (DREAL Île-de-France 2019). À de nombreuses reprises, les gestionnaires forestiers interviewés témoignaient de la crainte des critiques des usagers des forêts (promeneurs et acheteurs de bois au premier plan). Pour eux, cette vision négative des récoltes forestières résulte de la méconnaissance de la gestion forestière, comme le présentait cette responsable municipale d'une métropole possédant des forêts : « *Il y a énormément de gens qui fréquentent nos forêts et on s'est rendus compte que les gens allaient toujours au même endroit, qu'ils utilisaient la forêt sans vraiment la connaître et qu'il y avait des conflits d'usage, qu'il y a toujours aujourd'hui. Et dès que les gens voient une coupe rase, ça hurle quoi.* »

Discussion

L'autre réponse est la difficulté à assumer la remise en cause de la multifonctionnalité (Buttoud 2007), leitmotiv de la foresterie française. Pourtant, dans les rares entretiens où elles ont été abordées, les fonctions de stockage de carbone, d'épuration de l'eau, de contribution aux patrimoines esthétique ou culturel étaient principalement scrutées à la lumière des bénéfices ou des obstacles qu'elles apportent à la production de bois.

Ces deux réponses sont plus longuement abordées dans les propositions de la partie 2, qui poursuit la discussion.

L'adaptation aux dérèglements climatiques s'applique majoritairement à maintenir la production de bois. Dans les discours sur l'efficacité relative des différentes mesures d'adaptation, les incertitudes techniques et climatiques sont maniées au profit de ce service écosystémique.

2. Trois propositions pour diversifier l'adaptation de la gestion forestière aux dérèglements climatiques

Un dogme est l'oiseleur guettant dans la forêt,
Qui, parce qu'il a pris un passereau, croirait
Avoir tous les oiseaux du ciel bleu dans sa cage.

V. Hugo, dans *La fin de Satan*

Cette partie de la discussion présente trois propositions pour diversifier les adaptations aux changements climatiques au-delà des seuls aspects précédemment décrits. Elle s'inspire de propositions et remarques recueillies tout au long de la thèse. Ainsi, bien que la majeure partie de leurs propos ait porté sur la technique et la production de bois, les forestiers privés et publics rencontrés ont aussi fait montre de recul, et ont puisé dans leur expérience pour discourir de considérations sociales et économiques.

2.1. Distinguer gestion sylvicole et gestion forestière

Qu'il s'agisse des projets de recherche sur la foresterie (chapitre 2, , page 83) ou des entretiens menés pour les premières enquêtes de terrain (chapitre 1, page 61), l'imaginaire des forestiers interviewés est fortement imprégné des questions techniques de production de bois. À la question de savoir quelle était sa vision de l'avenir, un responsable d'unité territoriale de l'ONF répondait ainsi : « *Aujourd'hui ce qui se développe c'est la télédétection ou le Lidar et compagnie. Pour le moment c'est encore un peu de la science-fiction mais pas tant que cela. Ne serait-ce qu'aujourd'hui on arrive à croiser par exemple des modèles numériques de terrains avec des modèles numériques de surfaces et en faisant la différence entre les deux vous avez la hauteur de votre végétation. Or la hauteur c'est fondamental pour nous, pour le déclenchement d'une première éclaircie.* »

Il semble donc essentiel de désincarcérer l'imaginaire forestier de la seule production de bois, afin que l'ACC prenne l'ensemble des services écosystémiques forestiers en considération (chapitre 3, page 105). Dans une vision anthropocentrique élargie – c'est-à-dire autant pour les générations humaines actuelles et futures que pour les non-humains – il est crucial de ne pas faire abstraction des autres fonctions de la forêt comme l'épuration de l'eau (Ellison et al. 2017), le maintien d'habitats naturels variés (e.g., Naidoo et Ricketts 2006), ou la fonction de régulation thermique (Perrin et al. 2017).

Il existe plusieurs approches pour remettre ces BSE délaissés au centre de la gestion forestière. Des exemples économiques en ont été dépeints dans les chapitres 3 et 4. Nous reviendrons ici sur deux autres moyens pour penser l'adaptation aux changements climatiques sous l'angle de la gestion forestière (multifonctionnelle), et pas seulement sylvicole (pour la production de bois).

Le premier moyen est déjà largement mis en œuvre. Il s'agit d'ouvrir la réflexion aux projets venant de contextes régionaux ou nationaux différents. En prospectant sur les initiatives menées ailleurs, il est possible de mettre au jour des adaptations directes (techniques pour la plupart) ou indirectes (socio-économiques, à l'instar de la diversification des revenus de la gestion forestière). Le projet « Spurring INnovations for forest eCosystem sERvices in Europe » (SINCERE & European Forest Institute 2018) est justement une plateforme européenne recensant ces initiatives. À titre d'exemple³¹, une des publications de ce programme détaille le déploiement de politiques publiques propres aux produits forestiers non ligneux dans divers pays de l'Union Européenne (Wolfslehner et al. 2019).

Le second moyen est de s'inspirer des retours d'expérience de l'agriculture, autre exemple de gestion d'un socio-écosystème soumis à des impératifs productifs, mais tendant de plus en plus à la multifonctionnalité (Barbier & Goulet 2013). Cela permettrait aussi d'éviter les écueils décrits par un propriétaire privé du sud de la France : « *On refait les mêmes erreurs que l'agriculture dans les années 1960, on industrialise, on mécanise, on met du chimique maintenant, on refait les mêmes conneries* ».

Assez logiquement, une des analogies entre les ACC des gestionnaires des socio-écosystèmes forestiers ou agricoles est l'approche techniciste (Seguin 2003). Cela étant dit, il faut reconnaître qu'à l'inverse des milieux forestiers, les solutions d'ACC imaginées dans les milieux agricoles français font un peu plus appel à des réponses socio-économiques. Ces réponses sont conçues au niveau des types de cultures (à l'instar de la viticulture, Lereboullet, Beltrando, et Bardsley 2013), de la législation (Ahmadi et al. 2013) ou encore des filières (comme dans le cas de la production laitière alpine, Sérès 2010). Bien que les pas de temps de l'agriculture soient plus courts qu'en forêt,

³¹ Un autre exemple prend pour cas d'étude le développement des enterrements en forêt suisse, ouvrant la réflexion de l'usage des forêts à de nouveaux services écosystémiques, spirituels cette fois-ci. S'il n'est pas directement lié à l'adaptation aux changements climatiques en forêt, cet exemple souligne la nécessité d'envisager l'ensemble des possibilités d'évolution de la gestion forestière pour son adaptation climatique.

des initiatives s'inspirant des activités agricoles commencent à essaimer dans la gestion forestière (Figure 27). Elles offrent l'espoir d'y voir des moyens socio-économiques supplémentaires pour faire face aux conséquences des changements climatiques³². L'agroforesterie propose aussi des modes de production différents de bois, dont les vertus techniques (en complément de l'agriculture), paysagères, mais aussi pour le stockage de carbone sont une source complémentaire de retours d'expérience pour la foresterie (Michon 2015).

La multifonctionnalité, maître-mot de la gestion forestière, n'est pas traduite dans les adaptations aux changements climatiques qui se focalisent sur les services écosystémiques productifs. L'ouverture de l'adaptation aux fonctions forestières, essentielles, du stockage de carbone, de l'épuration de l'eau et du maintien des dynamiques écologiques peut bénéficier de multiples initiatives issues d'autres socio-écosystèmes, qu'ils soient forestiers (à l'étranger) ou agricoles.

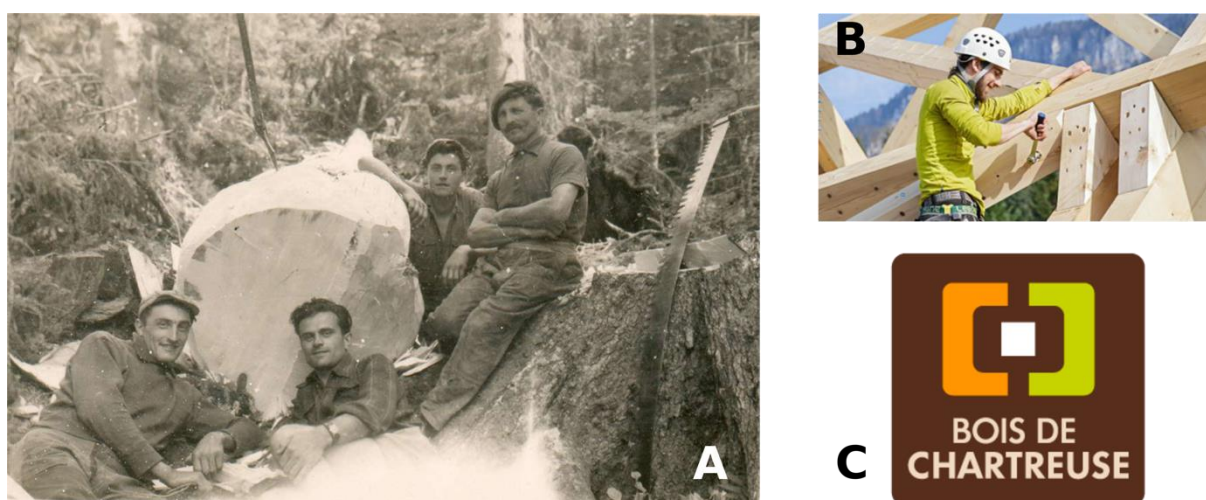


Figure 27. L'appellation d'origine contrôlée « Bois de Chartreuse ».

La récente création du premier label d'appellation d'origine contrôlée (AOC) forestier (INAO 2018) témoigne d'une inspiration agricole. Il sera intéressant de voir si l'accent mis sur la valeur ajoutée du bois, plutôt que sur les volumes produits, est un moyen efficace de relâcher la pression économique pesant sur la production de bois en volume. Cette différenciation a pu, durant une courte période, avoir lieu avec les labels PEFC et FSC, mais il est aujourd'hui plus pénalisant de ne pas les avoir, qu'avantageux de les respecter. Quoi qu'il en soit, ici encore le rôle d'un PNR – celui de Chartreuse – a été primordial dans cette innovation forestière. A : Une filière implantée de longue date dans le massif. B : Réalisation actuelle opérée avec l'AOC. C : Logo de l'AOC. Images tirées du site <http://bois-de-chartreuse.fr/>.

³² Il convient toutefois de ne pas extrapoler la compréhension des trajectoires agricoles à l'évolution de la gestion forestière. Rien ne permet ainsi de présumer que la foresterie française suivra la tendance agricole. Celle-ci a surtout conduit au regroupement foncier et à l'émergence d'une agriculture de firme, aux côtés d'une agriculture traditionnellement familiale (Purseigle 2012), ainsi qu'à l'essor de pratiques environnementalement plus responsables (Cardona 2012).

2.2. Faire de la rencontre avec les non-forestiers une chance, non pas un risque

Après la distinction entre gestions forestière et sylvicole, voici la deuxième proposition pour développer des ACC qui ne soient pas que techniques. Il est ici question de l'engagement du dialogue sur l'ACC avec les milieux non forestiers – la « société » dans son ensemble. La section qui suit reprend des recommandations pour un dialogue apaisé glanées durant les terrains de la thèse et les conférences auxquelles j'ai pu assister, et les contextualise dans le cadre de la décision d'une gestion forestière adaptative.

Sur chacun des terrains de la thèse, des forestiers évoquaient des crispations dans les interactions avec les « non-initiés », confirmant la forme de défiance relatée dans l'introduction (section 1.4 de l'introduction), à l'instar de ce membre du CRPF : *« Je pense que c'est, ce qui est en train de monter c'est la pression du grand public sur les forêts. Aujourd'hui il reste un peu cantonné aux forêts qui sont très parcourues, mais j'ai l'impression qu'il y aura de plus en plus une pression sur les forêts pour les sanctuariser, ne plus rien y faire, nous traiter de méchants coupeurs de bois ».*

Le désarroi des gestionnaires forestiers est compréhensible. Ils pensaient avoir réussi, grâce à la labellisation écologique (PEFC, FSC), à faire concorder leurs pratiques de récolte et l'écologisation des modes de consommation. Pourtant, la communication qui en est faite est vulnérable au regard des consommateurs finaux : *« On n'a peut-être pas été bon au niveau communication. On communique quand y'a une grosse connerie qu'a été faite, les journalistes s'emparent du truc et puis voilà quoi. Cash investigation sur PEFC c'était ça quoi, c'est du sensationnel »* (dixit un autre agent du CRPF, dans le Grand Est). Ce désarroi se double d'une seconde incompréhension : en parallèle des difficultés de communication sur la labellisation, les milieux forestiers doivent faire face à la manifeste dissonance cognitive des consommateurs. Un salarié de l'ONF rapportait ainsi que *« Les gens veulent mettre du bois chez eux parce que le béton c'est nul, mais ils ne se demandent pas d'où vient le bois. C'est-à-dire qu'ils veulent du bois mais ils ne sont pas d'accord pour qu'on en coupe quoi... ».*

Bien que ces remarques ne soient pas spécifiques aux changements climatiques, tout porte à croire que les adaptations préconisées par les forestiers en étendent la portée. En effet, les ACC vont dans le sens d'une accentuation des interventions techniques, à destination de la production de bois, peu plébiscitées par des consommateurs finaux peu au fait de la complexité de la sylviculture (Dobré et al. 2006). Fidèles à leur sens de la planification sur le temps long, les milieux forestiers préparent déjà le terrain de la communication. Récemment, ils ont lancé une campagne

trisannuelle de communication « Pour moi, c'est le bois » avec le soutien de l'État (Bardon et Dereix 2017).

Il y a lieu, ici, de s'interroger sur le parti pris communicationnel d'une telle démarche. Face à des consommateurs exigeants, opter pour la diffusion unidirectionnelle d'un message, plutôt que sur l'élaboration d'un réel échange, accroît le risque d'échouer à réduire la dissonance cognitive décrite ci-dessus. Un écart de taille distingue une volonté de communiquer à la société d'une ambition de communiquer *avec* la société. C'est la première posture qui prévaut et a le plus fréquemment été perçue dans les discours, même si la transition vers la deuxième posture est amorcée, comme ici dans les Landes : « *C'est très important, expliquer ce que l'on fait, à travers je veux dire des sites internet, des réseaux sociaux, de l'affichage sur le terrain, des réunions avec des associations, avec les maires, etc. Ça demande... On n'est plus les seuls maîtres à bord, et beaucoup de monde s'intéresse à la forêt.* ». Plus loin du terrain, mais toujours dans les milieux forestiers, cette posture de communication unidirectionnelle a conduit à manquer une occasion de nouer un dialogue, cette fois avec le lectorat de l'ouvrage *La vie secrète des arbres* (Wohlleben 2017). Le livre comporte des amalgames, notamment lors d'une présentation partielle et partielle de travaux d'écologie scientifique ; pourtant, son succès a eu le mérite d'attirer l'attention sur la gestion forestière. Et voilà que la réponse que l'académie d'agriculture et des forêts a apporté à ce phénomène d'édition insiste sur le besoin de faire appel aux « vrais experts », sans vraiment parler de mettre en place de débats contradictoires (Section « Forêts et filière bois » de l'Académie d'agriculture de France, 2017). L'occasion était pourtant belle de toucher plus directement les personnes intéressées par la thématique (ou du moins les 3,5 millions de propriétaires privés français !), en proposant des instances d'échanges à double sens.

A contrario, des initiatives territoriales montrent que l'importance de tels dialogues à double sens est prise au sérieux par de plus en plus de forestiers (chapitre 3, page 105). Par exemple, des projections-débats du film « L'intelligence des arbres » ont eu lieu un peu partout en France, organisées par des associations environnementales mais aussi des instances forestières et scientifiques (e.g., centre Agroparistech de Nancy, Muséum National d'Histoire Naturelle). Plus encore, prenant le taureau par les cornes, l'ONF a même été jusqu'à opter pour une sylviculture irrégulière sur l'ensemble des forêts franciliennes, à forte composante récréative (Gayet 2017). Le but est, entre autres, de prévenir toute plainte relative à des coupes rases, une stratégie adoptée pour des raisons similaires dans certaines parties de l'Allemagne (Bauhus et al. 2017). Ces deux exemples sont caractéristiques du besoin d'une « ingénierie culturelle »³³ dans la conception et la mise en place d'ACC qui aillent au-delà du seul BSE de production de bois.

³³ « *Il s'agit d'un savoir-faire permettant d'articuler une analyse scientifiquement et techniquement pertinente avec la prise en compte de la réalité psychologique, sociale et culturelle des acteurs concernés, pour identifier des processus de prise de décision et de mise en oeuvre de ces décisions permettant une action atteignant effectivement les objectifs identifiés.* » (Barthod 2007).

S'ils sont des virtuoses de la technique, les gestionnaires forestiers ne sont pas à l'aise dans le dialogue avec les bénéficiaires des services écosystémiques forestiers (consommateurs finaux, promeneurs, etc.). Le risque est grand, à ne pas inclure ces derniers dans les réflexions sur l'adaptation aux changements climatiques, d'augmenter la pression sociale sur des évolutions techniques forestières incomprises du grand public, ou sur de nouvelles organisations sociales ou économiques des liens unissant forestiers et non-forestiers (e.g., PSE).

2.3. Accompagner la gestion adaptative, au risque du politique

Opter pour une gestion forestière la plus adaptative possible : c'est l'objet de cette troisième et dernière proposition. Pour rappel, la gestion adaptative peut être définie comme un « *processus systématique d'amélioration des pratiques et des politiques de gestion fondé sur un apprentissage basé sur la connaissance des résultats de stratégies ayant préalablement été mises en œuvre* » (Pahl-Wostl et al. 2007). Dans l'idée de se garder la latitude d'intervenir du mieux possible face aux aléas climatiques à venir, la gestion adaptative insiste sur l'idée de fermer le moins possible l'éventail des trajectoires écologiques des socio-écosystèmes forestiers. En d'autres termes, il y a lieu ici encore de « ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier », par exemple en actualisant les objectifs de volumes à prélever selon les variations de productivité, ou en révisant régulièrement les quotas de prélèvements d'ongulés pour mieux suivre les évolutions démographiques des cheptels.

Pour les forestiers, et plus généralement les gestionnaires d'espaces naturels, la gestion adaptative est néanmoins plus simple à définir qu'à mettre en œuvre, comme l'atteste l'annexe 1 (Bertrand & Fouqueray 2017). Il est donc d'autant plus important d'accompagner du mieux possible les gestionnaires forestiers dans son déploiement. Les considérations qui suivent sont inspirées par des conversations échangées avec des gestionnaires d'espaces naturels et des forestiers, durant les ateliers du chapitre 4 (page 127). La mise en place d'une gestion forestière adaptative nécessite de porter certaines thématiques à un niveau politique, pour défendre l'importance du temps long concernant trois points :

- la gestion sylvo-cynégétique
- le financement pérenne des établissements et agences publiques

- la traduction dans les politiques publiques des concepts de « solutions fondées sur la nature » et « d'adaptation basée sur les écosystèmes ».

« Je pense vraiment qu'on a un problème absolument majeur à régler au niveau du gibier. Si on n'est pas capables de faire ça, à certains endroits, je suis prêt à tout abandonner. Je pense pas qu'on ait pris la mesure de ce qui est en train de se passer au niveau de la forêt, au niveau des gestionnaires. [...] Moi je fais travailler ici 15 personnes, je pourrais très bien dire y'en a marre. Je demande à des Polonais de venir me raser tous les ans 10 ha, ils prennent le bois et puis après advienne que pourra de cette forêt. » Cette citation d'un expert forestier privé (chapitre 1, page 61) résume à elle seule l'impuissance des forestiers à restaurer un équilibre sylvo-cynégétique dans de nombreux massifs. La difficulté à gérer les fortes populations de gibier en forêt a été une constante de tous les terrains, que ce soit en entretiens (chapitres 1 et 3) ou dans les questionnaires accompagnant les ateliers *Foster Forest* (chapitre 4, page 127). Sans corrélation directe avec les changements climatiques, les dégâts de gibier fragilisent pourtant les forêts, aggravant les perturbations climatiques et menaçant la réussite de stratégies d'ACC. En d'autres termes, rétablir l'équilibre sylvo-cynégétique est une mesure dont les conséquences, dénuées d'incertitudes, sont positives en ce qui regarde la résilience des forêts aux changements climatiques.

Les mécanismes expliquant la forte prévalence d'ongulés sauvages en forêt ont été présentés dans l'introduction (section 1.2 de l'introduction). Leur résolution ne passera pas par une généralisation des solutions techniques (engrillagement ou protection individuelle des plants), trop coûteuses à mettre en place systématiquement. La question de la décision et de l'application des plans de chasse est avant tout politique (Alphandéry & Fortier 2007; Traïni 2000), et comme le notifie le même expert forestier : *« Je crois tout simplement que les chasseurs sont plus doués en matière de communication et en matière de pouvoir que ce peuvent l'être les forestiers. Ils sont dans leurs forêts, à travailler dans leurs forêts, et ils passent pas leur temps à pleurnicher dans les ministères, donc voilà. Et les chasseurs sont plutôt des gens qui ont un petit peu d'argent, donc ils sont influents, et puis ils sont meilleurs communicants, c'est tout ! Donc je crois qu'il faut pas se voiler la face. »*

Malgré cela, des leviers d'actions existent pour les forestiers (Ammer et al. 2010). D'un point de vue légal, ces derniers peuvent soutenir une bascule dans la définition des plans de chasse, pour que les quotas ne dépendent plus de comptages majoritairement menés par les fédérations de chasseurs (qui sont ainsi juges et parties), mais dépendent des dégâts observés sur les arbres, à l'instar des frottages, abroutissements ou écorçages – par ailleurs moins sujets à controverses

méthodologiques³⁴. Dans la même veine, il me semblerait possible de militer pour que la détermination des saisons de chasse ne repose pas que sur les variations démographiques des populations de chevreuils, cervidés ou sangliers, mais intègre aussi les changements phénologiques des arbres. Autrement dit, il y aurait là lieu de débiter la chasse dès le débouillage ou le développement de la régénération, pour mieux protéger la dynamique forestière. Une telle proposition n'avance cependant pas de solutions pour les éventuels remous qu'elle créerait dans chez les opposants à la chasse...

Du point de vue de la sensibilisation, il pourrait être possible d'inclure les problématiques forestières dans les formations cynégétiques, qui en sont pour le moment absentes (Figure 28). Les forestiers pourraient aussi communiquer les coûts de la chasse pour la gestion forestière aux politiques et au « grand public », voire même faire la promotion des grands prédateurs comme solution alternative, dans une forme de « diplomatie » avec le vivant non-humain (chapitre 1, page 61 ; Morizot 2016) ...

Peut-être verra-t-on en dernier recours émerger des collectifs de chasse composés de propriétaires forestiers et de partisans d'une gestion adaptative des milieux forestiers ? Cette idée, soulevée à la légère lors d'un atelier *Foster Forest*, est peut être plus proche de la réalité qu'on ne le croit.

³⁴ Les procédés de comptage des populations de grand gibier ont connu des avancées techniques et statistiques, comme le recours aux données satellitaires de productivité des végétaux (Pettorelli et al. 2006) ou à l'analyse de l'ADN environnemental (Bohmann et al. 2014). Cela étant, ils sont encore sujets à de fortes incertitudes (ONF, communication personnelle ; Douhard et al. 2013).

LE PERMIS DE CHASSER Accueil Entraînement Infos pratiques Mon profil

QCM thématique

Question 4 / 160

Connaissance de la faune sauvage

Cet animal est généralement dans un terrier durant le jour :

A en toutes saisons

B en hiver uniquement

C jamais

✓ Valider ma réponse ▶ Question suivante

Figure 28. L'examen du permis de chasse, une occasion de sensibiliser les chasseurs à la gestion forestière.

À l'heure actuelle, les entraînements proposés en ligne portent sur cinq thèmes : armes et munitions, connaissance de la chasse, connaissance de la faune, lois et règlements, questions éliminatoires. Les forestiers pourraient tenter d'inclure des questions relatives à la gestion forestière dans ces exercices. Image : capture d'écran du site <http://www.reussite-permisdechasser.com>.

Concernant le financement des emplois des CRPF et de l'ONF, les forestiers pourraient bénéficier d'un dialogue renouvelé avec la société pour encourager les pouvoirs publics à assurer un financement pérenne de ces structures. Un financement mixte de ces emplois-support pourrait être envisagé, dans des démarches similaires à celles présentées dans le chapitre 3, mais l'hypothèse est faible d'un engagement au long cours de la part de politiques élus pour un mandat de quelques années seulement. Pourtant, sans ancrage territorial à long terme des forestiers, il risque d'être impossible d'assurer la continuité dans le temps de stratégies d'ACC fondée sur une connaissance du terrain acquise au fil des années (Duncker et al. 2012). Un conseiller d'une Chambre d'Agriculture en rendait compte en ces termes : « Ah oui, j'aime mon métier donc je suis passionné par ça ! Maintenant je suis en CDD, si seulement j'avais un CDI, parce que ça c'est vraiment du long-terme... Bon, je vois les collègues qui sont là depuis 10-12 ans, voire 15 ans sur le secteur, ce qu'ils ont fait ! Là par contre, là si vous en rencontrez, ce sera plus la même chose ! Ils gèrent des gens, et puis ils se sont fait un nom, y'a des marchands de bois, même des professionnels de la filière, qui viennent leur demander conseil. Parce qu'ils savent que le technicien de chambre d'agriculture des PDM [Plans de Développement de Massif] les conseilleront toujours au mieux pour leurs forêts. »

La tendance actuelle est pourtant à la diminution du soutien de l'État aux instances publiques d'appui à la gestion forestière. Pour la forêt publique, la très grande tension sur les conditions de travail à l'ONF a déjà donné lieu à une grande marche reliant différents cortèges partis de plusieurs massifs forestiers français et convergeant dans la forêt de Tronçais (Collectif 2018). Quant à la forêt privée, les conseillers forestiers publics des CRPF et Chambres d'Agriculture ont eux aussi des inquiétudes, suite au projet gouvernemental de réduire une de leurs sources de financement (la taxe additionnelle sur le foncier non bâti (Le Maire & Darmanin 2019)).

Le troisième levier d'action politique sur lequel les forestiers peuvent intervenir devrait leur être plus familier, puisqu'il s'agit d'un concept scientifique traduit en message politique : les « solutions fondées sur la nature » (SFN), ou leur variante propre aux changements climatiques, les « adaptations basées sur les écosystèmes ». L'intérêt de ces deux concepts est principalement politique, en doublant l'anthropocentrisme des BSE à des considérations environnementales (Eggermont et al. 2015; Maes & Jacobs 2017; Munroe et al. 2012). Ainsi, la Commission Européenne a défini les SFN comme des mesures durables qui visent simultanément à atteindre des objectifs environnementaux, sociétaux et économique, et qui aident à maintenir et améliorer le capital naturel (Naumann et al. 2011; European Commission 2015). La gestion forestière proche de la nature, du type de ProSilva, pourrait en être une illustration (Munroe et al. 2012; Bauhus et al. 2017).

Promouvoir la gestion forestière proche de la nature a des attraits à la fois pour la qualité et la productivité en bois, pour le maintien d'habitats naturels (arbres âgés, par exemple), et pour la résilience à certains aléas climatiques (tempêtes, parasites, mais pas forcément pour les modifications phénologiques, cf. note 37). Renforcer la formation des propriétaires privés sur ce type de gestion serait un changement marqué, par exemple lors des formations FOGEFOR³⁵ (Marty 2000). Un expert forestier landais dressait à leur endroit un constat sévère, proclamant que nombre de ces derniers manquaient de ce qu'il appelait « *des neurones, des compétences, des gens qui ont des yeux, qui savent voir une forêt, voir un arbre, et puis moins de fioul, moins de mécanique... Je dis pas qu'il en faut pas, mais savoir l'utiliser quoi. Là, si vous voulez, avec le soc, pourquoi on labourez ? Parce qu'on a des charrues. Voilà.* » Pour les convaincus de la gestion adaptative, des SFN ou de la sylviculture proche de la

³⁵ La formation FOGEFOR est proposée et animée par les CRPF aux propriétaires privés désireux de monter en compétence sur la gestion de leurs biens forestiers.

nature, il faudra faire preuve de retenue et d'humilité pour co-construire la gestion des socio-écosystèmes forestiers (Olsson et al. 2004).

Les jeux sérieux sont idoines pour aborder paisiblement la question des SFN et tester sans risque de nouvelles initiatives forestières (Redpath et al. 2018; Garcia 2019), ce que nous avons tenté de mettre en place dans le chapitre 4 en tirant profit des retours d'expérience de la communauté de la modélisation d'accompagnement (Barreteau et al. 2003). Les jeux peuvent aussi ouvrir la discussion sur les SFN, souligner les limitations et incertitudes liées à la sylviculture proche de la nature dans des socio-écosystèmes aussi complexes que les forêts gérées (Bauhus et al. 2017). Surtout, il importera aux forestiers de ne pas ériger les SFN en un nouveau dogme, mais de bien mesurer leurs propos. La sylviculture proche de la nature, par exemple, ne doit pas être vue comme un seul outil de conservation des dynamiques écologiques en forêt, mais bien comme l'accompagnement durable de la production de bois. La clef, comme souvent, sera de recourir à des expérimentations pour éviter toute généralisation outrancière de théories écologiques (Figure 29). L'appui des réseaux de gestionnaires d'espaces naturels – qui ne sont pas sans connaître la notion – sera pour cela essentiel (annexe 4).



Figure 29. La place des perturbations naturelles dans les dynamiques écologiques des forêts, une inconnue bien connue.

En forêt, les dérèglements climatiques concernent autant des processus écologiques au long cours (phénologie, vitesse de croissance des arbres, ...) que des perturbations plus ponctuelles (sécheresses, attaques parasitaires, incendies, ...). L'importance relative de ces deux types de changements climatiques sur le futur des forêts métropolitaines est encore difficile à évaluer, tout comme les réponses à y apporter (Wohlgemuth et al. 2002; Roux & Dhôte 2017). À titre d'exemple, il est légitime de craindre que le passage à une sylviculture irrégulière, en maintenant un couvert forestier continu, fasse de l'ombre aux essences héliophiles comme les chênes (*Quercus sp.*). Seules des retours d'expériences pourront mettre en lumière si les trouées ouvertes par des perturbations naturelles suffiront au maintien de ces essences, ou s'il faudra intervenir par éclaircies pour encourager leur régénération. Pour en savoir plus sans attendre des décennies, il serait tout à fait imaginable de croiser les données de MétéoFrance et de l'Inventaire Forestier National plutôt que de mettre en place de longues expérimentations. Image : chêne tombé en forêt de Białowieża, Pologne (Erik de Haan).

La gestion forestière adaptative est un moyen pertinent de prendre en compte les incertitudes des dérèglements climatiques. Pour inciter à la prise en compte des processus écologiques dans ce type de gestion, les forestiers peuvent encourager le recours à des pratiques sylvicoles au double intérêt écologique et productif. Ces pratiques peuvent être qualifiées de « solutions fondées sur la nature », à l'instar de la gestion forestière dite « proche de la nature ». Toutefois, les blocages à leur mise en place relèvent du politique plutôt que du technique. Lever ces blocages nécessite de peser du mieux possible dans les arènes politiques territoriales et nationales, qu'il s'agisse des décisions cynégétiques, du financement des entités forestières territoriales ou de l'accompagnement des gestionnaires forestiers sur le terrain.

3. Trois propositions pour étendre l'écologie de la conservation à une écologie de la conversation

All that is attempted [by conservation] is to provide *conditions*, based on our best scientific insight and subject to the present-day social and economic restraints, which will make it possible for an evolutionary succession of organisms to continue, inevitably subject to the social consent of future generations.

O. Frankel et M. Soulé, dans *Conservation and Evolution* (1981)

La deuxième section de la discussion s'intéressait à l'adaptation aux changements climatiques sous l'angle de la diversification socio-économique de la gestion forestière. De manière complémentaire, cette troisième et dernière section envisage l'ACC à la lumière de l'écologie de la conservation.

Elle s'intéresse aux surfaces forestières gérées, mais aussi aux massifs relevant d'un régime spécial de protection environnementale. S'inspirant des postures des gestionnaires d'espaces naturels protégés rencontrés sur le terrain, les trois propositions qui suivent suggèrent de maintenir la conversation entre écologues scientifiques, gestionnaires de programmes de conservation et gestionnaires forestiers, à travers des échanges pragmatiques (régionalisation d'une trame verte, actualisation d'atlas communaux de la biodiversité, etc.) – sans rien céder cependant de l'exigence scientifique de l'écologie de la conservation ni de sa nature expérimentale.

3.1. L'adaptation aux changements climatiques, un laboratoire à ciel ouvert pour l'écologie forestière

La première proposition pour lier l'ACC et l'écologie de la conservation est le maintien d'espaces forestiers en libre évolution – un maintien actif, se différenciant du laisser-faire par défaut de nombreuses propriétés privées. Dans l'histoire de ce qui ne s'appelait pas encore l'écologie de la conservation, les premières stratégies consistaient déjà à établir des zones dénuées d'activités humaines, dans le principe de la « mise sous cloche » (Honnay 2004). Deux siècles plus tard, la prise en compte des forçages anthropiques ne fait plus débat pour l'écologie de la conservation, suite à la mise en avant de l'étourdissante pression de sélection imposée par les humains sur l'ensemble des espèces vivantes (Palumbi 2001). Un tel constat a entraîné la conceptualisation d'approches socio-écologiques, voire évo-centrées (Sarrazin & Lecomte 2016), de la conservation des milieux naturels (Fernández-Manjarrés et al. 2018). Malgré cela, il ne faut pas interpréter ces propos comme un encouragement à abandonner la protection « forte » d'espaces forestiers en libre évolution. Ces

derniers, au contraire, sont essentiels pour la compréhension socio-écologique de l'ACC, et ce pour trois raisons.

La première raison est scientifique et a trait à l'ensemble des espèces inféodées aux milieux forestiers : le maintien de zones en libre évolution contribue au brassage génétique (et pas seulement des arbres), à la connectivité des milieux naturels, au maintien de tailles de population dans lesquelles la sélection naturelle a lieu sans goulot d'étranglement génétique. Ces zones en libre évolution peuvent tout à fait être des espaces ayant subi de lourds dégâts, suite par exemple à une sécheresse ou une tempête, comme c'est le cas de la réserve biologique intégrale de la forêt domaniale de Chizé (Le Monde 2005).

La deuxième raison se place aussi sur le plan de la pure connaissance écologique, et fait abstraction de toute considération morale, éthique ou utilitariste de l'ACC. Il s'agit de voir les changements climatiques comme la plus grande expérience à ciel ouvert jamais réalisée pour l'étude des adaptations *biologiques* des écosystèmes. Pour la première fois de l'histoire de l'écologie en tant que science établie, le climat, jusqu'ici considéré comme une constante inébranlable, se met à changer. Quitte à en subir les conséquences, autant prendre le parti d'en apprendre le maximum sur les forêts non gérées. À titre personnel, il me paraît primordial de prendre en compte l'histoire récente de la gestion des forêts (Bergès & Dupouey 2017). Un cas d'étude possible est celui des trajectoires écologiques des nombreuses forêts « férales » (section 1.4 de l'introduction), dont l'assemblage et l'abondance spécifique ont été marqués par des décennies de gestion anthropique. Leur adaptation biologique (plasticité phénotypique, sélection génétique) différera-t-elle de celle de forêts dont la gestion ou la libre évolution est plus ancienne ? Telle est pour moi l'une des questions incontournables de l'écologie de la conservation, en particulier parce qu'il est impossible de prévoir l'importance future, en surface, des forêts férales³⁶. De fait, l'initiation ou l'arrêt de la gestion forestière peut répondre à des stimuli aussi abrupts qu'une évolution économique du coût de l'énergie, ou le développement d'une technologie baissant drastiquement des coûts d'intendance qui auraient jusqu'ici été rédhibitoires à la mise en gestion.

Enfin, la troisième raison soutenant la création et le maintien d'espaces forestiers en libre évolution est stratégique : les gestionnaires d'espaces naturels protégés peuvent, grâce à eux, étendre leur rayon d'action sur des zones gérées (Mermet 1992). Par exemple, une mesure territoriale d'adaptation aux changements climatiques peut « mordre » sur une zone protégée en libre évolution, à l'instar de la mise en place d'une AOC ou du changement d'un zonage forestier

³⁶ L'établissement actuel d'un réseau de placettes de jeunes accrus forestiers va de pair avec ces remarques. Ces jeunes peuplements forestiers sont souvent issus de la déprise agricole, et arborent certaines singularités. En particulier, ils sont plus probablement installés sur des sols anthropisés (par l'amendement ou le retournement) que les sols forestiers traditionnels.

de captage d'eau, en réponse à des sécheresses. De ce fait, les instances responsables de la gestion de la zone protégée seront impliquées dans la conception de l'ACC, et pourront y faire valoir leur point de vue. De même, ces instances bénéficieront, avec des zones en protection « forte », de points de comparaison alimentant et confortant leur expertise ; c'est en s'appuyant sur cette expérience qu'ils pourront avancer avec professionnalisme des points d'attention à intégrer dans des ACC en forêt gérée.

Maintenir des zones forestières en libre évolution est essentiel pour l'adaptation aux changements climatiques en forêt. D'un point de vue écologique, cela assure la pleine expression des processus évolutifs. D'un point de vue stratégique, les apprentissages tirés de ces zones sont utiles à la prise en compte des problématiques environnementales dans le reste des ACC, qu'elles soient techniques ou socio-économiques.

3.2. Relier le débat land-sharing/land-sparing à la multifonctionnalité

Les dérèglements climatiques s'ajoutent à la liste des changements globaux renouvelant des débats dans les milieux de la conservation, comme celui de l'opposition entre land-sharing et land-sparing (section 1.3 de l'introduction) (Fischer et al. 2009). De nouvelles initiatives viennent ranimer des arguments maintenant anciens, à l'instar de « Nature needs half » (Nature needs half 2009). La raison d'être de ce mouvement est exposée dans son manifeste : protéger et interconnecter en moyenne la moitié des surfaces terrestres et marines du globe. D'autres initiatives, comme la « conservation conviviale », tentent de dépasser une dichotomie factice opposant outils juridiques (zonages fonciers) et outils économiques (Büscher & Fletcher 2019) – en l'occurrence avec des projets sur la réintroduction des top-prédateurs.

Le débat land-sharing/land-sparing est d'importance dans la question des ACC en forêt française, du fait de l'importance culturelle et juridique de la multifonctionnalité de ces espaces. Certains forestiers rencontrés, enclins à gérer les forêts selon un mode « land-sparing », mobilisent ainsi des arguments climatiques pour conforter leur préférence. Cela s'applique à la nécessité de maintenir des zones de libre évolution, pour l'adaptation biologique, comme l'exprimait un chargé de mission biodiversité de la DREAL : « *Les arbres morts dans la forêt, donc pour nous c'est important, pour l'écosystème, pour la biodiversité, les champignons, les cavernicoles, mais ça rajoute une couche de danger pour les*

bûcherons ou ouvriers forestiers, donc comment faire ? C'est un frein réel ! Et donc comment le gérer ? Je pense que si on faisait des regroupements de forêt en libre évolution ça serait plus facile, il y aurait moins de dispersion d'arbres morts dans les parcelles. Si on avait des îlots parfaitement conservés, identifiés, c'est l'une des possibilités. » Cette remise en cause de la multifonctionnalité découle aussi des conséquences indirectes des changements climatiques. Il en va ainsi de la demande accrue en bois-énergie, répercussion de politiques d'atténuation qui doivent en même temps intégrer des considérations environnementales. Pour de nombreux gestionnaires forestiers, une multifonctionnalité « spatialisée » faciliterait la gestion. Un agent du CRPF témoignait ainsi : « *D'un côté [le ministère de] l'agriculture nous dit il faut mobiliser plus de bois et d'un autre l'environnement nous dit faut faire attention, faut faire ci, faut faire ça, faut faire des études, faut être d'accord avec ci, faut faire des enquêtes publiques, donc euh le frein il est là, administratif surtout* ». Un forestier de l'ONF, lui, rapportait la difficulté de mener une gestion multifonctionnelle aux instructions ministérielles contradictoires : « *Quand vous parlez avec des personnes de la DRAF, donc côté agriculture-forêt, et des gens de la DREAL, plutôt aménagement du territoire-Environnement, c'est tous les deux des fonctionnaires et ils vont avoir... Vous les mettez dans une réunion ils ne seront pas d'accord non plus, pourtant ils sont représentants de l'État.* ».

L'écologie de la conservation a ici un rôle à jouer pour que les forêts gérées intègrent pleinement les connaissances disponibles (et les simulations participatives et jeux de rôles en sont un moyen efficace, chapitre 4, page 127). À nouveau, la question est ici celle du décalage entre le temps long de l'évolution des arbres³⁷ et des pratiques forestières et celle du temps court des contraintes pesant sur les gestionnaires forestiers. Pourtant, de nombreux résultats scientifiques mettent en avant des pratiques forestières bénéfiques à la fois à la conservation des milieux naturels, et à la productivité à long terme des forêts (Brockerhoff et al. 2017; Jactel & Brockerhoff 2007). Dialoguer avec les forestiers pour marteler ce message est indispensable au moment où l'ACC commence lentement à faire évoluer les pratiques sylvicoles. Cela étant, et contrairement aux propos des sections précédentes, l'échelle d'action appropriée n'est pas forcément celle du terrain –de nombreux

³⁷ À première vue, il n'y a pas de décalage entre le temps long de l'évolution des arbres et le temps des changements climatiques. L'évolution biologique se joue en continu : pour la plupart des arbres matures, des graines sont produites chaque année. Parmi ces graines, certaines germeront les années froides, d'autres les années chaudes. À terme, le mélange de jeunes plants adaptés à ces conditions climatiques variables devrait assurer la régénération. Seulement, à long terme, la sélection climatique sur la germination n'augure en rien de la survie ou du succès reproducteur des individus adultes. De plus, les jeunes plants peuvent faire face aux lents changements de température et de précipitation des années durant, mais être confrontés soudainement à des effets seuil obérant leur développement physiologique. Ainsi, on s'attend à un avancement saisonnier de la levée de dormance des semences (avec des températures hivernales moyennes plus élevées, la germination est précoce) ; le risque pour les plants et les bourgeons est alors d'être exposés à des gels printaniers (Heide 1993). De même, les insectes prédateurs des plants et bourgeons peuvent bénéficier des nouvelles conditions climatiques et accentuer les dégâts causés aux arbres (Uelmen et al. 2016).

forestiers sont déjà conscients des intérêts d'une gestion à long terme, comme en témoigne l'existence du mouvement ProSilva (Figure 30). Il y a plutôt là intérêt à tenter de peser sur les échelons de décision de l'ONF (pour la forêt publique) et des mécanismes d'incitations fiscales ou de sanctions juridiques des divers ministères liés à la forêt. C'est, d'une certaine manière, ce que tentent depuis longtemps de faire les milieux associatifs environnementaux, nouvellement réunis dans une commission d'enquête citoyenne souhaitant aboutir à une proposition de loi restreignant des pratiques forestières de court terme (Delmas 2019).



Figure 30. Le logo du mouvement ProSilva, pour une gestion forestière au long cours.

Le site internet de l'association présente la démarche ProSilva de la manière suivante : « *La sylviculture Pro Silva est basée sur la gestion de la qualité et se veut respectueuse des processus naturels des écosystèmes forestiers, tout en étant économiquement viable. La stratégie retenue tend à l'optimisation de la production des peuplements forestiers d'une manière durable et rentable tout en intégrant les fonctions écologique et sociale qui leur sont assignées. Cette sylviculture d'arbre permet d'obtenir des revenus soutenus et réguliers tout en ayant des forêts multifonctionnelles, continues et stables.* » (ProSilva 2017).

Il importe que les écologues de la conservation transmettent du mieux possible les acquis et les incertitudes de leurs retours d'expériences. Le dialogue à maintenir ou établir doit autant concerner les gestionnaires forestiers publics et privés, sur le terrain, que les milieux militants aux stratégies plus politiques. Le but est d'être le plus transparent possible, tout en donnant le meilleur des informations disponibles sur les adaptations aux changements climatiques, afin qu'elles soient vraiment multifonctionnelles et tiennent compte de l'ensemble des BSE forestiers. La persistance de zones dédiées à une fonction unique de la forêt n'est pas à regretter, comme pour les espaces naturels protégés, certaines forêts périurbaines récréatives ou pour des massifs artificiellement créés

(e.g., les Landes). Néanmoins, pour une plus grande possibilité d'adaptations aux changements climatiques, il importe de maintenir le plus possible une gestion forestière intégrant spatialement des BSE productifs et de régulation.

3.3. Les multiples propriétés du droit de propriété

La troisième proposition pour une écologisation de l'adaptation aux changements climatiques porte plus particulièrement sur un outil juridique pertinent pour les forêts privées.

Le jeu *Foster Forest* a mis en avant la contribution des propriétaires privés aux réflexions sur l'adaptation (chapitre 4, page 127). Pourtant, il faut distinguer ici les personnes qui sont venues participer – la plupart syndicalistes forestiers, présents dans les instances forestières territoriales – et le grand nombre de propriétaires privés moins actifs dans leur gestion. Comme le signalait un propriétaire venu à l'une des simulations participatives : « *On a tous des amis qui ont des forêts et qui ne s'en occupent pas et ça nous hérissé le poil et ce n'est pas acceptable. Dans la conjoncture actuelle, on a tous une responsabilité de produire, de fixer le carbone, même les oiseaux, enfin il y a un truc qu'il faut faire. Et aujourd'hui ces gens ils ont un truc pour la chasse, OK, mais il n'y a pas que ça dans la vie.* »

La propriété privée forestière est primordiale, du fait de sa surface, pour l'adaptation aux changements climatiques de la foresterie française. Du point de vue des stratégies d'adaptation biologique aux changements climatiques, la myriade de parcelles peu ou pas gérées, véritable archipel génétique en libre évolution, représente ce laboratoire à ciel ouvert évoqué ci-dessus. Cela étant, la situation actuelle de la propriété privée soulève des questions sur son rôle dans l'ACC. Les interrogations sont relatives aux droits qu'octroient la propriété privée sur un bien (droits d'*usus*, d'*abusus* et de *fructus*)³⁸ (Villalba 2015; Parance & de Saint Victor 2014). Dans le cadre de l'ACC, cette définition de la propriété privée forestière est essentielle, car elle centre l'attention sur le propriétaire, dont les échelles spatio-temporelles d'action sont en décalage avec celles des changements climatiques (Figure 31).

³⁸ Ces droits sont définis pour les biens mobiliers et immobiliers par le Code Civil : « *La propriété est le droit de jouir et disposer des choses de la manière la plus absolue, pourvu qu'on n'en fasse pas un usage prohibé par les lois ou par les règlements.* » (Légifrance 1804).

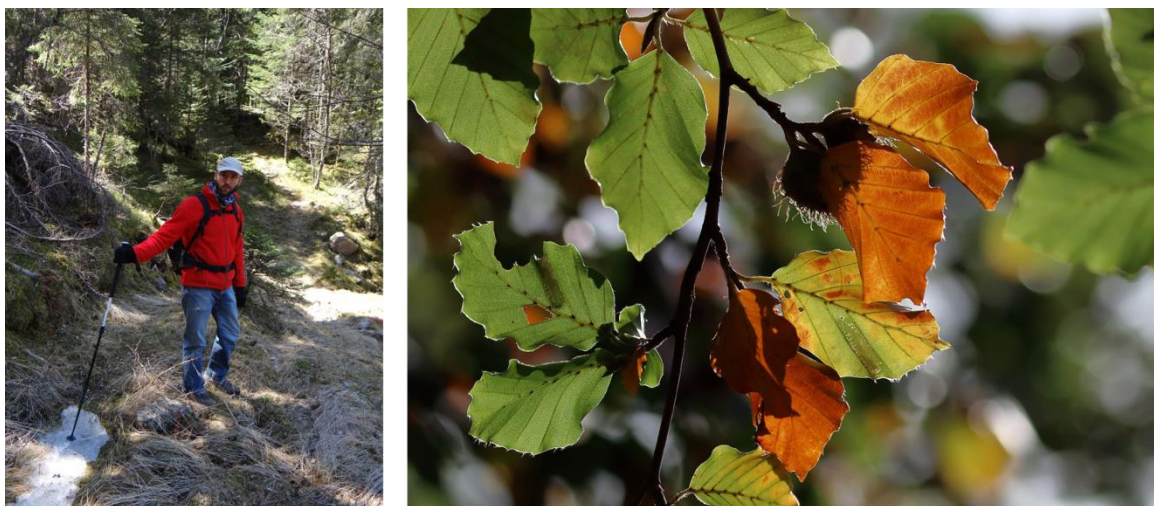


Figure 31. De la différence des cycles de vie entre humains et arbres.

Les échelles spatiales et temporelles de la gestion forestière, en forêt privée, sont bien inférieures à celles des changements climatiques affectant les forêts. Une sécheresse, par exemple, occasionnera un déstockage massif de bois à l'échelle régionale, voire transfrontalière (voir aussi la Figure 26) : un propriétaire privé isolé n'aura pas prise sur l'accroissement des volumes mis sur le marché, et sera démuné face à la chute des cours du bois engendrée. Le même constat d'impuissance peut être établi pour le décalage temporel entre temps de la gestion de la propriété privée et cycles forestiers. A : M. Thiery, propriétaire en forêt, qui a eu l'amabilité de me présenter son PSG. Pour les propriétaires privés, un plan simple de gestion court sur une à deux décennies. B : Faines d'un hêtre. Un hêtre commencera seulement à fructifier vers ses 40 ans.

Comment, dès lors, concevoir des adaptations aux changements climatiques à des échelles spatio-temporelles pertinentes, quand 75% des forêts sont sous un régime foncier conduisant le plus souvent à une gestion à petite échelle et à court terme ?

Comme l'attestent les chapitres 3 et 4, les paiements pour services écosystémiques (PSE) sont une des réponses les plus couramment avancées. Si l'intérêt d'une telle approche a souvent été avancé dans les études menées sur le terrain (i.e., fusionner l'intérêt du propriétaire et l'intérêt général), il n'en pas été de même pour les répercussions des PSE. Un risque souvent décrié est celui d'une marchandisation du vivant (commodification, Farley & Costanza 2010). À propos de ce risque, le président de la CDC Biodiversité déclarait, lors du colloque « Économie des Solutions Fondées sur la Nature », qu'il « *faut avoir des arguments qui ne soient pas que moraux* », afin de disposer d'une dialectique à opposer à d'éventuels décideurs aux penchants purement économiques. L'argument est recevable, mais ne doit pas cacher de forts enjeux moraux et écologiques des PSE (Farley & Costanza 2010; Redford & Adams 2009) :

- risque de récompenser les gestionnaires forestiers aux pratiques les moins soutenables ; à rétribuer l'écologisation des pratiques de gestion, les forestiers à la plus grande marge de progrès sont aussi ceux qui bénéficieront le plus des PSE
- risque d'injustice sociale par la socialisation des pertes et la privatisation des profits

Discussion

- risque de substituer à l'action publique seulement des mécanismes de marché, comme le craignait un forestier durant une simulation participative dans les Pyrénées : « *Les capacités d'investissement notamment dans les collectivités territoriales diminuent comme dans la sphère publique* »
- risque de ne plus distinguer espèces natives et exogènes (puisque rien n'exclut qu'elles puissent toutes fournir des BSE similaires, d'un point de vue fonctionnel).

Or, PSE mis à part, d'autres outils existent pour faire dialoguer les échelles d'actions des propriétaires privés avec les échelles d'actions pour l'ACC. La proposition qui suit, portant sur les obligations réelles environnementales (ORE), a été abordée durant un atelier *Foster Forest* mené dans le Perche. S'il n'a pas autant été traité que les PSE, c'est peut-être parce qu'il interroge la construction, fondamentale pour notre société, du droit de propriété.

Avant d'introduire les ORE, il importe d'abord de présenter comment la propriété forestière (publique et privée) peut être vue sous l'angle de la gestion de biens publics ou de biens communs, deux formes fonctionnant pour le coup à de larges échelles spatio-temporelles.

La gestion de la forêt comme un bien public est illustrée par les activités de l'ONF en forêt domaniale ; même si ces forêts relèvent du domaine privé de l'État, il est possible de voir en celles-ci un bien public (pour des questions de non-rivalité et de non-excluabilité de certains de leurs usages, comme le stockage de carbone) (Kaul 2006; Ostrom 1990). Avec les forêts domaniales, tous les services écosystémiques sont gérés au nom de l'intérêt public ; la vente du bois produit étant censée équilibrer la production de BSE de régulation, culturels ou récréatifs. Dans les propriétés communales aussi, la gestion des forêts peut être rapportée à celle d'un bien public, parfois en précisant les BSE « cibles ». Ainsi, pour le BSE de production de bois de chauffage, on observe que le droit d'affouage persiste dans certaines communes forestières (Fortier 1991) ; pour le BSE de régulation de la qualité de l'eau, la gestion forestière dépend de pratiques décidées par des syndicats intercommunaux (Bouleau et al. 2016). La propriété étant incessible, et sur de grandes surfaces, il est possible de mettre en place des stratégies d'ACC au long cours (comme le déploiement d'îlots de vieux bois pour compenser les effets d'un raccourcissement des cycles sylvicoles).

Pour voir la gestion de la forêt sous l'angle des biens communs, il est nécessaire de préciser de quels services écosystémiques il est question. Dans le cas de la gestion coopérative forestière, il s'agit de la production de bois (Ranville 2018). Pour la filière forêt-bois landaise, c'est la défense

forestière contre l'incendie (DFCI) qui peut faire l'objet d'une telle analyse. Les propriétaires forestiers de la Gironde, des Landes, du Lot-et-Garonne et de la Dordogne financent directement une partie du dispositif grâce à une taxe à l'hectare. Les fonds récoltés ne sont pas illimités, et leur utilisation est rivale (en dépenser une partie ici enlèvera aux autres adhérents du système la possibilité d'en bénéficier là). De plus, si certains propriétaires forestiers jouent les « passagers clandestins » en se déroband au paiement de la contribution, il n'est pas possible de les exclure de la zone spatiale bénéficiant de la DFCI. Le caractère obligatoire de cette taxe peut être vu comme un moyen d'éviter un trop grand nombre de « passagers clandestins » à cette institution collectivement mise en place (Janssen et al. 2010). Ici encore, gérer un bien commun à de larges échelles d'actions peut être assuré par des institutions territoriales prenant en charge la gestion d'un bien commun – pourquoi pas, à l'avenir, pour l'entretien de réseaux régionaux de plateformes de stockage du bois coupé suite à des attaques parasitaires ?

À titre complémentaire, la forêt considérée du point de vue des biens privés présente quelques particularités. Alors que les biens privés se caractérisent principalement par l'excluabilité et la rivalité (une seule personne en est propriétaire), les forêts privées répondent difficilement au critère d'excluabilité. Pour un propriétaire, le seul moyen reconnu légalement d'atteindre l'excluabilité est de clôturer son bien, une solution rarement mise en place car très coûteuse. Ainsi, les forêts sont des biens privés pour lesquels les usages liés au droit de propriété sont nuancés par une jurisprudence bienveillante à l'égard de tiers utilisateurs (cueilleurs non professionnels, promeneurs, etc.), et sont encadrés par des normes environnementales importantes (prévention des risques d'incendies, zonages de captages d'eau ou de protection environnementale, etc.).

Dans ces brèves présentations de la gestion forestière sous l'angle des biens publics, communs ou privés, il a fallu à chaque fois circonscire les services écosystémiques ciblés. Une précision semblable est de rigueur lorsqu'on se penche, dans le cas des biens privés, sur la capacité des ORE à répondre au temps long de l'adaptation aux changements climatiques.

Outil juridique, les ORE ne remettent pas en cause la prédominance de la propriété privée : il ne s'agit là ni de collectivisation, ni de préemption au nom de l'intérêt général, mais d'un « arrangement hybride » de droit privé (Sandler 2010). Cet arrangement repose sur une vision hétérodoxe du droit de propriété. La définition classique du droit de propriété est basée sur un titre de propriété unissant un humain à un foncier forestier en conférant au premier un droit absolu (*usus, abusus, fructus*) sur le second. En lieu et place de cela, les ORE considèrent la propriété privée

comme un lien entre humains à propos d'un foncier forestier. Sous cet angle, il est alors possible de préciser, pour chaque BSE forestier, le « faisceau de droits » (droit d'exclure, d'aliéner, d'utiliser, etc.) unissant le propriétaire et d'éventuels usagers (Orsi 2013). La distinction est cruciale et sied à la posture anthropocentrique élargie avancée dans l'introduction : il ne s'agit pas, comme pour la cause animaliste, d'attribuer de nouveaux droits au vivant non-humain (les conséquences seraient lourdes sur le reste du droit français, et en particulier sur les codes ruraux et forestiers). Il s'agit plutôt de redéfinir les droits entre humains à propos des forêts, et plus spécifiquement en explicitant les services écosystémiques considérés.

Plusieurs exemples illustrent déjà comment le droit de propriété est différent selon chacun des BSE issus d'une propriété privée. Concernant la chasse, le droit français distingue le droit de chasse du droit de chasser³⁹. Le droit des propriétaires à user (le plus souvent, couper) des arbres de leurs propriétés peut lui aussi être conditionné à des normes juridiques dépendantes des BSE considérés (épuration de l'eau, lutte contre l'érosion des sols, enjeux récréatifs, etc.)⁴⁰.

Les ORE sont elles aussi basées sur une distinction des droits de propriété en fonction des BSE, en l'occurrence la conservation d'habitats naturels. Cet outil foncier a été récemment créé, et est encore peu utilisé (Vaissière et al. 2019). Inspirées des servitudes de conservation anglo-saxonnes, les ORE sont un contrat foncier volontairement passé entre un propriétaire d'un bien foncier et une collectivité publique, un établissement public ou une personne morale de droit privé agissant pour la protection de l'environnement. Une ORE peut courir jusqu'à 99 ans, et sa grande spécificité est d'être attachée au bien foncier, non pas à son propriétaire – elle sera transmise avec le bien en cas de vente ou de succession. L'ORE définit des obligations de gestion, soit passives (interdictions de certaines pratiques), soit actives (obligation de mettre en place un type de sylviculture donné). Le contractant s'engage à des contreparties financières, techniques (e.g., gestion d'un chantier sylvicole) ; il peut aussi s'engager à apporter une expertise au propriétaire pour la bonne mise en œuvre des obligations.

Avec les ORE, un PNR qui souhaiterait par exemple établir une stratégie d'ACC sur de grandes échelles spatiales peut s'affranchir de son manque de foncier. Surtout, il dispose d'un outil

³⁹ « Le droit de chasse se distingue du droit de chasser qui se définit comme un droit, accordé par un propriétaire ou un détenteur de droit de chasse, à une personne déterminée, de chasser sur une propriété. Le droit de chasser ne peut être ni loué, ni transmis à un tiers, car il matérialise la relation personnelle existant entre le titulaire du droit de chasse et la personne autorisée à chasser. », <http://www.oncfs.gouv.fr>. Par ailleurs, le droit d'un propriétaire à exercer la chasse sur sa propriété est soumis à un seuil surfacique (Poinsot 2008).

⁴⁰ C. Barthod liste certaines de ces contraintes : « l'interdiction de bruit autour des campings du sud de la France avant 8 h 30 en juillet et août ; l'interdiction des huiles minérales ; le très fort durcissement des règles de qualification sur l'épandage de produits agropharmaceutiques, et la non-homologation de certains produits pour un usage en forêt ; la signalisation de situations de danger (par exemple en cas d'escalade de tas de bois) ; les précautions particulières pour les travaux dans les périmètres de protection des captages d'eau, définies au cas par cas. » (Barthod, 2015).

Discussion

supplémentaire pour surmonter l'inadéquation entre le temps court de la gestion d'une propriété privée et le temps long d'une stratégie telle que la migration assistée, par exemple. De même, des associations similaires à Sylv'ACCTES ou Normandie Forêver pourraient recourir à ce type d'outil, quitte à le déployer sur des périodes relativement courtes (pourquoi pas sur la durée d'un plan simple de gestion).

Avec les obligations réelles environnementales, les milieux de l'écologie de la conservation bénéficient d'un outil foncier complémentaire aux outils juridiques de protection forte (e.g., réserves biologiques intégrales). Plus légers à mettre en œuvre (car contractuels), les ORE peuvent cibler des forêts gérées de biodiversité « ordinaire ». Elles sont un atout indéniable mobilisable par des structures d'animation territoriale pour conforter des stratégies d'ACC, car elles peuvent courir sur le temps long.

CONCLUSION

*Si, marchant dans la forêt,
tu rencontres deux fois le même arbre,
c'est que tu es perdu.*

Anonyme



Le chêne sessile, une essence réputée pour sa résistance aux sécheresses.

Conclusion

Il n'y a pas, et il n'y aura pas de solutions simples à apporter aux conséquences des dérèglements climatiques sur les socio-écosystèmes forestiers.

Pour autant, il importe pour les gestionnaires forestiers, mais aussi les écologues de la conservation, de maintenir leurs efforts de mise en place d'une gestion adaptative. L'objectif recherché est actuel, pour éviter des impacts qui soient trop coûteux à surmonter en forêt. Il est aussi futur, pour maintenir ouverte des possibilités d'évolution des forêts et de leurs usages.

Les adaptations aux dérèglements climatiques observées dans cette thèse sont ambivalentes. Prenant le parti de la technique, elles peinent à embrasser l'ensemble des biens et services écosystémiques forestiers – entre autres du fait de fortes contraintes économiques. Pourtant, les forestiers qui les présentent et les mettent en œuvre sont conscients du resserrement de leur approche à la technique. Lorsqu'ils en ont la possibilité, ils font preuve de créativité et d'une capacité d'innovation indéniable pour préparer l'avenir de ce milieu auquel ils consacrent tant d'efforts.

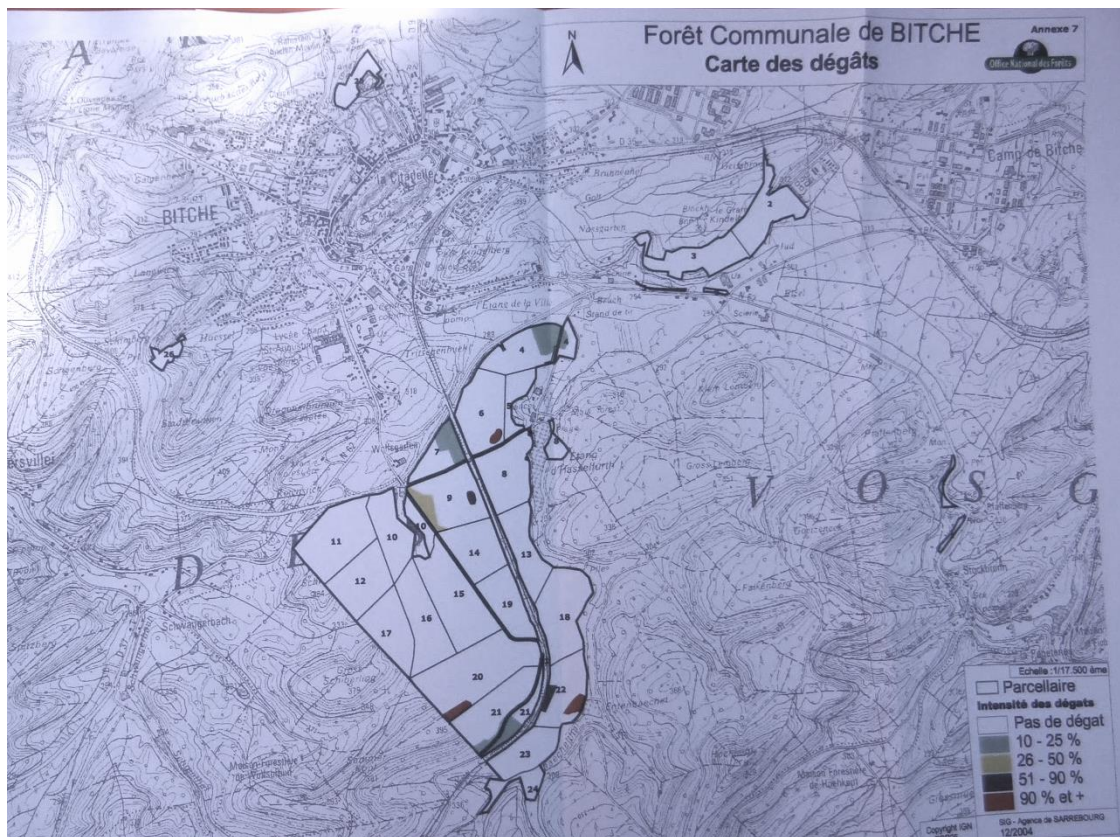
L'adaptation, dans le préambule, était vue comme un mouvement de la gestion forestière. Au cours des divers chapitres, nous en avons exploré l'origine, la dynamique et les fins. Pour en assurer le maintien, peut-être faudra-t-il désormais accepter d'y inclure de nouveaux « chorégraphes » venus d'autres milieux (agroforesterie, écologues de la conservation, associations et fondations impliquées dans l'atténuation, parcs naturels régionaux, union de communes forestières), dans cette idée latente de diversifier la réflexion.

À cette fin, il sera possible de poursuivre la démarche socio-écologique proposée le long de ces pages dans deux directions.

La première relève plutôt de l'écologie, et a trait aux solutions fondées sur la nature. Actuellement, les pratiques de gestion forestières se fondent sur un faible nombre d'espèces – 12 essences représentent 81% des volumes de bois vivant sur pied (IFN 2018). Or, on recense plus de 130 essences sur le territoire métropolitain, avec chacune leurs propriétés et capacités d'évolution face aux CC. Les adaptations techniques peuvent-elle tirer profit, tout en la préservant, de cette richesse spécifique ? Des réponses pourraient émerger d'approches combinant placettes expérimentales et *big data* (grâce à l'exceptionnel travail des services de l'Inventaire Forestier National).

Le tropisme de la deuxième perspective est social. Il s'agit d'améliorer la simulation participative *Foster Forest*. Ce faisant, peut-être sera-t-il possible de proposer cet outil aux structures d'animation territoriale pour stimuler la conception d'adaptations aux changements climatiques sur l'ensemble des enjeux de la gestion forestière ?

BIBLIOGRAPHIE



Carte des dégâts forestiers de la forêt communale de Bitche. Source : mairie de Bitche, ONF.

Bibliographie

- Abel N, Cumming DH, Anderies J (2006) Collapse and reorganization in social-ecological systems: questions, some ideas, and policy implications. *Ecology and Society* 11
- ADEME (2012) Impact'Climat - Outil de pré-diagnostic de l'impact du changement climatique sur un territoire. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Angers
- Adger WN, Arnell NW, Tompkins EL (2005) Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change* 15:77–86
- Ahmadi N, Bastien C, Trommetter M (2013) Observations, innovations et adaptations au changement climatique. *S'adapter au changement climatique: Agriculture, écosystèmes et territoires* 61
- Aitken SN et al. (2008) Adaptation, migration or extirpation: Climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* 1:95–111
- Akrich M (1989) La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques. *Anthropologie et Sociétés* 13:31–54
- Alber A (2010) Voir le son : réflexions sur le traitement des entretiens enregistrés dans le logiciel Sonal. *Socio-logos . Revue de l'association française de sociologie*
- Alberto FJ et al. (2013) Potential for evolutionary responses to climate change - evidence from tree populations. *Global Change Biology* 19:1645–1661
- Allen CR et al. (2014) Panarchy: Theory and Application. *Ecosystems* 17:578–589
- Alphandéry P, Fortier A (2007) A New Approach to Wildlife Management in France: Regional Guidelines as Tools for the Conservation of Biodiversity. *Sociologia Ruralis* 47:42–62

Bibliographie

- Ammer C et al. (2010) *Der Wald-Wild-Konflikt: Analyse und Lösungsansätze vor dem Hintergrund rechtlicher, ökologischer und ökonomischer Zusammenhänge*. Universitätsverlag Göttingen
- Ancori B et al. (1983) *L'innovation: vers une nouvelle révolution technologique*. La Documentation française. France
- Ancori B (2017) Politiques de la recherche environnementale et complexité du social Jollivet, M et al., editors. *Natures Sciences Sociétés* 25:S76–S83
- Anderegg WR et al. (2016) Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113:5024–5029
- Arpin I, ed. (2015) *Les mondes des inventaires naturalistes*. Éd. de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris
- Augustynczyk ALD et al. (2019) Diversification of forest management regimes secures tree microhabitats and bird abundance under climate change. *Science of The Total Environment* 650:2717–2730
- Aykut SC (2012) How to govern a 'new global risk'? The construction of climate change as a public problem at the global and European levels, in France and Germany. *Sciences sociales, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), Paris, France*
- Bakys R et al. (2009) Investigations concerning the role of *Chalara fraxinea* in declining *Fraxinus excelsior*. *Plant Pathology* 58:284–292
- Balian E, Eggermont H, le Roux X (2014) Outputs of the Strategic Foresight workshop "Nature-Based Solutions in a BiodivERsA context". BiodivERsA, Brussels

Bibliographie

- Baral A (2004) Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of cost vs. carbon benefit. *Biomass and Bioenergy* 27:41–55
- Barbier J-M, Goulet F (2013) Moins de technique, plus de nature : pour une heuristique des pratiques d'écologisation de l'agriculture. *Natures Sciences Sociétés* 21:200–210
- Bardon É, Dereix C (2017) Plan de communication pour le secteur de la forêt et du bois. Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux, Paris, France
- Barnaud C et al. (2018) Ecosystem services, social interdependencies, and collective action: a conceptual framework. *Ecology and Society* 23
- Barreteau O et al. (2003) Our Companion Modelling Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6
- Barreteau O, Bousquet F, Attonaty J-M (2001) Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River. 4
- Barthod C (2015) La multifonctionnalité des forêts entre discours et pratiques : illusion ou réalité à assumer ? *Revue Forestière Française* 4:293–319
- Barthod C (2001) La Réforme des financements publics aux investissements forestiers. *Revue Forestière Française* 9
- Barthod C (2007) Qu'a apporté le débat sur la gestion durable à la foresterie française ? Ce débat doit-il être dépassé ? *Revue Forestière Française*
- Bauhus J et al. (2017) Mixed-species forests: ecology and management. In: *Mixed-Species Forests*. Springer-Verlag p. np.

Bibliographie

- Bebi P, Kulakowski D, Rixen C (2009) Snow avalanche disturbances in forest ecosystems—State of research and implications for management. *Forest Ecology and Management* 257:1883–1892
- Becu N et al. (2016) Participatory simulation and learning process: technology matters! International Congress on Environmental Modelling and Software
- Bennett EM, Peterson GD, Gordon LJ (2009) Understanding relationships among multiple ecosystem services: Relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters* 12:1394–1404
- Bergès L, Dupouey J-L (2017) Écologie historique et ancienneté de l'état boisé : concepts, avancées et perspectives de la recherche. *Revue Forestière Française* 297
- Berrang-Ford L, Ford JD, Paterson J (2011) Are we adapting to climate change? *Global Environmental Change* 21:25–33
- Bertolas RJ (1998) Cross-Cultural Environmental Perception of Wilderness. *The Professional Geographer* 50:98–111
- Bertrand F, Fouqueray T (2017) Un Parc Naturel Régional en apprentissage : enseignements d'une démarche d'adaptation aux changements climatiques des actions en faveur de la biodiversité. *Norois. Environnement, aménagement, société* 47–61
- Biache C, Rouveyrol P (2011) Mise en place d'un îlot de sénescence: enquête sur des préconisations possibles et estimation du coût.
- Biber P et al. (2015) How Sensitive Are Ecosystem Services in European Forest Landscapes to Silvicultural Treatment? *Forests* 6:1666–1695

Bibliographie

- Bohmann K et al. (2014) Environmental DNA for wildlife biology and biodiversity monitoring. *Trends in Ecology & Evolution* 29:358–367
- Bolte A et al. (2009) Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research* 24:473–482
- Bonta M et al. (2017) Intentional Fire-Spreading by “Firehawk” Raptors in Northern Australia. *Journal of Ethnobiology* 37:700–718
- Börner A, Bellassen V, Luysaert S (2010) Forest Management Cartoons.
- Bouget C, Lassaue A, Jonsell M (2012) Effects of fuelwood harvesting on biodiversity — a review focused on the situation in Europe. *Canadian Journal of Forest Research* 42:1421–1432
- Bouleau G et al. (2016) Entre logique de production et de préservation : l'évolution de l'information environnementale dans les domaines de l'eau et de la forêt. *VertigO*
- Bousquet F, Le Page C (2004) Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling* 176:313–332
- Boutefeu B (2005) L'aménagement forestier en France : à la recherche d'une gestion durable à travers l'histoire. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*
- Boutefeu B, Arnould P (2006) Le métier de forestier : entre rationalité et sensibilité. *Revue Forestière Française* LVIII:12
- Boy D et al. (2012) Le Grenelle de l'environnement: acteurs, discours, effets. 493
- Brang P et al. (2014) Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry* 87:492–503

Bibliographie

- Bréda N et al. (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63:625–644
- Brockerhoff EG et al. (2017) Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation* 26:3005–3035
- Brunette M, Couture S, Pannequin F (2017) Is forest insurance a relevant vector to induce adaptation efforts to climate change? *Annals of Forest Science* 74
- Brunette M, Foncel J, Kéré EN (2017) Attitude Towards Risk and Production Decision: an Empirical Analysis on French Private Forest Owners. *Environmental Modeling & Assessment*
- Bühlmann F, Tettamanti M (2007) Le statut de l'approche qualitative dans des projets de recherche interdisciplinaires. *Recherche qualitative*
- Büscher B, Fletcher R (2019) Towards Convivial Conservation. *Conservation and Society* 17:283
- Busino G (2003) La preuve dans les sciences sociales. *Revue européenne des sciences sociales* 11–61
- Bussotti F et al. (2015) Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environmental and Experimental Botany* 111:91–113
- Buttoud G (2007) Forêt et réforme: un secteur en transition? *Revue forestière française*
- Callon M, Lascoumes P, Barthe Y (2014) *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*. Points.

Bibliographie

- Cardona A (2012) L'agriculture à l'épreuve de l'écologisation : éléments pour une sociologie des transitions. thesis, Paris, EHESS
- Carnoye L (2018) Les services écosystémiques comme outils d'aide à la décision et de communication pour les parcs naturels régionaux. L'exemple du parc Scarpe-Escaut. Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie
- Carpenter S et al. (2001) From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems* 4:765–781
- Carson R (1963) Printemps silencieux. Plon. Paris, France
- Casabianca F, Albaladejo C (1997) Des multiples légitimités de la recherche-action. 17
- Cauwet J et al. (1976) France, ta forêt fout le camp ! Stock/2. Stock, Paris, France
- Cavard X et al. (2011) Competition and facilitation between tree species change with stand development. *Oikos* 120:1683–1695
- Chapman BK, McPhee D (2016) Global shark attack hotspots: Identifying underlying factors behind increased unprovoked shark bite incidence. *Ocean & Coastal Management* 133:72–84
- Chazdon RL et al. (2016) When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio* 45:538–550
- Cheib A et al. (2012) Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters* 15:533–544
- Cheikho M, Clément P (2002) Pluridisciplinarité et complexité dans la formation au métier d'ingénieur forestier. *ASTER* 34

Bibliographie

- Christensen J (2004) Win-Win Illusions. *Conservation in Practice* 5:12–19
- Ciais P et al. (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437:529–533
- Cinotti B (2003) Une gestion non rentable peut-elle être durable? *Revue forestière française* 55:7–24
- CNPF (2019) CNPF - Centre national de la propriété forestière.
- CNPF (2016) Pôle expérimentations. Centre national de la propriété forestière
- CNRTL (2019) Trésor de la Langue Française Informatisé. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales
- Colautti S et al. (2014) Furniture distribution in Italy. *CSIL Centre for Industrial Studies*
- Coll L et al. (2018) Knowledge gaps about mixed forests: What do European forest managers want to know and what answers can science provide? *Forest Ecology and Management* 407:106–115
- Collectif (2018) Manifeste de Tronçais.
- Collins SL et al. (2011) An integrated conceptual framework for long-term social–ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9:351–357
- Colloff MJ et al. (2017) An integrative research framework for enabling transformative adaptation. *Environmental Science & Policy* 68:87–96
- Conseil Supérieur du Notariat (2018) Absence de définition juridique de la forêt.

Bibliographie

- Cooley DM et al. (2012) Managing dependencies in forest offset projects: toward a more complete evaluation of reversal risk. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 17:17–24
- Coomes OT et al. (2015) Farmer seed networks make a limited contribution to agriculture? Four common misconceptions. *Food Policy* 56:41–50
- Coopérative Agricole et Forestière Sud-Atlantique, COFOGAR - les Forêts du Sud, FORESTARN - Coopérative des Sylviculteurs Tarnais (2012) Manifeste en faveur des forêts de plantation en France.
- Corbera E (2012) Problematizing REDD+ as an experiment in payments for ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 8
- Corlett RT, Westcott DA (2013) Will plant movements keep up with climate change? *Trends in Ecology & Evolution* 28:482–488
- Crozier M, Friedberg E (1977) *L'acteur et le système. Les Contraintes de l'action collective*. Seuil. Paris, France
- Cubbage F, Harou P, Sills E (2007) Policy instruments to enhance multi-functional forest management. *Forest Policy and Economics* 9:833–851
- Dalle J-P et al. (2019) Évaluation du contrat d'objectifs et de performance (COP) 2016-2020 de l'Office National des Forêts (ONF) - Proposition de pistes d'évolution. Ministère de la transition écologique et solidaire, ministère de l'action et des comptes publics, Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales, Ministère des Outre-Mer, Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, Paris, France

Bibliographie

- Dassot M, Constant T, Fournier M (2011) The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science* 68:959–974
- Davis MB (1983) Quaternary History of Deciduous Forests of Eastern North America and Europe. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 70:550–563
- Delmas A (2019) Forêts : des députés lancent une commission d'enquête citoyenne. [Libération.fr](http://liberation.fr)
- Delzon S et al. (2013) Field Evidence of Colonisation by Holm Oak, at the Northern Margin of Its Distribution Range, during the Anthropocene Period. *PLOS ONE* 8:e80443
- Denormandie L, Parrot J, Deperrois H (2004) La scierie et le sciage. *Revue Forestière Française*
- Département de la santé des forêts (2018) Quantifier l'état de santé de la forêt, méthode simplifiée d'évaluation.
- Descola P (2005) *Par-delà nature et culture*. Gallimard. NRF, Paris
- Dessai S et al. (2009) Do we need better predictions to adapt to a changing climate? *Eos, Transactions American Geophysical Union* 90:111–112
- Deuffic P (2018) “Your policy, my rationale”. How individual and structural drivers influence European forest owners' decisions. *Land Use Policy* 15
- Deuffic P, Ginelli L, Petit K (2010) Patrimoine foncier... et naturel ? Les propriétaires forestiers face à l'écologisation des Landes de Gascogne. *Sud-Ouest Européen Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 109–124
- Dhenain S (2018) Les territoires littoraux languedociens face aux changements globaux: trajectoires et politiques d'adaptation. *Sciences de l'environnement, Agroparistech, Montpellier*
- Direction des Ressources Forestières et al. (2017) Fichier écologique des essences.

Bibliographie

- Dobbertin MK, Nobis MP (2010) Exploring research issues in selected forest journals 1979–2008. *Annals of Forest Science* 67:800–800
- Dobré M, Lewis N, Granet AM (2006) Comment les Français voient la forêt et sa gestion. *Rendez-vous techniques* 11:55–63
- Douai A, Plumecocq G (2017) *L'économie écologique*. La Découverte. Paris
- Douhard M et al. (2013) Roaring counts are not suitable for the monitoring of red deer *Cervus elaphus* population abundance. *Wildlife Biology* 19:94–101
- DREAL Île-de-France (2019) *Projet de programme régional de la forêt et du bois d'Île-de-France 2019-2029*.
- Duncker PS et al. (2012) Classification of Forest Management Approaches: A New Conceptual Framework and Its Applicability to European Forestry. *Ecology and Society* 17:art51
- Eggermont H et al. (2015) Nature-based Solutions: New Influence for Environmental Management and Research in Europe. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 24:243–248
- Ellerman AD, Convery FJ, de Perthuis C (2010) *Pricing Carbon: The European Union Emissions Trading Scheme*. Cambridge University Press, Cambridge
- Ellis EC, Ramankutty N (2008) Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6:439–447
- Ellison D et al. (2017) Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43:51–61
- Ellul J (1954) *La technique ou l'enjeu du siècle*. Armand Colin. Paris, France

Bibliographie

- Engle NL (2011) Adaptive capacity and its assessment. *Global Environmental Change* 21:647–656
- ESE (2019) Site internet du laboratoire Écologie, Systématique, Évolution - UMR8079. Laboratoire Écologie, Systématique et Évolution
- Étienne M (2010) La modélisation d'accompagnement: Une démarche participative en appui au développement durable. Quae.
- Étienne M (2003) SYLVOPAST: a multiple target role-playing game to assess negotiation processes in sylvopastoral management planning. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6
- Etienne M, Bourgeois M, Souchère V (2008) Participatory modelling of fire prevention and urbanisation in southern France: from coconstructing to playing with the model. *International Congress on Environmental Modelling and Software*
- European Commission, ed. (2004) Facing the challenge: the Lisbon strategy for growth and employment: report from the High Level Group chaired by Wim Kok. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg
- European Commission (2015) Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities': (full version). Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Fabiani J-L (2000) Éthique et politiques de la techno-nature. À propos de la biologie de la conservation. *Revue européenne des sciences sociales* 15–28

Bibliographie

- Faith DP et al. (2010) Evosystem services: an evolutionary perspective on the links between biodiversity and human well-being. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2:66–74
- Falkner R (2016) The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs* 92:1107–1125
- Fan Z et al. (2004) Simulated cavity tree dynamics under alternative timber harvest regimes. *Forest Ecology and Management* 193:399–412
- Farley J, Costanza R (2010) Payments for ecosystem services: From local to global. *Ecological Economics* 69:2060–2068
- Fauvelle É, Garcia C (2018) AgriForEst : un jeu pour élaborer des scénarios sur un terroir villageois d’Afrique Centrale. *VertigO - la revue électronique en sciences de l’environnement*
- Fernández-Manjarrés JF, Roturier S, Bilhaut A-G (2018) The emergence of the social-ecological restoration concept: Social-ecological restoration concept. *Restoration Ecology*
- Ferron J-L (2014) Le Douglas, nouvelle ressource nationale. *Revue Forestière Française* Fr.], ISSN 0035
- FFT (2019) Le site de la Fédération Française de Tennis.
- FIBOIS Alsace (2014) Le déséquilibre forêt-gibier Son coût pour la forêt en Alsace.
- Fischer J et al. (2009) Integrating resilience thinking and optimisation for conservation. *Trends in Ecology & Evolution* 24:549–554
- Fischer J et al. (2014) Land Sparing Versus Land Sharing: Moving Forward. *Conservation Letters* 7:149–157

Bibliographie

- FNB (2019) Forêt et changement climatique. Fédération Nationale du Bois
- Folke C (2006) Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16:253–267
- Folke C et al. (2010) Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and society* 15
- Ford CR et al. (2011) Can forest management be used to sustain water-based ecosystem services in the face of climate change? *Ecological Applications* 21:2049–2067
- Forest F et al. (2007) Preserving the evolutionary potential of floras in biodiversity hotspots. *Nature* 445:757–760
- Fortier A (1991) Le taillis contre la futaie. Différentes manières d’appréhender le paysage forestier ardennais. *Études rurales* 121:109–126
- Fortmann L et al. (2014) Incentive Contracts for Environmental Services and Their Potential in REDD. The World Bank, Washington, DC, USA
- Fouqueray T, Charpentier A, et al. (2019) Is Adaptation to Climate Change Threatening Forest Biodiversity? A Comparative and Interdisciplinary Study Case of Two French Forests. In: *Handbook of Climate Change and Biodiversity*. Leal Filho, W, Barbir, J, & Preziosi, R, editors. Springer International Publishing, Cham pp. 337–354.
- Fouqueray T, Trommetter M, Frascaria-Lacoste N (2019) Blind spots of strategy-oriented funding narrow research on forestry and climate change. in prep
- Fouqueray T, Trommetter M, Frascaria-Lacoste N (2018) Managed retreat of settlements and infrastructures: ecological restoration as an opportunity to overcome maladaptive coastal

Bibliographie

- development in France: Restoration opportunities through managed retreat. *Restoration Ecology*
- Frankel O, Soulé ME (1981) *Conservation and Evolution*. CUP Archive
- Frascaria-Lacoste N, Fernández-Manjarrés J (2012) Assisted Colonization of Foundation Species: Lack of Consideration of the Extended Phenotype Concept-Response to Kreyling et al. (2011). *Restoration Ecology* 20:296–298
- Friedberg E (1997) *Le Pouvoir et la Règle. Dynamiques de l'action organisée*. Le Seuil.
- Füssel H-M (2007) Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustainability Science* 2:265–275
- Futai K (2013) Pine Wood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Annual Review of Phytopathology* 51:61–83
- Gamborg C, Larsen JB (2003) 'Back to nature'—a sustainable future for forestry? *Forest Ecology and Management* 179:559–571
- Garcia C (2019) Could play be a game-changer for the world's forests? *World Economic Forum*
- García CE, Sanz-Menéndez L (2005) Competition for funding as an indicator of research competitiveness. *Scientometrics* 64:271–300
- Gardiner B et al. (2010) *Destructive storms in European forests: past and forthcoming impacts*. European Forest Institute
- Gayet S (2017) *L'ONF soigne nos forêts*. Yvelines Infos
- Geuna A (2001) The Changing Rationale for European University Research Funding: Are There Negative Unintended Consequences? *Journal of Economic Issues* 35:607–632

Bibliographie

- GHFF (2019) Groupe d'Histoire des Forêts Françaises (GHFF) | Groupe pluridisciplinaire d'étude des forêts, des patrimoines et des héritages sylvicoles.
- Godard O (2005) Les conditions d'une gestion économique de la biodiversité-Un parallèle avec le changement climatique. Cahier n 2005:018
- Gray JS et al. (2009) Effects of Climate Change on Ticks and Tick-Borne Diseases in Europe. *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases*
- Gren I-M, Aklilu AZ (2016) Policy design for forest carbon sequestration: A review of the literature. *Forest Policy and Economics* 70:128–136
- Groffman PM et al. (2010) Restarting the conversation: challenges at the interface between ecology and society. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8:284–291
- Gunderson LH, Holling CS, eds. (2002) *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press, Washington, DC
- Guo Y et al. (2007) Phylogenetic Relationships of South China Sea Snappers (Genus *Lutjanus*; Family Lutjanidae) Based on Mitochondrial DNA Sequences. *Marine Biotechnology* 9:682–688
- Guyot P, Honiden S (2006) Agent-Based Participatory Simulations: Merging Multi-Agent Systems and Role-Playing Games. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 9:15
- den Haan R-J, van der Voort M (2018) On Evaluating Social Learning Outcomes of Serious Games to Collaboratively Address Sustainability Problems: A Literature Review. *Sustainability* 10:4529
- Hallegatte S (2009) Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change* 19:240–247

Bibliographie

- Hamrick K, Gallant M (2018) Voluntary Carbon Markets Insights: 2018 Outlook and First-Quarter Trends. Ecosystem Marketplace, Forest Trends, Washington, DC, USA
- Harmon ME, Ferrell WK, Franklin JF (1990) Effects on Carbon Storage of Conversion of Old-Growth Forests to Young Forests. *Science* 247:699–702
- Harrington R et al. (2010) Ecosystem services and biodiversity conservation: concepts and a glossary. *Biodiversity and Conservation* 19:2773–2790
- Harris PG (2009) Climate Change and Foreign Policy | Case Studies from East to West. Routledge. London
- Hassenforder E et al. (2016) The MEPPP Framework: A Framework for Monitoring and Evaluating Participatory Planning Processes. *Environmental Management* 57:79–96
- Hector A, Bagchi R (2007) Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature* 448:188–190
- Heide OM (1993) Daylength and thermal time responses of budburst during dormancy release in some northern deciduous trees. *Physiologia Plantarum* 88:531–540
- Heinimann HR (2007) Forest operations engineering and management – the ways behind and ahead of a scientific discipline. *Croatian Journal of Forest Engineering* 15
- Henneron L (2014) Impact de la densité des peuplements forestiers sur la biodiversité et le fonctionnement biologique de l'interface sol-végétation.
- Hickey GM, Nitschke CR (2005) Crossing disciplinary boundaries in forest research: An international challenge. *The Forestry Chronicle* 81:321–323
- Higham T et al. (2011) The earliest evidence for anatomically modern humans in northwestern Europe. *Nature* 479:521–524

Bibliographie

- Holling CS (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4:1–23
- Hommel T, Godard O (2009) Que peut-on espérer des entreprises socialement responsables ? In: *Regards sur la Terre 2009. Annuels Presses de Sciences Po, Paris* pp. 167–178.
- Honnay O (2004) *Forest Biodiversity: Lessons from History for Conservation*. CABI
- Hornung M (1985) Acidification of soils by trees and forests. *Soil Use and Management* 1:24–27
- IFN (2017) *Inventaire Forestier National*.
- IFN (2018) *Le mémento - inventaire forestier*.
- INAO (2018) *Le Bois de Chartreuse obtient l'AOC*.
- Innes JL (2005) Multidisciplinarity, interdisciplinarity and training in forestry and forest research. *The Forestry Chronicle* 81:324–329
- Ionescu S, Jourdan-Ionescu C (2010) Entre enthousiasme et rejet : l'ambivalence suscitée par le concept de résilience. *Bulletin de psychologie Numéro* 510:401
- IPCC (2014a) *Climate Change 2014 - Synthesis Report*.
- IPCC, ed. (2014b) *Climate change 2014: mitigation of climate change ; Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, New York, NY
- IPCC (2019) *IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IRSTEA (2019) *Changement climatique : des forêts de montagne plus protectrices. Actions territoires*

Bibliographie

- Jacobs B et al. (2015) An adaptive capacity guide book: Assessing, building and evaluating the capacity of communities to adapt in a changing climate. Southern Slopes Climate Change Adaptation Research Partnership (SCARP), University of Technology Sydney and University of Tasmania. Hobart, Tasmania. ISBN: 9781862958272
- Jactel H, Brockerhoff EG (2007) Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters* 10:835–848
- Jambois A et al. (2013) Amélioration du pin maritime. INRA - GIS Pin Maritime du Futur 14
- Jandl R et al. (2007) How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137:253–268
- Janssen MA et al. (2010) Lab Experiments for the Study of Social-Ecological Systems. *Science* 328:613–617
- Jéhin P (2005) Les forêts des Vosges du nord du Moyen-Age à la Révolution. Presses Universitaires De Strasbourg, Strasbourg
- Jollivet M, Carlander M-A (2008) Compte-rendu des Journées. *Natures Sciences Sociétés* 7–14
- Jonard M et al. (2017) Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of The Total Environment* 574:616–628
- Kangas A, Laukkanen S, Kangas J (2006) Social choice theory and its applications in sustainable forest management—a review. *Forest Policy and Economics* 9:77–92
- Kaul I (2006) Une analyse positive des biens publics. In: *L'avancée des biens publics: politique de l'intérêt général et mondialisation*. Touffut, J, editor. Paris, France pp. 23–54.

Bibliographie

- Keenan RJ (2015) Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Annals of Forest Science* 72:145–167
- Kennedy JJ, Koch NE (2004) Viewing and managing natural resources as human-ecosystem relationships. *Forest Policy and Economics* 6:497–504
- Kennedy JJ, Thomas JW, Glueck P (2001) Evolving forestry and rural development beliefs at midpoint and close of the 20th century. 15
- Kerwin A (1993) None Too Solid: Medical Ignorance. *Knowledge* 15:166–185
- Klein N (2008) *La Stratégie du choc*. Actes Sud.
- Kohyama T, Takada T (2009) The stratification theory for plant coexistence promoted by one-sided competition. *Journal of Ecology* 97:463–471
- Kohyama TS, Takada T (2012) One-sided competition for light promotes coexistence of forest trees that share the same adult height Canham, C, editor. *Journal of Ecology* 100:1501–1511
- Kolström M et al. (2011) Reviewing the Science and Implementation of Climate Change Adaptation Measures in European Forestry. *Forests* 2:961–982
- Konadu DD et al. (2015) Land use implications of future energy system trajectories—The case of the UK 2050 Carbon Plan. *Energy Policy* 86:328–337
- Kraus D et al. (2016) *Catalogue des dendromicrohabitats - Liste de référence pour les inventaires de terrain*. Institut Forestier Européen (EFI)

Bibliographie

- Kuijper DPJ (2011) Lack of natural control mechanisms increases wildlife–forestry conflict in managed temperate European forest systems. *European Journal of Forest Research* 130:895
- La Dépêche du Midi (2018) Des récoltes de miel polluées par le glyphosate. *La Dépêche du Midi*, September
- La Montagne (2018) Faits divers - L'incendie de la société Mecafor à Ussel revendiqué dans un mail. www.lamontagne.fr
- Lagadeuc Y, Chenorkian R (2009) Les systèmes socio-écologiques : vers une approche spatiale et temporelle. *Natures Sciences Sociétés* 17:194–196
- Lal R (2005) Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220:242–258
- Lammel A, Dugas E, Guillen Gutierrez E (2012) L'apport de la psychologie cognitive à l'étude de l'adaptation aux changements climatiques : la notion de vulnérabilité cognitive. [VertigO] *La revue électronique en sciences de l'environnement* 12
- Laurans Y, Aoubid S (2012) L'économie au secours de la biodiversité? La légende des Catskills revisitée. *Policy Brief*
- Lavie É (2016) Chartier D., Rodary E. (dir.), 2016, *Manifeste pour une géographie environnementale*, Paris, Presses de Sciences Po, 412 p. *Cybergeog : European Journal of Geography* 8
- Le Maire B, Darmanin G (2019) *Projet de loi de finances 2020*.
- Le Moguédec G (2010) Evaluation of biodiversity for multi-purpose forest management using a non-linear optimization approach. *APPLIED ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH* 21

Bibliographie

- Le Monde (2005) A Chizé, les forestiers vont devoir regarder la nature d'un autre œil. Le Monde.fr, March 10
- Le Page C et al. (2011) Models for sharing representations. In: Companion Modeling. A Participatory Approach to Support Sustainable Development. Michel Étienne pp. 69–96.
- Le Page C, Perrotton A (2017) KILT: A Modelling Approach Based on Participatory Agent-Based Simulation of Stylized Socio-Ecosystems to Stimulate Social Learning with Local Stakeholders. In: Autonomous Agents and Multiagent Systems. Sukthankar, G & Rodriguez-Aguilar, JA, editors. Vol. 10643 Springer International Publishing, Cham pp. 31–44.
- Lebourgeois F, Granier A, Bréda N (2001) Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers. *Annals of forest science* 58:733–754
- Lefèvre F et al. (2014) Considering evolutionary processes in adaptive forestry. *Annals of Forest Science* 71:723–739
- Legay M (2007) Comment la sylviculture peut-elle accompagner les changements climatiques ? *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, June
- Légifrance (1804) Code civil - Article 544.
- Légifrance (2016) Code de l'environnement - Article L132-3.
- Légifrance (2012a) Code forestier (nouveau) | Orientations générales.
- Légifrance (2012b) Code forestier (nouveau) - Article L111-2.

Bibliographie

- Légifrance (2012c) Décret n° 2012-557 du 24 avril 2012 relatif aux obligations de transparence des entreprises en matière sociale et environnementale.
- Légifrance (2018a) Décret n° 2018-1043 du 28 novembre 2018 créant un label « Bas-Carbone ».
- Légifrance (2018b) Légifrance, le service public de la diffusion du droit. Le service public de la diffusion du droit
- Lenzion J, Leuschner C (2008) Growth of European beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings is limited by elevated atmospheric vapour pressure deficits. *Forest Ecology and Management* 256:648–655
- Lepori B et al. (2007) Comparing the evolution of national research policies: what patterns of change? *Science and Public Policy* 34:372–388
- Lereboullet A-L, Beltrando G, Bardsley DK (2013) Socio-ecological adaptation to climate change: A comparative case study from the Mediterranean wine industry in France and Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164:273–285
- Lescourret F et al. (2015) A social–ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14:68–75
- Levet A-L, Guinard L, Purohoo I (2014) Le commerce extérieur des produits bois : existe-t-il réellement un paradoxe français ? *Revue Forestière Française* 51
- van der Linde S et al. (2018) Environment and host as large-scale controls of ectomycorrhizal fungi. *Nature* 558:243–248
- Lindenmayer DB, Franklin JF, Fischer J (2006) General management principles and a checklist of strategies to guide forest biodiversity conservation. *Biological Conservation* 131:433–445

Bibliographie

- Linder M (2000) Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change. *Tree Physiology* 20:299–307
- Lindholm E-L, Berg S, Hansson P-A (2010) Energy efficiency and the environmental impact of harvesting stumps and logging residues. *European Journal of Forest Research* 129:1223–1235
- Lindner M et al. (2014) Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management* 146:69–83
- Lindner M et al. (2010) Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259:698–709
- Liu J et al. (2007) Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science* 317:1513–1516
- Lombard Latune J (2018) La compensation écologique : du principe de non perte nette de biodiversité à son opérationnalisation - analyse de l'action collective. thesis, Paris Saclay
- Luyssaert S et al. (2008) Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455:213–215
- MAAF (2017) Programme National de la Forêt et du Bois 2016-2026. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, Paris
- MAAF, IGN (2015) Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines des forêts françaises métropolitaines. Institut National de l'Information Géographique et Forestière, Paris, France
- Maes J, Jacobs S (2017) Nature-Based Solutions for Europe's Sustainable Development: Europe's sustainable development. *Conservation Letters* 10:121–124

Bibliographie

- Marage D (2018) La forêt dans tous ses états: de la conservation à l'évaluation territoriale Volume 1 Oeuvre scientifique inédite. In: Vol. 1 Paris p. 323.
- Marchi E et al. (2018) Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of The Total Environment* 634:1385–1397
- Marty P (2000) Pourquoi étudier la vulgarisation des sciences forestières ? Etude des formations à la gestion des forêts. *Nature Sciences Sociétés* 8:63–65
- Mascia MB et al. (2003) Conservation and the Social Sciences. *Conservation Biology* 17:649–650
- Mather AS (2001) The transition from deforestation to reforestation in Europe. In: *Agricultural technologies and tropical deforestation* (eds. Angelsen, A.; Kaimowitz, D.) CABI in association with centre for international Forestry Research 35–52
- Mathevet R et al. (2010) Dossier «Le réveil du dodo III» - La solidarité écologique : un nouveau concept pour une gestion intégrée des parcs nationaux et des territoires. *Natures Sciences Sociétés* 18:424–433
- Mathevet R et al. (2018) Environmental Stewardship and Ecological Solidarity: Rethinking Social-Ecological Interdependency and Responsibility. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 31:605–623
- Mathias J-D et al. (2015) Using the Viability Theory to Assess the Flexibility of Forest Managers Under Ecological Intensification. *Environmental Management* 56:1170–1183
- MCPFE (1993) General Guidelines for the Sustainable Management of Forests in Europe - resolution H1.
- Mermet L (1992) *Stratégies pour la gestion de l'environnement - La nature comme jeu de société ?* L'Harmattan. Paris, France

Bibliographie

- Meyer M, Molyneux-Hodgson S (2010) Introduction: The Dynamics of Epistemic Communities. *Sociological Research Online* 15:1–7
- Michon G (2015) Agriculteurs à l'ombre des forêts du monde. *Agroforesteries vernaculaires*. Actes Sud.
- Millar CI, Stephenson NL (2015) Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance. *Science* 349:823–826
- Millar CI, Stephenson NL, Stephens SL (2007) Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological applications* 17:2145–2151
- Moon K, Blackman D (2014) A Guide to Understanding Social Science Research for Natural Scientists: Social Science for Natural Scientists. *Conservation Biology* 28:1167–1177
- Morandin LA, Winston ML (2006) Pollinators provide economic incentive to preserve natural land in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 116:289–292
- Morin MB et al. (2015) Climate change and the forest sector: Perception of principal impacts and of potential options for adaptation. *The Forestry Chronicle* 91:395–406
- Morizot B (2016) Les Diplomates. *Cohabiter avec les loups sur une autre carte du vivant*. Wildproject.
- MTES (2017) Géorisques | Mieux connaître les risques sur le territoire.
- Müller B et al. (2013) Describing human decisions in agent-based models – ODD + D, an extension of the ODD protocol. *Environmental Modelling & Software* 48:37–48
- Munroe R et al. (2012) Review of the evidence base for ecosystem-based approaches for adaptation to climate change. *Environmental Evidence* 1:13

Bibliographie

- Musch B, Ladier J, Rousselle Y (2015) De la théorie à la pratique : adaptation des ressources génétiques forestières au changement climatique, un travail en partenariat. In: Paris p. 9.
- Nagel LM et al. (2017) Adaptive Silviculture for Climate Change: A National Experiment in Manager-Scientist Partnerships to Apply an Adaptation Framework. *Journal of Forestry* 115:167–178
- Naidoo R, Ricketts TH (2006) Mapping the economic costs and benefits of conservation. *PLoS biology* 4:e360
- Nature needs half (2009) Nature needs half. *Nature Needs Half*
- Naudts K et al. (2016) Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science* 351:597–600
- Naumann S et al. (2011) Assessment of the potential of ecosystem-based approaches to climate change adaptation and mitigation in Europe. Final report to the European Commission, DG Environment
- Nelson DR (2011) Adaptation and resilience: responding to a changing climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2:113–120
- Nelson R et al. (2010) The vulnerability of Australian rural communities to climate variability and change: Part I—Conceptualising and measuring vulnerability. *Environmental Science & Policy* 13:8–17
- Netherer S, Schopf A (2010) Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests—General aspects and the pine processionary moth as specific example. *Forest Ecology and Management* 259:831–838
- Nicolino F (2018) Attention, les arbres sont dangereux. *Charlie Hebdo*

Bibliographie

- Noss RF (2001) Beyond Kyoto: forest management in a time of rapid climate change. *Conservation Biology* 15:578–590
- Odermatt O (2015) Les périodes critiques pour l'abrouissement. *La Forêt* 68:10–13
- Olsson P, Folke C, Berkes F (2004) Adaptive comanagement for building resilience in social–ecological systems. *Environmental management* 34:75–90
- ONERC (2015) L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change. La Documentation française. Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, Paris, France
- ONERC (2017) Recommandations pour un nouveau Plan national d'adaptation au changement climatique. Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique, Paris
- ONF (2008) Règlement national d'exploitation forestière.
- Orazio C, Kies U, Edwards D (2017) Handbook for wood mobilisation in Europe. European Forest Institute. Cestas, France
- Orée (2015) Climat et Biodiversité: Enjeux et pistes de solutions - Acteurs d'aujourd'hui et de demain, à la croisée des enjeux du climat et de la biodiversité.
- Orsi F (2013) Elinor Ostrom et les faisceaux de droits : l'ouverture d'un nouvel espace pour penser la propriété commune. *Revue de la régulation*
- Östlund L, Zackrisson O, Axelsson A-L (1997) The history and transformation of a Scandinavian boreal forest landscape since the 19th century. *Canadian Journal of Forest Research* 27:1198–1206
- Ostrom E (1990) *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge university press

Bibliographie

- Otto H-J (1998) *Ecologie forestière. Forêt privée française*, France
- Pahl-Wostl C et al. (2007) Managing change toward adaptive water management through social learning. *Ecology and Society* 12
- Palier B (2010) *Dépendance au chemin emprunté*. Presses de Sciences Po, Paris, France
- Palumbi SR (2001) Humans as the World's Greatest Evolutionary Force. *Science* 293:1786–1790
- Paoletti E et al. (2007) Impacts of Air Pollution and Climate Change on Forest Ecosystems — Emerging Research Needs. *The Scientific World JOURNAL* 7:1–8
- Parance B, de Saint Victor J (2014) *Repenser les biens communs*. CNRS Editions, France
- van Pelt SC et al. (2015) Communicating climate (change) uncertainties: Simulation games as boundary objects. *Environmental Science & Policy* 45:41–52
- Perez P et al. (2010) Évaluation et suivi des effets de la démarche. In: *La modélisation d'accompagnement: Une démarche participative en appui au développement durable*. Michel Étienne pp. 153–181.
- Perrin M et al. (2017) Plaidoyer pour le développement d'une action climatique régionale : aménagement de l'espace, usage des sols et conditions atmosphériques. *Norois. Environnement, aménagement, société* 29–45
- Pettorelli N et al. (2006) Using a proxy of plant productivity (NDVI) to find key periods for animal performance: the case of roe deer. *Oikos* 112:565–572
- Petucco C, Abildtrup J, Stenger A (2015) Influences of nonindustrial private forest landowners' management priorities on the timber harvest decision—A case study in France. *Journal of Forest Economics* 21:152–166

Bibliographie

- Phelps J, Webb EL, Agrawal A (2010) Does REDD+ Threaten to Recentralize Forest Governance? *Science* 328:312–313
- Poinsot Y (2008) Les enjeux géographiques d'une gestion durable de la faune sauvage en France. *Annales de géographie* n° 663:26–47
- Polomé P (2016) Private forest owners motivations for adopting biodiversity-related protection programs. *Journal of Environmental Management* 183:212–219
- Ponthieux S (2004) Le concept de capital social, analyse critique. In: 10e colloque de l'ACN. pp. 21–23.
- Porté A, Bartelink HH (2002) Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. *Ecological Modelling* 150:141–188
- Pramova E et al. (2012) Forests and trees for social adaptation to climate variability and change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 3:581–596
- Pretzsch H et al. (2010) Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. *Annals of Forest Science* 67:712–712
- Primmer E et al. (2014) Forest owner perceptions of institutions and voluntary contracting for biodiversity conservation: Not crowding out but staying out. *Ecological Economics* 103:1–10
- ProSilva (2017) Pro Silva France.
- Purseigle F (2012) Introduction. *Études rurales* 19–23

Bibliographie

- Ranville A (2018) Mieux comprendre les facteurs de succès de la coopérative avec la théorie de l'auto-organisation d'Elinor Ostrom. *RECMA* N° 347:92–110
- Reckien D, Eisenack K (2013) Climate Change Gaming on Board and Screen: A Review. *Simulation & Gaming* 44:253–271
- Redford KH, Adams WM (2009) Payment for Ecosystem Services and the Challenge of Saving Nature. *Conservation Biology* 23:785–787
- Redpath SM et al. (2018) Games as Tools to Address Conservation Conflicts. *Trends in Ecology & Evolution* 33:415–426
- Reghezza-Zitt M et al. (2012) What resilience is not: uses and abuses. *Cybergeog: European Journal of Geography*
- Rey-Valette H et al. (2012) Les plages du littoral languedocien face au risque de submersion : définir des politiques de gestion tenant compte de la perception des usagers. *Géographie, économie, société* 14:369–391
- Richard E (2013) L'action publique territoriale à l'épreuve de l'adaptation aux changements climatiques : un nouveau référentiel pour penser l'aménagement du territoire ? François Rabelais, Tours
- Rip A, Jacob, Merle, Hellstrom, Tomas (2000) Fashions, Lock-ins and the Heterogeneity of Knowledge Production. In: *The Future of Knowledge Production in the Academy*. Society for Research into Higher Education and Open University, Netherlands pp. 28–39.
- Robinson AP, McLarin M, Moss I (2016) A simple way to incorporate uncertainty and risk into forest harvest scheduling. *Forest Ecology and Management* 359:11–18

Bibliographie

- Röling N, Maarleveld M (1999) Facing strategic narratives: In which we argue interactive effectiveness. *Agriculture and human values* 16:295–308
- Rosenvald R, Lõhmus A (2008) For what, when, and where is green-tree retention better than clear-cutting? A review of the biodiversity aspects. *Forest Ecology and Management* 255:1–15
- Roux A, Dhôte J-F (2017) Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. INRA-IGN, Paris, France
- Sadin É (2015) *La Vie algorithmique. Critique de la raison numérique. L'Échappée*. Paris, France
- Saetren H (2005) Facts and myths about research on public policy implementation: Out-of-Fashion, allegedly dead, but still very much alive and relevant. *Policy Studies Journal* 33:559–582
- Saint-Andrieux C (1994) Dégâts forestiers et grand gibier. 1. Reconnaissance et conséquences. Supplément Bulletin Mensuel de l'Office National de la Chasse, November
- Sandler T (2010) Common-property resources: privatization, centralization, and hybrid arrangements. *Public Choice* 143:317–324
- Sansilvestri R (2015) *Evaluation de la capacité adaptative des socio-écosystèmes forestiers français face au changement climatique: le cas de la migration assistée*. Paris Saclay
- Sansilvestri R, Frascaria-Lacoste N, Fernández-Manjarrés JF (2015) Reconstructing a deconstructed concept: Policy tools for implementing assisted migration for species and ecosystem management. *Environmental Science & Policy* 51:192–201
- Sarrazin F, Lecomte J (2016) Evolution in the Anthropocene. *Science* 351:922–923

Bibliographie

- Savoie J-M, Largeteau ML (2011) Production of edible mushrooms in forests: trends in development of a mycosilviculture. *Applied Microbiology and Biotechnology* 89:971–979
- Schrijver A de et al. (2012) Tree species traits cause divergence in soil acidification during four decades of postagricultural forest development. *Global Change Biology* 18:1127–1140
- Seguin B (2003) Adaptation des systèmes de production agricole au changement climatique. *Comptes Rendus Geoscience* 335:569–575
- Seidl R et al. (2016) The sensitivity of current and future forest managers to climate-induced changes in ecological processes. *Ambio* 45:430–441
- Semal L, Villalba B (2013) Obsolescence de la durée. La politique peut-elle continuer à disqualifier le délai ? In: *L'évaluation de la durabilité. Indisciplines* Franck-Dominique Vivien, Jacques Lepart, Pascal Marty, Paris.
- Sérès C (2010) L'agriculture de montagne face au changement climatique : exposition des territoires et marges de manœuvre des exploitations laitières. 14
- Sergent A (2010) Régulation politique du secteur forestier en France et changement d'échelle de l'action publique. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 96–110
- Shove E (2003) Principals, agents and research programmes. *Science and Public Policy* 30:371–381
- Simonet G (2009) Le concept d'adaptation : polysémie interdisciplinaire et implication pour les changements climatiques. *Natures Sciences Sociétés* 17:392–401
- Simons AM (2011) Modes of response to environmental change and the elusive empirical evidence for bet hedging. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 278:1601–1609

Bibliographie

- SINCERE, European Forest Institute (2018) Spurring INnovations for forest eCosystem sERvices in Europe. SINCERE
- Soulé ME (1985) What Is Conservation Biology? *BioScience* 35:727–734
- Spittlehouse DL, Stewart RB (2004) Adaptation to climate change in forest management. *Journal of ecosystems and management* 4
- Stephenson NL et al. (2014) Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature* 507:90–93
- Sylv'ACCTES (2018a) Communiqué de presse du 2 février 2018.
- Sylv'ACCTES (2018b) Sylv'ACCTES. Sylv'ACCTES, des forêts pour demain
- Thoenig J-C (1973) L'ère des technocrates: le cas des Ponts et Chaussées. Paris, Les Editions D'Organisation
- Thompson I et al. (2014) Forest resilience, biodiversity, and climate change: a synthesis of the biodiversity, resilience, stability relationship in forest ecosystems.
- Thuiller W et al. (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102:8245–8250
- Toïgo M et al. (2015) Overyielding in mixed forests decreases with site productivity Canham, C, editor. *Journal of Ecology* 103:502–512
- Traïni C (2000) Les braconniers de la politique. *Sciences Po Juin*:79
- Tronquet C, Grimault J, Foucherot C (2017) Projet VOCAL - Potentiel et déterminants de la demande volontaire en crédits carbone en France. *Etudes Climat*, January
- Trumbore S, Brando P, Hartmann H (2015) Forest health and global change. *Science* 349:814–818

Bibliographie

- de Turckheim B, Bruciamacchie M (2005) La futaie irrégulière - Théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. Edisud. Saint-Remy-de-Provence
- Turner BL, Robbins P (2008) Land-Change Science and Political Ecology: Similarities, Differences, and Implications for Sustainability Science. *Annual Review of Environment and Resources* 33:295–316
- UCFF (2019) Reportage radio RFI sur la coopérative UNISYLVA et la gestion des forêts. Les coopératives forestières
- Uelmen JA et al. (2016) Effects of winter temperatures, spring degree-day accumulation, and insect population source on phenological synchrony between forest tent caterpillar and host trees. *Forest Ecology and Management* 362:241–250
- UICN France (2018) Les Solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France. IUCN, Paris, France
- UNESCO (2019) Chaîne des Puys - Limagne fault tectonic arena - UNESCO World Heritage Centre.
- UNFCCC (2007) Kyoto Protocol - reference manual on accounting of emissions and assigned amount. UNFCCC, Bonn, Germany
- Vaissière A-C et al. (2019) Quelles implications possibles du monde agricole dans la compensation écologique ? Vers des approches territoriales. HAL
- Van Gameren V (2014) L'adaptation de la gestion forestière privée au changement climatique : le cas wallon. *Sud-Ouest Européen Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 63–75
- Vidalou J-B (2017) Être forêts - Habiter des territoires en lutte.

Bibliographie

- Villalba B (2015) Développement durable et territoires, Vol. 6, n°2 | Septembre 2015.
Développement durable et territoires 6:5
- Walmsley JD, Godbold DL (2010) Stump Harvesting for Bioenergy - A Review of the Environmental Impacts. *Forestry* 83:17–38
- Weinstein ND (1984) Why it won't happen to me: perceptions of risk factors and susceptibility. *Health psychology* 3:431
- Western D (2001) Human-modified ecosystems and future evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98:5458–5465
- Westley F et al. (2002) Why systems of people and nature are not just social and ecological systems. In: In: Gunderson, LH and CS Holling (eds.). *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, 103-119. Island Press p. 532.
- Williams CM, Henry HAL, Sinclair BJ (2015) Cold truths: how winter drives responses of terrestrial organisms to climate change. *Biological Reviews* 90:214–235
- Wohlgemuth T et al. (2002) Dominance reduction of species through disturbance—a proposed management principle for central European forests. *Forest Ecology and Management* 166:1–15
- Wohlleben P (2017) *La Vie secrète des arbres*. Les Arènes. France
- Wolfslehner B, Prokofieva I, Mavsar R (2019) Non-wood forest products in Europe: Seeing the forest around the trees. European Forest Institute.
- Woods A, Coates KD, Hamann A (2005) Is an Unprecedented Dothistroma Needle Blight Epidemic Related to Climate Change? *BioScience* 55:761–769

Bibliographie

- Wu JS, Lee JJ (2015) Climate change games as tools for education and engagement. *Nature Climate Change* 5:413–418
- Yachi S, Loreau M (1999) Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96:1463–1468
- Yousefpour R et al. (2012) A review of decision-making approaches to handle uncertainty and risk in adaptive forest management under climate change. *Annals of Forest Science* 69:1–15
- Yuan W et al. (2019) Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances* 5:eaax1396
- (2015) *Dictionnaire de la pensée écologique*. Presses universitaires de France. Paris

ACRONYMES

Liste non exhaustive.

ACC Adaptations aux Changements Climatiques	GIEC Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie	IDF Institut de Développement Forestier
ANR Agence Nationale de la Recherche	IFN Inventaire Forestier National
AOC Appellation d'Origine Contrôlée	INRA Institut National de la Recherche Agronomique
BSE Biens et Services Écosystémiques	IRSTEA Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
CC Changements Climatiques	LCC Low Carbon Certification
CNRS Centre National de la Recherche Scientifique	MF Main Focus
COFOR Communes FOREstières	NF Normandie Forêver
COP Contrat d'Objectifs et de Performance	NRP Natural Regional Park
CRPF Centre Régional de la Propriété Forestière	ONF Office National des Forêts
CNPF Centre National de la Propriété Forestière	ORE Obligations Réelles Environnementales
DFCI Défense des Forêts Contre les Incendies	PEFC Programme for the Endorsement of Forest Certification
ECOFOR Groupement d'Intérêt Public ÉCOsystèmes FOREstiers	PNR Parc Naturel Régional
ES Ecosystem Services	PSE Paiements pour Services Écosystémiques
ETF Entreprises de Travaux Forestiers	PSG Plan Simple de Gestion
EU European Union	SACC Sylv'ACCTES
FFN Fonds Forestier National	SES Socio-ÉcoSystèmes
FNCOFOR Fédération Nationale des Communes Forestières	SFN Solutions Fondées sur la Nature
FSC Forest Stewardship Council	SFO Sustainable Forest Operations
GES Gaz à Effets de Serre	SHS Sciences Humaines et Sociales
GHG GreenHouse Gases	TIC Technologies de l'Information et de la Communication

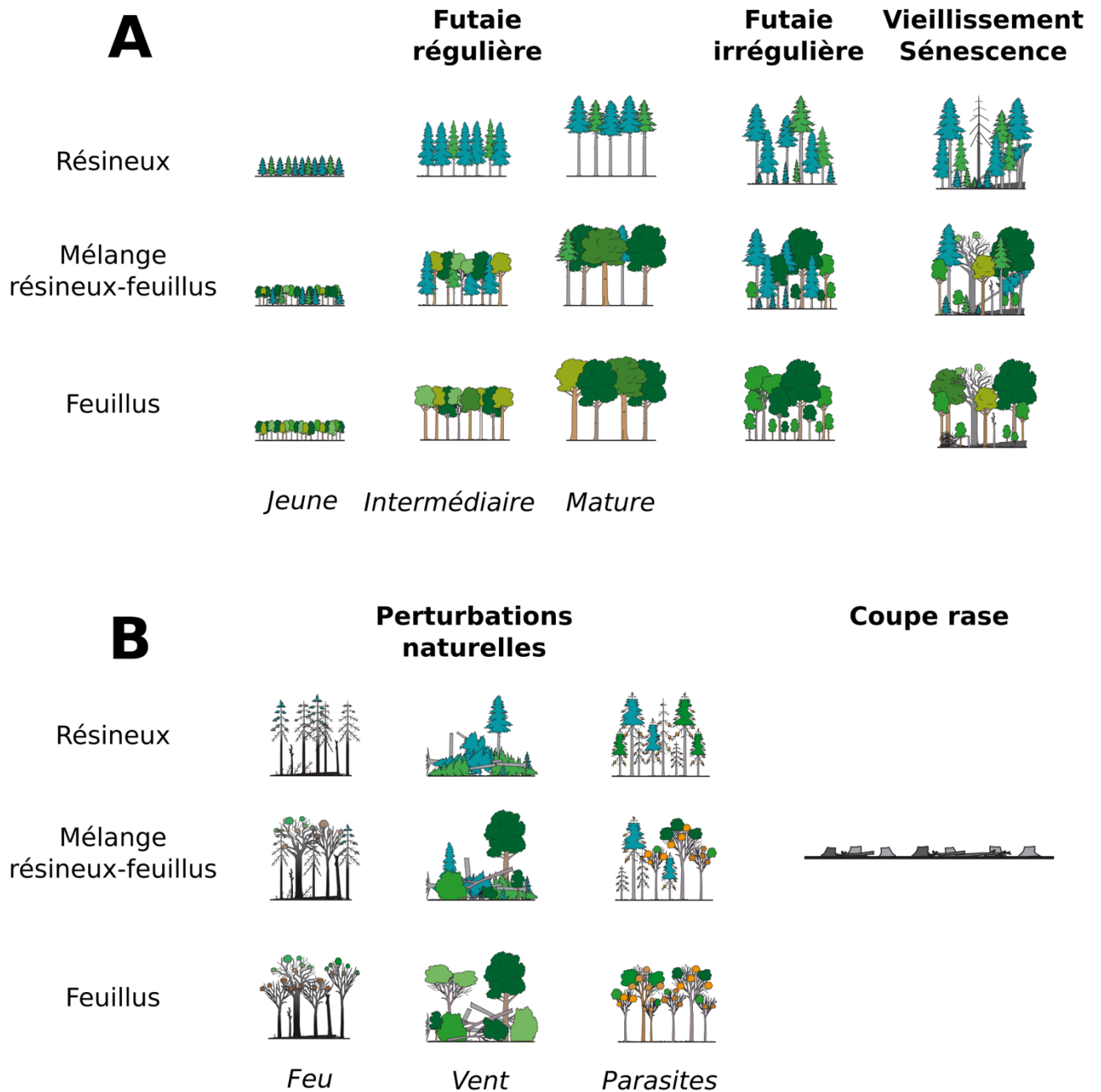
IMAGIER

Figure 32. Diversité des types des peuplements forestiers.

A : En futaie régulière, le couvert n'est pas continu à l'inverse de la futaie irrégulière. La futaie irrégulière n'est pas synonyme de mélange d'essences, même si c'est un cas extrêmement fréquent.

B : Des perturbations naturelles ou anthropiques peuvent changer la face d'un peuplement.

Les illustrations sont tirées de Börner, Bellassen, et Luyssaert (2010).



LISTE DES FIGURES

Sauf mention contraire, les figures sont œuvres de l'auteur.

Pour les photographies, l'absence de crédit indique une image libre de droit.

Figure 1. (En exergue) Des forêts qui se déplacent : l'inimaginable a bien lieu. _____	13
Figure 2. Échantillon de la couverture médiatique et audiovisuelle des thématiques forestières durant le doctorat. _____	13
Figure 3. La forêt métropolitaine en chiffres. _____	18
Figure 4. Taux de boisement des départements métropolitains. _____	18
Figure 5. Typologie des gestions forestières selon leur intensité. _____	20
Figure 6. Première de couverture de l'ouvrage collectif France, ta forêt fout le camp ! _____	25
Figure 7. Médiation de l'expérience forestière par les technologies de l'information et de la communication. _____	26
Figure 8. Transcription régionale des orientations forestières nationales et documents de gestion durable affiliés. _____	30
Figure 9. Y a-t-il une stratégie des Stratégies ? Logo des politiques publiques françaises en lien avec la forêt. _____	31
Figure 10. Incendie de l'entreprise corrézienne de travaux forestiers MECABIOFOR. _____	35
Figure 11. Sensibilité à la sécheresse et à la température des essences françaises les plus communes. _____	41
Figure 12. L'argumentaire du changement climatique, mobilisé à tout propos. _____	49
Figure 13. Terrains d'études des différentes parties de la thèse. _____	60
Figure 14. Climate-related drivers of forestry evolutions and their implementation. _____	71
Figure 15. Climate change adaptations rely on technical operations at different decision stages of forest management. _____	72
Figure 16. Forestry adaptations to climate change focus on productive ecosystem goods and services. _____	74
Figure 17. Main focuses (MFs) of research projects funded by strategy-oriented programs and their categorization. _____	101
Figure 18. Cumulative number of projects per year, with main focuses indicated. _____	102
Figure 19. Evolution of the number of projects explicitly mentioning mitigation in their content description. _____	103
Figure 20. Framework of voluntary carbon offset contracts. _____	126
Figure 21. A simplified version of Foster Forest conceptual model. _____	135
Figure 22. UML overview of the Foster Forest agent-based model. _____	138
Figure 23. Parameters modulating the growth of trees in Foster Forest. _____	139
Figure 24. Set-up of a participatory simulation of Foster Forest. _____	141
Figure 25. Evolution of a plot's soil fertility. _____	163
Figure 26. La presse régionale, relai des inquiétudes pesant sur l'avenir des forêts. _____	171
Figure 27. L'appellation d'origine contrôlée « Bois de Chartreuse ». _____	185
Figure 28. L'examen du permis de chasse, une occasion de sensibiliser les chasseurs à la gestion forestière. _____	191
Figure 29. La place des perturbations naturelles dans les dynamiques écologiques des forêts, une inconnue bien connue. _____	194
Figure 30. Le logo du mouvement ProSilva, pour une gestion forestière au long cours. _____	199
Figure 31. De la différence des cycles de vie entre humains et arbres. _____	201
Figure 32. Diversité des types des peuplements forestiers. _____	248

LISTE DES TABLEAUX

<i>Table 1. Anonymized list of interviewees, identified by region and connection with forestry.</i>	81
<i>Table 2. Sample list of 17 research projects funded by strategy-oriented programs.</i>	99
<i>Table 3. Pairing of the two main focuses for the research projects funded by strategy-oriented programs.</i>	100
<i>Table 4. Analytical focus of the participatory simulations.</i>	146
<i>Table 5. ODD+D description of Foster Forest participatory simulations.</i>	152
<i>Table 6. Temporal evolution of recruitment, growth, and death parameters per species.</i>	159
<i>Table 7. Parameters used in the forest growth model and the initialization of the Foster Forest agent-based model.</i>	160
<i>Table 8. Ecological and social parameters used in Foster Forest.</i>	164

ANNEXES



Les services forestiers récréatifs, l'occasion pour les gestionnaires forestiers de présenter les adaptations aux promeneurs. Ici, la pause méridionale, à Bitche.
Crédit photographique : Timothée Fouqueray.

Dans cette thèse, les recherches relatives à l'adaptation aux changements climatiques se sont uniquement fondées sur le cas d'étude de la gestion forestière. Pourtant, tout socio-écosystème est concerné par la mise en place de stratégies d'adaptation, chacun à sa manière.

Les annexes 1 et 2 présentent chacune une « excursion » scientifique, menées durant le doctorat pour étoffer ma vision de la gestion adaptative et des dérèglements climatiques à des milieux différents de la forêt.

L'annexe 1 expose le fruit d'un travail auquel m'a invité François Bertrand, géographe tourangeau. Dans cet article, qui a fait l'objet d'une publication dans la revue géographique *Norois*⁴¹, nous revenons sur la démarche de gestion adaptative du service biodiversité du PNR « Loire-Anjou-Touraine », dans une région à laquelle nous sommes tous deux attachés.

L'annexe 2 s'intéresse à la relocalisation stratégique, un outil d'adaptation aux changements climatiques pour les littoraux. Les réponses techniques (digues, ré-ensablement, etc.) ne pouvant à elles seules répondre à l'inéluctable montée du niveau de la mer, un projet de loi récemment déposé a suggéré de considérer ce mode d'adaptation pour certains fronts de mer. Ce travail a été publié dans la revue *Restoration Ecology*⁴².

L'annexe 3 est un travail collectif, co-écrit avec Sarah Cogos et Pierre Chassé, eux aussi doctorants dans l'équipe TESS. Elle décrit les résultats d'une analyse des pratiques interdisciplinaires des doctorants français en sciences de l'environnement. Aboutissement d'une lente, perturbante, mais toujours souriante réflexion tricéphale, ce tapuscrit a récemment été soumis au regard éditorial de la revue *Natures Sciences Sociétés*.

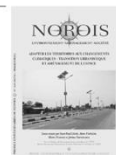
L'annexe 4 est issue du travail de Victoria Soubeiran, dont j'ai encadré le stage de sa première année de master en Écologie, Biodiversité, Évolution (Université Paris Sud). C'est un court article, qui a été publié dans la catégorie « Des mots pour le dire » de la revue *Espaces Naturels – Revue des professionnels de la nature*.

⁴¹ <https://journals.openedition.org/norois/6224>

⁴² <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/rec.12836>

1. Un Parc Naturel Régional en apprentissage : enseignements d'une démarche d'adaptation aux changements climatiques des actions en faveur de la biodiversité

NOROIS N° 245, 2017/4, p. 47-61



Un Parc Naturel Régional en apprentissage : enseignements d'une démarche d'adaptation aux changements climatiques des actions en faveur de la biodiversité

A French Regional Natural Park on a Learning Curve: Insights from an Approach of Adapting Biodiversity Conservation to Climate Change

François BERTRAND^a et Timothée FOUQUERAY^b

^a Auteur correspondant, CITERES, UMR 7324 université de Tours, 37 000 Tours, France.
(bertrandfrancois@gmx.fr)

^b Ecologie, Systématique, Évolution, AgroParisTech, CNRS, Univ. Paris-Sud, université Paris-Saclay, 91 400 ORSAY, France. (timothee.fouqueray@agroparistech.fr)

Résumé : L'adaptation au changement climatique (ACC) demeure l'enfant pauvre de l'action publique locale de conservation de la biodiversité. Comment anticiper les effets des changements climatiques et prendre des décisions dans des situations complexes et incertaines sur un territoire donné ? Quelles questions conceptuelles et pratiques cela soulève-t-il ? La problématique de l'adaptation vient en effet questionner les finalités des politiques en faveur de la biodiversité, leurs référentiels d'action et leurs modalités de mise en œuvre. Pour illustrer ces évolutions, les auteurs s'appuient sur le retour d'expérience du Parc Naturel Régional (PNR) Loire-Anjou-Touraine qui a initié en interne une démarche d'intégration expérimentale. Afin d'élaborer une stratégie d'ACC et d'alimenter la révision de sa charte, le PNR a passé ses actions pour la biodiversité au crible de l'ACC. Cet article mêle sciences de l'aménagement et de la conservation pour analyser les apprentissages et implications socio-écologiques issus de cette expérimentation.

Abstract: *Adaptation to the consequences of climate change remains a blind spot in local public action aimed at biodiversity conservation. In order to anticipate the effects of climate change and take administrative decisions in uncertain and complex situations, policymakers seek rigorous tools, along with support and assistance. How can territories adapt to climate change? What conceptual and practical questions does this raise? What actions result from such questions? It is with this in mind that the Loire-Anjou-Touraine Regional Natural Park is reviewing its policies and practices with regard to climate change, with a view to revising its charter. A test phase has been implemented internally, ending in 2018, to encourage elected representatives, agents and partners associated with the park to highlight specific territorial issues related to biodiversity and climate-change processes. In order to develop a climate-change adaptation strategy for local biodiversity, the park has chosen to review its strategic plan, operations and measures, and analyze the risks and opportunities for biodiversity that are brought about by climate change. Here, the authors make use of land-use planning and conservation sciences to analyze what practical socio-ecological consequences arise and what methodological lessons can be learned as a result of this experimental approach.*

Mots clés : changement climatique – biodiversité – gestion adaptative – apprentissage social

Keywords: *climate change – biodiversity – adaptive management – social learning*

Article reçu le 27 janvier 2017 ; définitivement accepté le 30 septembre 2017

INTRODUCTION

Comment l'adaptation aux changements climatiques (ACC) contribue-t-elle à l'évolution des politiques et des pratiques locales en faveur de la biodiversité ? Les changements climatiques remettent en cause les réponses attendues des écosystèmes aux choix actuels de gestion. Plusieurs considérations soulignent l'importance de ces liens entre les effets des changements climatiques et la biodiversité. L'atténuation du réchauffement climatique, par exemple, pourrait laisser plus de temps à l'adaptation biologique des êtres vivants. Inversement, de nombreuses études mettent en avant les intérêts climatiques de la conservation de la biodiversité : meilleur stockage de carbone dans des écosystèmes, hausse des réponses fonctionnelles à une perturbation et donc des chances pour le milieu naturel de la surmonter, etc. (Campbell *et al.*, 2008). Si une prise en compte par la communauté politique internationale de la nécessaire intégration des problématiques d'atténuation, d'adaptation et de biodiversité est observée¹, les traductions opérationnelles à des échelles locales demeurent rares jusqu'à récemment. En France, ni le plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC, 2011)² ni les politiques d'atténuation ne font mention des aires protégées. Et inversement, les stratégies nationales de création et de gestion d'aires protégées terrestres ou marines n'abordent pas la question du changement climatique, si ce n'est pour évoquer l'observation de ses impacts. Pourtant, la prise en compte de l'ACC peut mener à questionner les objectifs des politiques de conservation de la biodiversité, leurs référentiels d'action et leurs modalités de mise en œuvre.

Pour illustrer ces évolutions, l'article propose de discuter ces questions sur la base de l'analyse d'un cas concret : le Parc Naturel Régional (PNR) Loire-Anjou-Touraine³, qui a conduit une expérimentation consistant à évaluer ses actions pour la biodiversité au regard des enjeux de l'ACC.

En France, depuis une quinzaine d'années, si les changements climatiques sont devenus un nouvel

objet pour l'action publique locale, avec des obligations réglementaires d'intégration toujours croissantes (Bertrand, 2013), les préoccupations quant à l'ACC n'ont émergé que dans un second temps, après 2010. Les Parcs Naturels Régionaux (PNR) dans leur ensemble et le PNR Loire Anjou Touraine en particulier n'échappent pas à cet agenda. Cependant, ce « retard » en matière d'adaptation, commun à toutes les collectivités locales et EPCI, doit être nuancé pour les PNR. En effet, ils apparaissent comme des lieux particulièrement favorables pour initier des réflexions sur l'adaptation de leur territoire, d'une part, au titre de leurs missions⁴ et d'autre part, au titre de leur statut de syndicat mixte de projet, leur octroyant un rôle d'animateur et d'intermédiaire entre collectivités de différents niveaux (non-appartenance exclusive à un seul échelon territorial et non-concurrence avec les collectivités territoriales). Cette inscription institutionnelle multi-niveaux, « à côté » et en soutien des collectivités locales, et l'autonomie opérationnelle relative qui en découle, constituent des facteurs clés pour assurer des fonctions de mise à l'agenda et de médiation locale autour des questionnements relatifs à l'ACC (Bertrand, 2013).

Le PNR Loire-Anjou-Touraine s'est ainsi engagé volontairement dans un Plan Climat Territorial depuis 2006 et a initié réflexions et activités sur l'ACC depuis 2010. Plusieurs activités exploratoires de médiation et d'acculturation autour de la question du climat et de l'adaptation ont ainsi été conduites par deux agents du Parc, en charge de l'énergie et du climat et de l'éducation au territoire (Collectif, 2014; Fédération des Parcs Naturels Régionaux de France, 2015)⁵. Ces activités ont été préalables à une démarche d'intégration plus formalisée de l'ACC dans l'ensemble des actions du Parc. C'est ainsi que le Parc s'est engagé, dans la perspective de la révision de sa charte, à définir et déployer une méthodologie adaptable à l'ensemble de ses missions et qui

1. Notamment les travaux de la récente *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* – IPBES.

2. Le 2^e PNACC devrait faire mention des aires protégées (cf. les travaux de révision conduits en 2016-2017, [<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/adaptation-france-au-changement-climatique>]).

3. Le PNR LAT regroupe 128 communes adhérentes (200 600 habitants) autour d'un projet fort de préservation des patrimoines et de valorisation des ressources locales, inscrit dans sa charte pour 12 ans (2008-2020).

4. Selon l'article R333-4 du Code de l'Environnement, les 5 missions des PNR sont : la protection et la gestion du patrimoine naturel, culturel et paysager; l'aménagement du territoire; le développement économique et social; l'accueil, l'éducation et l'information; l'expérimentation, l'innovation.

5. On peut notamment citer un Forum sur les changements climatiques en 2010, la coproduction par le PNR d'un spectacle sur les changements climatiques en 2011 (« *Atmosphère, Atmosphère* » par la Compagnie Spectabilis), la tenue d'ateliers participatifs (« Valentine, voyage en 2050 ») auprès de divers publics (habitants, élus, scolaires...) afin de collecter différentes représentations des habitants sur les changements climatiques. Pour plus d'informations : [<http://parc-lat-climat.jimdo.com/outils-de-sensibilisation-au-climat/>].

aboutisse à la définition d'une stratégie d'ACC pour 2018. Pour élaborer et tester concrètement cette méthodologie, mais aussi pour faire sortir la problématique de l'adaptation de la seule mission Climat, le Bureau du Parc a missionné l'équipe technique du service Biodiversité et Paysages sur la thématique de l'adaptation en décembre 2014, la préservation de la biodiversité apparaissant comme l'une des priorités de la charte. Le service Biodiversité et Paysages et la mission Climat ont donc co-construit à partir de 2015 une « démarche-test » exploratoire qui a notamment abouti à un diagnostic des politiques « biodiversité » et des cartes d'impacts⁶. D'un point de vue pratique, le fait de disposer de certaines ressources s'est avéré indispensable à la réussite d'une telle démarche. Concernant l'allocation de temps, certains agents du Parc ont depuis plusieurs années investi cette thématique de l'adaptation ; plusieurs stagiaires ou volontaires en service civique ont également été mobilisés sur ce sujet, ces efforts permettant de rassembler une certaine expertise scientifique et opérationnelle sur cette problématique. Enfin, en termes de moyens financiers, l'investissement de longue date du Parc sur la question climatique et sur l'adaptation lui a permis de contractualiser avec l'ADEME sur cette thématique. Ces éléments de contexte se retrouvent fréquemment dans le cas de collectivités investies volontairement dans des politiques climatiques (Bertrand, 2013).

Cet article propose d'analyser cette expérimentation et le processus d'apprentissage mis en œuvre par le PNR avec le double regard des sciences de l'aménagement et de la conservation. Dans une première partie sont présentés le matériel d'étude, à savoir l'expérimentation conduite par le PNR, dans laquelle les auteurs ne sont pas intervenus, ainsi que le cadre théorique du *social learning* mobilisé pour notre analyse. L'article présente ensuite dans la deuxième partie les principaux enseignements que les agents du Parc ont tirés suite aux deux premières phases de leur expérimentation. Ces bénéfices et limites socio-écologiques potentiels qu'ils ont identifiés d'une adaptation de leurs politiques de préservation de la biodiversité aux enjeux du changement climatique sont discutés et mis en perspective par les auteurs, au regard des connaissances et débats en cours au sein des sciences de la conservation

6. Correspondants aux phases 1 et 2 de la figure 2.

et des recherches sur l'adaptation au changement climatique. Dans la troisième partie, le processus d'apprentissage mis en œuvre par le PNR autour de l'ACC et de ses actions en faveur de la biodiversité et ses effets en termes de gouvernance est étudié.

MATÉRIEL ET CADRES D'ANALYSE

Cette partie vise à présenter le matériel d'étude : l'expérimentation que le PNR a engagée dans le contexte plus large de ses actions déjà entreprises face aux changements climatiques (figure 1). Elle vise également à préciser la méthode et le cadre théorique que les auteurs ont utilisés pour conduire en deuxième et troisième parties l'analyse critique de cette expérimentation.

La démarche prospective du PNR pour intégrer l'ACC dans la politique de conservation de la biodiversité

En 2014, dans le cadre de l'évaluation du Plan Climat, l'absence de prise en compte formelle de l'ACC a été soulignée et a conduit le Bureau du Parc à missionner en décembre 2014 le Conseil Scientifique et Prospectif (CSP)⁷ et l'équipe technique du Parc pour travailler sur ce sujet. Un travail de synthèse des données bibliographiques sur les effets globaux et locaux du changement climatique a tout d'abord été effectué pour asseoir les réflexions sur la prise en compte de l'adaptation dans les activités du Parc (Parc Naturel Régional Loire-Anjou-Touraine, 2015). Depuis 2015, la notion d'adaptation a donc été intégrée dans le projet « énergie climat »⁸ du Parc. Ainsi, dans le cadre d'un *Contrat d'Objectif Territorial Énergie-Climat* signé avec l'ADEME en avril 2016, le Parc s'est engagé à déployer une stratégie d'ACC pour l'ensemble de ses projets d'ici 2018, notamment pour préparer la révision de sa charte (à partir de 2018, l'actuelle charte s'achevant en 2020). Une volontaire en service civique (d'octobre 2015 à mai 2016), encadrée par la chargée de mission énergie climat, a assisté les agents dans leur démarche.

7. Pour plus d'informations : [<http://www.parc-loire-anjou-touraine.fr/fr/le-parc/le-fonctionnement/conseil-scientifique-et-prospectif/>].

8. Le Plan Climat du Parc n'a pas évolué depuis l'évaluation, mais le Parc a continué à faire évoluer son projet général « énergie climat » en ayant été lauréat de l'appel à projet « Territoires à énergie positive pour la croissance verte ».

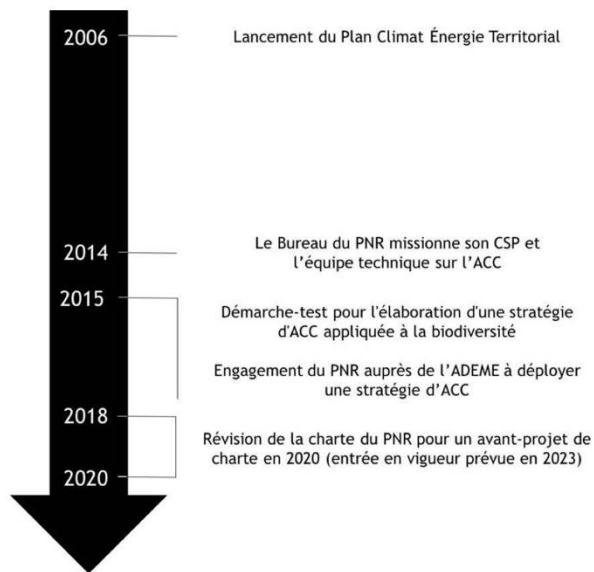


Figure 1 : Contexte de la démarche-test d'adaptation au changement climatique (inspiré de PNR LAT, décembre 2015; ACC : adaptation au changement climatique, CSP : conseil scientifique et prospectif) Context of the prospective approach on climate change adaptation (adapted from PNR LAT, Decembre 2015)

Cet article propose d'analyser *a posteriori* la démarche d'intégration de l'ACC conduite au sein du service Biodiversité Paysage du PNR sur la période allant de décembre 2015 à mai 2016 (correspondant à 12 séances de travail entre agents). Il repose sur une analyse réflexive des phases 1 et 2 de la démarche (figure 2), c'est-à-dire :

- de l'analyse des forces et des faiblesses de la politique du Parc en faveur de la biodiversité au regard des effets des changements climatiques connus;
- de la cartographie des impacts du CC sur les sites naturels du Parc.

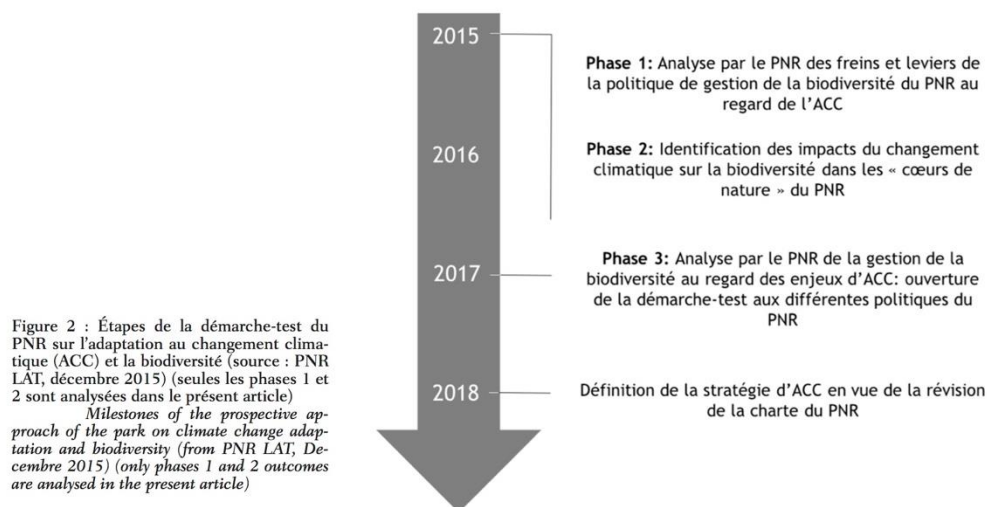
La phase 3, engagée en 2016, visant à élargir le processus de diffusion auprès des élus, des partenaires du Parc et des acteurs du territoire n'a pu être analysée dans le cadre de cet article.

D'un point de vue contextuel plus large, il est nécessaire de rappeler ici les étapes antérieures de l'appropriation de la problématique de l'adaptation, car elles apparaissent comme une condition de succès importante : de 2010 à 2014, deux agents au sein du Parc se sont saisis de la problématique de l'ACC et l'ont « travaillée » selon différents dispositifs (spectacle, animation pédagogique, éducation à l'environnement... – voir note 5).

Cadre théorique

L'analyse *a posteriori* de cette expérimentation est conduite avec un double regard, celui de la biologie de la conservation d'une part et celui de l'action climatique locale d'autre part. Il s'agit d'un essai d'évaluation des implications socio-écologiques de cette « démarche-test » autour de l'adaptation, et de ses effets en termes de gouvernance, de diffusion et d'acceptation de la problématique de l'adaptation.

L'expérimentation étudiée a conduit à interroger les modalités de gestion des ressources naturelles au regard des effets du changement climatique. Nous considérons ce dispositif comme un processus d'apprentissage permettant d'initier une gestion adaptative, définie comme un « processus systématique d'amélioration des pratiques et des politiques de gestion fondé sur un apprentissage basé sur la connaissance des résultats de stratégies ayant préalablement été mises en œuvre » (Pahl-Wostl *et al.*, 2007). Ce mode de gestion, qui insiste sur la démarche suivie, est souvent associé à l'organisation d'un apprentissage collectif (*social learning*) permettant de partager des références communes et de développer des stratégies adaptatives (Armitage, Marschke et Plummer, 2008; Bormann *et al.*,



1999). Pour évaluer les apports de cette démarche pour l'ensemble des compétences du PNR, nous mobilisons la théorie de la gestion et de l'apprentissage à trois niveaux (*single, double et triple loops*) (Pahl-Wostl, 2009). Cette approche considère que le changement des régimes de gouvernance provient de processus d'apprentissages. Par boucle simple, les auteurs entendent l'apprentissage lié aux améliorations méthodologiques qui ne remettent pas en question le cadre de l'action (apprentissage d'amélioration incrémentale des routines établies). Énoncé autrement, il s'agit de se demander si les gestionnaires suivent *bien* les pratiques de gestion (Taket *et al.*, 1998). La boucle double, elle, concerne l'apprentissage lié aux questionnements sur ce cadre d'action (apprentissage recadrant) : les gestionnaires ont-ils les *bonnes* pratiques? Enfin, la boucle triple vient reconsidérer les valeurs et visions du monde ayant débouché sur le cadre de l'action de gestion (apprentissage transformant) : les pratiques s'inscrivent-elles dans un contexte adéquat? N'est-il pas possible d'ouvrir ce cadre de gestion afin qu'il soit partagé par toutes les parties prenantes concernées?

Démarche d'analyse

Le point de départ de cet article est une communication présentée par des membres du PNR lors d'un séminaire consacré au croisement entre

démarches territoriales d'adaptation et problématiques de conservation de la biodiversité⁹. Ce texte a servi aux auteurs de première base pour une discussion critique de cette expérimentation. S'en est suivie une analyse *a posteriori* du processus et des contenus produits lors des phases 1 et 2 de l'expérimentation, sur la base d'une analyse de documents (notes de synthèses, documents de travail, cartes et comptes-rendus de réunions de l'équipe du Parc) et d'échanges avec les agents du Parc.

La partie II présente les résultats marquants issus de l'auto-évaluation du Parc sur ses prises de positions et décisions quant à l'adaptation de leurs politiques de préservation de la biodiversité aux enjeux du changement climatique. Ces résultats sont réorganisés et discutés au regard de certains concepts de l'aménagement et de la conservation, mobilisés par la problématique de l'adaptation territoriale : la spécialisation, le zonage et les périmètres de protection; l'articulation entre différentes échelles de gestion, spatiales et temporelles; les processus de décision et la gestion des incertitudes; la transversalité et la mise en cohérence effective entre différents objec-

9. « Démarche pour la définition d'une stratégie d'adaptation au changement climatique : cas de la biodiversité », communication d'Olga Baleyra (service civique), Lucile Stanicka (en charge du patrimoine naturel) et Florence Busnot-Richard (en charge de l'énergie et du climat), séminaire « Territoires, environnement et biodiversité face aux changements climatiques : impacts et adaptation », 11 mai 2016, Université de Poitiers et Communauté d'agglomération du Pays Châtelleraudais.

tifs de politiques publiques ; le maintien de la biodiversité génétique, spécifique, écosystémique ; les modalités de redéfinition des stratégies de conservation *in situ* ; les apports de la gestion adaptative ; la lutte contre la fragmentation des habitats.

La partie III est une analyse *a posteriori* s'inspirant de la théorie de l'apprentissage et s'appuyant sur la démarche du PNR décrite dans la figure 2.

L'ÉTAPE D'APPROPRIATION : LES BÉNÉFICES ET LES LIMITES DE L'ADAPTATION DES POLITIQUES DE PRÉSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ AUX ENJEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La première étape du test de la méthodologie des agents du Parc a consisté en une auto-analyse forces/faiblesses de la politique biodiversité du Parc sous le « prisme climatique » (Hahn et Fröde, 2011)¹⁰, c'est-à-dire qu'elle a été examinée vis-à-vis de sa capacité à faire face aux effets du changement climatique auxquels le territoire du Parc est susceptible d'être confronté. Cette analyse a été menée en interne et a porté sur les différentes composantes de la politique biodiversité du Parc (la gouvernance, la charte du Parc, le projet du service biodiversité).

Les questions que se sont alors posées les agents du Parc, tout au long de la phase 1 de leur démarche (figure 2), sont les suivantes : « *Mon action, ma politique, ma gouvernance, mon fonctionnement me permettent-ils d'intégrer et de s'adapter aux effets annoncés des changements climatiques ? Si oui, comment ? Si non, quels sont les freins à lever ? Quelle est la capacité du Parc (de sa politique, de ses élus et techniciens), en tant que gestionnaire, à prendre des mesures pour prévenir ou tirer profit des conséquences du changement climatique ?* »

Ensuite, l'analyse force/faiblesse a été étendue aux éléments externes qui échappent au contrôle du Parc mais qui affectent son activité et ses choix politiques, comme par exemple les moyens financiers mobilisés dans le cadre de conventions ou de contrats (Natura 2000 par exemple) ou encore, les politiques de préservation des espèces à l'échelle européenne et nationale.

Pour cette première phase (figure 2), l'équipe projet du Parc a conduit des entretiens semi-directifs avec les agents du service Biodiversité et Paysages, des élus et des acteurs du territoire en lien avec la biodiversité (associations naturalistes, Conservatoire d'Espaces Naturels, etc.).

À ce stade, le Parc tire plusieurs enseignements de ses travaux et questionnements : un cloisonnement entre les différents dispositifs en faveur de la biodiversité, une synergie entre des objectifs de conservation de la biodiversité et ceux de l'ACC, et enfin des interrogations sur les échelles spatiales et temporelles pour concevoir les politiques de conservation dans un contexte de changements climatiques.

La segmentation entre dispositifs d'actions, un frein pour mettre en œuvre l'adaptation de façon transversale

En menant l'analyse des différents programmes d'actions du Parc en matière de biodiversité, les agents constatent que les conventions et financements par contrats (contrats Natura 2000, contrats Nature, Mesures Agro-Environnementales...) et par missions conduisent à un découpage de l'activité du service Biodiversité et Paysages par espèces et par zones micro-géographiques.

Ce cloisonnement des actions et du temps de travail des agents constitue un frein au pilotage d'actions d'adaptation (dès lors qu'elles sortent de ces espaces privilégiés) et à la mise en cohérence de l'ensemble des activités du service. Enfin, il pose la question de la disponibilité des agents pour inventer et mettre en œuvre de nouvelles actions transversales, hors des dispositifs existants.

Au niveau des pratiques, l'évolution des politiques de biodiversité en lien avec les enjeux du climat ne va pas pour le Parc de pair avec l'évolution des référentiels de gestion et d'évaluation imposés par les donneurs d'ordres et financeurs. Si des évolutions sémantiques sont indéniables, comme les Mesures Agro-Environnementales qui ont évolué en Mesures Agro-Environnementales et Climatiques – MAEC – à la faveur de la nouvelle Politique Agricole Commune (2015-2020), elles ne s'accompagnent pas d'amélioration pratique sur le plan de l'adaptation (aucune modalité particulière de prise en compte des effets du CC n'est précisée dans le cahier des charges des MAEC). Il y a une segmentation entre les orien-

10. Cette approche se rapporte au « *Climate Proofing for Development* » développé par la GIZ, agence allemande de coopération internationale.

tations politiques et leurs mises en œuvre locales, comme l'illustre le cas des sites Natura 2000. Cette politique européenne institue un réseau de sites protégés, en vue d'assurer la conservation d'espèces et de milieux rares et menacés. À notre sens cependant, l'incertitude concernant la forme exacte des conséquences du changement climatique (migrations d'espèces, interactions symbiotiques...) interroge de plus en plus les chargés de mission sur la pertinence des actions qu'ils soutiennent ou mettent en œuvre. Or la « boîte à outils » dont ils disposent n'intègre pas (encore) ces possibles changements. Il n'y a pas non plus diffusion de consignes des services de l'État français (financeur et responsable de la mise en œuvre de la politique Natura 2000 sur le territoire national) pour les prendre en compte dans la gestion courante des sites. Ou lorsque des recommandations existent (European Commission, 2013), elles concernent davantage la gestion du réseau que la gestion par site, et ne parviennent pas jusqu'au niveau des agents.

Des pratiques de gestion des milieux naturels propices à leur adaptation aux changements climatiques

Les actions de conservation des milieux naturels menées par l'équipe du PNR, que ce soit à l'échelle d'un site ou de tout le territoire, nous paraissent propices à l'ACC des écosystèmes au vu des recommandations des sciences de la conservation. En effet, le changement climatique risque d'accroître l'intensité, la fréquence ou la répartition spatiale d'impacts déjà inclus dans la gestion actuelle de la biodiversité – qu'il s'agisse en l'occurrence d'inondations, de sécheresses... (Campbell *et al.*, 2008). Tout projet actuellement mené pour contribuer au bon état écologique des milieux naturels participe alors de l'ACC. En effet, la communauté scientifique des écologues s'accorde quant à l'importance de maintenir la fonctionnalité des écosystèmes, gage d'un équilibre dynamique entre adaptation *biologique* à un contexte donné et capacité d'innovation en cas de changement de ce contexte¹¹ (Stein *et al.*,

2013). Parmi de nombreux processus écologiques nécessaires à cet équilibre dynamique, on peut citer la connectivité des habitats naturels, leur taille, la préservation d'espèces fonctionnellement redondantes (pollinisateurs, frugivores, légumineuses...) (Hooper *et al.*, 2005).

Dès lors, toute action favorisant ces processus écologiques relève de l'ACC des milieux naturels. Même si elles n'avaient pas été identifiées *a priori* comme telles par les agents du Parc, de telles actions sont déjà réalisées. En effet, les plans de gestion menés par le Parc permettent des approches systémiques et multi-acteurs. Ainsi, en conservant une diversité des milieux, l'action du PNR favorise la richesse en espèces ainsi que la diversité génétique au sein des espèces. Ceci améliore la résilience des socio-écosystèmes en laissant de plus grandes possibilités d'innovations génétiques, comportementales et d'interactions entre les espèces (mutualistes, symbiotiques, compétitrices...). De plus, le Parc mène des actions concrètes en faveur de la connectivité des habitats naturels, notamment par la mise en place de la Trame Verte et Bleue (TVB)¹² qui vise à créer, maintenir ou restaurer des corridors écologiques¹³ bénéfiques au déplacement ou à la migration de certaines espèces. Dans les faits, ces actions passent par l'animation d'espaces emblématiques, tels que les réserves naturelles régionales ou les sites Natura 2000, ou l'accompagnement de collectivités dans le renforcement de la TVB.

L'adaptation aux changements climatiques renouvelle les référentiels temporels de la conservation de la biodiversité

Les évolutions des politiques publiques de conservation de la biodiversité sont affectées par la montée en puissance de l'ACC sur la scène politique (Füssel, 2007). En particulier se pose à nouveau la question des échelles d'action spatiales et temporelles. Tout d'abord, la question du temps, du temps qui passe et du temps qui reste pour prendre les bonnes trajectoires. Cet aspect de la question climatique a

11. À titre d'exemple, la composition des essences d'arbres d'une forêt et leur part relative dans le bouquet d'essences locales sera, sur une échelle temporelle propre à ces végétaux, en permanente reconfiguration. Gageons que la ressource en eau ne soit pas limitante jusqu'à ce qu'un changement du régime des pluies dû au changement climatique ait lieu. Dès lors, les arbres les plus adaptés à ce contexte céderont progressivement

leur place dans les milieux naturels à des essences plus efficaces dans leurs besoins en eau.

12. Le Parc conduit des chantiers pour restaurer des portions de trames manquantes, dans le cadre d'un contrat nature.

13. Espace reliant des écosystèmes ou des habitats naturels, qui permettent le déplacement des espèces ainsi que le brassage génétique de leurs populations.

indéniablement été sous-estimé, comme le rappelle Jacques Theys (2015). Ensuite, plus classiquement, la question de l'adéquation entre temporalités des politiques publiques (durée courte des mandats pour les élus locaux, 2 à 5 ans pour les conventions ou contrats de gestion ou 12 ans¹⁴ pour la charte du Parc) et temporalités longue des problèmes d'environnement (Beck *et al.*, 2006) est reposée dans la perspective de l'ACC. Les préoccupations se mêlent à des échelles temporelles diverses : temps court des adaptations aux impacts ponctuels et temps long de la prise en compte des changements climatiques graduels (modifications des régimes pluviaux, de courants atmosphériques...). D'après nous, une gestion adaptative efficace – fondée sur l'apprentissage des expérimentations récentes et améliorables en fonction des événements à venir – doit articuler ces temporalités multiples, ce qui demeure problématique dans le cadre actuel des politiques publiques de conservation.

Le choix d'une échelle temporelle adéquate pour optimiser l'ACC est intrinsèquement lié aux incertitudes portant sur la nature et l'intensité des impacts climatiques sur le territoire (Hawkins et Sutton, 2009). De ce fait, le référentiel temporel des politiques d'adaptation doit prendre en compte, à mesure qu'elles sont précisées, les améliorations futures des projections climatiques des impacts locaux. Ce référentiel oscille alors entre le pas de temps court des connaissances actuelles et le pas de temps long des avancées scientifiques, dans une vision dynamique et réversible des choix effectués, de manière à assurer le bon fonctionnement des écosystèmes. Une telle vision privilégie la protection des espaces naturels en mobilisant à la fois des approches de gestion dynamique et des dispositifs sociaux et économiques (Wu, 2008). Or, les outils de gestion de la biodiversité à disposition de l'action publique impliquent encore largement une vision relativement figée, traduisant une conception des politiques de protection de la nature seulement centrée sur la protection des espèces (espèces protégées, rares, menacées...).

Le maintien d'une approche d'ACC centrée sur la préservation à *court et moyen termes* des espèces pose assurément autant de questions qu'il en résout. À l'échelle du PNR, les interrogations de ses agents

ont ici porté sur le devenir des espèces dites patrimoniales ou remarquables. Aujourd'hui ciblées par les politiques locales de préservation de la biodiversité, elles sont susceptibles de se déplacer sous l'effet du changement climatique (migrations, arrivées de nouvelles espèces ou disparitions d'espèces actuellement présentes). Comment prévoir ces migrations et comment tenir compte de ces évolutions probables ? Le travail d'analyse mené par le Parc s'est appuyé essentiellement sur des espèces dites patrimoniales mais nous remarquons que leur questionnement pourrait de même s'appliquer aux espèces dites ordinaires. Ce questionnement peut aussi s'étendre aux espèces invasives, dont l'émergence peut être favorisée par les conditions climatiques futures.

De la difficulté de conserver espèces et espaces dans un contexte d'incertitudes climatiques

À la difficulté de penser les temporalités d'une gestion de la biodiversité répondant aux changements climatiques s'ajoute la question des échelles de l'action environnementale. La conception d'une conservation de la biodiversité centrée sur les espèces a en effet évolué vers la prise en compte des espaces, d'où la création de zonages de protection des milieux de vie des espèces (Centre d'étude du droit de l'environnement, 2002). Elle s'est plus récemment diversifiée pour introduire les préoccupations à *moyen et long termes* de processus écologiques plus évolutifs et complexes comme les continuités écologiques, ce qu'illustrent les travaux relatifs à la TVB. Toutefois, le déplacement éventuel des espaces protégés, en lien avec la mobilité « climatique » des habitats des espèces qui ont justifié au départ la désignation de ces espaces, n'est pas encore abordé (néanmoins, des études mentionnent le concept « d'aire protégée potentielle » pour répondre à d'éventuels besoins futurs, résultants des impacts prévisibles du changement climatique sur la biodiversité [Campbell *et al.*, 2008]).

En outre, l'évaluation de l'efficacité des politiques de préservation de la biodiversité mises en œuvre reste encore largement basée sur des indicateurs de présence et d'état de conservation de quelques espèces protégées, et porte peu sur la fonctionnalité des espaces.

14. Durée allongée à 15 ans par la loi pour la reconquête de la biodiversité d'août 2016.

L'expérience du PNR, en ce sens, est notable et instructive. De nombreux facteurs d'optimisation des ressources humaines, temporelles et financières peuvent intervenir dans le choix des espaces à protéger, qu'il s'agisse de la sensibilité des espèces au changement climatique – les options étant de se concentrer sur les espèces les plus vulnérables ou au contraire les plus à mêmes d'être sauvées – ou par exemple de privilégier les espaces accueillant le plus d'espèces vulnérables, voire les espaces dont on pense qu'ils pourront en accueillir le plus (Fischer *et al.*, 2009). À titre d'exemple, le PNR gère le site Natura 2000 des basses vallées de la Vienne et de l'Indre, désigné au titre de la Directive Oiseaux¹⁵ et qui vise la conservation de plusieurs espèces, dont le râle des genêts. Ce dernier serait amené à disparaître de ce territoire (Fourcade, 2014), entre autres en raison des modifications climatiques attendues localement. Or, cet oiseau correspond à une espèce parapluie : sa protection permet de préserver indirectement des milieux naturels (prairies humides fauchées) et d'autres espèces dépendant de ces mêmes milieux, qui font la richesse écologique de sites comme les Basses Vallées de la Vienne et de l'Indre. D'un point de vue tant écologique qu'éthique, il semble délicat d'abandonner les actions de préservation du râle tant qu'il est encore présent, en sachant qu'elles bénéficient à d'autres espèces, à moins de justifier d'un report des moyens vers d'autres actions de conservation, en anticipant sa disparition. Socialement, le choix d'arrêter de protéger les espèces patrimoniales vouées à disparaître du fait du changement climatique complique un peu plus la tâche des équipes du Parc. Au vu des efforts de dialogue réalisés, comment ne pas perdre l'adhésion des acteurs locaux mobilisés de longue date pour la préservation du râle, tels que les agriculteurs impliqués dans des pratiques spécifiques de fauche tardive, et réussir à maintenir ou réinventer suffisamment vite des messages et moteurs d'implication dans la préservation de la biodiversité? Enfin, la bascule vers une stratégie d'ACC centrée non plus uniquement sur les espèces et les espaces, mais bien aussi sur les dynamiques fonctionnelles des écosystèmes (connectivité, succession écolo-

gique, lutte contre la simplification des traits fonctionnels des écosystèmes...) induit une refonte de l'attribution des moyens, notamment financiers, des gestionnaires. Ces réflexions, accélérées par la nécessité de réviser prochainement la charte du Parc, portent sur une diversité de sujet, à l'instar de la gestion d'espèces à affinité nordique ou montagnarde aujourd'hui présentes en plaine et qui pourraient disparaître du territoire du Parc avec la hausse attendue des températures.

La tenue régulière d'un conseil scientifique et prospectif associant agents, élus et scientifiques, l'intérêt et les missions de conservation de la biodiversité sur un projet de territoire repensé tous les douze ans favorisent le rôle pilote du PNR. Les travaux présentés dans la troisième partie de l'article témoignent des apprentissages découlant de la réflexion visant à approfondir la prise en compte des effets du changement climatique dans les politiques de gestion de la biodiversité.

QUELS EFFETS DE LA DÉMARCHE D'ADAPTATION EN TERMES D'APPRENTISSAGES POUR LE PNR?

La deuxième étape de « démarche-test » conduite par les agents du Parc (figure 2) devait leur permettre de prendre conscience et d'identifier des perturbations, négatives ou positives, induites par le changement climatique sur la biodiversité locale. L'idée était de mobiliser l'expertise des agents afin de traduire les effets des changements climatiques sur des milieux naturels considérés comme identitaires en termes de biodiversité pour le Parc.

En se basant sur un recensement des impacts des changements climatiques pour le Parc, issu d'un travail bibliographique, les agents du service Biodiversité ont réalisé un travail prospectif afin d'identifier les secteurs qu'ils considèrent comme les plus vulnérables aux effets annoncés du changement climatique, parmi les sites naturels majeurs du Parc¹⁶ (qui sont aussi les mieux connus des agents) (figure 3). Sur la base de leurs connaissances, des évolutions passées et des tendances actuelles de

15. La Directive 2009/147/CE (appelée plus généralement Directive Oiseaux) du 30 novembre 2009 est une mesure prise par l'Union européenne afin de promouvoir la protection et la gestion des populations d'espèces d'oiseaux sauvages du territoire européen.

16. Ils correspondent aux 14 sites naturels exceptionnels (SNE) et aux 32 zones écologiques majeures (ZEM) définies dans la charte du Parc (2008-2020). Selon cette dernière, la vocation des SNE est la conservation de la biodiversité et les ZEM ont un intérêt biologique reconnu aux niveaux régional, national et européen et sont prioritaires pour mettre en œuvre des politiques de gestion contractuelle de la biodiversité.

L'exercice de prospective « climatique » mené au sein du Parc constitue ainsi une voie innovante de mobilisation des acteurs du territoire autour des connaissances et incertitudes du changement climatique, dont nous proposons d'analyser les enseignements à chacun des trois niveaux de la théorie de l'apprentissage de Pahl-Wostl (2009).

Boucle simple d'apprentissage : une prospective climatique mobilisant les connaissances disponibles en termes d'impacts territorialisés du changement climatique

Après de premiers exercices de médiation auprès du grand public autour de l'idée d'un climat futur modifié, le besoin de disposer de données scientifiques approfondies sur l'exposition du territoire au changement climatique a conduit la responsable « énergie-climat » du Parc à produire plusieurs synthèses bibliographiques, sur les impacts des changements climatiques pour le territoire du Parc puis sur la biodiversité en particulier¹⁷.

La difficulté à trouver des réflexions propres à leur territoire les a menés à solliciter des experts locaux, parmi lesquels des chercheurs, via plusieurs instances :

- la commission Biodiversité Paysages, regroupant notamment des universitaires (géophysiciens, géographes) et des naturalistes (Ligue de Protection des Oiseaux, Centre Permanent d'Initiatives pour l'Environnement...).

- le Conseil Scientifique et Prospectif du Parc (CSP), qui a planché sur la thématique, en plénière ou en groupe de travail réduit après avoir été saisi de la question de l'ACC par le bureau du Parc (cf. figure 1). Le CSP a alors consacré plusieurs séances à l'adaptation : séance plénière du 19 mars 2015, atelier du 2 juin 2015 « faire vivre socialement l'ACC », séance plénière du 9 décembre 2015 consacrée à la présentation des travaux du Parc et de travaux scientifiques¹⁸,

17. Parc Naturel Régional Loire-Anjou-Touraine, 2015. *L'adaptation au changement climatique : quels impacts pour le territoire – synthèse des données bibliographiques*, Montsoreau-Maison du Parc, Non publié. Parc Naturel Régional Loire-Anjou-Touraine, 2016. *Synthèse bibliographique : adaptation au changement climatique et biodiversité*, Montsoreau-Maison du Parc, Non publié.

18. Présentation de la démarche du Parc en cours « *La politique biodiversité du Parc à l'épreuve du changement climatique* » ; Exposé scientifique sur « *La Loire et le changement climatique* » ; Exposé scientifique sur

séance du 28 juin 2016 consacrée à la notion de résilience¹⁹.

Ce recours aux connaissances scientifiques et locales correspond pleinement à une boucle d'apprentissage simple : le premier pas pour une meilleure gestion de la biodiversité a été de réduire et préciser les incertitudes portant sur les impacts locaux du changement climatique. Suite à cet apprentissage simple, les gestionnaires du service Biodiversité et Paysages ont pu établir un diagnostic de la sensibilité des espaces remarquables du PNR pour chacun des neuf impacts du changement climatique retenus (graduels, ponctuels et écosystémiques, cf. *supra*).

Une des limites reconnues de l'exercice est la non-intégration de la capacité adaptative des milieux et des espèces dans cette boucle simple d'apprentissage. En effet, la vulnérabilité de la biodiversité est fonction de la sensibilité et de l'exposition au changement climatique. Il serait alors prématuré de préjuger qu'un milieu soit vulnérable sans en apprécier la capacité d'adaptation ; la composition des essences végétales du système bocager et prairial de l'Authion pourrait par exemple évoluer de sorte qu'il échappe à un stress hydrique en période sèche.

Néanmoins, conscients des limites de cette démarche et de l'impossibilité de complètement réduire les incertitudes, les membres du service Biodiversité Paysages se sont engagés dans une boucle d'apprentissage d'un niveau supérieur.

Double boucle d'apprentissage : les incertitudes de l'exercice de prospective climatique, vecteur de réflexivité pour les praticiens

Dans le contexte d'une démarche d'ACC comme celle présentée ici, la boucle d'apprentissage « double » est destinée à redéfinir le cadre de la gestion de la biodiversité en contexte d'incertitudes climatiques. Prendre en compte ces incertitudes induit une remise en cause des référentiels d'actions habituels des agents : plutôt que de chercher à *bien*

« *La biodiversité végétale ligérienne et le changement climatique : que savons-nous ? Travail sur les plaines inondables* » ; Exposé sur les sciences participatives avec le projet Vigie Nature du MNHN.

19. Matinée consacrée aux échanges entre les membres du CSP sur la notion de résilience, à partir de points de vue disciplinaires ; atelier thématique en groupe l'après-midi : « *Comment penser la résilience pour le territoire du Bourgueillois ?* »

faire les choses, il est désormais question de réviser si ce sont les *bonnes* actions à accomplir. Pour les agents du Parc, ce retour critique a permis d'identifier certaines zones d'ombres de l'ACC : ainsi, à l'issue de l'exercice de cartographie, plusieurs données sont identifiées comme manquantes pour calibrer le cadre des actions à entreprendre²⁰, à l'instar plus largement du cadre géographique de la gestion ou de l'évolution des compétences institutionnelles du PNR.

Dans cette dynamique interrogeant le bien-fondé du cadre externe de l'action des chargés de mission, la démarche d'ACC, qui intervient en amont de la révision de la charte, a interrogé l'axe de cette charte spécifiquement dédié à la conservation de la biodiversité. D'autres notes de service confirment cette réflexion quant au *bon* cadre de l'action ; elles montrent que cette boucle d'apprentissage double permet de questionner ensemble des cadres institutionnels des politiques publiques de la biodiversité, certains échappant au contrôle du PNR (MAEC, documents d'objectifs des zones classées Natura 2000, arrêtés préfectoraux de protection de biotope...) (cf. *supra*).

Cette deuxième boucle souligne les difficultés à définir un cadre institutionnel et spatial stable pour la gestion de la biodiversité, dans un contexte de changement climatique. La réflexion sur les *bonnes* pratiques à adopter se heurte ici aux incertitudes géographiques et biologiques propres à l'évolution du climat et à la complexité institutionnelle de la gouvernance de la biodiversité. La démarche, toutefois, est essentielle pour imaginer le meilleur exercice possible des compétences du PNR. Enfin, les avancées des travaux du PNR peuvent être étendues à un troisième niveau d'apprentissage : la reconnaissance par tous du besoin d'inventer collectivement une gestion des impacts du changement climatique.

Boucle triple d'apprentissage : une appropriation collective pour mettre en débat les adaptations du territoire

Les suites de cette « démarche-test » engagée au sein du service Biodiversité ont été d'ouvrir la construction d'une nouvelle méthodologie à l'ensemble des parties prenantes de l'ACC. La première boucle d'apprentissage accompagnant la démarche d'ACC a permis aux agents du PNR de prendre la mesure du cadre de l'ACC (meilleure connaissance des fréquences, intensités, cartographie de neuf impacts recensés) ; la deuxième boucle, elle, a permis d'identifier les modifications du cadre de gestion de la biodiversité à apporter pour le rendre compatible avec les objectifs de l'ACC. Une troisième boucle d'apprentissage a spontanément découlé de ces réflexions afin d'ouvrir la redéfinition du cadre de gestion à *tous* les acteurs concernés. La troisième étape de la démarche-test, qui n'a pas pu être étudiée ici car encore en cours de réalisation (cf. figure 1), marque cette ouverture. Elle consiste à identifier les actions aujourd'hui favorables à la biodiversité et renforçant la résilience et la capacité d'adaptation des écosystèmes face au changement climatique. Ces actions sont alors désignées comme étant « sans regrets » : des gains sont assurés *in fine* pour la biodiversité, quelles que soient les évolutions du climat. *A contrario*, les actions permettant de réduire une vulnérabilité, en la transférant dans le temps, dans l'espace, ou sur une autre espèce seront qualifiées de « mal adaptation » (Barnett et O'Neill, 2010). Cette analyse nécessite une ouverture aux autres champs d'intervention du Parc (urbanisme, tourisme...), afin de faire une analyse croisée avec les autres missions du PNR pour savoir si une action d'adaptation mise en œuvre en faveur de la biodiversité ne risque pas d'impacter négativement une autre mission du Parc, ou inversement.

CONCLUSION

Pour construire une stratégie d'adaptation et alimenter les travaux de révision de sa charte, le Parc Loire-Anjou-Touraine a débuté une démarche expérimentale sur la problématique de l'adaptation appliquée à ses actions en faveur de la biodiversité. D'abord conduite en interne au sein de son service Biodiversité et Paysages, cette démarche a ensuite

20. On peut donner, à titre d'exemple, ces différents éléments cités par les agents et compilés dans un document de travail interne au Parc de mai 2016 : « On ne peut pas se prononcer sur l'impact de l'augmentation de la T° (sur le long terme) sur les espèces. [...] – Risque de disparition du houx ? – Besoin d'informations sur les vignes. Les impacts du CC sur les ravageurs. – Le risque et le gonflement des argiles, plus accru qu'actuellement avec le CC ? – Quelles espèces de référence on se fixe ? – Quelles seront les espèces remarquables de demain ? [...] Le concept d'invasions biologiques devra être revisité pour redéfinir des concepts comme néoindigènes. – Mettre en place un suivi « climato-écologique » pour comprendre l'évolution des espèces, des habitats [...] – Pas de connaissance sur l'impact du CC sur le bocage. »

été étendue à la Commission Biodiversité et Paysages du Parc et a vocation à être partagée de façon élargie. Cet article a cherché à mettre en avant une série d'enseignements issus de cette expérience.

Tout d'abord, en interne au Parc, on constate que l'adaptation devient dès 2015 un sujet de travail rassemblant les différents agents en charge des politiques de biodiversité, puis par la suite l'ensemble du personnel. Dans ce processus, les réflexions sur l'adaptation servent de support pour décloisonner les agents de leurs secteurs d'intervention respectifs, mais plus encore pour animer l'équipe technique et politique autour du projet de révision de la charte et rassembler les agents autour de représentations partagées. Ensuite, vis-à-vis de l'extérieur, le Parc, par son positionnement institutionnel intermédiaire et aussi en mobilisant son CSP sur ce sujet, remplit pleinement son rôle de collectivité-pilote en défrichant les enjeux de l'ACC pour le territoire, en faisant dialoguer, via différentes modalités, les connaissances scientifiques et les enjeux de l'action locale. Il y a bien là une activité de traduction, c'est-à-dire une production et une diffusion de connaissances territorialisées pour élaborer une stratégie d'ACC et des principes d'action partagés. Toutefois, la portée de ces apprentissages reste très délicate à évaluer. Sur le territoire du Parc, ces réflexions pour décliner pratiquement l'adaptation peuvent-elles essaimer au-delà des élus et partenaires impliqués ? Notamment, comment intégrer ces apprentissages dans les documents de planification et d'urbanisme des EPCI et des communes partenaires du Parc, mais aussi auprès d'acteurs privés concernés comme ceux du tourisme, de la viticulture et de la foresterie ? Par ailleurs, au-delà du périmètre d'intervention du Parc, comment ces apprentissages peuvent-ils être partagés par d'autres Parcs ou d'autres gestionnaires de biodiversité plus largement ? La fenêtre temporelle étudiée ne permet pas de répondre à ces questions, bien que des lieux d'échanges potentiels puissent être identifiés, comme la fédération des PNR de France (et son Conseil d'Orientations, Recherche et Prospective) ou la commission « aires protégées » de l'UICN France²¹.

21. En novembre 2016, le Parc a partagé son expérience au sein du groupe de travail « Aires protégées et changements climatiques » de la commission « aires protégées » de l'UICN France. Celui-ci a par la suite rédigé une série de recommandations à destination des autorités de classement, des gestionnaires et des collectivités locales.

Cette expérimentation a permis d'interroger les pratiques et les référentiels des politiques locales de conservation de la biodiversité. Sont alors observés par les praticiens des obstacles déjà largement identifiés dans la littérature : la prise en compte d'incertitudes multiples et pour certaines irréductibles, l'ajustement délicat de périmètres de sauvegarde, par nature fixes et pourtant appelés à évoluer en fonction de certaines migrations d'espèces, la coordination d'actions conduites à plusieurs niveaux, la difficulté à intégrer les aires protégées dans des politiques sectorielles (planification, urbanisme, Politique Agricole Commune...), le passage délicat du « lutter contre » à « faire avec » le changement climatique, le traitement et le statut des espèces dites invasives, etc. Les questions soulevées à l'échelle du territoire par les effets du changement climatique illustrent pleinement les évolutions historiques des cadres de gestion de la biodiversité. L'approche spatiale a peu à peu été intégrée à une focale portant jusque-là seulement sur les espèces ; mais les recompositions probables et imprévisibles des communautés biologiques viennent questionner la pertinence d'une gouvernance environnementale régie par des objectifs de maintien de qualité des milieux naturels (notamment le choix des indicateurs de bon état des milieux). Ces recompositions résultent des interactions réciproques entre des espaces naturels et des assemblages d'espèces animales et végétales en interdépendance. Ces interactions sont exposées à la fois aux impacts du changement climatique (des plaines vouées à se transformer en zones d'expansion des crues, des pollinisateurs remontant vers le nord moins vite que les végétaux qu'ils fécondent...) et aux capacités d'adaptation de tous les composants des écosystèmes (modifications comportementales d'insectes pollinisateurs qui pourraient, au lieu de remonter de au nord, sortir à des heures plus fraîches ; mais comment prévoir alors la possibilité qu'ils se retrouvent alors aussi en présence d'un prédateur potentiel comme les chiroptères ?).

La bascule vers un mode de gestion de la biodiversité adaptatif, et non pas orienté par des objectifs « fixistes » – comme le maintien à tout prix de telle espèce ou tel milieu dans une zone donnée – est une réponse possible à ces incertitudes et à la complexité des interactions écologiques (Stein *et al.*, 2013). Dans un contexte donné et en l'état des connaissances, il s'agit de tester un mode de gestion, basé

sur l'apprentissage des expérimentations récentes et améliorables en fonction des événements à venir. La démarche de prospective climatique a peut-être permis l'introduction progressive dans les esprits de la possibilité d'un changement de paradigme dans la gestion de la biodiversité. L'objectif des interventions du Parc reste le respect des processus naturels dans l'évolution spatiale et temporelle d'espèces et d'espaces naturels ; mais là où l'obligation de résultats était jusqu'ici prépondérante, l'évaluation des politiques et pratiques de gestion risque, du fait des incertitudes climatiques, de basculer vers une logique d'obligation de moyens. L'apprentissage par ajustement et l'amélioration des expériences précédentes ne pourra, dans ce cas-là, que conforter les compétences de pilotage environnemental et social du territoire qu'exerce le PNR.

La démarche expérimentale de prospective étudiée ici peut s'inscrire dans le cadre d'une gestion adaptative, puisqu'il s'agit bien d'organiser un processus de décision à partir de connaissances issues du processus de gestion lui-même. Ici, seules les deux premières phases du processus de gestion adaptative, tel que décrit par l'UICN (Gross *et al.*, 2016) ont pu être analysées : l'évaluation des vulnérabilités et des risques, et l'identification et le choix des options d'adaptation. Les deux autres phases, la mise en œuvre des actions d'adaptation et le suivi et l'ajustement, n'ont donc pas pu être observées. Ces deux temps sont conduits au sein d'un des services du Parc, principalement par les gestionnaires d'aires protégées, en vase clos (l'association des scientifiques se fait dans des temps et des instances parallèles à la démarche), et l'élargissement à d'autres acteurs n'est prévu qu'à l'étape suivante.

Une limite de cette démarche-test est le caractère monosectoriel de l'analyse : celle-ci n'envisage le changement climatique qu'au regard de ses effets sur la biodiversité et l'adaptation n'est pensée que comme un ajustement des pratiques de gestion de la biodiversité. Il s'agit bien d'une réflexion sur les vulnérabilités des espèces et des espaces protégés et sur l'adaptation des plans de gestion au changement climatique. En ce sens, elle produit des apprentissages qui pourront être mis en œuvre dans les pratiques des gestionnaires de biodiversité du Parc et pourront servir à alimenter la réflexion sur la définition des objectifs de la future charte du Parc.

Néanmoins, la contribution des actions en faveur de la biodiversité aux objectifs d'adaptation (et non l'inverse) pour le territoire dans son ensemble n'est pas abordée, et seuls les aspects socio-écologiques sont considérés. Ainsi, les contributions des aires protégées à l'atténuation (stockage du carbone) et à l'adaptation (limitation de l'incidence d'évènements extrêmes comme des crues ou des sécheresses) n'est pas réellement envisagée durant ces phases de l'expérimentation. Les aires protégées sont donc considérées ici comme des « victimes » des effets du changement climatique, mais guère comme « solutions », en ce sens que leur rôle dans la politique climatique du Parc n'est pas réellement abordé.

Cette restriction et ce cloisonnement de la démarche peuvent s'expliquer par la nécessité de tester et donc de stabiliser une méthodologie, et pour se faire, de ne pas trop ouvrir le champ de l'analyse. La démarche du Parc initie une réflexivité et un réel apprentissage sur les pratiques des gestionnaires et, au-delà, formule et diffuse des représentations partagées des futurs climatiques du territoire et des enjeux en termes d'adaptation que pouvait poser la perspective de l'adaptation. Les prémices d'une culture territoriale de l'adaptation, de ses enjeux et de ses multiples perspectives apparaissent ainsi en gestation au sein du Parc. Le suivi de la mise en place de la troisième étape de cette démarche-test d'adaptation permettra d'observer comment l'équipe du Parc, en s'inspirant des apprentissages venus des deux premières étapes présentées ici, pourra dépasser les difficultés identifiées ici pour mener du mieux possible la révision de la charte.

Remerciements

Les auteurs tiennent à chaleureusement remercier l'équipe du PNR Loire-Anjou-Touraine, et notamment Florence Busnot-Richard et Lucile Stanicka, agentes en charge respectivement de l'énergie et du climat et du patrimoine naturel, ainsi qu'Olga Baleya, en service civique au Parc, pour leurs participations et leurs précieuses remarques ayant grandement contribué à l'émergence de cet article.

Bibliographie

- ARMITAGE D., MARSCHKE M., PLUMMER R., 2008. Adaptive co-management and the paradox of learning, *Global Environmental Change*, 18 (1), p. 86-98.
- BARNETT J., O'NEILL S., 2010. Maladaptation, *Global Environmental Change*, 20 (2), p. 211-213.
- BECK C., LUGINBÜHL Y., MUXART T., 2006. *Temps et espaces des crises de l'environnement*, Versailles, Quae éditions, 412 p.
- BERTRAND F., 2013. L'institutionnalisation locale des politiques climatiques en France, in BERTRAND F., ROCHER L. (dir.), *Les territoires face aux changements climatiques. Une première génération d'initiatives locales*, Bruxelles, édition Peter Lang, p. 25-70.
- BORMANN, B.T., MARTIN, J.R., WAGNER, F.H., WOOD, G., ALEGRIA, J., CUNNINGHAM, P.G., BROOKES, M.H. FRIESEMA P., BERG J., HENSHAW J., 1999. Adaptive management, in JOHNSON N.C., MALK A.J., SEXTON W., SZARO R. (eds), *Ecological stewardship: A common reference for ecosystem management*, 3, Amsterdam, Elsevier, p. 505-534.
- CAMPBELL A. et al., 2008. The linkages between biodiversity and climate change adaptation, *UNEP World Conservation Monitoring Centre*, 66 p.
- CENTRE D'ÉTUDE DU DROIT DE L'ENVIRONNEMENT (éd.), 2002. *Le zonage écologique*, Bruxelles, Bruylant.
- COLLECTIF, 2014. Passage obligé de l'adaptation aux mutations climatiques, *PARCS – Magazine de la Fédération des PNR*, 73, p. 16.
- EUROPEAN COMMISSION, 2013. *Guidelines on climate change and Natura 2000: dealing with the impact of climate change, on the management of the Natura 2000 network of areas of high biodiversity value*, Luxembourg, Publications Office, 105 p.
- FÉDÉRATION DES PARCS NATURELS RÉGIONAUX DE FRANCE, 2015. *51 Initiatives pour le climat- Les Parcs s'engagent*, Paris, 60 p. [<http://www.calameo.com/read/00003402418ebde73322d>].
- FISCHER J., PETERSON G.D., GARDNER T.A., GORDON L. J., FAZEY I., ELMQVIST T., FELTON A., FOLKE C., DOVERS S., 2009. Integrating resilience thinking and optimisation for conservation, *Trends in Ecology & Evolution*, 24 (10), p. 549-554.
- FOURCADE Y., 2014. *Approche intégrative de la stratégie de conservation du Rôle des génets*, Thèse de doctorat en biologie des populations et écologie, Université Nantes Angers Le Mans, 253 p.
- FÜSSEL H.M., 2007. Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons, *Sustainability Science*, 2 (2), p. 265-275.
- HAHN M., FRÖDE A., 2011. *Le « Climate Proofing » pour le développement – S'adapter au changement climatique. Réduire les risques*, Eschborn, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 38p. [<http://www.4c.ma/medias/climate-proofing-pour-le-developpement-fr.pdf>].
- HAWKINS E., SUTTON R., 2009. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90 (8), p. 1087-1107.
- HOOPER D.U., CHAPIN III F.S., EWEL J.J., HECTOR A., INCHAUSTI P., LAVOREL S., LAWTON J. H., LODGE D. M., LOREAU M., NAEEM S., SCHMID B., SETÄLÄ H., J. SYMSTAD A., VANDERMEER J., WARDLE D.A., 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge, *Ecological monographs*, 75 (1), p. 3-35.
- PAHL-WOSTL C., 2009. A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes, *Global Environmental Change*, 19 (3), p. 354-365.
- PAHL-WOSTL C., SENDZIMIR J., JEFFREY P., AERTS J., BERKAMP G., CROSS K., 2007. Managing change toward adaptive water management through social learning, *Ecology and Society*, 12 (2), p. 30. [<http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss2/art30/>].
- STEIN B. A., STAUDT A., CROSS M. S., DUBOIS N. S., ENQUIST C., GRIFFIS R., HANSEN L. J., HELLMANN J. J., LAWLER J. J., NELSON E. J., PAIRIS A., 2013. Preparing for and managing change: climate adaptation for biodiversity and ecosystems, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(9), p. 502-510.
- TAKET A., FLOOD R.A., ROMM N.R.A., 1998. Diversity Management: Triple Loop Learning, *The Journal of the Operational Research Society*, 49(3), 293 p.
- THEYS J., 2015. Le climat : une question de temps, *Natures Sciences Sociétés*, 23, p. 1-2.
- WU J., 2008. Changing perspectives on biodiversity conservation: from species protection to regional sustainability, *Biodiversity Science*, 16 (3), p. 205-213.

2. Managed retreat of settlements and infrastructures: ecological restoration as an opportunity to overcome maladaptive coastal development in France

Restoration Ecology
THE JOURNAL OF THE SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION

OPINION ARTICLE

Managed retreat of settlements and infrastructures: ecological restoration as an opportunity to overcome maladaptive coastal development in France

Timothée Fouqueray^{1,2} , Michel Trommetter³, Nathalie Frascaria-Lacoste¹

The effects of climate change on coastal risk factors are increasing due to both rising sea levels and increasingly intense coastal floodings. However, these changes are only just beginning to be incorporated into planning strategies for coastal economies and land use in France. Recent coastal storms marked the turning point, and public authorities have now started to revise coastal management legislation, stating that the managed retreat of settlements and infrastructure is the preferred strategy to adapt to climate change. To date, this managed retreat has almost exclusively been discussed in relation to the current political, social, and economic obstacles that make it difficult to relocate equipment and houses inland. Here, we add to this discussion by depicting how the careful ecological restoration of dunes and salt marshes on land made available by managed retreat could overcome some of these obstacles. First, we describe three possible strategies to adapt to sea-level rise as well as the maladaptation of the current strategy. Then, we focus on the limitations and advantages of ecological restoration in terms of managed retreat and vice versa. Finally, we depict how a new kind of land lease, introduced in draft legislation, can help tackle the multitemporal and multispatial issues that currently hinder managed retreat.

Key words: adaptation, land use, marine submersion, restoration, sea level, social-ecological

Implications for Practice

- If restorationists do not neglect the social issues that accompany managed retreat, they have a major opportunity to create, restore, and conserve dune ridges, salt marshes, and their associated ecological communities on coastal land made available by managed retreat.
- Drawing from adaptive management, draft legislation introduces “zones of authorization for resilient and temporary activities” that can help serve as an example of adaptation to sea-level rise for coastal land use acts in other countries.

Introduction

Sea-level rise (SLR) will have major consequences for populations in low-lying coastal areas (Wong et al. 2014). Despite the uncertainties surrounding the expected speed and magnitude of SLR (Cazenave & Llovel 2010; Carson et al. 2016), it is very likely to exacerbate long-term adverse impacts of storm surges and coastal floodings (Wong et al. 2014). Adaptation policies must therefore be developed to provide strategies for coping with the effects of global warming on coastal areas. Defined as “adjustments in ecological, social, or economic systems in response to observed or expected changes in climatic stimuli and their effects” (Adger et al. 2005a, 2005b), strategic adaptations can be considered to be either reactive (e.g. building dams or dikes after coastal flooding) or proactive. Proactive adaptations

are measures taken to lessen the perceived negative impacts of future events (Engle 2011) such as prohibiting housing construction in future coastal flood-prone areas. In France, SLR and its consequences are an extremely important issue because the country’s coastlines are of great ecological and economic value (Van Der Maarel 2003; Wong et al. 2014). Indeed, coastlines can be seen as four interconnected subsystems: sediment cells of beaches, coastal municipalities, management paradigms, and oceans, for which the spatial extent and temporal scales are shown in Table 1.

France was affected by an almost unprecedented winter storm (storm Xynthia) in 2010, which resulted in 47 fatalities and property damage estimated at €1.5 billion. More winter storms 3 years later exacerbated erosion and damaged man-made structures (Rocle & Salles 2017; Cour des Comptes 2010). Such winter storms diminish atmospheric pressure enough to raise the local sea level and trigger marine submersion (Wong et al. 2014). The fatalities and property damage caused by these

Author contributions: TF conceived, designed, and wrote the paper; MT, NF made additional contributions and edited the manuscript.

¹Écologie, Systématique, Évolution, AgroParisTech, CNRS, University of Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91400, Orsay, France

²Address correspondence to T. Fouqueray, email timothee.fouqueray@agroparitech.fr

³GaEL, INRA, CNRS, Grenoble INP, Université Grenoble Alpes, 38000, Grenoble, France

© 2018 Society for Ecological Restoration
doi: 10.1111/rec.12836

Supporting information at:
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.12836/supinfo>

Annexe 2

Restoration opportunities through managed retreat

Table 1. Current social-ecological environments of French coastal municipalities with their spatial and temporal scales. Characteristics and scales inspired by Wong et al. (2014), Feagin et al. (2005), Carson et al. (2016), and Mineo-Kleiner (2017).

	<i>Beach Sediment Cells</i>	<i>Coastal Municipalities</i>	<i>Management Practice</i>	<i>Ocean Systems</i>
Nature of the system	Biophysical transport of sediments	Social and economic development strategies in municipalities with seafront access	Mental representations of human interventions regarding ecosystems	Climatic cycles of oceans
Spatial scale	1–10 km	5–20 km	France	Planetary
Temporal extent under current functioning	Years	Municipal mandate (6 years)	10–50 years	Geological times, 10 ⁴ –10 ⁶ years
Indicator of change	Accumulation of sediments	Population growth and seasonal affluence of visitors	Prevalence of knowledge and representations of management practices	Sea level
Indicator of resilience	Seasonal return of beach vegetation	Return rate of population and visitors after disturbance	Ability of the current values to keep leading coastal policies	Latency time needed to return to preindustrial periodic oscillations of geological climate
Former state of the system	Balance between erosion and sediment accumulation	Plans for tourism development, population growth, gradual institutionalization of conflict resolution through property rights or coastal laws	Command and control	Preindustrial sea level
Current state of the system	Coastline retreat	Coastal armoring, tourist, and transportation saturation, with degradation of tourist resorts by winter storms	Static perception of coastline land use (no influence of environmental changes) with conflicting rules and consolidated institutions	Sea-level rise
State of the system under managed retreat	Dune and salt marsh revegetation	Managed retreat economy: beach tourism, outdoor recreative coastal uses	Adaptive management of climate change, “monitor and adapt” approach	Uncertainties but projected higher sea levels and disrupted marine streams

storms and consequent flooding led to a national revision of coastal policies to take safety and environmental issues into consideration (Rocle & Salles 2017). Members of the French Parliament are currently debating updates to coastal land use laws in an attempt to introduce legislative levers that favor adaptations to SLR (Lurton et al. 2017).

In this paper, we focus on a coastal adaptation strategy known as managed retreat (MR), which is encouraged in the new draft of the coastal act. MR is sometimes called “planned retreat” or “managed realignment” and involves an inland relocation of infrastructure currently located on low-lying coastal land (e.g. coastal protection infrastructure, houses, industrial, and commercial areas), which is at risk of coastal flooding (Heurtefeux et al. 2011). For example, a seafront road was relocated 40 m inland between 2007 and 2012 in Sète, a coastal municipality in southern France (Heurtefeux et al. 2011). In France, MR is of particular interest, especially for 25% of the country’s coastlines with observable erosion (around 1,700 km, of which around 1,150 km are low-lying sand coasts) (Mineo-Kleiner 2017), as

the retreating coastline draws nearer to infrastructure and jeopardizes it.

We begin here by analyzing the persistent blockages of MR in certain areas. We then present several precautions in order to preserve mutual social and ecological benefits of MR and ecological restoration. Finally, we describe how the renewal of the coastal act presents an opportunity for MR and the ecological restoration of low-lying coastal areas.

We first base our assessment on a review of (1) peer-reviewed articles from ecology, economics, geography, and political science journals, mostly published in French since storm Xynthia (2010). We complete these sources with (2) the minutes of meetings on coastal flooding management involving governmental agencies such as the “Conservatoire du Littoral” (body responsible for preservation of the French coastline) and the “Cour des Comptes” (French supervisor of public subsidies) from the same period, as well as (3) European reports on erosion and coastal adaptation to SLR strategies published since year 2000. The review results were supplemented with an exploratory field visit

to Port-des-Barques in March 2017, a municipality affected by storm Xynthia in Charente-Maritime (Fig. S1), as well as personal communication with coastal land use planners.

French Coastline Planning Is Maladapted to the Effects of Expected Climate Change

Three Strategies to Adapt to SLR and Marine Submersions

The effects of winter storms are expected to be exacerbated by climate change-related SLR, and although sea-level estimates for 2030 do not exceed 0.07 m, they vary between 0.35 and 1 m for 2100 (Vinchon et al. 2011; Lurton et al. 2017).

Allison and Hobbs (2004) suggest three broad options to adapt to such crises, with different intervention intensities. For municipalities that seek to prevent coastal disturbances, the most interventionist strategy is “command and control,” which involves a community actively fighting coastline erosion through the heavy use of technology. This strategy has been used in France in recent decades (Table 1), with the construction of coastal defenses such as dikes, groins, seawalls, and geotextile tubes (Touili et al. 2014; Clément et al. 2015). Making “adjustments” through more gentle interventions (e.g. alert systems, insurance systems, flood-proof buildings) is the intermediate strategy (Cour des Comptes 2010). “MR” is the third and least interventionist strategy regarding erosive processes. Relocating sea-front housing, economic infrastructure (e.g. industrial areas, roads, factories), and strategic buildings (e.g. hospitals, fire stations) means that humans reduce their impact on the coastal ecosystem and adapt to the disturbance instead of repelling it; in this way, MR differs from the default position of doing nothing and corresponds to adaptive management principles (Engle 2011).

By relying on the expensive “command and control” strategy, French shorelines are on a maladaptive trajectory, as erosive processes and natural disasters are enhanced by climate change. To date, technological interventions have indeed disrupted beach accretion, and less sediment has been delivered to coasts because of the trapping of riverine sediment behind dams and the diversion of water for irrigation (Wong et al. 2014). Defensive structures dissipate wave energy by causing upwelling and decreasing the amount of sediment deposited at a particular location, thus resulting in down-drift erosion at other locations. Coastal defenses therefore need to be constantly extended at a high cost to human lives and society.

French Coastal Municipalities Persist in the “Command and Control” Strategy

Here, we identify the economic, political, and social obstacles that compel local decision-makers to abide by their current maladaptive strategy of coastal armoring.

Economically, insurance companies supported the recovery of coastal inhabitants after storm Xynthia. In France, these companies reimburse policy holders for damage caused by natural disasters using money collected nationally from car and home insurance premiums (Clément et al. 2015). However, the

demand for financial compensation is likely to increase unsustainably, because increasing numbers of people (due to the demographic pressure on coastlines) will be exposed to more frequent and intense coastal flooding (Lambert 2015). This economic connectedness of people through their insurance policies is accompanied by the connectedness of the state and affected municipalities, as the former partially funds the reconstruction of the latter. Coastal recovery was indeed strongly supported by public subsidies following storm Xynthia. For instance, one of the main areas affected by storm Xynthia, the Charente-Maritime department (Fig. S1), launched a €750,000 television advertising campaign to promote beach tourism, stating that the area would recover and be ready for the summer vacation period. Another €3 million was spent on restoring sea defenses and sand replenishment (Anziani 2010). Such sea defenses are contrary to the principles of MR because the authorities could simply wait for the land to become permanently submerged and then claim it as a public maritime domain, a procedure similar to the United States “rolling easement system” (Siders 2013). Both the tourism-based economy and the financial connectedness between inland and coastal territories participate in maintaining this maladaptive “command and control” management, because the need for taking SLR into account is continually postponed.

Socially, the reluctance to change can explain how maladaptive individual and collective behaviors hinder adaptations to SLR. As a coastal community grows and becomes richer, it will apply increasing pressure on local decision-makers to choose sea defenses as opposed to MR. For instance, following storm Xynthia, the inhabitants of Charente-Maritime demanded for dikes to be built instead of demolishing vulnerable houses (Mineo-Kleiner & Meur-Ferec 2016). Sea defenses support a false sense of security, causing counteradaptive misperceptions of risks (Mineo-Kleiner & Meur-Ferec 2016). For instance, fatalities could have been avoided if inhabitants trapped in flooded houses had felt vulnerable enough to participate in prevention programs and learn to keep their shutters open, thus allowing for an emergency exit (J. Laugraud 2017, ex-mayor, personal communication). Ultimately, the pressure to build sea defenses was applied to mayors, some of whom see coastal land use as an electoral lever through employment and population growth. Local political mandates last for 6 years in France, which is short relative to the time required for a return on investment in MR. Maladaptive policies therefore fail to reward investment in MR, because benefits are only perceived in the future (Abel et al. 2011).

The self-reinforcing first strategy of “command and control” calls for a renewal of recent French coastal policies. So how can MR be an opportunity to implement coastal ecological restoration?

Can MR Benefit Ecological Restoration and Vice Versa?

By releasing land, MR can be a chance to create, restore, or preserve coastal ecosystems, as long as care is taken to respect the

balance between socioeconomic issues and ecological considerations.

Benefits and Precautionary Measures of MR for Ecological Restoration

Above all, MR favors ecological restoration by providing habitats for coastal species: the creation, restoration, and conservation of dune ridges and salt marshes benefit coastal plant communities by preventing beaches from steepening and shortening (Feagin et al. 2005). MR also improves species resilience to climatic fluctuations by providing habitats for species to recolonize neighboring areas that have become eroded or destroyed (Adger et al. 2005a, 2005b).

It is also essential to avoid potentially counterproductive measures of MR in terms of ecological restoration. If the target site has been recently damaged, land released through MR will initially require work to bring it back to the desired environmental trajectory. For soil that has been brought into an artificial state before MR or mechanically disrupted during the demolition of infrastructure during MR, doing nothing favors common species at the expense of species of ecological interest (Affre et al. 2015). Anthropogenic interventions try to accelerate ecological recovery at a target site, as illustrated at the Sète lido, where 300,000 marram grass (*Ammophila arenaria*) seedlings were planted (Vinchon et al. 2011). To improve respect for the site, newsletters and liaison groups were used to explain to visitors why MR is important (Dixon et al. 2008).

On coastlands affected by MR, there may also be species that are protected or of ecological interest. Cases have been reported in which translocation and rescue programs for plants and animals were considered necessary for MR to be successful (Dixon et al. 2008).

Above all, MR involves relocating infrastructure inland, which means that natural or agricultural land away from the coast is at risk of being artificialized. Indeed, the land shortage in France impedes the relocation of houses and equipment to unaffected land (Mineo-Kleiner 2017). There are legal safeguards to avoid displacing urbanization pressure and destroying natural soils such as the prohibition to build on preserved land and injunctions to relocate within urbanized areas. Yet political arbitration between the various sources of local pressure on land makes the task complex, especially since electoral mandates are relatively short (Table 1).

Ecological Restoration Assets Favoring MR

Inversely, ecological restoration presents beneficial side effects for MR. For instance, the revegetation of newly cleared land restores sediment cycling. Dune ridges and salt marshes are ecosystem-based reducers of destructive wave energy, which protect the land (Temmerman et al. 2013). Coupled with wave-breaking plants such as sea grass (*Posidonia oceanica*) and eelgrass (*Zostera marina*), ecological restoration as part of MR permits the effective adaptation to coastal erosion and flooding (Temmerman et al. 2013).

Instead of emphasizing restoration constraints, publicizing the benefits of natural processes for MR encourages stakeholders with potentially contrasting interests in environmental issues to work together. For example, the restoration of coastal marshes simultaneously increases biodiversity, stores carbon, and limits seawater intrusion (Mossman et al. 2012; Temmerman et al. 2013). Consequently, a relevant integration of the beneficial side effects of MR fosters the transition from a static perspective of biodiversity to a “monitor and adapt” management system (Table 1).

Limitations of MR Due to Ecological Restoration

Dedicating released land to ecological restoration alone endangers the social acceptability of MR. This can be counteracted by fostering tourism-based employment that relies on the use of light infrastructure (e.g. moveable buildings on stilts) (Mineo-Kleiner & Meur-Ferec 2016). From this perspective, most MR scenarios include an economic appraisal of the released land by coupling the project with low-impact economic activities. Based on experience, the touristic valuation of restored coastlines is compatible with environmental processes. In terms of cleaning up beaches, it is possible to retrieve nonorganic waste alone or leave foreshore tide marks untouched until tourists start frequenting the area. This favors nucleation and the accumulation of sand on dune ridges, because it maintains the supply of organic material to feed dune vegetation and allows sand sequestration (Temmerman et al. 2013; Wong et al. 2014; Lambert 2015). Touristic valuation also sometimes relies on shuttle buses linking beaches to parking lots that no longer stand close to the seaside because of MR.

A Draft Law to Overcome Multiscale Obstacles to MR

MR has been described as a cost-efficient long-term means of coping with the effects of SLR (Abel et al. 2011), and the obstacles for its adoption are well documented. So how can the draft legislation help French coastal municipalities implement MR?

The Rise of MR in Research Programs

After storm Xynthia in 2010, the stakeholders who clamored for changes in coastal policies were mostly insurance companies and the Cour des Comptes, or in other words, those paying for the restoration. Public agencies and insurance companies tried to refine their decision-making by investing in efforts to decrease uncertainty (e.g. SLR celerity, recovery costs after marine submersion). Consequently, scientific projects were launched in France to learn lessons from storm Xynthia (Vinchon et al. 2011). The Sète lido was involved in a call for proposals and partly changed from a “command and control” strategy to MR. This 12 km long and 2 km wide strip of sand, which is very popular with tourists, separates the sea from a lagoon on the south coast of France (Fig. S1). The lido also hosts an economic asset: the renowned Listel vineyard, which has been subjected to severe coastal erosion (Heurtefeux et al.

2011). A seafront road was relocated between 2007 and 2012 to allow the sand dunes to recover. The dunes were made more stable using bundles of brushwood, and they now protect the lido (Heurtefeux et al. 2011). MR was partly made possible because the demand for income from tourism and the support for the well-being of inhabitants, linked to the stability of the beach, were strong, and because no houses had to be relocated (Mineo-Kleiner & Meur-Ferec 2016). This rare case of MR is distinguished on account of its foresight and long-term investment (MR cost of €54 million). Interestingly, the French state, which previously granted maladaptive public subsidies for the reconstruction of sea defenses, now funds experimental MR. This small change points out a transformation in the representation of human interventions on ecosystems, from a static perception of coastlines to adaptive management practices (Table 1), which are now echoed in the draft legislation.

What Can a New Law Do for MR?

The law entitled “Adapting Coastal Territories to Climate Change” is currently being passed by the French Parliament (Lurton et al. 2017). Drawing from research outputs such as Sète’s results, draft legislation was developed. It is also based on experimental findings from other countries, thanks to exchanges with the U.K. Environment Agency (Pontee 2007; Creed et al. 2014; Rocle & Salles 2017). The law will introduce “zones of authorization for resilient and temporary activities,” a new type of land lease designed for vulnerable coastal strips. These leases will last between 5 and 99 years, and tenants will be required to leave when the risks exceed a threshold indicated in a prevention plan (Lurton et al. 2017)—hence the legislative interpretation of “resilience” for labile and removable activities (e.g. windsurf schools). Ultimately, the law will also define a “coastline mobility zone” in which natural barriers (e.g. salt marshes and dune ridges) are preferred over manmade sea defenses. Governance mechanisms have been designed for a smooth transition to MR, drawing on an economic study of MR cost sharing (see, e.g. the insights from a willingness-to-pay analysis in Rey-Valette et al. (2016)).

The originality of this draft law is its acknowledgement of the complex social and ecological interdependencies of coastal subsystems with their different spatial and temporal scales (Table 1). With the new type of lease, the draft legislation offers an innovative tool to implement MR as a multiscale “no-regret” solution to SLR. Focusing on the level of coastal municipalities as the main constraint to MR, the decision to end new leases is not motivated by a temporal deadline but instead by a risk threshold that functions as lever against the temporal uncertainties of SLR.

Moreover, the draft does not set aside the financial crux of MR. The inclusiveness of ecological restoration as a solution to problems of different spatial scales makes it possible to attract various funding, especially when public spending is restricted. Obtaining money from more sustainable sources than public subsidy alone could also help overcome the reluctance of the private sector to become involved. As a land restoration approach,

MR has a legitimate place in land use policies when compensating for flood defense and port projects, as investigated (with mixed success) in England (Dixon et al. 2008). Salt marshes formed through MR comply with the criteria from the European Fisheries Fund, because they act as nurseries for fisheries (Dixon et al. 2008). Funding also exists from schemes to protect the connectivity of an area, provided that MR meets the requirement of achieving a good ecological status. The integration of greenhouse gas removal into the European 2030 climate and energy framework is currently underway, setting the stage for possible financial retribution of carbon storage by MR.

Discussion

In our view, the success of MR relies on the inclusion of socio-economic issues in ecological restoration. Coastal municipalities make use of technologies (dams and dikes, etc.), anticipate recurring events (marine submersion, storms), and display continual interactions between human and nonhuman agents on various spatiotemporal scales. Thus, they can be qualified as social-ecological systems, because these processes lead to their establishment, maintenance, and reorganization in a form that would otherwise not exist, influencing their capacity to adapt to the effects of SLR (Gunderson & Holling 2002; Sanderson et al. 2016). From this perspective, and because MR is first intended for human groups and initially depends on external economic inputs, it can be considered to be a social-ecological restoration (Fernández-Manjarrés et al. 2018). Importantly, this should not be regarded as the intrusion of social issues into ecological restoration, but on the contrary, as an opportunity for ecological restoration to integrate a utilitarian adaptation to climate change.

To support the draft law, a relevant holistic narrative could reveal how interlocking economic, political, and social impediments to local change can be addressed using an imperfect but promising solution: MR. Panarchy, for instance, can combine results on various spatiotemporal scales and from various disciplines (economics, ecology, and others) in a single framework. Unlike hierarchical descriptions of top-down systems, panarchy can describe the dynamics of nested natural and social systems that interact in creative, destructive, and evolutionary ways. Each system experiences growth and a subsequent stabilization; a collapse phase triggered by an external disturbance then follows (in the case of MR, the interacting subsystems could be those described in Table 1); the system can then reorganize and start the cycle again (Gunderson & Holling 2002). Albeit its essentially descriptive approach of social-ecological systems, panarchy is of great help if used in combination with explanatory theories, and has been applied in various research fields including forestry and archeology and other coastal social-ecological systems (Kharrazi et al. 2016; Sanderson et al. 2016).

Incentives to switch to MR (i.e. protecting lives, saving money, restoring ecosystems) are still too weak before the conservative wait-and-see strategy, because of the strong recovery

processes and cognitive biases, and because organizations tend to wait for technological developments (Rey-Valette et al. 2012; Clément et al. 2015). Improving the acceptability of MR and ecological restoration as no-regret opportunities is a way to trigger change.

Anticipation is the key to transforming the system, and active territorial planning in the French context is a step in this direction (Adger et al. 2005a, 2005b; Abel et al. 2011; Lurton et al. 2017). Unlike in the United States, which has market-driven coastal land-planning policies, the cultural preference in France is for territorial projects with a holistic approach, designed with and by the public authorities. This benefits the implementation of MR (Siders 2013; Mineo-Kleiner & Meur-Férec 2016), supported by the positive outcomes of ecological restoration.

These particularities of the current context indicate that ecological restoration offers multiple advantages for MR and that the path to adapting to the effects of climate change on coastlines is steep but straight.

Acknowledgments

T.F. thanks the ENS Lyon for providing a doctoral scholarship, Charente-Maritime inhabitants for valuable discussions, and Guillaume Rieu for logistic support. T.F., M.T., N.F. are grateful to two anonymous referees and to the editors for constructive comments. T.F., M.T., N.F. thank LabEx BASC for providing a grant (16HGY050). T.F., M.T., N.F. have no conflict of interest to declare.

LITERATURE CITED

- Abel N, Gorddard R, Harman B, Leitch A, Langridge J, Ryan A, Heyenga S (2011) Sea level rise, coastal development and planned retreat: analytical framework, governance principles and an Australian case study. *Environmental Science & Policy* 14:279–288
- Adger WN, Arnell NW, Tompkins EL (2005a) Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change* 15:77–86
- Adger WN, Hughes TP, Folke C, Carpenter SR, Rockström J (2005b) Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science* 309:1036–1039
- Affre L, Dumas PJ, Dumas E, Laffont-Schwob I, Taton T (2015) Regard écologique sur le recul stratégique: atouts et risques pour la diversité végétale péri-urbaine marseillaise. *VertigO*, <https://journals.openedition.org/vertigo/15748>
- Allison H, Hobbs R (2004) Resilience, adaptive capacity, and the “Lock-in Trap” of the Western Australian agricultural region. *Ecology and Society* 9:3
- Anziani A (2010) Xynthia: les leçons d’une catastrophe (rapport d’étape). Sénat, Paris, France
- Carson M, Köhl A, Stammer D, Slangen ABA, Katsman CA, van de Wal RSW, Church J, White N (2016) Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change* 134: 269–281
- Cazenave A, Llovel W (2010) Contemporary sea level rise. *Annual Review of Marine Science* 2:145–173
- Clément V, Rey-Valette H, Rulleau B (2015) Perceptions on equity and responsibility in coastal zone policies. *Ecological Economics* 119: 284–291
- Cour des Comptes (2010) Les enseignements des inondations de 2010 sur le littoral atlantique (Xynthia) et dans le Var. Cour des Comptes, Paris, France
- Creed S, Maybank M, Pagny J, Comor M, Deniaud G (2014) Living with a changing coast - LiCCo study site report. European Regional Development Fund, Exeter, United Kingdom
- Dixon M, Morris RKA, Scott CR, Birchenough A, Colclough S (2008) Managed realignment—lessons from Wallasea, UK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering* 161:61–71
- Engle NL (2011) Adaptive capacity and its assessment. *Global Environmental Change* 21:647–656
- Feagin RA, Sherman DJ, Grant WE (2005) Coastal erosion, global sea-level rise, and the loss of sand dune plant habitats. *Frontiers in Ecology and the Environment* 3:359–364
- Fernández-Manjarrés JF, Roturier S, Bilhaut A-G (2018) The emergence of the social-ecological restoration concept: social-ecological restoration concept. *Restoration Ecology* 26:404–410
- Gunderson LH, Holling CS (eds) (2002) *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington, DC
- Heurtefeux H, Sauboua P, Lanzellotti P, Bichot A (2011) Coastal risk management modes: the managed realignment as a risk conception more integrated. In: *Risk management in environment, production and economy*. InTech, Rijeka, Croatia
- Kharrazi A, Fath B, Katzmair H (2016) Advancing empirical approaches to the concept of resilience: a critical examination of Panarchy, ecological information, and statistical evidence. *Sustainability* 8:935
- Lambert M-L (2015) Le recul stratégique : de l’anticipation nécessaire aux innovations juridiques. *VertigO*, <https://journals.openedition.org/vertigo/15812>
- Lurton G, Morel-à-l’Huissier P, Bazin T, Cattin J, Menuel G, Perrut B, et al. (2017) Proposition de loi de M. Gilles Lurton portant adaptation des territoires littoraux au changement climatique.
- Mineo-Kleiner L (2017) L’option de la relocalisation des activités et des biens face aux risques côtiers: stratégies et enjeux territoriaux en France et au Québec. PhD thesis. XXX, Brest, France, Université de Bretagne Occidentale
- Mineo-Kleiner L, Meur-Férec C (2016) Relocaliser les enjeux exposés aux risques côtiers en France: points de vue des acteurs institutionnels. *VertigO* 16, <https://journals.openedition.org/vertigo/17656>
- Mossman HL, Davy AJ, Grant A (2012) Does managed coastal realignment create saltmarshes with ‘equivalent biological characteristics’ to natural reference sites? Elphick, C, editor. *Journal of Applied Ecology* 49: 1446–1456
- Pontee NI (2007) Realignment in low-lying coastal areas: UK experiences. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering* 160:155–166
- Rey-Valette H, Rulleau B, Meur-Férec C, Flanquart H, Hellequin A-P, Sourisseau E (2012) Les plages du littoral languedocien face au risque de submersion: définir des politiques de gestion tenant compte de la perception des usagers. *Géographie, économie, société* 14:369–391
- Rey-Valette H, Rulleau B, Balouin Y, Hérivaux C (2016) Enjeux, valeurs des plages et adaptation des territoires littoraux à la submersion marine. *Économie rurale* 1:49–65
- Rocle N, Salles D (2017) Pioneers but not guinea pigs’: experimenting with climate change adaptation in French coastal areas. *Policy Sciences* 51:231–247
- Sanderson EW, Solecki WD, Waldman JR, Parris A (2016) Prospects for resilience: insights from New York City’s Jamaica Bay. Island Press, Washington, DC
- Siders A (2013) *Managed coastal retreat: a legal handbook on shifting development away from vulnerable areas*. Columbia Law School Public Law & Legal Theory Working Paper Group, New York, USA
- Temmerman S, Meire P, Bouma TJ, Herman PMJ, Ysebaert T, de Vriend HJ (2013) Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature* 504:79–83
- Touili N, Baztan J, Vanderlinden J-P, Kane IO, Diaz-Simal P, Pietrantonio L (2014) Public perception of engineering-based coastal flooding and erosion risk mitigation options: lessons from three European coastal settings. *Coastal Engineering* 87:205–209

- Van Der Maarel E (2003) Some remarks on the functions of European coastal ecosystems. *Phytocoenologia* 33:187–202
- Vinchon C, Baron-Yelles N, Berthelieir E, Hérivaux C, Lecacheux S, Meur-Férec C, Pedreras R, Rey-Valette H, Rulleau B (2011) MISEEVA: set up of a transdisciplinary approach to assess vulnerability of the coastal zone to marine inundation at regional and local scale, within a global change context. In: *Littoral 2010 – adapting to global change at the coast: leadership, innovation, and investment*. EDP Sciences, p. 11003
- Wong PP, Losada IJ, Gattuso J-P, Hinkel J, Khattabi A, KL McInnes, Saito Y, Sallenger A (2014) Coastal systems and low-lying areas. Pages 361–409. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES,

Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds) *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. Cambridge, U.K.

Supporting Information

The following information may be found in the online version of this article:

Figure S1. Map of France with Charente-Maritime and Sète indicated.

Coordinating Editor: Henny Van der Windt

Received: 19 February, 2018; First decision: 18 March, 2018; Revised: 5 June, 2018; Accepted: 5 June, 2018

3. La thèse interdisciplinaire en sciences de l'environnement, des défis à relever et des opportunités à saisir : regards de doctorants

Pierre Chassé¹, Sarah Cogos^{1,2}, Timothée Fouqueray^{1*}

¹ Écologie, Systématique, Évolution, AgroParisTech, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91400, Orsay, France

²Department of Forest Ecology and Management, Swedish University of Agricultural Sciences, SE-90183, Umeå, Suède

* Auteur correspondant, timothee.fouqueray@agroparistech.fr

Résumé

Les incitations croissantes à l'interdisciplinarité viennent modifier les pratiques de recherche dès le doctorat. Les doctorants faisant le choix de l'interdisciplinarité peuvent se trouver livrés à eux-mêmes face aux défis méthodologiques et épistémologiques que cette approche peut entraîner. Ce « Vie de la recherche » témoigne d'un projet initié et conduit par trois doctorants se revendiquant d'une pratique interdisciplinaire des sciences de l'environnement. Il présente et analyse les résultats d'un questionnaire diffusé auprès de doctorants en sciences de l'environnement en France, notamment au regard d'une conférence organisée dans ce cadre sur le thème de la thèse interdisciplinaire. L'article propose aussi des pistes de réflexion pour une meilleure intégration de l'interdisciplinarité dans le parcours doctoral.

Title

What are interdisciplinary doctorates? Insights from French environmental sciences, by and on PhD students

Abstract

Growing incentives to interdisciplinarity in academic research induce modifications of the research practices already at the stage of the PhD. PhD students choosing interdisciplinarity can be left to their own resources when they have to face related methodological and epistemological challenges. This article reports on a project conducted by three PhD students following an interdisciplinary approach in environmental sciences. It describes the results of a questionnaire sent to PhD students in environmental sciences in France, with inputs of a conference they organized on interdisciplinary PhD projects. Results from the questionnaire illustrate the wide diversity regarding interdisciplinarity's definitions, motivations, and benefits, but also in

terms of methods to collect and analyze data. We also suggest avenues for a better integration of interdisciplinarity within the PhD process. Notably, a pragmatic approach of interdisciplinarity could help PhD students to move away from the doubts regarding their scientific legitimacy. Moreover, we suggest that a reflexive attitude of PhD students should also be fostered in order to identify the methodological and epistemic implications of interdisciplinarity. However, this stance needs to be supported by some changes within the academic frame in order to alleviate PhD students' difficulties and favor innovative research practices to tackle contemporary socio-environmental problems.

Mots-clés

Environnement, recherche, doctorat, interdisciplinarité, France

Keywords

Environment, research, PhD, interdisciplinarity, France

Introduction

La conférence-atelier « BASC-Our » portant sur la pratique de l'interdisciplinarité lors du doctorat en sciences de l'environnement s'est tenue du 1^{er} au 3 avril 2019 à Paris. Organisée par les auteurs de cet article, doctorants du laboratoire Écologie, Systématique, et Évolution⁴³, elle avait pour objectif de mettre en débat les pratiques de recherche interdisciplinaires lors de la thèse. Cette conférence, baptisée « Thèse interdisciplinaire cherche avenir professionnel », a rassemblé des universitaires confrontés à l'interdisciplinarité ou ayant participé aux premiers projets interdisciplinaires en France, ainsi que de jeunes docteurs interdisciplinaires (encadré n°1). Il s'agissait de confronter nos réflexions grâce à des regards extérieurs et rompus à l'expérience de l'interdisciplinarité, mais aussi de discuter des résultats d'un questionnaire soumis au préalable à des doctorants en sciences de l'environnement. Deux jours d'atelier avec sept doctorants interdisciplinaires en sciences de l'environnement, une post-doctorante et une ingénieure d'étude préparant une candidature de thèse, ont prolongé les échanges. L'atelier avait pour objectif d'illustrer par des partages d'expériences comment se manifeste aujourd'hui l'interdisciplinarité pratiquée par les doctorants en sciences de l'environnement, à en expliciter les implications pour les doctorants, et proposer des pistes pour pallier les défis posés par la pratique de l'interdisciplinarité. Nous revenons dans cet article sur la démarche et les objectifs de l'ensemble de ce projet (conférence et atelier), qui visait à :

- Recenser les pratiques de l'interdisciplinarité mobilisées par les doctorants en sciences de l'environnement en France aujourd'hui : méthodes de collecte et d'analyse des données, mode de travail (collectif, individuel), etc. ;

⁴³ www.es.e.u-psud.fr

- Caractériser les déterminants communs aux pratiques de l'interdisciplinarité mises en œuvre lors du doctorat ;
- Identifier les difficultés que ces pratiques peuvent poser dans le cadre d'un doctorat, et à sa sortie, ainsi que des solutions possibles pour y pallier.

Encadré n°1:

Intervenants de la conférence « Thèse interdisciplinaire cherche avenir professionnel » :

- Sophie Caillon, chercheuse au CNRS, ethnoécologue, membre de la section interdisciplinaire du CNRS (section 52)
- Nathalie Machon, professeure d'écologie au Muséum National d'Histoire Naturelle, et directrice de l'école doctorale Sciences de la Nature et de l'Homme
- Nicole Mathieu, historienne et géographe, directrice de recherche émérite au CNRS, a dirigé plusieurs programmes interdisciplinaires et a été rédactrice en chef adjointe de la revue *Natures Sciences Sociétés*
- Florence Revelin, docteure en anthropologie de l'environnement, ingénieure contractuelle à l'INRA
- Roxane Sansilvestri, docteure en sciences de l'environnement et chercheuse en socio-écologie
- Patrick Steyaert, ingénieur de recherche à l'INRA.

Les origines de la démarche

« Il n'y a pas de modèle ; on est dans le domaine du bricolage. Avec tout ce que ce mot implique de compromis, par rapport à l'objectif poursuivi, imposés par les contraintes locales de tous ordres. Mais aussi avec l'exigence de créativité que cela suppose [...] ». Ces quelques mots, utilisés pour décrire en 2008 les formations interdisciplinaires (Jollivet et Carlander 2008), ont particulièrement résonné, plus de dix ans après, à nos oreilles de doctorants. Le recours fréquent à une interdisciplinarité que nous considérons *élargie* (Jollivet, 2008), mélangeant l'écologie scientifique aux sciences politiques, à l'anthropologie ou à la géographie, et encouragé par notre équipe « Trajectoires ÉcologiqueS et Sociétés » (ESE 2019), ne nous libère pas des questionnements méthodologiques et épistémologiques inhérents au travail de « bricolage » souligné ci-dessus. Dans nos expériences respectives, plusieurs moments-clés de la thèse nous ont ainsi semblé problématiques : lacunes méthodologiques dans la pratique de nouvelles disciplines, constitution du comité de suivi de thèse, choix des journaux dans lesquels publier, dialogues entre scientifiques de cultures disciplinaires différentes, qui sont des écueils connus de tout chercheur ayant pratiqué l'interdisciplinarité. La littérature que nous avons consultée nous a permis d'apprécier la variété des réflexions et des événements

scientifiques portant sur l'interdisciplinarité⁴⁴, ainsi que celle des structures de recherche interdisciplinaires⁴⁵. Comme l'indiquait déjà le compte-rendu des journées de NSS en 2008, « les contextes institutionnels dans lesquels [les initiatives] se déploient, les thématiques sur lesquelles elles se construisent, les objectifs qu'elles poursuivent sont très divers. Chacune a, de ce fait, des caractéristiques qui lui sont propres » (Jollivet 2008).

Cependant, nous souhaitons disposer d'un point de vue complémentaire sur les implications de l'interdisciplinarité lors de la réalisation de la thèse de doctorat, à l'instar du choix de la direction de thèse, des formations doctorales, ou de la stratégie de publication. Nous souhaitons donc mieux connaître la diversité des pratiques et des compromis mis en œuvre par les autres doctorants se revendiquant de l'interdisciplinarité en sciences de l'environnement. Nous n'avons pas voulu reproduire des initiatives déjà menées ailleurs, mais plutôt tenter de les compléter à notre mesure et à travers notre regard de jeunes chercheurs, le questionnaire et l'atelier étant pour nous l'occasion d'échanger et d'enrichir nos points de vue sur la thèse interdisciplinaire dans le domaine de l'environnement.

Construction et diffusion du questionnaire

Le questionnaire visait à caractériser les méthodes de recherche des doctorants interdisciplinaires en France. Pour pouvoir analyser ces résultats à partir d'un échantillon comparable, nous avons restreint l'échantillon des doctorants à ceux qui se reconnaissaient dans la pratique des « sciences de l'environnement ». Il s'agissait notamment de décrire les pratiques des doctorants aux moments clés de la thèse (préparation du sujet, mode de travail, choix des publications, méthodologies, etc.) ; d'apprécier la prédominance de l'interdisciplinarité « de proximité » entre disciplines voisines (*e.g.* écologie et géologie, chimie et biologie) ou « élargie » (*e.g.* histoire et génétique, climatologie et sociologie) ou encore de retracer les trajectoires de formation. Le questionnaire comportait 31 questions, certaines à choix multiples, d'autres ouvertes permettant aux répondants de s'exprimer librement, et réparties en quatre parties : « Votre thèse », « Votre encadrement », « Votre parcours », « Vos pratiques ». Pour diffuser le questionnaire, nous avons sollicité l'aide de 56 écoles doctorales qui abordaient des thèmes liés aux sciences de l'environnement au sens large, aussi bien par des approches de sciences de sciences naturelles (SN) que de sciences humaines et sociales (SHS). Pour les sélectionner, nous avons utilisé les mots-clés « environnement », « société(s) », « écosystème », « biodiversité », « agriculture », « agronomie », « territoire », « nature », « écologie », « ressources », présents dans leurs intitulés ou leurs thématiques (Campus France 2018). Le questionnaire n'était pas destiné spécifiquement à des doctorants se reconnaissant comme interdisciplinaires, puisque nous

⁴⁴ Voir par exemple l'école d'été interdisciplinaire "Autour du 2°C" en 2019, l'atelier international Hommes-Milieus en 2018, le colloque INterDISCIPLINarité en 2017 ou encore la journée d'études « Pratiques du pluridisciplinaire » à Nanterre en 2015.

⁴⁵ Voir par exemple le laboratoire « LIttoral ENvironnement et Sociétés » de la Rochelle, le laboratoire « Dynamiques Sociales et Recomposition des Espaces » à Paris, le département Sciences pour l'Action et le Développement de l'INRA.

voulions comparer leurs pratiques avec celles de répondants monodisciplinaires. Sur les potentiels 15000 doctorants des 56 écoles doctorales que nous avons ciblées, 121 ont répondu⁴⁶. La suite de l'article a pour but de présenter les principaux résultats de ce questionnaire à la lumière des interventions du colloque.

Un état des lieux des thèses interdisciplinaires en sciences de l'environnement

Des doctorants non-monodisciplinaires

Notre questionnaire visait dans un premier temps à établir un état des lieux des sujets de thèse, à l'aide des mots clés fournis par les doctorants pour décrire leur thèse (Fig. 1.). Pour la plupart, ils correspondent sans surprise aux thématiques des écoles doctorales que nous avons ciblées. Parmi les thématiques communes à plusieurs doctorants, la « biodiversité », « l'adaptation », « l'agriculture » et les « services écosystémiques » représentaient respectivement 12%, 7%, 5% et 5% des thématiques (Fig. 1). Par ailleurs, la « modélisation » était la seule méthode citée par les répondants comme mot-clé caractérisant leur thèse (9% d'entre eux, parmi lesquels 72% se déclarent non-monodisciplinaires). Cette prépondérance de la modélisation comme outil central des sciences de l'environnement n'est pas réellement surprenante, « à une époque où l'on se tourne de plus en plus souvent vers les modèles et vers la simulation pour aborder la complexité et aider à la décision » (Botta et al., 2011).

⁴⁶ Doctorants de 45 écoles doctorales différentes, 56% de femmes et 44% d'hommes.

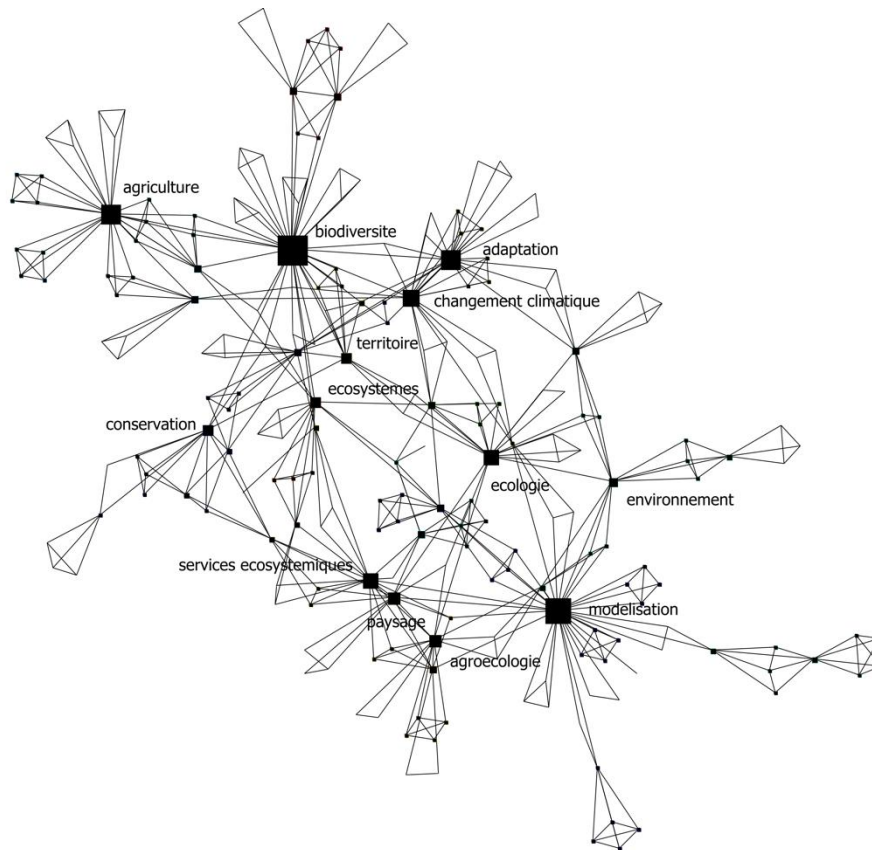


Figure 1. Principaux domaines de recherche des doctorants en science de l'environnement, d'après une analyse sémantique des mots-clés sur le logiciel ORA (Carley, 2014). Les nœuds correspondent aux mots-clés et leurs liens à leur cooccurrence. La taille des nœuds est proportionnelle à leur fréquence de citation. La proximité spatiale de deux thématiques est proportionnelle à leur cooccurrence. Les thématiques qui n'ont été citées que par un seul répondant (71% des réponses) ne sont pas nommées sur la figure.

L'objectif était ensuite d'analyser les pratiques des doctorants interdisciplinaires. Alors que le questionnaire ne ciblait pas spécifiquement les répondants interdisciplinaires, ceux-ci représentaient 80%. Parmi eux, 33% se sont déclarés multidisciplinaires, 33% interdisciplinaires et 14% transdisciplinaires, doctorants que nous avons regroupés sous le terme de « non-monodisciplinaires » (NMD). Néanmoins, ces proportions sont à moduler en fonction de ce que représente pour chacun des répondants le concept de discipline. Alors que pour certains, la NMD peut être revendiquée entre disciplines pouvant sembler très proches⁴⁷, d'autres considèrent certaines disciplines⁴⁸ comme la géographie, l'écologie ou l'agronomie, NMD en soi. Paradoxalement, parmi les 73 répondants n'ayant indiqué qu'une discipline de rattachement, 54 se sont définis comme non-monodisciplinaires, dont 25 comme multi-, 20 comme inter-, 1 comme multi- et 8 comme transdisciplinaires, sans pour autant qu'ils en précisent la signification.

⁴⁷ Certains font une différence entre écologie des communautés et écologie fonctionnelle et se revendiquent « interdisciplinaires », tandis que d'autres n'indiquent que la discipline « écologie » et se revendiquent monodisciplinaires.

Bien que la majorité des répondants se soit définie comme NMD, il ressort des réponses un certain flou quant aux définitions et aux spécificités des approches dans lesquelles ils se sont reconnus. Un répondant déclarait avoir une « grande incompréhension des différences entre pluri, inter, et transdisciplinarité ». Une autre se déclarait multidisciplinaire car « c'est le terme utilisé par l'école doctorale », et avouait ne pas connaître « la différence fondamentale entre les trois termes » (multi, inter, pluri). D'autres, au contraire, faisaient une distinction plus précise entre ces concepts, et les différençaient selon le degré d'hybridation entre les disciplines. Pour un des répondants par exemple, la multidisciplinarité implique « le traitement d'une même problématique à partir de disciplines, de fondements théoriques et de pratiques/méthodes de recherche radicalement différents », alors que l'inter- ou la transdisciplinarité impliquent « une hybridation des méthodes et des fondements théoriques ». Cette dernière définition est d'ailleurs plus proche de celles que l'on peut classiquement retrouver dans la littérature (Létourneau, 2008 ; Darbellay et Paulsen, 2011 ; Mathieu, 2018). Cette vision était également celle partagée lors de la conférence par Nicole Mathieu, pour qui « l'interdisciplinarité est une relation entre des disciplines qui ont des différences épistémiques et des différences d'objets vraiment très fortes, avec des discontinuités cognitives ». Malgré des difficultés à caractériser la terminologie à laquelle ils font appel, la plupart des répondants se sont malgré tout définis comme NMD et soulignent l'importance de l'hybridation d'approches disciplinaires différentes.

La formation, passeport pour la non monodisciplinarité

Un second objectif du questionnaire était de caractériser le profil de ces doctorants NMD, en nous intéressant à leurs parcours de formation. La majorité des répondants NMD a suivi une formation de deuxième cycle semblant se prêter à l'interdisciplinarité, comme en géographie, écologie, ou en école d'ingénieur. Onze des 121 répondants se sont ouverts à de nouvelles disciplines pendant leur thèse, soit en ajoutant une nouvelle discipline à leur discipline d'origine, soit en basculant vers une discipline « proche » de leur discipline d'origine⁴⁸. Un seul répondant est passé des SHS aux SN. Si lors de la conférence, il a été souligné que les sciences humaines et sociales pouvaient paraître plus abordables *a priori* pour un non-initié, il a été rappelé que le bagage théorique et méthodologique qu'elles comportaient était parfois largement sous-estimé —le risque étant d'ignorer les acquis ou les implications méthodologiques de la discipline. Entraînant un changement épistémologique profond, l'ouverture depuis les SN vers les SHS et inversement, caractérisant une interdisciplinarité « élargie », bénéficierait sans doute d'un accompagnement et d'une prise de recul sur les spécificités de chacune des disciplines mobilisées.

⁴⁸ Gestion de l'environnement à sciences politiques, commerce à sciences de l'information, droit international à économie.

Profils de doctorants interdisciplinaires

Nous avons ensuite établi une typologie des différents « profils NMD » à partir des réponses des doctorants en utilisant les domaines (SHS ou SN) des disciplines auxquelles ils se rattachaient, leurs méthodes, le type de données utilisées, ainsi que le mode d'analyse des données – quantitatif ou qualitatif. A partir de ces critères, il a été possible de distinguer sept profils-types de doctorants (voir tableau 1). Ce premier résultat montre ainsi l'importante diversité derrière les pratiques NMD. L'interdisciplinarité élargie représente à peine 6% des répondants au questionnaire. La rareté de ces profils peut sans doute s'expliquer par la difficulté de concilier et de se familiariser avec des disciplines aux différences épistémiques fortes dans la seule durée d'une thèse. Plusieurs intervenants à la conférence considéraient même que la maîtrise de plusieurs disciplines appartenant à des domaines différents n'était pas forcément possible. Il a plutôt été suggéré de construire l'interdisciplinarité à partir d'un fort ancrage disciplinaire et de s'ouvrir ensuite à d'autres disciplines à travers des projets de recherche et des collaborations avec d'autres chercheurs. Nicole Mathieu proposait notamment de voir l'interdisciplinarité comme « quelque chose de ponctuel », qui se recomposerait à travers des projets de recherche, ou des interactions avec d'autres chercheurs.

Tableau 1. Typologie de l'interdisciplinarité pratiquée par les doctorants NMD en fonction des disciplines, des méthodes, des données et de leur analyse déclarés dans le questionnaire. En italique sont indiqués des exemples de profils des répondants. SN : sciences naturelles ; SHS : sciences humaines et sociales. Le numéro suivant le symbole # correspond au numéro d'anonymisation du répondant.

Combinaison des disciplines déclarée par les répondants	Méthodes de collecte de données	Données mobilisées	Type d'analyse des données
SN – SHS (inter)	SN	SN	Quantitatif et qualitatif
<i>Ex : # 38 préhistoire et écologie</i>	<i>Datations ¹⁴C, simulations paléoclimatiques, modélisation prédictive</i>	<i>Données chronologiques, données paléoenvironnementales, modèles de niches écologiques</i>	<i>Analyse quantitative et qualitative des données typo-techno, statistiques</i>
SN – SHS (inter)	SN – SHS	SN – SHS	Quantitatif
<i>Ex : # 57 géographie et écologie</i>	<i>Observation, enquêtes, archives</i>	<i>Entretiens, SIG, archives, relevés de terrain</i>	<i>R (carto, statistiques, visualisation)</i>
SN – SN (inter)	SN	SN	Quantitatif
<i>Ex : # 112 Écologie microbienne</i>	<i>Collecte sur le terrain, extraction, amplification et séquençage d'ADN</i>	<i>Données d'abondance issues de metabarcoding</i>	<i>Analyses statistiques sur R</i>
SHS – SHS (multi)	SHS	SHS	Quantitatif et qualitatif
<i>Ex : # 113 aménagement du territoire, sciences politiques, écologie territoriale, histoire environnementale</i>	<i>Entretiens semi-directifs, questionnaires, banques de données en ligne, données publiques</i>	<i>Retranscriptions d'entretiens, bases de données SIG, statistiques de flux matériels, cartographies, archives historiques</i>	<i>Analyse qualitative d'entretiens, cartographie, statistiques</i>

SN (trans)	SN	SN	Quantitatif
<i>Ex : #40 Écologie</i>	<i>Données libres ou récupérables auprès de coordinateurs</i>	<i>Base de données de sciences participatives, SIG</i>	<i>Analyses statistiques</i>
SHS (trans)	SHS	SHS	Qualitatif
<i>Ex : #74 Géographie</i>	<i>Questionnaires, entretiens semi-directifs, observation participante</i>	<i>Notes d'observations participantes, littérature grise, retranscriptions d'entretiens</i>	<i>Analyses qualitatives</i>
SN – SHS (inter)	SHS	SHS	Quantitatif et qualitatif
<i>Ex : # 44 Agronomie</i>	<i>Entretiens semi-directifs</i>	<i>Retranscriptions d'entretiens</i>	<i>Statistiques (ACM,AFM)</i>

Choisir l'interdisciplinarité

La majeure partie des répondants au questionnaire expliquait le choix de l'approche NMD par la nature même de leur objet d'étude. Ainsi, pour plusieurs répondants, c'est la complexité de leur objet d'étude qui appelle l'interdisciplinarité, comme cela est suggéré par certains auteurs (Phillipson et al., 2009 ; Baudry et al., 2017). Cependant, pour Nicole Mathieu, comme pour Patrick Steyaert, l'approche NMD devrait être motivée non pas par un objet d'étude spécifique, mais plutôt par une question de recherche.

Enfin, nous avons demandé aux doctorants quels étaient selon eux les apports d'une approche interdisciplinaire dans leur démarche scientifique. 25% des réponses mettaient en avant l'ouverture et le recul qu'apporte une démarche interdisciplinaire, qui représenterait un moyen de « sortir de sa zone de confort » ou permettrait une « ouverture d'esprit ». 17% des réponses suggéraient que l'interdisciplinarité permettait d'acquérir des résultats et des données plus robustes. Ensuite, l'interdisciplinarité favoriserait une vision globale ou systémique, permettant d'appréhender la complexité des objets d'étude. Elle permettrait également de favoriser les interactions et les échanges entre les disciplines. Roxane Sansilvestri, lors de la conférence, a en effet insisté sur le rôle des chercheurs interdisciplinaires comme « trait d'union entre les disciplines », reprenant l'image des « passeurs de frontières ». Enfin, pour certains, l'interdisciplinarité ouvrirait des possibilités professionnelles, en permettant de développer une « compétence polyvalente ». Finalement, seuls 2% des répondants ont indiqué que l'un des intérêts de l'interdisciplinarité était de garantir une meilleure applicabilité des résultats en lien avec « le réel ». Ce dernier résultat semble indiquer que le choix d'une approche NMD n'est pas nécessairement guidé par une problématique touchant une question de société, à l'inverse de ce qu'ont pu exposer certains intervenants. En effet, selon Nicole Mathieu, les premiers projets interdisciplinaires développés en France portaient une forte dimension appliquée. Or, si les recherches des doctorants pratiquant une interdisciplinarité « élargie » (6% des répondants) ont une vocation appliquée pour 80% d'entre eux, 34% des doctorants NMD considèrent que leur sujet de recherche n'a

aucune application ni dans le domaine privé ni dans le domaine public⁴⁹. Il est ainsi légitime de se demander si l'injonction croissante aux approches NMD ne serait pas en train de gommer le caractère appliqué des questionnements auxquels l'interdisciplinarité souhaitait originellement répondre, en s'institutionnalisant peu à peu comme un prérequis d'abord scientifique.

Difficultés de la thèse interdisciplinaire

Le questionnaire visait aussi à faire émerger les difficultés spécifiques d'une telle approche dans le cadre du doctorat. En dehors des difficultés inhérentes à la conduite d'une thèse, celles spécifiquement pointées par les répondants NMD peuvent être envisagées sous trois angles : un premier relatif à la méthode, un deuxième à la structure même du doctorat, et un troisième à l'entourage académique des doctorants.

Au-delà du problème, fréquemment cité, des multiples définitions que peuvent revêtir un même concept selon les disciplines mobilisées, les doctorants rencontrent d'abord des difficultés liées à l'acquisition de nouvelles méthodes de recherche. Comme l'illustre un répondant, « Je manipule des outils sans vraiment les maîtriser car ils sortent de mon domaine de compétence ». Pour certains doctorants venant des sciences naturelles et s'ouvrant aux SHS, il a par exemple été soulevé la difficulté associée à une pratique rigoureuse de l'entretien semi-directif. Ce problème de manque d'expertise et de pratique dans les méthodologies utilisées a aussi été relevé par les jeunes docteurs intervenues lors de la conférence. Roxane Sansilvestri parlait de « sentiment d'inconfort », et Florence Revelin de « spécialisation dans rien » et de « perte de repère par rapport à sa discipline mère ». Pour certains doctorants, cette difficulté se double parfois du manque d'expertise de leurs encadrants dans les disciplines employées, laissant les doctorants NMD dans un autodidactisme d'autant plus délicat.

Ensuite, la structure du doctorat et l'inscription de la thèse dans un cadre académique peuvent aussi représenter un obstacle à la réalisation d'une thèse NMD. Alors que la durée de 3 ans de thèse est la même pour tous les doctorants, se familiariser avec des outils issus de disciplines nouvelles représente un investissement en temps et une difficulté supplémentaires. Comme l'ont souligné Nicole Mathieu et Sophie Caillon lors de la conférence, il s'agit là d'un défi additionnel majeur comparé à une thèse monodisciplinaire dans sa discipline de formation. Par ailleurs, l'inscription obligatoire d'une thèse sous une mention unique, parmi celles proposées par les écoles doctorales, n'est pas toujours adaptée aux thèses interdisciplinaires. Cette inscription obligatoire de la thèse sous une mention unique peut être préjudiciable pour le candidat lors des concours de recrutement, car elle ne reflète pas nécessairement son parcours ni ses compétences, problème qui peut être accentué devant des jurys non familiers des recherches interdisciplinaires. Si le CNRS s'est doté d'une section interdisciplinaire – tout en continuant à demander une discipline principale – ce

⁴⁹ Ce qui est comparable aux doctorants monodisciplinaires qui indiquent pour 40% d'entre eux l'absence d'application dans le domaine public ou privé

n'est pas encore le cas du Conseil National des Universités, responsable des recrutements de maîtres de conférences.

Enfin, le déroulement d'une thèse NMD peut être compliqué par un entourage scientifique peu adapté. Ceci est notamment vrai pour certains doctorants de sciences naturelles s'étant tournés vers les sciences humaines et sociales tout en étant restés dans un laboratoire dominé par les sciences naturelles. Il revient alors aux doctorants de trouver l'aide qu'aurait pu lui fournir un collectif de recherche partageant les mêmes problématiques et les mêmes méthodes.

Vers un meilleur accompagnement des doctorats interdisciplinaires

Bien que certaines de ces difficultés soient structurelles et nécessitent des changements à une échelle plus globale, la conférence a été l'occasion de réfléchir et d'échanger sur des solutions possibles pour les dépasser. Pour remédier au problème d'un entourage scientifique parfois inadapté au projet de recherche, Roxane Sansilvestri et Florence Revelin ont évoqué le rôle qu'ont pu jouer les relations avec des chercheurs extérieurs à leur laboratoire, en soulignant notamment l'importance de leur comité de thèse. Pour pallier au second problème évoqué de la recherche d'identité propre au chercheur interdisciplinaire ou au sentiment de manque d'expertise, Sophie Caillon suggérait d'adopter une approche pragmatique. Plutôt que de se demander « qui suis-je ? », le jeune chercheur pourrait dépasser ces blocages liés à la peur de manquer de légitimité en se posant des questions concrètes et essentielles à l'aboutissement du projet de recherche : « à quelles questions je veux répondre ? », et pour cela, « quelles méthodes j'utilise ? ». Ces réflexions rejoignent celles de Patrick Steyaert, pour qui le choix de l'interdisciplinarité devrait s'accompagner d'une approche réflexive sur la posture de recherche. Cette réflexivité sur la construction de nos problématiques de recherche, de nos pratiques, et de nos hypothèses, est essentielle pour mieux comprendre notre position et notre rôle en tant que chercheur ou doctorant interdisciplinaire, vis-à-vis des problématiques scientifiques, mais aussi, et surtout, vis-à-vis de la société.

Cette approche pragmatique de l'interdisciplinarité ne résout néanmoins pas les tensions qui peuvent émerger entre attentes académiques et pertinence sociale. Dans un milieu scientifique de plus en plus compétitif, il semble que plusieurs positions soient à envisager pour le futur des doctorants interdisciplinaires. Une des solutions est bien « d'embarquer dans le train », comme l'indiquait Sophie Caillon, et d'accepter de devoir publier à un rythme qui n'est pas forcément celui de la recherche interdisciplinaire. Néanmoins, elle appelait simultanément à développer des approches de co-construction des connaissances et de « slow-science », et à recourir à de nouveaux moyens de relier science et société, notamment avec l'aide de la pratique artistique. Si de telles approches semblent difficiles à concilier avec les contraintes universitaires actuelles, elles pourraient s'inscrire dans des approches plus « territorialisées » de la recherche. À l'image des premiers projets de recherche interdisciplinaires, s'ancrent sur un territoire

permettrait de répondre directement à des problématiques auxquelles les acteurs sont confrontés tout en développant des approches novatrices pour y répondre. Pour aller encore plus loin, certains intervenants mettaient en avant le développement des approches transdisciplinaires, qui permettraient de nouer des relations fortes avec ces acteurs de terrains. Si Nathalie Machon soulignait en effet que le profil interdisciplinaire était plutôt perçu comme un avantage en dehors du monde académique, le développement d'une approche transdisciplinaire pourrait faciliter le passage de l'un à l'autre et permettre d'associer pertinence sociale et recherche académique.

Conclusion

Le projet BASC-Our a tenté de dresser un bilan de la pratique doctorale non-monodisciplinaire en sciences de l'environnement. Nos résultats ont permis de souligner les multiples formes que peut prendre le doctorat en science de l'environnement, ainsi que la diversité des profils et pratiques non-monodisciplinaires. Cette disparité des questions de recherche, méthodes ou données utilisées constitue pour nous la richesse des approches non-monodisciplinaires. Le tressage méthodologique et disciplinaire que nécessitent ces pratiques permet de faire émerger de nouvelles questions de recherche ou de nouvelles méthodes pour y répondre. De plus, l'approche interdisciplinaire, comme nous l'avons rappelé dans cet article, semble idoine pour traiter certains problèmes socio-environnementaux actuels de plus en plus complexes et multi-acteurs. Or, le bricolage que requiert la mise en œuvre d'une approche interdisciplinaire oblige le doctorant interdisciplinaire à se poser très précocement un certain nombre de questions sur le rôle des connaissances scientifiques, leur acquisition, et plus généralement, la place du chercheur dans la société, réflexions qui nous semblent aujourd'hui déterminantes.

Cependant, comme le soulignait Jollivet (2008), pour que cette richesse puisse pleinement porter ses fruits, « encore faut-il que les conditions soient réunies pour l'exploiter ». Cette pluralité ne facilite pas la constitution d'un cadre commun pour évaluer la qualité de la recherche interdisciplinaire. La difficulté d'adapter ce type de recherche au contexte institutionnel freine sa pratique, et plus généralement les dynamiques nécessaires à une meilleure compréhension des enjeux socio-environnementaux actuels. De plus, alors que le lien entre interdisciplinarité et pertinence sociale semblait fort lors de l'émergence des premiers projets interdisciplinaires, il se pourrait que l'institutionnalisation croissante de l'interdisciplinarité entraîne un détachement du « terrain » et de ses acteurs, et constitue un risque de se retrancher dans une nouvelle « tour d'ivoire » scientifique. Dans un contexte académique de plus en plus difficile dans la recherche publique française (baisse des financements et du nombre de postes dans les Etablissements Publics à caractère Scientifique et Technologique, obtention tardive d'un poste stable dans le secteur public, forte compétitivité, évaluation croissante des chercheurs...) (MESRI, 2018 ; voir aussi les tribunes collectives du monde sur le CNRS (Collectif, 2018, 2019)), défendre une telle exigence sera d'autant plus difficile et nécessitera sans doute des modifications institutionnelles importantes. D'ailleurs, 69% de l'ensemble des répondants affirmaient se sentir inquiets quant à leur avenir professionnel. C'est pourtant

bien à eux qu'il reviendra, à l'avenir, d'impulser ou de soutenir ces évolutions pour répondre aux enjeux contemporains que soulèvent les problèmes socio-environnementaux.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'Avenir (LabEx BASC ; ANR-11-LABX-0034). Nos remerciements vont aussi à l'équipe TESS, Alexandre Péry et Jean-Marc Douguet pour les améliorations apportées au questionnaire ; aux écoles doctorales qui l'ont diffusé ; aux doctorants ayant contribué au questionnaire et/ou à l'atelier ; et aux intervenants et participants du colloque.

Références

- Baudry, J., Alignier, A., & Thomas, Z., 2017. Interdisciplinarité et représentation de la complexité des systèmes socio-écologiques : recherches sur la zone atelier Armorique. *Natures Sciences Sociétés*, 25 : 850-854.
- Botta, A., Graillet, D., Abi-Zeid, I., Deffuant, G., Weissenberger, S. & Duchemin, E., 2011. La modélisation en sciences de l'environnement : approches et questionnements. *Vertigo*, volume 11, numero 3.
- Campus France, 2018. Campus France : étudier en France. (online: <https://www.campusfrance.org/fr>).
- Carley, Kathleen M. (2014). ORA: A Toolkit for Dynamic Network Analysis and Visualization, In Reda Alhajj and Jon Rokne (Eds.) *Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining*, Springer.
- Collectif, (2018). L'étiement programmé du CNRS, symptôme du dédain pour la recherche publique, dans *Le Monde*, 5 décembre 2018, p.SCH7.
- Collectif, (2019). Le CNRS fêtera-t-il ses 100 ans ?, dans *Le Monde*, 19 juin 2019, p.SCH7.
- Darbellay, F., Paulsen, T. (Eds), 2011. Au miroir des disciplines : Réflexions sur les pratiques d'enseignement et de recherche interet transdisciplinaires, *Im Spiegel der Disziplinen. Gedanken über inter- und transdisziplinäre Forschungs und Lehrpraktiken*, Berne, Peter Lang.
- ESE, 2019. Site internet du laboratoire Écologie, Systématique, Évolution - UMR8079, Laboratoire Écologie, Systématique et Évolution. (online: <https://www.ese.u-psud.fr/>).
- Jollivet, M., 2008. Présentation, *Natures Sciences Sociétés*, Supplément, Supp. 2, 4–6.
- Jollivet, M., Carlander, M.-A., 2008. Compte-rendu des Journées, *Natures Sciences Sociétés*, Supplément 2, 7–14.

Annexe 3

Létourneau, A., 2008. La transdisciplinarité considérée en général et en sciences de l'environnement. *VertigO*, 8(2).

Nicole Mathieu, « Pratiquer l'interdisciplinarité : pourquoi persister ? », *EspacesTemps.net* [En ligne], Travaux, 2018 | Mis en ligne le 7 février 2018, consulté le 15.06.2019. URL : <https://www.espacestemp.net/articles/pratiquer-linterdisciplinarite-persister/>

MESRI & DGESIP/DGRI-SIES (2018), État de l'emploi scientifique 2018. Rapport mis en ligne le 9 octobre 2018, consulté le 15.06.2019. URL : <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid133529/l-etat-de-l-emploi-scientifique-en-france-edition-2018.html>

Phillipson, J., Lowe, P. & Bullock, J.M., 2009. Navigating the social sciences: interdisciplinarity and ecology. *Journal of Applied Ecology*, 46: 261-264.

4. Solutions Fondées sur la Nature (SFN)

SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE (SFN)

Espaces naturels n°63 - juillet 2018

Des mots pour le dire

Par **Victoria Soubeiran**, master Biodiversité, écologie, évolution et **Timothée Fouqueray**, laboratoire Écologie, systématique, évolution, de l'université Paris-Saclay



Le concept de « solutions fondées sur la nature » (SFN) a émergé au début des années 2000 à l'initiative de la communauté de la conservation. Il est aujourd'hui porté par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), qui définit les SFN comme « des actions de protection, de gestion durable et de restauration d'écosystèmes naturels ou modifiés, qui répondent à des défis sociétaux de manière effective et adaptative, apportant à la fois un bien-être humain et des bénéfices pour la biodiversité ».

Il s'agit donc de promouvoir la faculté des écosystèmes de rendre un ensemble de Biens et services écosystémiques (BSE) aux sociétés, lorsqu'ils sont en bon état. Une noue (sorte de fossé large et peu profond) végétalisée, par exemple, permettra l'infiltration directe des eaux pluviales et évitera le ruissellement, contrairement aux chaussées bétonnées classiques. Elle réduira l'effet d'îlot de chaleur urbain grâce au phénomène d'évapotranspiration, constituera un habitat pour la faune en fonction de sa végétation et pourra être un lieu de loisir si sa surface le permet. En cela, la différence entre SFN et Génie écologique (GE) reste subtile.

Les SFN sont en tous les cas une reconnaissance d'un travail de communication. Mentionnées aujourd'hui dans des appels à projets européens tels que le programme-cadre de recherche et innovation de l'horizon 2020, les SFN sont de plus en plus présentes dans les politiques publiques. Plus récemment, un rapport de l'Organisation des Nations unies de mars 2018 appelle à la mise en place de SFN pour la gestion de l'eau au niveau mondial.

Les années à venir seront décisives : les SFN pourront-elles créer une différence significative dans la gestion des risques naturels et dans les politiques en faveur du climat ? Valoriser les nombreux avantages de la nature pour les sociétés humaines suffira-t-il à faire évoluer les mentalités et les pratiques ? Pour le moment, les SFN restent encore méconnues des citoyens. C'est pourtant une notion positive qui vise à rassurer les sociétés : il existe des solutions pour répondre aux défis globaux, et pouvant bénéficier à tous. En effet, la nature n'est pas le problème, mais la solution.

victoria.soubeiran@u-psud.fr

timothee.fouqueray@agroparistech.fr

Titre : Adaptations aux incertitudes climatiques de long terme : trajectoires socio-écologiques de la gestion forestière française

Mots clés : adaptation, changement climatique, forêt, socio-écosystèmes, technique, jeux sérieux

Résumé : Les trajectoires socio-écologiques des forêts sont considérablement dépendantes des pratiques sylvicoles retenues par leurs gestionnaires. Or, ces choix de gestion sont susceptibles d'évoluer afin de prendre en compte les impacts des dérèglements du climat sur les milieux forestiers. L'objectif des travaux qui suivent est donc de comprendre les évolutions de la gestion forestière induites par les adaptations aux dérèglements climatiques (ACC). Ils se concentrent sur la France métropolitaine, dont les forêts sont l'un des écosystèmes les plus importants – elles en couvrent un tiers de la surface. Trois thématiques de recherche ont permis de décliner cette problématique : (1) la diversification des ACC (quels biens et services écosystémiques forestiers (BSE) cible-t-elle ?) ; (2) l'importance accordée par les forestiers aux approches techniques, en comparaison des réflexions portant sur l'organisation socio-économique de la gestion forestière ; et enfin (3) l'intégration des dynamiques écologiques dans la conception et la mise en œuvre d'adaptations aux changements climatiques.

Chapitre 1 : Recensement, par des enquêtes de terrain, des ACC en forêts privées et publiques. Les adaptations répertoriées concernaient seulement quelques-uns des nombreux BSE forestiers, au premier rang desquels la production de bois, le stockage de carbone et la préservation des habitats naturels. Ces adaptations étaient avant tout mises en place pour répondre à des aléas climatiques déjà vécus par les forestiers. Surtout, ces adaptations relevaient d'évolutions des techniques sylvicoles, où les humains interviennent sur le socio-écosystème forestier, en modifiant les composantes naturelles.

Chapitre 2 : J'ai étudié le financement public des projets de recherche portant simultanément sur les changements climatiques et sur la fores-

ter. J'ai montré qu'une des causes du manque de considération des aspects socio-économiques de l'ACC provient de la prééminence de recherches techniques, très peu tournées vers les services écosystémiques socio-culturels, de régulation ou de soutien.

Chapitre 3 : Retour au terrain, pour une étude de cas sur le paiement pour stockage de carbone. J'ai mis en relief comment la diversification des revenus engendrée par ce type d'innovation est un moyen indirect pour les forestiers de s'adapter aux changements climatiques, en diminuant leur dépendance à une production ligneuse fortement menacée par les dérèglements climatiques. Les atouts, mais aussi certaines limites techniques et conséquences socio-économiques de cette approche ont été soulignés.

Chapitre 4 : Synthèse des apprentissages des chapitres précédents, grâce à la création d'une simulation participative de gestion forestière. Dans *Foster Forest*, divers acteurs de la gestion forestière sont plongés dans un scénario de fort changement climatique. Pour mener à bien leur propre mission, ils disposent d'une panoplie de pratiques sylvicoles inspirée de pratiques usuelles, mais qui ne suffisent pas à faire face aux perturbations climatiques. Pour compenser, les participants ont toute liberté de proposer des changements des règles du jeu afin de faire évoluer l'organisation socio-économique de leurs activités forestières. La dizaine d'applications de cette simulation participative, dans différentes régions françaises, a permis de confirmer les résultats des chapitres précédents. Les parties jouées ont aussi apporté un éclairage sur l'importance des structures d'animation territoriale dans l'élaboration de projets d'adaptations, à des échelles complémentaires des seules visions « à la parcelle ».

Title : Adaptation to long-term uncertainty : social-ecological trajectories of French forest management

Keywords : adaptation, climate change, forest, socio-ecosystems, technic, serious games

Abstract : Adapting forest management to climate change (CC) is a key issue, as forests are crucial for mitigation policies and the provision of many ecosystem services (ES). Understanding the magnitude of the progress made in this respect can help shape further adaptation developments and avoid the putative maladaptive side effects of forest management evolutions. Here, I aim to bridge the knowledge gap of adaptation implementation in French forests.

Chapter 1: Based on semi-structured interviews with foresters, my findings highlight unprecedented aspects of adaptations: (i) a focus on productive ES at the expense of other essential services such as water supply or natural habitats; (ii) adaptations rely on technical changes in forest management and do not deal with climate impacts through organizational or economic tools; and (iii) envisaging ecological processes through adaptations is instrumental and limited to small spatial and temporal scales. My results also extend the existing body of knowledge to the framework of forest management: (i) CC is not the main driver of forestry changes; (ii) extreme events are windows of opportunity to stimulate adaptive changes; and (iii) proactive adaptation to unexperienced hazards is very weak.

Chapter 2: Assessment of the diversity of research projects in the forest sciences focusing on CC. I categorized projects according to discipline and main focus, using data from the online description of French public calls for proposals and from selected projects. Since 1997, mitigation research has gradually given way to adaptation. Despite pledges for the inclusion of social sciences, research rarely draws on the social sciences and focuses on ES of economic interest. Biomass production is paramount, being addressed either directly or through projects on tree species of industrial interest. Hence, instead of a diverse search for adaptation strategies, climate research is geared toward a few ES. Without denying the need for timber and

biofuel production, I encourage public funders to complement current calls for proposals with more diverse approaches beneficial for both biomass production and other ES.

Chapter 3: I study how multiple mechanisms for the mitigation of CC have been developed, drawing on a combination of reducing and offsetting greenhouse gas (GHG) emissions. While mechanisms are mandatory for certain economic sectors, some business that are not required to mitigate their GHG emissions would nevertheless like to do so. I examine two study cases in France to analyze how public and private foresters seized this opportunity to obtain complementary funding from such companies for forestry operations. I focus on offset contracts issued by associations linking public sector forestry agencies, forest landowners, and offset funders. Carbon mitigation was a reason shared by all contractors to commit to the agreement, although it concealed multifarious motivations. Hence, I argue that voluntary offset contracts act like a Trojan horse by enabling foresters to dialogue with entities that would otherwise not be interested in supporting forest management. Regional embedding was crucial to overcoming the mitigation challenges.

Chapter 4: To gain insight on how can socio-economic adaptive tools complement technical evolutions of forestry, I designed *Foster Forest*, a participatory simulation of forest management. It combines a role-playing game, an agent-based model, and a scenario of CC with high uncertainties. Drawing from multiple applications in French regions, I show that climate change is not a short-term matter of concern for private and public foresters. I analyze the emergence of socio-economic changes (mainly payment for carbon storage) in the provision of ES, and participants' negotiations to spontaneously change the simulation rules. I also highlight how collective adaptive action was steered by stakeholders with a public interest role.

