



HAL
open science

Connaître et gérer les forêts, anticiper leurs futurs : enquête au cœur des infrastructures de recherche forestière françaises

Antoine Dolez

► **To cite this version:**

Antoine Dolez. Connaître et gérer les forêts, anticiper leurs futurs : enquête au cœur des infrastructures de recherche forestière françaises. Sociologie. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2020. Français. NNT : 2020GRALH002 . tel-03411095

HAL Id: tel-03411095

<https://theses.hal.science/tel-03411095>

Submitted on 2 Nov 2021

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Sociologie**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Antoine DOLEZ

Thèse dirigée par **Céline GRANJOU**, Directrice de recherche, **INRAE**,
et codirigée par **Séverine LOUVEL**, Maîtresse de conférences **HDR**,
Sciences-Po Grenoble

préparée au sein du laboratoire **PACTE** et du **LESSEM**
dans l'**École Doctorale Sciences de l'Homme, du Politique et du**
Territoire

Connaître et gérer les forêts, anticiper leurs futurs

Enquête au cœur des infrastructures de recherche
forestière françaises

Thèse soutenue publiquement le **9 juillet 2020**,
devant le jury composé de :

M. Marc BARBIER

Directeur de recherche, LISIS, Paris, Président

Mme Céline GRANJOU

Directrice de recherche, l'INRAE, Grenoble, Directrice de thèse

M. Raphaël LARRÈRE

Directeur de recherche émérite, INRAE, Paris, Examineur

Mme Séverine LOUVEL

Maîtresse de conférences HDR à Science-Po, Grenoble, co-
directrice de thèse

Mme Florence MILLERAND

Professeure à l'UQAM, Montréal, Rapporteur

M. Franck VARENNE

Maître de conférences HDR à l'Université de Rouen, Rapporteur



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Florence Millerand et Franck Varenne pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail, ainsi que Marc Barbier et Raphaël Larrère pour leur participation à mon jury de thèse.

Ecrire une thèse est une expérience ambiguë, une épreuve solitaire et collective. Tels Philémon et Baucis, métamorphosés en arbres et unis à jamais par leurs branches enlacées, ces pages ont fleuri de lectures et de rencontres. Collègues, amis, famille, nous voilà ici transformés et réunis dans ces quelques feuilles noircies.

Je remercie sincèrement mes deux directrices de thèse Céline Granjou et Séverine Louvel pour la confiance qu'elles m'ont accordée. Merci pour votre écoute, votre présence et votre bienveillance. Merci pour vos précieux conseils, vos idées et le temps que vous avez passé à m'accompagner pendant toutes ces années de ma vie académique. Je crois que ce travail nous ressemble, et je suis très fier de l'avoir réalisé avec vous.

J'exprime toute ma gratitude à mes 'enquêtés' : chercheurs, ingénieurs et forestiers qui m'ont accordé leur temps pour discuter de la connaissance et de la gestion des forêts. Grâce à vous, j'ai découvert un objet, un milieu et un paysage que je connaissais peu, et qui aujourd'hui me fascine.

Je remercie les collègues et amis de Grenoble et de Strasbourg. Merci à mes 'compagnons de galère' rencontrés, lors de cette longue traversée, à IRSTEA : Gaëlle Ronsin, Clément Viguiier et Lucas Brunet, et au DHVS : Guillaume Linte et Nils Graber. Merci à Christian Bonah et Nils Kessel de m'avoir fait confiance et donné la possibilité d'enseigner. Cela m'a permis d'aborder ce travail avec un nouveau regard. Merci Nils pour tes conseils et ton soutien. Merci à Elisabeth Fuchs et Marion Speisser de m'avoir aidé dans la traduction de mes citations. Merci Thérèse d'avoir été là lorsque le poids de la thèse s'est révélé être lourd à porter.

Merci à mes amis, cousin, frère et sœur qui ont eu la gentillesse de relire ce manuscrit : Charlotte, Gaëlle, Pauline, François, Vincent, Guillaume, Christopher et José.

Je suis heureux d'avoir pu vivre quelques années dans la 'Capitale des Alpes', et rencontré ces amis qui ont partagé mes joies et mes doutes, mes jours et mes nuits. Merci d'avoir été là : Rachel, Quentin, Sylvain, Tim, Alexandre, Mathias, Adrien et Laura.

La thèse a pu m'éloigner physiquement et psychologiquement de ceux que j'aime. Merci à mes proches d'avoir compris. La distance et le temps n'ont, je crois, pas fait leurs œuvres. Merci à mes amis de longue date : Mathilde, Christopher, José, François et Bastien. Merci à ma famille : Hélène, Louis, François, Jules, Vincent, Papa. Merci Jean et merci Maman pour votre soutien lors de mes retours dans la 'Cité de Géants'.

On dit souvent que la thèse marque une étape importante dans un parcours académique, une trajectoire intellectuelle, et ouvre une nouvelle page à écrire. Merci infiniment à Charlotte et à Rémy de m'avoir épaulé et encouragé du moment où j'ai quitté mes Flandres natales à celui où je mets un point final à ce chapitre de ma vie.

Avant-propos

Les données présentes dans ce manuscrit ont été récoltées entre 2014 et 2019. Depuis la fin de la rédaction, certaines informations ont pu changer. Les données sur les chercheurs et ingénieurs sont mentionnées telles qu'elles ont été récoltées au moment de la réalisation de l'entretien (voir annexe 1). En 2020, l'INRA et IRSTEA ont fusionné pour devenir INRAE. J'ai choisi de ne pas intégrer cette fusion dans la mention des institutions des acteurs.

Les citations bibliographiques et les propos des acteurs sont signalés par le type de guillemet suivant : « »

Les concepts ou expressions sont signalés par ce type de guillemet : ‘ ’

Les astérisques (*) renvoient au terme définis dans le lexique (annexe 3). L'astérisque apparaît lors de la première mention du terme technique.

Toutes les traductions des citations en anglais ont été réalisées par mes soins, et avec l'aide d'Elisabeth Fuchs et Marion Speisser. Les citations en langue originale sont reproduites en note de bas de page. Quand ce n'est pas ma traduction, cela est également précisé en note.

Résumé

Connaître et gérer les forêts, anticiper leurs futurs. Enquête au cœur des infrastructures de recherche forestière françaises

Les changements globaux ont mis sur le devant de la scène politique et scientifique les forêts, appréhendées comme des dispositifs de lutte contre le changement climatique, et comme des écosystèmes menacés par les climats futurs. Chercheurs, ingénieurs et gestionnaires forestiers déploient des stratégies pour anticiper leurs dynamiques futures afin de les préparer aux enjeux écologiques, socio-économiques et politiques de demain. Ces préoccupations pour l'avenir des forêts ne sont pourtant pas nouvelles, elles sont au cœur des sciences et de la gestion des forêts depuis la fin du XVIII^{ème} siècle, comme le grand récit de la « mort des forêts » (*das Waldsterben*) ou celui des « puits de carbone » pour atténuer le changement climatique. Cette thèse étudie d'un point de vue historique et sociologique comment sont façonnés les futurs des forêts françaises. S'inscrivant dans le courant des *Science and Technology Studies (STS)*, ce travail s'appuie sur le concept d'infrastructures de recherche forestière pour décrire et analyser comment les forêts sont transformées en chiffres et en données, comment elles sont quantifiées, modélisées et simulées informatiquement pour être gérées et gouvernées. Les infrastructures de recherche forestières renvoient alors aux assemblages sociotechniques, organisationnels et scientifiques qui visent à surveiller les forêts, et rendre leurs futurs anticipables et gouvernables. L'enquête au cœur de ces infrastructures a été menée dans plusieurs laboratoires français de recherche forestière et s'appuie sur des entretiens réalisés avec des chercheurs, ingénieurs et gestionnaires, ainsi qu'une analyse documentaire de leurs productions. L'étude des pratiques de quantification, de modélisation et de simulation des forêts, et des acteurs, collectifs et institutions qui les portent, dévoile alors les dimensions sociotechniques de la production des futurs des forêts. Ces futurs ont une histoire et une matérialité : ils suivent les trajectoires prises par les infrastructures de recherche forestière. Ces futurs sont pluriels : les acteurs portent des visions concurrentes sur les rôles joués par les forêts dans les climats futurs, et sur les savoirs, technologies et pratiques à mettre en œuvre pour les adapter aux changements globaux.

Mots-clefs : Etudes des futurs ; Infrastructures de recherche ; Pratiques de modélisations et de simulations ; *Science and Technology Studies* ; Sciences des forêts ; Sociologie de l'environnement.

Abstract

Knowing and managing forests, anticipating their futures. Investigation into French forest research infrastructures

Global changes have put forests at the forefront of the political and scientific agendas. Then, they are understood as devices to fight climate change as well as ecosystems threatened by future climates. Forest researchers, engineers and managers are thus developing strategies to anticipate their future dynamics so as to prepare them for tomorrow ecological, socio-economic and political challenges. However these concerns for forest futures are not new. They have been at the core of forest science and management since the end of 18th century, such as the major narrative of the “death of forests” (das Waldsterben) or the one of the “carbon sink” to mitigate climate change. This PhD-thesis investigates from an historical and sociological perspective how French forest futures are shaped. Following the *Science and Technology Studies* (STS) approach, this study draws on the concept of forest research infrastructures to describe and understand how forests are transformed into numbers and data and how they are quantified, modeled and computer-simulated to be managed and governed. Forest research infrastructures thereby refer to the sociotechnical, scientific and organizational assemblages aiming to monitor forests and make their futures anticipable and governable. The investigation into these infrastructures has been conducted in several French forest research laboratories and relies on interviews with researchers, engineers and managers, and on a documentary analysis of their productions. Studying forest quantification, modeling and simulating practices, and the actors, collectives and institutions that carry them out, reveals the sociotechnical dimensions of the production of forest futures. These futures are both historical and material: they reflect the trajectories taken by forest research infrastructures. These futures are plural: actors have competing visions of the role to be played by forests in future climates, as well as of the knowledge, technologies and practices to be mobilized in order to adapt them to climate changes.

Key-words: Futures Studies; Research infrastructures; Modeling and simulation practices; Science and Technology Studies; Forest Sciences; Environmental Sociology.

Sigles, acronymes et abréviations

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AFOCEL : Association Forêt-Cellulose

[réseau] AFORCE : réseau français pour l'Adaptation des Forêts au Changement climatique

ALIENvi : Alliance nationale de recherche pour l'environnement

AMAP : botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations

ANR : Agence Nationale de la Recherche

[équipe] ASTRRE : Approches socio-écosystémiques des territoires, des risques et des ressources

[projet] *ARRANGE : Advanced Multifunctional Forest Management in European Mountain Ranges*

[projet] BIO-PRO-FOR : Impact des changements globaux sur la Biodiversité et la Productivité des Forêts alpines

[projet] BGF : Biodiversité, Gestion Forestière et Politiques publiques

CAP : Certificat d'Aptitude Professionnelle

CAPGIS: Computer-aided projection of strategies in silviculture

CAQ : réseau Croissance, Amélioration, Qualité

[projet] CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles

CASIF : Catalogue en ligne des sources d'information sur la forêt

CEFE : Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive

CERAFER : Centre national d'Etudes techniques et de Recherches technologiques pour l'Agriculture, les Forêts et l'Equipement Rural

CEMAGREF : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts

CEPE : Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques (ancien CEFE)

CFDT : Confédération Française Démocratique du Travail

CGAAER : Conseil Général de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Espaces Ruraux

CIRAD : Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement

CNPF : Centre National de la Propriété Forestière

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

(GIS) COOP : (Groupement d'Intérêt Scientifique) Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers

CRAN : Comprehensive R Archive Network

CRPF : Centre régional de la Propriété Forestière

CTGREF : Centre Technique du Génie Rural des Eaux et Forêts

DEFORPA : Dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique

DSF : Département Santé des Forêts

[équipe] DYNAMICS : Changements globaux, dynamique et gestion durable des espaces forestiers et pastoraux de montagne

EFI: European Forest Institute

EML: Ecological Metadata Language

ENEF : Ecole Nationale des Eaux et Forêts

ENGREF : Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

ENITEF : Ecole nationale des Ingénieurs des Travaux des Eaux et des Forêts

[projet] EMERGE : Elaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Energie

EPIC : Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial

ERC: European Research Council

ERF : Ecole Royale Forestière

ESE : laboratoire Ecologie, Systémique et Evolution

ETH : Eidgenössische Technische Hochschule (en français : Ecole Polytechnique fédérale)

FCBA : Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement

FFN : Fonds Forestier National

[équipe] FORECAST : Forêts, Changements globaux et Adaptation : Simulations et expérimentations

[projet] *FORESEE: Forest RESource Estimation for Energy*

GBIF : Global Biodiversity Information Facility

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

(GIP) ECOFOR : (Groupement d'Intérêt Public) Ecosystèmes Forestiers

GHFF : Groupe d'Histoire des Forêts Françaises

ICP-FOREST: International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (en français PIC-FOREST)

ICOS: Integrated Carbon Observation System

IDF : Institut pour le Développement Forestier

IFN : Inventaire Forestier National

IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INRA-EFPA : Institut National de la Recherche Agronomique, département Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

IPBES: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services

IRSTEA : Institut national de Recherches en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

ITEF : Ingénieurs des Travaux Eaux et Forêts

IUFRO : *International Union of Forest Research Organizations* (en français : Union Internationale des Instituts de Recherches Forestières)

LESSEM : Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne

LIDAR: Light detection and ranging

[modèle] *LPJ: Lund, Postdam, Jena*

LSCE : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

ILTER: Long-Term Ecosystem Research

[projet] *MEDEFU: Carbon and water flux of Mediterranean Forests and impacts of land use/cover changes*

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

NCEAS: National Center for Ecological Analysis and Synthesis

ONERC : Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique

ONF : Office National des Forêts

ONG : Organisation Non Gouvernementale

OPECST : Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Techniques

PBI : Programme Biologique International

RENECOFOR : Réseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers

RMT : Réseau Mixte Technologique

RTM : Restaurations des Territoires de Montagnes

SHS : Sciences Humaines et Sociales

SIG : Système d'Information Géographique

SIGMA : Station Internationale de Géobotanique Méditerranéenne et Alpine

SOERE : Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement

[équipe] STEPE : Société, Territoire, Environnement, Politique, Economie

STS : Science and Technology Studies

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

URSAVE : Unité de Services et de Recherche en Analyses Végétales et Environnemental

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	20
I. PREAMBULE : LES FORETS SUR LE DEVANT DE LA SCENE MEDIATIQUE	20
A. Les ‘Forêts-Infrastructures’ au cœur de la lutte contre le changement climatique	20
B. Les ‘Forêts-Sanctuaires’ : une critique de la sylviculture moderne	22
C. De l’arbre au chiffre, puis au pixel : surveiller les forêts et anticiper leurs futurs	25
II. ETUDIER LE GOUVERNEMENT DES FUTURS DES FORETS	28
A. Forêts et Sciences humaines et sociales	28
1. L’histoire des forêts : corps forestier, économie, conflits et déforestations.....	28
2. Sociologie de l’environnement, STS, et études sociales des forêts tropicales.....	31
B. Etudier les « futurs en mouvement » : les <i>Future Studies</i>	34
C. Gouverner les futurs des forêts : surveiller, anticiper et quantifier.....	37
1. Gouverner, c’est surveiller, et anticiper un futur ouvert.....	38
2. Une approche décentralisée de la surveillance	39
3. Une sociologie de la quantification des forêts.....	41
III. ETUDIER LES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE FORESTIERE PAR LE PRISME DES PRATIQUES DE MODELISATION ET DE SIMULATION.....	44
A. Les infrastructures de recherche forestière	44
1. Inverser les infrastructures de recherche forestière pour étudier le gouvernement des forêts	45
2. Quatre caractéristiques des infrastructures de recherche.....	49
B. Une sociologie des pratiques de modélisation et de simulation des forêts	54
1. Analyser la science « en situation » : le ‘tournant pratique’ des STS.....	55
2. Les principes méthodologiques d’une sociologie des pratiques de modélisation.....	57
IV. DETAIL DE L’ENQUETE ET PRESENTATION DU PLAN DE LA THESE	59
A. Présentation de l’enquête	59
B. Architecture générale de la thèse	61
INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE : DE LA PROPHETIE AUX ANTICIPATIONS : DEUX VISIONS DES FUTURS DES FORETS	64
CHAPITRE 1 : UNE BIOPOLITIQUE DES FORETS : SCIENCES, POLITIQUES ET RECHERCHES FORESTIERES EN FRANCE (1820-1980).....	68
INTRODUCTION.....	68
I. CALCULER ET PREVOIR LA RESSOURCE EN BOIS : LA SCIENCE FORESTIERE ET LE CORPS FORESTIER EN FRANCE (FIN XVIII ^{EME} – 1880).....	71
A. La science forestière à la fin du XVIII ^{ème} siècle : quantifier et prévoir la ressource forestière	72

1.	« Nos chênes ne rendent plus d'oracle » ; quand le futur change de camp.....	72
2.	Transformer la forêt en chiffres	74
3.	La 'forêt normale' comme objectif de gestion	77
B.	Les outils de la politique forestière française : le code, l'administration et la presse forestières.....	79
1.	Le code forestier : réglementer les usages des bois.....	80
2.	L'Ecole Royale Forestière et la presse forestière : formaliser et diffuser les principes de la science forestière.	82
C.	Les dimensions politiques et « écologiques » du discours sur le reboisement (1800-1880)	84
1.	Une politique étatiste de reboisement	85
2.	La forêt : gardienne de l'équilibre des cycles naturels	88
II.	LA STRUCTURATION DES RECHERCHES FORESTIERES : INTRODUIRE L'OBSERVATION ET L'EXPERIMENTATION EN FORET (1880 – 1945).....	90
A.	La naissance d'une « machine unique » : les débuts des infrastructures de recherche forestière	91
1.	Introduire la méthode expérimentale dans les recherches forestières.....	92
2.	La naissance des infrastructures de recherche forestière françaises	94
B.	La 'biologisation' des forêts : nouveaux savoirs et dynamique européenne des recherches forestières.....	96
1.	Une structuration européenne des recherches forestières	96
2.	Les recherches forestières se pluralisent : botanique, géographie et phytosociologie	98
III.	REFORMER LES INSTITUTIONS ET LES DISPOSITIFS DE LA BIOPOLITIQUE FORESTIERE (1945-1980) : LA 'MODERNISATION' DES FORETS FRANÇAISES	103
A.	Reboiser et inventorier les forêts : la modernisation de la forêt comme infrastructure productive	103
1.	Le Fonds forestier national : un dispositif pour 'moderniser' les forêts.....	103
2.	Cartographier la ressource en bois : l'Inventaire Forestier National	105
B.	Réformer la recherche forestière : l'intégration à l'INRA et l'écologisation des forêts	108
1.	La restructuration des instituts de recherches forestières	108
2.	Les effets de la restructuration : la rencontre de deux cultures scientifiques.....	110
C.	Formaliser les outils institutionnels et scientifiques de la gestion forestière : l'ONF et la notion de « station forestière ».....	113
1.	La structuration des organismes de gestion des forêts : la création de l'ONF.....	114
2.	Formaliser des outils utiles pour le forestier : les tables de production et les « stations forestières »	115
	CONCLUSION	119
	CHAPITRE 2 : LE FUTUR CATASTROPHISTE DE LA « MORT DES FORETS » : L'AFFAIRE DES PLUIES ACIDES ET L'ESSOR DE LA SURVEILLANCE DES ECOSYSTEMES FORESTIERS.....	122
	INTRODUCTION.....	122

I.	LES INCERTITUDES METROLOGIQUES : AU CŒUR DE LA DYNAMIQUE DE L'AFFAIRE DES PLUIES ACIDES	124
A.	Scandale et emballement médiatique ? Trajectoire scientifique, sociale et politique des pluies acides.....	124
1.	16 novembre 1981 : le début du scandale	124
2.	L'alerte passe la frontière : les pluies acides menacent les forêts françaises.....	126
3.	Les coupables du scandale : quel composé chimique incriminer ?	127
B.	Nouvelle pollution, « nouveau risque » : incertitudes métrologiques et dépérissement forestier.....	130
1.	Les pluies acides comme « risque nouveau ».....	130
2.	Qu'est-ce qu'un dépérissement forestier ?	133
C.	Une politisation européenne du phénomène des pluies acides	136
II.	LES RECHERCHES FORESTIERES MISES A L'EPREUVE DES PLUIES ACIDES : SURVEILLER LES ECOSYSTEMES FORESTIERS ET MODELISER LEURS DYNAMIQUES	139
A.	Comprendre le fonctionnement de l'arbre et de la forêt : l'essor des approches écophysiologiques et écosystémiques.....	140
1.	Etudier le fonctionnement de l'arbre : la mise au point des modèles fonctionnels écophysiologiques	140
2.	L'héritage du PBI pour l'écologie forestière : appréhender la forêt comme une « machine cybernétique »	143
B.	La surveillance de la santé des forêts : <i>monitoring</i> et gestion forestière.....	148
1.	Piloter les infrastructures de surveillance des forêts : la pyramide du monitoring environnemental.....	149
2.	Diagnostiquer la santé des forêts : le DSF et la doctrine des trois facteurs	152
	CONCLUSION	156

CHAPITRE 3 : LES RECHERCHES FORESTIERES A L'HEURE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : LES FUTURS PLURIELS ET INCERTAINS DES FORETS FRANÇAISES

	INTRODUCTION.....	160
I.	LES AGENDAS DES RECHERCHES FORESTIERES AVANT L'IRRUPTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	162
A.	L'agenda de recherche : un concept descriptif et relationnel.....	162
B.	L'agenda sylvicole : prévoir la ressource, orienter la gestion.....	166
1.	Prédire la récolte, prévoir la sylviculture : les modèles de croissance.....	166
2.	Orienter la gestion forestière : les guides de sylviculture.....	169
C.	L'agenda écologique : comprendre les processus fondamentaux des écosystèmes forestiers	172
1.	Les modèles fonctionnels : expliquer les mécanismes des écosystèmes forestiers.....	173
2.	Produire des données expérimentales : le site de Puéchabon	176

II. LES RECHERCHES FORESTIERES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : L'ANTICIPATION DES FUTURS DES FORETS AU CŒUR DES AGENDAS DE RECHERCHES.	178
A. La communauté forestière soucieuse des effets du changement climatique dans les années 2000	180
1. La sécheresse et la canicule de 2003 : un « avant-goût » du futur ?.....	180
2. « La fin du hêtre ? » : les cartes du projet CARBOFOR	182
3. L'intégration du problème climatique dans les institutions de gestion forestière.....	187
B. Les agendas écologiques et sylvicoles face au changement climatique : « climatisation » et hybridation des agendas.....	188
1. Le changement climatique dans l'agenda écologique : un simple élément de contexte ?	189
2. La « climatisation » de l'agenda sylvicole : développer la bioéconomie et anticiper la gestion forestière future	193
3. Une hybridation des agendas comme effet de la « climatisation » : l'essor d'un régime d'anticipation ? ...	196
CONCLUSION	204
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE : LES 'FUTURS MENAÇANTS', MOTEURS DE L'EVOLUTION DES RECHERCHES FORESTIERES.....	206
INTRODUCTION DE LA SECONDE PARTIE : SOCIOLOGIE DES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE FORESTIERE CONTEMPORAINES.....	210
CHAPITRE 4 : INFRASTRUCTURES, <i>MONITORING</i> ET MODELISATION : LA PRODUCTION SOCIOTECHNIQUE DES DONNEES FORESTIERES	216
INTRODUCTION.....	216
I. UNE DIVERSITE DE MODELES POUR UNE DIVERSITE DE DONNEES.....	218
A. Une multitude de pratiques de modélisation : quelques définitions liminaires.....	218
1. Un modèle pour toute une carrière ou une pluralité de petits modèles.....	219
2. Formalisation, modélisation et simulation	220
3. L'échelle spatiotemporelle du phénomène étudié conditionne les données à collecter.....	221
B. Construire un modèle : un processus non-linéaire et itératif.....	224
1. En théorie, une construction 'idéale' linéaire des modèles	224
2. ... En pratique, une relation « symbiotique » entre modèles et données	226
II. LA 'FABRICATION' DES DONNEES FORESTIERES	231
A. Réduire les coûts de production : « valoriser l'existant »	231
1. Le 'bricolage' des données forestières	231
2. Les bases de données, éléments structurant des équipes de recherche : l'exemple d'EcoPlant.....	234
3. Le partage et la mutualisation des données	236
B. Fabriquer des 'données de long terme' : le chercheur forestier comme historien	240
1. L'harmonisation des données anciennes : un travail titanesque mais sous-évalué.....	241
2. Créer des données de long terme : l'astuce du 'space for time'	245

III. TRAJECTOIRES TECHNIQUES, SOCIALES ET POLITIQUES DES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE FORESTIERE : LE <i>MONITORING</i> ET LA SURVEILLANCE DES FORETS FRANÇAISES	248
A. Précarité et maintenance des infrastructures de recherche : RENECOFOR, une « aventure humaine »	249
1. Le contexte des 25 ans de RENECOFOR : le futur du réseau est menacé	250
2. Le fonctionnement social de RENECOFOR.....	252
3. Maintenir l'engagement des agents de terrain.....	255
4. La conservation des données : Sauvegarder le « patrimoine scientifique ».....	256
B. Trajectoires, bifurcations et inerties des infrastructures de recherche forestière : RENECOFOR et l'IFN.....	257
1. Intégrer l'étude du changement climatique et de la biodiversité dans RENECOFOR	258
2. L'Inventaire Forestier National à l'épreuve des tempêtes	260
C. De l'inventaire au <i>monitoring</i> : les dimensions politiques de la surveillance des forêts ...	262
1. Inventaire et Monitoring : deux approches différentes.....	262
2. Les dimensions politiques de la surveillance des forêts	264
CONCLUSION	268

CHAPITRE 5 : MODELISER ET SIMULER LES FORETS : LES DIMENSIONS SOCIALES DES LANGAGES ET ARTEFACTS INFORMATIQUES 270

INTRODUCTION.....	270
I. CAPSIS ET <i>OnfR</i> : DES « LABORATOIRES VIRTUELS » ? L'ETUDE SOCIALE DE DEUX ARTEFACTS INFORMATIQUES	273
A. CAPSIS : une plateforme de modélisation pour mener des « expérimentations virtuelles »... ..	273
1. La construction de la plateforme CAPSIS.....	274
2. Réaliser des « expérimentations virtuelles » : le fonctionnement de CAPSIS	279
3. CAPSIS : le modèle social de la plateforme	285
B. Le package <i>OnfR</i> : infrastructure informatique du département RDI de l'ONF	290
1. Le langage informatique R et les packages	291
2. Le package <i>OnfR</i> : organiser et structurer le travail de la RDI	294
3. <i>OnfR</i> : structurer une communauté d'utilisateurs.....	296
C. CAPSIS et <i>OnfR</i> : des « laboratoires virtuels » ?.....	299
II. ETUDIER LA MODELISATION ET LA SIMULATION « EN SITUATIONS » : OUVRIR LES « BOITES GRISES » DES CHERCHEURS FORESTIERS	301
A. Choisir son langage : raisons pratiques et habitudes de programmation	301
B. Les métadonnées : rendre visible le « travail inachevé ».....	306
1. L'importance de la traçabilité : l'archivage des versions	306
2. Les 'commit' comme acte d'écriture : rendre visible l'inachevé du travail scientifique	308
C. 'Bug' ou 'variable' ? Le modélisateur face au résultat de son modèle.....	313

CONCLUSION	319
CHAPITRE 6 : TROIS VISIONS DES FUTURS CLIMATIQUES DES FORETS : LES 'ENGAGEMENTS EPISTEMIQUES' DES CHERCHEURS ET INGENIEURS FORESTIERS.....	322
INTRODUCTION.....	322
I. DEUX PROFILS IDEAUX-TYPIQUES : LE MODELISATEUR FORESTIER ET L'ECOLOGUE FORESTIER	327
A. Le 'modélisateur forestier' : faire confiance aux chiffres	328
1. La construction processuelle de l'identité des chercheurs.....	328
2. La légitimité du chiffre : le modèle comme outil central pour orienter la gestion forestière.....	330
B. 'L'écologue forestier' : comprendre le fonctionnement des écosystèmes	332
1. Mobiliser une multitude d'outils théoriques et expérimentaux pour étudier les lois écologiques	332
2. Modéliser n'est pas une fin en soi. Le modèle devrait orienter l'expérimentation pour faire progresser les connaissances	334
C. Tableau récapitulatif des deux 'profils' des chercheurs et ingénieurs forestiers.	337
II. TROIS VISIONS DES FUTURS DES FORETS : 'FRONTS DE SCIENCE', PROMESSES TECHNOSCIENTIFIQUES ET 'ETHOS DE L'ANTICIPATION'	339
A. Le 'futur-risqué' des forêts : surveiller, anticiper et piloter les Forêts-Infrastructures	342
1. Le changement climatique : risques et opportunités pour les forêts françaises	343
2. Piloter technologiquement et politiquement les 'Forêts-Infrastructures' : un ethos de la confiance	348
B. Le 'futur-disruptif' des changements globaux : les forêts sont des écosystèmes non-linéaires et stochastiques	351
1. Modéliser en conditions limites le fonctionnement des écosystèmes forestiers	351
2. La « société nous demande de jolies cartes » : une critique des modèles d'aires de répartition, et une éthique du renoncement	357
C. 'Le futur-passé' des forêts, systèmes historicisés aux dynamiques de long terme	359
1. Comprendre les dynamiques passées des socio-écosystèmes forestiers	359
2. Malgré les incertitudes, prendre la parole : une éthique de la responsabilité	364
D. Tableau récapitulatif des trois visions des futurs des forêts.....	366
CONCLUSION	367
CONCLUSION DE LA SECONDE PARTIE : L'« ECOLOGIE DES FUTURS » DES FORETS AU PRISME DES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE FORESTIERE	368
CONCLUSION GENERALE	370
I. UNE ETUDE HISTORIQUE ET SOCIOLOGIQUE DE L'ECOLOGIE DES FUTURS DES FORETS FRANÇAISES.....	370

II. UNE SOCIOLOGIE DES FUTURS DES FORETS AU PRISME DES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHES	377
III. ETUDIER LES CONTESTATIONS DES FUTURS CYBERNETIQUES DES FORETS- INFRASTRUCTURES	381
ANNEXES.....	383
ANNEXE 1 : TABLEAUX DES ENQUETES	383
ANNEXE 2 : MODELE CORRELATIF ET MODELE FONCTIONNEL : UNE OPPOSITION THEORIQUE, MAIS QU'EN EST-IL EN PRATIQUE ?	387
ANNEXE 3 : LEXIQUE DES TERMES TECHNIQUES.....	391
ANNEXE 4 : LISTE DES ENCADRES ET DES TABLEAUX	394
ANNEXE 5 : LISTE DES IMAGES	396
BIBLIOGRAPHIE	397
SOURCES PRIMAIRES.....	397
SOURCES SECONDAIRES.....	408
RESUME / ABSTRACT	424

Introduction générale

I. Préambule : les forêts sur le devant de la scène médiatique

A. Les ‘Forêts-Infrastructures’ au cœur de la lutte contre le changement climatique

Durant l’été 2019, les forêts ont régulièrement occupé l’espace médiatique français¹. Feux de forêts en Amazonie, en Afrique et en Sibérie ; rougissements des sapins vosgiens ou des pins de la forêt de Fontainebleau, conséquences des sécheresses printanières et estivales. Les « poumons verts de la Planète », selon l’expression consacrée, n’ont, semble-t-il, jamais été autant menacés. Parallèlement, la presse française a relayé en juillet 2019 un article paru dans *Science* où des chercheurs de l’Université ETH de Zurich (Bastin et al., 2019) estiment qu’il est actuellement possible de planter 900 millions hectares de forêts à travers le globe, et que ces derniers pourraient stocker 205 gigatonnes de carbone². Les propos du Premier Ministre éthiopien ont également fait la Une : il avait déclaré³ vouloir planter quatre milliards d’arbres d’ici octobre 2019⁴.

Forêts menacées par les changements globaux, l’expansion des terres agricoles ou les grands projets infrastructurels ; forêts porteuses d’espoir dans la lutte contre le changement climatique : ces deux visions mettent à l’agenda politique national et international une ‘Forêt-

¹ Une recherche effectuée sur la base de données *Factiva*, circonscrite à la presse francophone, avec les mots-clés suivants - (arbre or forêt or forêts or arbres) and ("changement climatique" or "réchauffement climatique" or "changements climatiques") – dénombre la parution de 1153 articles pour le mois d’août 2019. Comparé aux deux années précédentes, c’est la première fois que le nombre d’articles dépasse le millier d’occurrences. La moyenne des années 2017 et 2018 tourne autour de 500 à 600 articles. On voit également une augmentation du nombre d’articles parus avec environ 700 à 800 articles par mois, à partir de mars 2019 (recherche effectuée le 30/08/2019).

² Plusieurs articles ont remis en cause les chiffres avancés par Bastin et ses coauteurs. Certains scientifiques estiment que le chiffre avancé est cinq fois trop optimiste (Veldman et al., 2019).

³ Campistron (2019, août) [<https://www.france24.com/fr/20190805-ethiopie-planter-quatre-milliards-arbres-environnement-deforestation-abiy-ahmed>].

⁴ Le nombre d’arbres réellement plantés est difficile à estimer : <https://www.bbc.com/news/world-africa-50813726> (Mwai, 2019, décembre).

Infrastructure', placée sous surveillance, permettant de relever le défi climatique qui se dresse devant nos sociétés. Un an avant ces événements est lancée la plateforme *Global Forest Watch*⁵, portée notamment par Google, les universités de Cambridge et du Maryland ou le *World Resources Institut*. Elle rend possible la visualisation en temps réel de l'évolution des couverts forestiers à l'échelle planétaire. Sur leur site, on peut lire : « Soyez le premier à observer la nouvelle déforestation tropicale ». C'est bien ce qu'il s'est passé. Les cartes de couvert forestier de *Global Forest Watch*, réalisées grâce aux satellites de la NASA, ont occupé l'espace médiatique pendant tout le mois d'août 2019. Grâce à elles, les déforestations en Amazonie, en Sibérie et en Afrique deviennent visibles, et celles en Amazonie ont engendré une réponse politique internationale, lors du G7 qui s'est tenu à Biarritz du 24 au 26 août 2019, ainsi que des tensions diplomatiques entre le Brésil et la France. Les technologies de surveillance des écosystèmes forestiers ont joué un rôle prépondérant dans la construction en problème public, et international, de ces déforestations. Les chiffres avancés dans *Science* par l'équipe de chercheurs suisses se basent sur des données de couverts forestiers obtenues grâce à photo-interprétation qui sont ensuite intégrées dans un modèle informatique pour prévoir les évolutions possibles du couvert forestier mondial, ainsi que la quantité de gaz à effet de serre (GES) absorbée par ce dernier. La surveillance des écosystèmes forestiers et l'informatisation des données forestières sont au cœur de cette vision d'une 'Forêt-Infrastructure', menacée et source d'espoir face au changement climatique.

C'est aujourd'hui dans le contexte global du débat sur notre entrée dans l'Anthropocène que se déploient notamment les projets de 'Forêts-Infrastructures' conçues comme une arme efficace pour gagner la lutte contre le changement climatique. Le vocabulaire militaire n'est sans doute pas anodin et prolonge la filiation que les technologies de surveillance, employées dans les sciences de l'environnement, entretiennent avec les savoirs militaires (Doel, 2009 ; Grevsmühl, 2014). Popularisé en 2000 par le chimiste Paul Crutzen et le biologiste Eugene Stoermer (2000), l'Anthropocène renvoie à la nouvelle période géologique dans laquelle la planète serait entrée, période où les activités humaines deviennent le principal moteur de l'évolution géologique et climatique de la Planète⁶. La Terre se serait tellement 'humanisée'

⁵<https://www.globalforestwatch.org/>

⁶ Il existe des débats entre scientifiques pour savoir quand faire débiter cette nouvelle période. Tandis que certains auteurs, comme Paul Crutzen ou certains historiens de l'environnement, proposent la date de 1784 qui correspond à l'invention de la machine à vapeur par James Watt, la communauté des géologues est attachée aux indicateurs stratigraphiques qui datent l'entrée dans l'Anthropocène dans les années 1950. Ces débats témoignent également d'une réappropriation de ce concept par les sciences sociales (Nichols and Gogineni, 2018) où la pertinence du terme 'Anthropocène' est débattue. Par exemple, pour l'historien Christophe Bonneuil

que les ‘cycles naturels’ seraient à présent déterminés essentiellement par les activités humaines. Cette nouvelle période géologique engendre des interprétations contradictoires. Tandis que les alertes climatiques se multiplient et que les notions d’effondrement et de catastrophe climatique ont été popularisées par le courant de la ‘collapsologie’, d’autres acteurs proposent de prendre acte de cette nouvelle situation géologique où l’homme doit devenir le gardien de la Terre, la surveiller et la protéger. Les ‘Forêts-Infrastructures’ représentent cette conception de l’Anthropocène où la Planète est un « artifice total » façonné par les activités humaines (Maris, 2018, p.7).

Comment en est-on arrivé à penser les forêts comme des infrastructures de lutte contre le changement climatique ? Pourquoi les forêts sont-elles aujourd’hui définies et gérées en termes d’infrastructures de gestion anticipative du changement climatique ? Quels assemblages d’instruments, de données, de visions professionnelles, d’agendas de recherche et de techniques de gestion ont contribué à rendre les forêts pensables et gérables en de tels termes ? Ma thèse apporte des réponses à ces questions.

B. Les ‘Forêts-Sanctuaires’ : une critique de la sylviculture moderne

En France, cette présence médiatique des ‘Forêts-Infrastructures’ se déploie dans un contexte marqué, depuis quelques années, par l’émergence d’une autre vision : celle des « forêts sanctuaires »⁷ (Nouaillas, 2018, juin). On peut faire coïncider cette présence médiatique avec la parution, en 2017, du livre du forestier allemand Peter Wohlleben, *La vie secrète des arbres*. Ce livre a rencontré un succès de librairie en Allemagne, puis en France⁸.

(2014), il faudrait plutôt parler d’ « Occidentalocène » plutôt que d’Anthropocène, car ce dernier terme semble imputer une responsabilité à l’humanité entière, alors que les émissions de GES sont essentiellement imputables, au moins jusque dans les années 1970, aux pays occidentaux.

⁷ La parution, le 27 août 2019, du numéro spécial du quotidien *Libération* consacré aux forêts (« Le Libé des Forêts ») est un bon exemple de la conjonction de ces discours divers sur les forêts. Le journal consacre, certes, un article sur la déforestation en Amazonie, mais aussi sur la sylvothérapie, sur la gestion des forêts françaises par l’ONF, et même sur les concours de bûcheronnage sportif. Durant l’été, le magazine *Géo* sort un numéro spécial sur les forêts, et le forestier allemand Peter Wohlleben y explique longuement sa vision des forêts.

⁸ Un article de *L’Express* (Payot, 2018, juillet) écrit : « Peter Wohlleben ... pulvérise les statistiques avec *La Vie secrète des arbres* (515 000 exemplaires au compteur depuis mars 2017) » (https://www.lexpress.fr/culture/livre/les-grands-comptes-des-succes-de-librairie_2022887.html)

Il a été traduit dans une trentaine de langues⁹. Dans son livre, le forestier allemand raconte comment les arbres communiquent et s'entre-aident, dans une perspective teintée d'anthropomorphisme. Il raconte comment un arbre malade est aidé par ses voisins grâce aux échanges de nutriments dans le système racinaire, ou comment l'arbre « mère » prend soin de ses « enfants » (Wohlleben, 2017). En se basant sur des connaissances scientifiques, et notamment les travaux de l'écologue canadienne Suzanne Simard, l'auteur décrit une forêt unie et interconnectée, et prône une sylviculture proche de la nature, et une forêt « sanctuaire ». Le forestier critique la mécanisation de l'exploitation des forêts, et les plantations mono-spécifiques qui sont le résultat du développement de la science forestière. En réalité, ce sont les principes de la sylviculture moderne telle qu'elle se développe en Allemagne et en France aux XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles qui sont visés par les critiques de P. Wohlleben.

La publication de l'ouvrage s'est accompagnée de critiques, en France comme en Allemagne, venant d'acteurs institutionnels et d'ingénieurs forestiers, et plus particulièrement de l'Académie d'Agriculture française, qui considère que l'ouvrage du forestier relève plus du registre du conte que de celui de la production scientifique, et véhicule une vision déformée de la forêt. L'Académie d'Agriculture a publié une note critique, et relaie une pétition venant de scientifiques allemands qui demandent aux médias de traiter du livre de P. Wohlleben avec esprit critique. L'une des objections de l'Académie d'Agriculture porte précisément sur cette vision d'une « forêt sanctuaire ». Pour cette dernière, ce qui est en jeu, c'est « l'acceptabilité sociale » des travaux forestiers effectués par l'Office National des Forêts (ONF) qui est régulièrement critiqué sur ce point par des associations de protection de la nature depuis les années 1970¹⁰. Bernard Roman-Amat, membre de l'Académie d'Agriculture, et un des auteurs de la note critique, a tenu ces propos dans un entretien au journal *La Vie* : « Depuis le début des années 1980, on assiste à une montée en puissance des associations de protection de la nature, notamment en milieu urbain, qui ne veulent plus de coupes rases ou de coupes à blanc dans les forêts où ils vont se promener. Pourquoi pas, si nous arrivons à définir une vision équilibrée des usages forestiers. Mais, là-dessus, Peter Wohlleben arrive avec sa vision simpliste et militante : pour lui, une bonne forêt est une forêt sans hommes et sans coupes, une

⁹ Un article du 29 mai 2017 paru dans *Le Monde* titre « *La vie secrète des arbres, best-seller et leçon de bonheur* » (Le Hir, 2017, mai). On pourrait multiplier les références, elles sont nombreuses. Le livre a aussi fait l'objet d'un film *L'intelligence des arbres* (2016), diffusé dans une centaine de salles en France.

¹⁰ Voir les propos tenus par Christian Delaballe (2016), ancien directeur de l'ONF dans ses mémoires, *l'Office National des forêts ou le sentiment d'entreprendre*, et notamment le chapitre « Le vain procès des coupes rases »

forêt sanctuaire. Comment voulez-vous que les forestiers s'y retrouvent ? » (Nouillas, 2018, juin).

L'Académie d'Agriculture semble craindre que la vision de la forêt proposée par Wohlleben ne vienne appuyer une critique de la politique de gestion des forêts, notamment celle de l'ONF, dans un contexte où l'Office est de plus en plus attaqué pour sa gestion essentiellement économique des forêts. Le financement de l'Office est assuré en grande partie par la vente du bois, ce qui oblige les agents à intensifier leurs coupes (D'Allens, 2019). Dans son film documentaire, sorti en 2018, *Le Temps des Forêts*, François-Xavier Drouet donne la parole à des agents de l'ONF et à des associations de citoyens qui dénoncent la gestion purement économique de l'ONF. Les « marches pour la forêt » de fin 2018 militaient contre cette politique forestière. Le *Manifeste de Tronçais*, qui prend le nom de la forêt où ces marches ont débuté, insiste sur la gestion multifonctionnelle des forêts, une gestion salvatrice pour affronter les défis posés par le changement climatique : « C'est le rempart de nos enfants face à une crise écologique et climatique qui s'emballe. C'est l'eau potable, la biodiversité et la résilience, l'épuration de l'air, le stockage d'une partie du carbone en excès dans l'atmosphère et la possibilité d'en stocker dans le bois matériau. C'est aussi notre lieu de connexion avec la Nature. Renoncer à tous ces bienfaits serait une pure folie » (Manifeste de Tronçais, 2018).

Si le livre de Wohlleben a été critiqué par le milieu forestier scientifique français et allemand, c'est parce qu'il propose une image de la forêt diamétralement opposée à celle héritière de la science forestière du XIX^{ème} siècle : une forêt productive et mono-spécifique. Contre ce rapport instrumental entretenu avec les forêts, l'anthropologue américain Eduardo Kohn (2017) propose d'envisager les arbres comme des êtres qui pensent et communiquent, jetant les bases d'une anthropologie qui ne sépare plus humains et non-humains. Ce sont également les forêts productives et le rapport économique et calculatoire qui les sous-tend que le philosophe canadien Jean-Baptiste Vidalou (2017) condamne dans son essai *Être forêts – Habiter des territoires en lutte*. Il dénonce les technologies de surveillance des forêts et leur « vision stratosphérique » (Vidalou, 2017, p.10) où l'arbre est réduit à un pixel, créant un rapport instrumental et « déterrestre » (Bonneuil et Fressoz, 2016, p.81) à ces espaces que le philosophe nous invite à habiter, à protéger et à vivre : « être forêts ».

C. De l'arbre au chiffre, puis au pixel : surveiller les forêts et anticiper leurs futurs

Côté cour, se développent les technologies de surveillance des écosystèmes forestiers qui permettent de suivre leurs évolutions, et d'anticiper leurs futurs possibles. Le projet *Global Forest Watch* est emblématique d'un regard « d'en haut » (Grevsmühl, 2014) façonné par des technologies liées aux savoirs militaires : photographie aérostatique, photographie aérienne par avion, imageries satellitaires (*Ibid.*). Ces savoirs et technologies ont contribué à forger la notion d'« environnement global » (*Ibid.*) qui renvoie à une façon de gouverner la Nature¹¹, et qui culmine avec l'irruption de la modélisation globale du changement climatique. Dans son ouvrage consacré à cette notion d'« environnement global », l'historien des sciences et des techniques Sebastian Vincent Grevsmühl rapporte les propos du photographe et aéronaute Nadar (1820-1910), l'un des premiers à développer la photographie aérostatique contribuant ainsi à forger ce « regard vertical » sur le monde (*Ibid.*, p.113) : « C'est bien en effet le planisphère, car il n'y a nulle perception des différences d'altitudes. Tout est 'au point' ». Il cite ensuite les propos de l'aéronaute anglais James Glaisher : « Le paysage disparaît, en ce sens que l'on n'en voit plus que la projection sur un plan [...] Jamais je n'avais vu les paysages terrestres plus semblables à un plan d'ingénieur. » (*Ibid.*). L'évolution des techniques de suivi des forêts – le passage de la photographie aérienne aux images satellitaires ou aux cartographies forestières réalisées grâce à des drones et la technologie du *LIDAR**¹² – m'amène à actualiser les propos de Nadar : aujourd'hui, dans la surveillance des écosystèmes forestiers, 'tout est au pixel'. La surveillance actuelle des forêts est héritière de ce regard d'ingénieur qui transforme l'arbre en chiffre, puis en pixel ; la forêt, ainsi quantifiée, devient gouvernable. Au cours des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, les sciences des forêts ont construit leur scientificité en développant des approches quantitatives (statistiques, biométrie*, modélisation) couplées à l'observation et l'expérimentation forestières (*arboretums**, stations de recherche et réseaux d'observation et de suivi continu – *monitoring*). D'abord inventoriées pour calculer le stock de bois disponible et permettre un meilleur calcul de l'impôt, les forêts sont aujourd'hui placées sous surveillance pour qu'on puisse connaître leur état, leurs évolutions, et anticiper les menaces qui peuvent peser sur elles dans le futur.

¹¹ Les sciences sociales de l'environnement ont déconstruit le terme « Nature », montrant notamment qu'il s'agissait d'un « concept vide » (Descola, 2005). Dans ma thèse, je me permets, néanmoins, d'utiliser ce terme comme synonyme d'« environnement », conscient de tous les présupposés que le terme « Nature » contient.

¹² *Light detection and ranging* ou *Laser detection and ranging*. C'est une technique de mesure qui permet de déterminer la distance d'un objet grâce à un faisceau laser.

Côté jardin, ce sont des ‘Forêts-Sanctuaires’ brandies comme étendard pour critiquer une gestion économique héritière de la sylviculture des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles. Il est intéressant de constater que c’est au moment où les ‘Forêts-Infrastructures’ sont mises en avant comme un moyen de lutter contre le changement climatique, que sont critiquées les pratiques qui visent à les quantifier et les gérer rationnellement. Les forêts ne sont plus seulement quantifiées mais également modélisées. Sur son écran d’ordinateur, l’ingénieur forestier peut faire pousser des ‘forêts virtuelles’, y intégrer les scénarios climatiques du Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat (GIEC), et ainsi anticiper leurs évolutions futures. Les futurs des forêts sont ainsi rendus visualisables, manipulables et gouvernables grâce aux infrastructures de surveillance et d’anticipation au cœur desquels la modélisation et la simulation jouent un rôle primordial. Quantification et modélisation des forêts, production de données forestières et technologies de surveillance des écosystèmes forestiers contribuent au gouvernement des futurs des forêts qui est la thématique centrale de cette thèse.

Dans cette thèse, je propose d’expliquer comment sont anticipés les avènements des forêts et d’explorer les infrastructures sociotechniques de surveillance et d’anticipation qui visent à rendre visualisables et gouvernables les futurs des forêts. J’attire ici l’attention du lecteur sur deux termes centraux dans ce manuscrit. Quand j’utilise le terme « futurs », au pluriel, il renvoie à l’expression ‘visions du futur’, c’est-à-dire les conceptions que les acteurs se font du futur possible des forêts. Cette idée de « futurs » au pluriel s’inscrit dans le courant des *Future Studies* que je décris plus loin dans l’introduction générale de ce manuscrit. Le terme « infrastructure » est, quant à lui, utilisé dans deux sens différents, discriminés par l’utilisation de la majuscule et de la minuscule :

1/ Par ‘Forêt-Infrastructure’, je renvoie aux forêts qui sont étudiées par les scientifiques, et gérées et gouvernées dans des buts précis : production de bois, fixation des sols et terrains glissants, stockage du CO₂, ou réserve de biodiversité. Ces forêts font partie d’infrastructures sociotechniques plus larges qui rassemblent les institutions, les communautés, les savoirs et les techniques qui confèrent aux forêts des fonctions précises dans une optique d’exploitation, d’anticipation et de gestion.

2/ Par ‘infrastructures de recherche forestière’, je décris les assemblages d’éléments sociotechniques, scientifiques, politiques, organisationnels et juridiques qui émergent au

XIX^{ème} siècle et qui sous-tendent des pratiques de connaissance et de gestion des forêts. Les infrastructures de recherche forestière rendent possible les travaux des ingénieurs et chercheurs qui visent à connaître les forêts et à anticiper leurs futurs.

II. Etudier le gouvernement des futurs des forêts

Pour comprendre comment les futurs des forêts sont produits par les sciences des forêts, et orientent les gestions et les politiques forestières, mon travail de recherche s'inscrit dans les disciplines suivantes : l'histoire des sciences, la sociologie des sciences et les *Science and Technology Studies* – STS – [A]. Il s'appuie également sur une série de travaux qui ont pris le nom de *Future Studies* [B] et qui étudient les manières dont les futurs sont rendus présents, pensables et imaginables, et les façons dont ils informent ainsi nos actions présentes. Enfin, en m'appuyant sur une partie des travaux du philosophe Michel Foucault, et du sociologue Alain Desrosières [C], je soutiens l'idée que l'étude des futurs des forêts est une étude du gouvernement de ces dernières qui s'appuie notamment sur des dispositifs de surveillance et de quantification, au sein desquels les pratiques de modélisation et de simulation occupent une place centrale.

A. Forêts et Sciences humaines et sociales

Ces paragraphes dressent un panorama des recherches en sciences humaines et sociales (SHS) qui ont pris comme objet la forêt. Bien que cet état de l'art ne vise pas l'exhaustivité dans le nombre de travaux mentionnés, il présente tout de même un aperçu complet des thématiques, des questionnements et des disciplines envisagés. Par ailleurs, je ne m'intéresse pas ici aux travaux dits opérationnels qui visent à produire une connaissance pour orienter la gouvernance des forêts, car ma thèse ne s'inscrit pas dans cette visée. On peut tout de même citer, par exemple, l'économie forestière, la modélisation des interactions entre la disponibilité de la ressource et les pratiques de sylviculture, les enquêtes qui étudient les valeurs que les « consommateurs » et les gestionnaires attribuent aux forêts, ou la scénarisation participative des services écosystémiques des massifs forestiers.

1. *L'histoire des forêts : corps forestier, économie, conflits et déforestations*

En France, il semble que ce soit l'histoire qui ait dominé le paysage des SHS qui étudient les forêts, autour du Groupe d'Histoire des Forêts Françaises (GHFF), créé en 1982, et qui compte parmi ses membres, notamment, l'historienne Andrée Corvol, l'historien Denis

Woronoff et le géographe Paul Arnould (Kalaora et Vlassopoulos, 2013, p. 61). Un autre groupe de chercheurs – sociologues, agronomes et économistes – s’est constitué à l’Institut National pour la Recherche Agronomique (INRA) en 1975 au sein de l’équipe STEPE (Société, Territoire, Environnement, Politique, Economie). On compte parmi eux les sociologues Bernard Kalaora et Raphaël Larrère, les historiens Oliver Nougarède et Denis Poupardin, ou encore l’ingénieur agronome et forestier Noël Decourt (*Ibid.*, p.62), auteur d’ouvrages de références sur les forêts (Decourt, 1999 ; Decourt, 2001) et rédacteurs de plusieurs tables de production*¹³ pour différentes essences forestières françaises. Plusieurs thématiques sont étudiées.

[1] La forêt, comme milieu social, est envisagée dans l’évolution que les sociétés entretiennent avec elle (Corvol, 1987 ; Chalvet, 2011), ou via la naissance du tourisme en forêt (Kalaora, 1979).

[2] La forêt, comme ressource, est analysée dans les relations qu’elle entretient avec le secteur proto-industriel (Woronoff, 1990) ou avec les systèmes agraires (Larrère et Poupardin, 1990).

[3] La forêt est également approchée par ceux qui la connaissent et l’administrent : le corps forestier. Ce dernier est étudié dans une perspective sociologique et historique comme un ‘corps social’ qui se structure autour de doctrines et de rites (Kalaora et Poupardin, 1984 ; Kalaora et Savoye, 1986 ; Kalaora et Poupardin, 1988), comme un ‘métier’ (Boutefeu et Arnould, 2006) ou dans les relations qu’il entretient avec l’affirmation d’un « Etat forestier » français (Buttoud, 1983).

[4] Les ‘politiques forestières’ ont fait l’objet de travaux en sciences politiques, afin de saisir leurs évolutions historiques (Buttoud, 1998) ou leurs mutations actuelles (Sergent, 2013).

[5] L’histoire des pratiques et des politiques d’aménagement forestiers a également été examinée (Boutefeu, 2005), et plus particulièrement les Restaurations des Territoires de Montagnes (RTM) de la fin du XIX^{ème} siècle (Kalaora et Savoye, 1985). Ces travaux

¹³ Les tables de production sont les premiers outils quantitatifs, développés par la science forestière, pour prévoir le stock de bois, et optimiser la coupe. Elles sont décrites plus en détail dans le chapitre 1.

francophones (Larrère et al., 1981) ou anglophones (Whited, 2000) étudient alors les relations conflictuelles entre les politiques de reboisement menées par les forestiers, et les sociétés rurales. L'affirmation du pouvoir de l'Etat français sur les forêts entraîne des conflits, comme la célèbre « Guerre des Demoiselles » – de 1829 à 1831 (Sahlins, 1994). Ces luttes ne sont pas propres au territoire français, et elles ont également été documentées en Angleterre (Thompson, 2014) ou en Allemagne (Hölzl, 2018).

La littérature internationale propose deux autres options thématiques. Certains travaux donnent à lire une histoire globale des déforestations aux XIX^{ème} et XX^{ème} siècles (Tucker et Richards, 1983 ; Tucker et Richards, 1988). D'autres études retracent l'histoire des dégradations de la forêt amazonienne (Dean, 1995 ; Hecht et Cockburn, 2010), ou des forêts de la côte Pacifique d'Amérique du Nord (Rajala, 1998). L'autre option concerne l'émergence des discours sur l'exploitation soutenable des forêts aux XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, aux Etats-Unis (Demeritt, 2001), au Canada (Herrington, 2014 ; Flamand-Hubert et Lewis, 2019) ou en Allemagne (Hölzl, 2010). Ces auteurs montrent, entre autres, comment les premières cartographies nationales de la ressource forestière ont contribué à faire émerger l'idée d'une exploitation soutenable des forêts, car elles mettent fin au mythe d'une disponibilité illimitée de cette ressource, notamment aux Etats-Unis (Demeritt, 2001).

Les relations entre sciences des forêts et gouvernement de ces dernières ont été explorées par certains historiens qui lient, alors, expansion du colonialisme et mise en ordre de la nature, et plus particulièrement des forêts (Anker, 2001 ; Barton, 2002). En France, l'ouvrage paru en 2016, *La Forêt Salavatrice* (Decocq et al., 2016) analyse les relations entre les discours scientifiques et ceux politiques portés par le corps forestier à l'occasion des RTM. Cette perspective est influencée, notamment, par les travaux du philosophe Michel Foucault qui montre comment le gouvernement des êtres et des choses s'appuie sur un ensemble de technologies de surveillance et de cartographie, et de savoirs qui façonnent l'objet en question pour le rendre gouvernable. Cette perspective théorique avait déjà été proposée par l'anthropologue James C. Scott, dans son chapitre portant sur « l'Etat et la science forestière » (Scott, 1998, p.11-52) ou le géographe David Demeritt (2001) dans son analyse des premières cartes qui représentent le déclin des surfaces boisées aux Etats-Unis, lors de l'ère progressive (1890-1920).

C'est dans cette dernière orientation théorique – les relations entre connaissance et gouvernement des forêts – que je m'inscris, en m'intéressant plus particulièrement aux sciences des forêts, aux techniques forestières, et aux collectifs qui les portent et les développent. Peu d'études ont porté sur l'histoire des sciences des forêts, mis à part l'article canonique¹⁴ d'Henry Lowood (1990) sur l'émergence de la science forestière en Allemagne. On peut citer également le travail de l'historien Michel Dupuy (2004), bien que ce soit plutôt une histoire de l'écologie « au miroir de la forêt », pour reprendre le titre de son ouvrage. Ainsi, dans cette thèse, je propose une histoire des sciences des forêts et des institutions de recherche, de formation et de gestion où ces savoirs se sont développés. En France, il semblerait que ce soit surtout la naissance et le développement de l'écologie qui aient intéressé les historiens (Acot, 1989 ; Déléage, 1991), tandis que l'histoire des sciences des forêts, en général, et de la science forestière, en particulier, ne figure que de manière parcellaire dans les livres et traités de sylviculture. C'est une histoire qui glorifie les grands artisans du développement de la science forestière et de la sylviculture en France (par exemple : Perrin, 1952, IX-XII). C'est une histoire écrite par le corps forestier, une histoire ritualisée, et qui contribue à assurer la cohésion sociale de ce corps à travers le temps. Pour ma part, je donne à lire une histoire des sciences des forêts qui est aussi une histoire des manières de gouverner des forêts.

2. Sociologie de l'environnement, STS, et études sociales des forêts tropicales

D'une manière schématique, on peut distinguer deux options thématiques que la sociologie a prises concernant l'étude des forêts. D'un côté, la sociologie économique étudie la forêt comme ressource économique, et vise à rendre compte des structurations du marché du bois (Shepens, 2008 ; Marty, 2015). D'autre part, il peut s'agir d'analyser la forêt comme un milieu social et environnemental, c'est l'orientation théorique choisie par la sociologie de l'environnement. Or, certains auteurs (Kalaora et Charles, 2014, p.287-293) constatent que, contrairement à d'autres pays, la sociologie de l'environnement a eu des difficultés à émerger en France. Néanmoins, pour ces mêmes auteurs, la sociologie rurale, comme par exemple l'étude de la chasse (Chamboredon, 1982 ; Fabiani, 1982), peut constituer une prémisse à

¹⁴ Canonique, car beaucoup d'études qui traitent de l'émergence de la science forestière allemande font référence à cet article, et le citent abondamment (voir, entre autres : Scott, 1998 ; Barton 2002).

l'émergence de la sociologie de l'environnement. Dans leur ouvrage consacré à la sociologie environnementale en France et en Allemagne, B. Kalaora et L. Charles (2014) identifient cinq courants sociologiques qui ont fait de l'environnement leur objet d'étude : la sociologie rurale, la sociologie s'inscrivant dans l'approche de la société du risque, la science politique, la sociologie des sciences et de l'innovation, et la sociologie politique qui s'intéresse aux processus de concertation environnementale. Deux courants ont particulièrement contribué à cadrer mon enquête sur les futurs des forêts : le courant de la sociologie du risque [1] qui a porté un regard sur la construction des représentations d'un futur catastrophiste des forêts menacées par les « pluies acides » : la 'mort des forêts' – le *Waldsterben*, en allemand, et le courant de la sociologie des sciences [2], ou *STS*, qui a notamment porté son regard sur les forêts tropicales et leur gouvernance mondiale.

[1] Les travaux du sociologue allemand Ulrich Beck (1986) ont engendré des études qui portent sur ces « nouveaux » risques que le théoricien allemand décrit comme étant collectifs, globalisés, et invisibles ou difficiles à diagnostiquer sans le truchement d'une expertise scientifique et technique. Parmi eux, la pollution atmosphérique transfrontalière, nommée parfois à tort « pluies acides », a été un terrain d'étude privilégié pour aborder ces risques d'une nouvelle nature, ceux produits par la science, la technologie et l'industrie. Dans les années 1980, les pluies acides sont tenues pour responsables de dépérissements forestiers que l'on constate dans une grande partie de l'Europe. En France, c'est le sociologue des sciences Philippe Roqueplo qui a analysé la construction de ce « problème d'environnement » (1988 ; 1990). Au niveau international, l'ouvrage du politologue néerlandais Marteen Hajer (1995) constitue une référence sur cette controverse socio-environnementale. Ces deux auteurs s'inscrivent dans la théorie du risque d'Ulrich Beck. Ces travaux constituent une source d'inspiration importante pour cette thèse dans la mesure où ils portent un regard sur les sciences des forêts et leurs expertises, et la manière dont elles problématisent les forêts en termes d'enjeu environnemental dont l'avenir doit être anticipé et pris en charge par de nouvelles infrastructures sociotechniques.

[2] Les *Science and Technology Studies* (STS), qui se développent dans les années 1970, visent à replacer la science dans les univers sociaux dans lesquels elle se déploie. Les *STS* défendent l'idée selon laquelle la production du savoir scientifique se développe dans des dynamiques collectives qui s'inscrivent dans des logiques sociales, politiques et économiques (Pestre, 2006). Depuis quelques années, elles ont produit une littérature abondante sur les

savoirs et les techniques qui visent à connaître et gouverner la nature ou l'environnement, notamment en lien avec le changement climatique, la biodiversité et son érosion, les océans, etc. Peu d'études ont porté sur les forêts. Celles qui existent traitent presque exclusivement des forêts tropicales, et notamment les forêts amazoniennes, dévoilant les difficultés à les gouverner et les conserver dans un contexte international marqué par le changement climatique, en se focalisant sur des dispositifs technico-politiques comme les dispositifs de compensation carbone *Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation – REDD* puis *REDD+* – (Gupta et al., 2012 ; Flechter et al., 2016 ; Foyer et al., 2017 ; Turhnout et al., 2017 ; Asiyambi and Lund, 2020). La quantification du stockage du carbone par les forêts a également fait l'objet d'études, toujours centrées sur les forêts tropicales – Amérique du Sud, Afrique ou Asie (Viard-Créat, 2014). Certains travaux en *STS* ont traité des sciences des forêts et de la sylviculture, en s'intéressant aux rapports qu'elles entretiennent avec les « connaissances situées » (Harraway, 1988) partagées par les forestiers de terrain (Fortmann et Ballard, 2011) ou les communautés locales (Saarikoski et Raito, 2013). Il convient également de citer les travaux de l'anthropologue américain Andrew Mathews (2011) qui s'est intéressé aux relations entre expertises et politiques forestières et communautés indigènes au Mexique. Il adopte la perspective défendue par les *STS* pour montrer comment s'opère la gouvernance des forêts mexicaines dans le contexte du changement climatique. Il serait faux de dire qu'aucun travail en *STS* ne s'est intéressé aux forêts européennes, on peut par exemple mentionner l'article de l'anthropologue Eunice Blavascunas sur la construction scientifique et politique de la forêt primaire polonaise de Bialowieza (Blavascunas, 2013).

Il semble qu'il y ait ainsi comme une force d'attraction des forêts tropicales sur la production en *STS* et en SHS, comme en témoigne l'entrée « forêt » du *Guide des humanités environnementales* (Sellato, 2016) qui porte sur la forêt tropicale de Bornéo. Les forêts européennes, et plus particulièrement les forêts françaises, constituent, aujourd'hui, des objets peu étudiés par les *STS*.

Cette thèse propose une histoire et une sociologie des sciences des forêts qui se focalise sur les objets techniques, les savoirs scientifiques, les institutions et les collectifs qui visent à connaître et gérer les forêts françaises ; elle explore ainsi les liens entre gouvernement et science des forêts. A rebours des études existantes sur les forêts françaises qui se sont beaucoup préoccupées de leur histoire et de leur passé, cette thèse propose une étude

sociologique et historique de la manière dont les futurs des forêts françaises sont rendus pensables, connaissables et gérables. De ce fait, je mobilise un deuxième grand corpus théorique, celui des *Future Studies*.

B. Etudier les « futurs en mouvement » : les *Future Studies*

On l'a vu précédemment, l'irruption du changement climatique a entraîné le développement de nouvelles visions, en partie divergentes, sur les futurs des forêts, considérées à la fois comme une arme efficace pour lutter contre ce dernier, et comme un écosystème en danger. Ces nouvelles visions s'expliquent notamment par une forte augmentation des publications scientifiques qui portent sur la prévision ou l'anticipation des futurs des écosystèmes depuis les années 1990, et par des mécanismes institutionnels de mise à l'agenda scientifique et politique du changement climatique (Coreau et al., 2009). Pourtant, cette préoccupation pour l'avenir des forêts n'est pas nouvelle, et ne coïncide pas avec l'irruption du changement climatique. La science forestière des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles s'est construite pour prédire la ressource en bois disponible. Par ailleurs, l'aménagement forestier se définit comme reposant sur un ensemble de « document[s] qui fixe[nt] les objectifs à atteindre et planifie[nt], dans le temps et dans l'espace, pour une durée de dix à vingt-cinq ans, les interventions (coupes et travaux) à effectuer » (Décourt, 1999, p.118). L'aménagement forestier est, par définition, orienté vers l'avenir, car les arbres poussent lentement ; il faut compter entre 60 et 100 ans pour qu'un arbre moyen atteigne sa taille adulte. Les sciences des forêts sont, dès leur émergence, des sciences de la prédiction (statistique), de la prévision et de l'anticipation, elles sont tournées vers l'avenir.

Le domaine des *Future Studies* regroupe des travaux qui prennent le futur comme objet de réflexion et d'enquête, et qui s'intéressent aux manières dont il est appréhendé par différents collectifs, et aux façons dont les idées que nous en développons informent les organisations et pratiques du présent (Nelson, Geltzer et Hilgartner 2008 ; Adams et al., 2009 ; Anderson, 2010 ; Coleman and Tutton, 2017). Le courant des *Future Studies* émerge dans les années 1960, au moment où se développent les technologies gouvernementales de modélisation et de simulation dans le contexte de la Guerre Froide (Granjou, Walker et Salazar, 2017). On assiste ainsi dans les années 1960 à un processus spécifique de scientification des pratiques d'anticipation (Mathews et Barnes, 2016 ; Aykut, Demortain et Benbouzid, 2019) :

développement de la cybernétique, de la modélisation et la simulation informatique ou de la planification économique, pour ne citer que ces exemples.

Les *Futures Studies* se caractérisent notamment par la montée des anticipations « environnementalistes », marquées par la publication, en 1972, du rapport Meadows qui, pour la première fois, a utilisé un modèle informatique développé à l'échelle de la planète, le modèle *World3*, pour simuler les interactions entre différentes variables : démographie, croissance industrielle, pollution, production alimentaire ou ressources naturelles. Les années 1970 ont constitué un tournant dans la prolifération des « modèles du futur » (Dahan-Dalmedico, 2007), et de nombreuses études ont ensuite vu le jour prenant comme objet d'analyse les modèles économiques (Mackenzie, Muniesa et Siu, 2007) ou les modèles climatiques (Dahan-Dalmedico, 2007 ; Edwards, 2010; Hastrup et Skrydstrup, 2013). Parallèlement, les sciences environnementales – et les sciences des forêts en particulier – sont aussi l'objet d'un certain nombre de transformations techniques : développement de l'ordinateur, des bases de données ou de capteurs sur les placettes d'observations¹⁵. La scientification et l'informatisation des anticipations environnementales sont liées aux développements de ces nouvelles technologies dans les sciences de l'environnement, dont les origines sont à situer dans le développement des savoirs militaires et stratégiques, notamment dans le contexte de la prospective énergétique pétrolière, et celui de la Guerre Froide (Doel, 2009 ; Grevsmühl, 2014).

Aujourd'hui, un certain nombre de travaux en sciences sociales se situent au croisement des *Future Studies* et des *STS*, et prennent comme objet les technologies d'anticipation des futurs de la Nature et la manière dont ces technologies rendent la Nature gouvernable, par exemple dans le cas des récifs de corail (Bravermann, 2016), des feux de forêts (Neale, 2016), ou des risques d'inondation (Demeritt et al., 2013). Ces travaux prennent comme objet d'analyse les objets techniques que sont les modèles et simulateurs informatiques, et caractérisent leur développement et leurs effets.

Pour Jessica Barnes et Andrew Mathews (2016), aborder les futurs environnementaux exige d'accorder une place centrale à la circulation de ces futurs : il s'agit d'étudier les

¹⁵ Les placettes d'observation sont des endroits où scientifiques et gestionnaires récoltent des données (diamètre des arbres, composition des sols, des pluies, ...) dans le cadre de projet de recherche ou de réseaux d'observations comme le réseau RENECOFOR.

« futurs en mouvement » - « *futures in motion* » (Mathews et Barnes, 2016, p.15). Ces mouvements se déploient dans deux directions : [1] un mouvement vertical et historique, et [2] un mouvement horizontal et 'social'.

[1] Etudier les mouvements verticaux de ces futurs, c'est s'intéresser aux contextes historiques, sociaux et scientifiques de production de ces derniers. La production et la circulation des futurs des forêts s'opèrent dans des contextes historiques différents qui cadrent les manières dont ils sont rendus pensables, connaissables et gouvernables. J'ai déjà mentionné le processus de scientification et d'informatisation de la prévision à partir des années 1960. D'autres travaux, notamment ceux qui se penchent sur les pratiques d'anticipation dans le contexte de la sécurité intérieure et de la prévention des risques terroristes (Aradau et van Münster, 2011 ; Amoore, 2013), font l'hypothèse du développement d'un 'Régime d'Anticipation' qui constituerait une nouvelle manière, pour les acteurs et les institutions impliquées dans les plans de prévention anti-terroriste, d'affronter un futur ouvert et inconnu (Aradau and van Münster, 2011, p.6). L'historienne Louise Amoore définit la logique de l'anticipation comme associée « non pas uniquement [au] moyen d'empêcher l'occurrence d'un événement en se basant sur les données passées projetées dans des futurs probables, mais [à la manière] d'anticiper l'émergence d'un événement en l'inscrivant dans un éventail de futurs possibles »¹⁶ (Amoore, 2013, p.9). L'anticipation vise ainsi à produire des futurs probables qu'il s'agit de visualiser et de comprendre, pour agir dès maintenant en faveur de leur réalisation (futur souhaitable) ou de leur non-réalisation (futur non-souhaitable). Ainsi, l'anticipation se distingue de la prédiction en tant que cette dernière propose l'image d'un futur linéaire, basé sur la poursuite des tendances du passé. Dans la suite de ce manuscrit, je montre notamment qu'à la prédiction linéaire de l'état de la ressource forestière, caractéristique de la science forestière du XIX^{ème} et du début du XX^{ème} siècle, se succède l'anticipation plurielle des évolutions possibles des écosystèmes forestiers, avec le développement de la modélisation. L'anticipation met donc à disposition des acteurs un éventail ouvert de futurs possibles qui orientent leurs actions présentes. S'il y a bien un mouvement vertical et historique d'émergence d'un futur ouvert et incertain, il n'est pourtant pas certain que la notion de 'Régime d'Anticipation' permette de saisir la pluralité des pratiques des chercheurs et ingénieurs forestiers qui visent à anticiper les futurs des forêts.

¹⁶ "It acts not strictly to *prevent* the playing out of a particular course of events on the basis of past data tracked forward into probable futures but to *preempt* an unfolding and emergent event in relation to an array of possible projected futures." (Amoore, 2013, p.9)

C'est pourquoi, il est également important d'étudier les mouvements horizontaux des futurs des forêts, c'est-à-dire comment ils circulent entre divers collectifs qui les produisent et les véhiculent.

[2] Analyser les mouvements horizontaux des futurs des forêts, c'est regarder comment ces derniers circulent entre diverses communautés scientifiques, gestionnaires ou politiques. Comment les futurs produits par les ingénieurs forestiers sont-ils appréhendés par les gestionnaires ? Comment ces futurs orientent-ils les actions des ingénieurs et des gestionnaires ? Dans quelle mesure ces futurs peuvent-ils être ignorés par ces acteurs ? La thèse rend compte de la diversité des collectifs et des pratiques qui, aujourd'hui, permettent aux chercheurs et gestionnaires d'anticiper les futurs des forêts en contexte de changement climatique : cette pluralité remet en cause l'idée d'un 'Régime d'Anticipation' unique¹⁷.

C. Gouverner les futurs des forêts : surveiller, anticiper et quantifier

Cette thèse porte sur les manières dont les futurs des forêts sont rendus pensables, connaissables et gérables. Pour explorer cette question, je m'appuie sur le concept d'infrastructures de recherche forestière pour décrire les assemblages de technologies, d'institutions, de collectifs, de pratiques et de discours qui contribuent à connaître et gérer les forêts, mais aussi à rendre pensables et gouvernables leurs futurs par des processus de quantification, de modélisation et de simulation. Avant de présenter en détail la manière dont je mobilise la notion d'infrastructure, je m'appuie sur les travaux de Michel Foucault [1] pour montrer que la notion de gouvernement est utile pour appréhender la connaissance des futurs des forêts. Les *Surveillance Studies* [2] ont montré, quant à elles, que la surveillance est un processus décentralisé, appuyant ainsi ma proposition de mobiliser le concept d'infrastructure. Enfin, les travaux du sociologue Alain Desrosières sur la notion de quantification [3] sont utiles pour analyser comment les artefacts quantificateurs structurent les collectifs qui connaissent et gèrent les forêts. Je détaille, enfin, ma proposition de déconstruire ces artefacts – tableaux statistiques, modèles et simulateurs – pour comprendre les dimensions scientifiques, politiques et sociales qui orientent la production des futurs des forêts.

¹⁷ C'est d'ailleurs l'hypothèse que nous avons défendue dans notre article collectif avec Céline Granjou et Séverine Louvel. Bien que cet article s'appuie sur ce travail de thèse, il développe certaines idées qui ne sont pas reprises intégralement dans le manuscrit présent (Dolez, Granjou et Louvel, 2019).

1. Gouverner, c'est surveiller, et anticiper un futur ouvert

Le philosophe Michel Foucault a mis en lumière la manière dont le gouvernement des êtres et des choses 'fabrique' son objet via une série de technologies de quantification, de surveillance et de cartographie. Ces travaux forment le substrat théorique de nombreuses études qui se sont intéressées, par exemple, à la 'modernisation' de l'Égypte par des technologies politiques comme le cadastre, la cartographie ou l'introduction de l'économie (Mitchell, 2002) ; à la gouvernance de la biodiversité globale via la Plateforme Intergouvernementale sur la Biodiversité et les Services Écosystémiques (IPBES) (Turnhout, Neves et De Lijster, 2014) ; ou aux effets politiques des premières cartes qui représentent les forêts états-uniennes et les limites de leur exploitation (Demeritt, 2001).

Dans son cours au Collège de France de 1977-1978 (2004), Foucault aborde le développement des technologies de sécurité et de contrôle qui caractérisent les nouvelles formes de pénalité aux Etats-Unis dans les années 1970-1980, mais dont la filiation est plus lointaine. Pour exemplifier ce qu'il nomme la « sécurité », le philosophe s'intéresse à l'émergence de la « ville sécuritaire » à l'époque moderne. Sa leçon inaugurale accorde une place importante à la réorganisation de la « ville sécuritaire » qui relève, pour lui, de ce nouvel art de gouverner qu'il nomme « gouvernementalité » (*Ibid.*, p.111), caractéristique de la constitution des Etats modernes. Il définit notamment la gouvernementalité comme « l'ensemble constitué par les institutions, les procédures, analyses et réflexions, les calculs et les tactiques qui permettent d'exercer cette forme bien spécifique, quoique très complexe, de pouvoir qui a pour cible principale la population, pour forme majeure de savoir l'économie politique, pour instrument essentiel les dispositifs de sécurité. » (*Ibid.*). La « ville sécuritaire » exemplifie cette nouvelle manière de gouverner qui s'appuie sur une mise en ordre et un contrôle des flux et des personnes. Dans sa présentation des caractéristiques de la « ville sécuritaire », c'est le quatrième point qui a retenu mon attention. La notion foucauldienne de gouvernementalité comprend l'idée de l'anticipation d'un futur ouvert, probablement moins connue et discutée par les travaux qui s'inspirent de la tradition foucauldienne :

« Enfin, le quatrième point important, c'est qu'on va travailler sur l'avenir, c'est-à-dire que la ville ne va pas être conçue ni aménagée en fonction d'une perception statique qui assurerait dans l'instant la perfection de la fonction, mais elle va s'ouvrir sur un avenir non exactement contrôlé ni contrôlable, non exactement mesuré ni mesurable, et le bon aménagement de la ville, ça va être précisément : tenir compte de ce qui peut se passer.

Bref, je crois qu'on peut parler là d'une technique qui s'ordonne essentiellement au problème de la sécurité, c'est-à-dire, au fond, au problème de la série. Série indéfinie des éléments qui se déplacent : la circulation, nombre x de chariots, nombre x de passants, nombre x de voleurs, nombre x de miasmes, etc. Série indéfinie des événements qui se produisent : tant de bateaux vont accoster, tant de chariots vont arriver, etc. Série indéfinie également des unités qui s'accumulent : combien d'habitants, combien de maisons, etc. C'est la gestion de ces séries ouvertes, et par conséquent qui ne peuvent être contrôlées que par une estimation de probabilités, c'est cela, je crois, qui caractérise assez essentiellement le mécanisme de sécurité » (*Ibid.*, p.21-22)

Comme on peut le lire, pour Michel Foucault, la gouvernementalité implique une ouverture vers un avenir incertain via la mise en série, c'est-à-dire au final, la quantification, et plus précisément la prévision par les probabilités. Le gouvernement de la « ville sécuritaire » tient compte de 'ce qu'il pourrait se passer', et pour ce faire, produit des informations quantitatives sur des flux, des personnes, des habitations. Ainsi, le gouvernement de la « ville sécuritaire » s'appuie sur le développement des statistiques. On peut d'ailleurs se rappeler les deux sens du terme « Statistique » qui avant d'être une branche des mathématiques, liée aux calculs de probabilité – présent également dans la citation de Foucault – renvoie aux informations produites par l'Etat (*Status* en latin) qui sont utiles à son gouvernement. « Prévoir, c'est gouverner » selon la célèbre maxime du journaliste et homme politique Emile de Girardin, et pour prévoir, il faut surveiller et quantifier. Dans cette perspective, surveillance et quantification sont au cœur des pratiques de gouvernement de la Nature ; la forêt transformée en séries chiffrées devient gouvernable. Les *Surveillance Studies* approfondissent les liens entre surveillance et quantification.

2. Une approche décentralisée de la surveillance

Les dispositifs de surveillance font l'objet, depuis les travaux de Michel Foucault et notamment son ouvrage *Surveiller et Punir* (1975), d'un certain nombre d'études qui prennent le nom de *Surveillance Studies*. Le sociologue Florent Castagnino (2018) a proposé un état de l'art assez complet sur cette littérature. Il distingue deux manières d'appréhender cette notion : une approche par le haut, qui conçoit « la surveillance comme un phénomène politique et social global » (Castagnino, 2018, p.10), et une approche « par le bas, comme un ensemble de production d'acteurs locaux et [qui] s'efforce d'en décrire les mécanismes » (*Ibid.*). Ces études prennent comme objets d'analyse les dispositifs sociotechniques de

surveillance, comme par exemple la vidéosurveillance. C'est dans cette seconde option théorique, l'approche par le bas, que ma thèse s'inscrit.

La notion d' « assemblage de surveillance » – '*surveillant assemblage*' (Haggerty and Ericson, 2000) – permet de se départir d'une vision centralisée des dispositifs de surveillance. L'ensemble des données forestières n'est pas réuni en un centre de calcul unique. Il ne faut pas penser la surveillance des écosystèmes forestiers sur le modèle du « Démon de Laplace » (1814)¹⁸, c'est-à-dire une vision centralisée où l'homme derrière son ordinateur pourrait embrasser d'un seul regard les devenirs du monde. Il s'agit bien plutôt d'assemblages de surveillance hétérogènes et non centralisés.

Haggerty et Ericson (2000) ont proposé le terme d' « assemblage de surveillance » en s'appuyant sur la conceptualisation opérée par les philosophes français Gilles Deleuze et Félix Guattari (1980). L'assemblage se distingue de la partie et du tout, c'est une multiplicité qui ne prend pas le modèle de la structure, mais plutôt de la machine ou du rhizome. Le rhizome se distingue de la racine, de sa structure hiérarchique et verticale (Deleuze et Guattari, 1980, p.13). Le rhizome a une expansion horizontale, continue, et dénuée de structure hiérarchique. Grâce au modèle du rhizome, on abandonne l'image centralisée du panoptique, et on comprend que chaque élément de l'assemblage a la possibilité d'influer sur son fonctionnement. Sur quels principes repose, alors, l'assemblage de surveillance ? Même si l'article d'Haggerty et Ericson porte plutôt sur la surveillance des corps et des hommes, il est possible de reprendre leur définition du fonctionnement des assemblages de surveillance pour l'appliquer au cas des forêts françaises :

« Cet assemblage fonctionne [de cette manière]: il abstrait et sépare les corps humains de leurs inscriptions territoriales et les [transforme] en séries de flux discrets »¹⁹ (Haggerty et Ericson, 2000, p.606)

¹⁸ « Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux » (Deffuant et al., 2015). L'article collectif de Deffuant et al. (2015) propose de confronter l'idée laplacienne aux savoirs et technologies actuelles ; les auteurs la « modernise en la munissant d'un ordinateur » : « Supposons que le démon de Laplace observe un système défini au lieu de l'Univers entier, qu'il connaisse les positions initiales des éléments de ce système à un moment donné, et qu'il puisse écrire un programme qui traduit les dynamiques de chacun de ces éléments au cours du temps. A partir de ce programme et des conditions initiales à un instant donné, le démon peut en principe calculer n'importe quel état futur du système » (*Idem*).

¹⁹ « This assemblage operates by abstracting human bodies from their territorial settings and separating them into a series of discrete flows ». On retrouve la transformation en séries chiffrées que mentionne Michel Foucault, présente dans la citation plus haut.

L'assemblage de surveillance extrait des forêts les données idoines pour les connaître et saisir leurs évolutions, les transforme et les reconfigure en séries chiffrées. Ici, c'est bien le processus de production de données forestières qui est visé. Ces données sont ensuite traitées par modélisation ou simulation, créant les 'forêts virtuelles' que l'on voit sur les écrans des modélisateurs forestiers. Ce sont les centres de calcul qui réassemblent les données produites (*Ibid.*, p.613). Ces 'forêts virtuelles' sont des « doubles numériques » - '*data double*' (*Ibid.*, p.611) – qui permettent aux modélisateurs de comprendre le fonctionnement des forêts et d'anticiper leurs évolutions. Le fonctionnement des assemblages de surveillance est analogue au processus de « datification » (Devictor et Bensaude-Vincent, 2016) et à celui de « mesurabilité » (Turhnout, Neves et De Lijster, 2014). Le premier concept a été proposé pour décrire le fonctionnement du *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF), projet qui vise à construire une base de données qui réunirait l'ensemble des informations produites sur la biodiversité mondiale. Le second concept a été développé pour caractériser la logique d'action de l'IPBES qui vise à mesurer l'évolution de la biodiversité mondiale. Ces deux processus partagent un point commun, qui se retrouve également dans les assemblages de surveillance des forêts : ce sont des dispositifs technico-politiques où la production de données sur la Nature est intrinsèquement liée à une façon de la gouverner à l'échelle planétaire. Les assemblages de surveillance et d'anticipation des forêts sont technico-politiques, ils conditionnent la possibilité d'un certain type de gouvernement des futurs des forêts. Ces forêts virtuelles sont produites par les processus de quantification – que la sociologie de la quantification permet d'aborder.

3. *Une sociologie de la quantification des forêts*

Le processus de quantification a déjà fait l'objet de certaines études (entre autres : Porter, 1994 ; 1995, Demortain, 2019). En France, c'est surtout les travaux du sociologue Alain Desrosières qui ont contribué à penser les phénomènes de quantification (Desrosières, 1993 ; 2008). L'auteur propose le projet d'une « Sociologie historique de la quantification » (Desrosières, 2008) qui vise à étudier la production de données quantitatives, les collectifs qui créent et utilisent ces données, et les liens que les statistiques entretiennent avec l'action publique. Pour le sociologue, le processus de quantification se compose de deux étapes : « quantifier, c'est convenir puis mesurer » (*Ibid.*, p.10). Par cette dissociation en deux étapes distinctes, A. Desrosières met l'accent sur les négociations, les débats, les accords ou les

désaccords qui sont inhérents à la création d'une convention de mesure. Les acteurs en charge de la quantification doivent se mettre d'accord sur le système d'« équivalences préalables » (*Ibid.*, p.11) qui précède toute mesure du phénomène étudié. Ces activités sociales sont déterminantes dans la création du standard de mesure, dans la création de l'indicateur quantitatif, mais laissent toujours de côté une partie du phénomène étudié. C'est pourquoi certains indicateurs sont parfois critiqués²⁰. Après la convention vient la mesure qui procède à partir d'un standard sur lequel il y a eu négociations et accords. Les objets ainsi quantifiés deviennent des « objets qui tiennent, au triple sens de leur robustesse propre (résistance à la critique), de leur capacité à se combiner entre eux, et enfin de ce qu'ils 'tiennent les hommes entre eux' en les incitant (ou parfois en les contraignant) à user de ce langage à visée universaliste, plutôt que d'un autre. » (*Ibid.*, p.12). Pour que les arbres deviennent chiffres, on mesure leur diamètre, on calcule leur âge. Ces données extrapolées à l'ensemble de la forêt, fournissent au forestier une information quantitative et robuste sur le stock de bois disponible. Ces informations quantitatives sont à la base des plans de gestion des forêts – l'aménagement forestier – et contraignent les forestiers à user des mêmes méthodes et standards pour permettre la création d'une information quantifiée et unifiée de la disponibilité de la ressource forestière nationale. La production et l'utilisation des données forestières règlent et orientent la gestion des forêts, c'est bien l'un des effets de la quantification que note Desrosières :

« Les objets ainsi quantifiés reconfigurent le monde. Ils agissent, en ce sens que les acteurs sociaux orientent leurs actions par rapport à eux, comme le montrent par exemple les nombreux 'indicateurs' qui rythment la vie sociale » (*Ibid.*)

Pour comprendre la manière dont la quantification conditionne un certain type de gouvernement des forêts, il faut s'intéresser aux collectifs qui s'accordent sur les standards de mesure, et qui mesurent. Il faut également étudier la production et la circulation de ces objets quantifiés : comment ont-ils été créés ? Entre quels collectifs circulent-ils ? Quelles actions orientent-ils, et quelles décisions politiques viennent-ils légitimer ? Sont-ils contestés ? Ces questions sont centrales pour comprendre comment les forêts sont quantifiées, et ainsi rendues gouvernables.

²⁰ On peut penser par exemple aux critiques qui émergent dans les années 1980 sur le Produit Intérieur Brut (PIB) comme seul indicateur de développement des pays (Gadrey et Jany-Catrice, 2012). On peut aussi se référer au chapitre très didactique « Un thermomètre moral ? » du physicien Pablo Jensen, sur les mises en équations de la société (Jensen, 2018).

Gouverner les forêts, c'est prévoir leurs évolutions. Prévoir, c'est quantifier. Si les premiers travaux de sciences forestières s'évertuent à construire des tableaux chiffrés qui prédisent l'évolution de la ressource en bois, aujourd'hui, on constate une pluralité de modèles et de simulateurs, à des échelles très variées (de l'arbre aux couverts forestiers mondiaux) qui visent à prévoir et anticiper les futurs écologiques et économiques des forêts. Les forêts sont ainsi quantifiées, modélisées et simulées grâce aux infrastructures de recherche forestière qui supportent l'ensemble de ces travaux. Ma thèse propose ainsi d'analyser la production des futurs des forêts en étudiant les infrastructures de recherche forestière et les pratiques de modélisation et de simulation des écosystèmes forestiers.

III. Etudier les infrastructures de recherche forestière par le prisme des pratiques de modélisation et de simulation

Dans cette thèse, j'ai fait le choix de m'intéresser aux manières dont les sciences des forêts façonnent les futurs des forêts. Pour ce faire, j'étudie les infrastructures de recherche forestière qui sous-tendent le travail des chercheurs et ingénieurs forestiers qui produisent des artefacts (tableaux, modèles et simulateurs) qui visent à anticiper les évolutions des forêts. La quantification ('mise en chiffres'), la 'mise en données', la modélisation et la simulation informatiques jouent un rôle central dans l'anticipation des futurs des forêts. Les arbres croissent lentement. Leur envergure et leurs caractéristiques biotiques font que l'expérimentation contrôlée en laboratoire n'est pas le mode d'investigation scientifique le plus approprié. Dès le XIX^{ème} siècle, les sciences des forêts mettent au point des fonctions statistiques pour prévoir la quantité de bois. La modélisation des arbres et des dynamiques forestières qui émergent dans la seconde partie du XX^{ème} siècle constitue une pratique centrale pour les ingénieurs et chercheurs forestiers qui cherchent à comprendre les dynamiques des écosystèmes forestiers, à tester leur sensibilité à diverses variables climatiques, biologiques ou écologiques, et à anticiper leurs évolutions futures. A l'heure actuelle, la simulation informatique constitue un outil central pour expérimenter *in silico* et anticiper les effets des changements climatiques sur les forêts. De plus, les pratiques de modélisation et de simulation ont contribué à façonner les infrastructures de recueil de données, en orientant notamment le choix des mesures, ou la localisation des placettes d'observation. C'est pour ces raisons, que je choisis d'étudier les infrastructures de recherche forestière [A], par le prisme des pratiques de quantification, de modélisation et de simulation des forêts [B].

A. Les infrastructures de recherche forestière

Dans cette section, je propose deux exemples concrets pour montrer ce que j'entends par 'infrastructure'. Puis, je m'appuie sur un certain nombre de principes théoriques et méthodologiques proposés par les *Infrastructure Studies* qui fondent l'objet de cette thèse :

faire une histoire et une sociologie de la production, de la circulation et du gouvernement des futurs des forêts.

1. *Inverser les infrastructures de recherche forestière pour étudier le gouvernement des forêts*

a. Dévoiler les infrastructures forestières à partir de deux cas concrets

Le premier exemple concerne la production de forêts virtuelles esquissée dans les paragraphes précédents. Pour construire ces « doubles numériques », les ingénieurs forestiers ont besoin de données récoltées par des équipes de recherche ou des agents forestiers, données qu'ils vont injecter dans leurs simulateurs de croissance, pour, entre autres, initialiser le modèle. Ces données sont stockées sur le disque dur de l'ordinateur de l'ingénieur, ou sur le réseau interne de son organisme de recherche. Tous les organismes de recherche ont des ingénieurs en charge du réseau informatique qui assurent le bon fonctionnement de l'architecture numérique, opèrent les maintenances, et veillent à éviter toute intrusion malveillante sur le réseau. Il suffit de consulter sa boîte mail institutionnelle pour voir leur travail, notamment quand ils signalent les tentatives d'hameçonnage²¹ (*phishing*). Pour que les données puissent entrer dans le modèle, il faut qu'elles aient toutes le même format numérique. Or les sources des données sont diverses. Elles peuvent avoir été récoltées pour construire le modèle en question, ou les ingénieurs forestiers peuvent utiliser les données récoltées par l'administration forestière qui se trouvent consignées dans les plans d'aménagements, et qui sont archivées en format papier pour les plus anciennes. Ainsi, il est nécessaire d'homogénéiser les données pour pouvoir les mettre dans le modèle. Récolter des données forestières, c'est, par exemple, aller en forêt, mesurer le diamètre des arbres à l'aide d'un dendromètre, puis reporter cette mesure dans des registres papiers ou numériques. Avant de pouvoir aller sur le terrain, les ingénieurs forestiers, comme ceux qui travaillent à IRSTEA, doivent rédiger un ordre de mission qui leur garantit d'être assurés en cas de problème rencontré sur le terrain. Si vous travaillez sur les forêts de montagne, certains terrains peuvent

²¹ Les mails malveillants que l'on peut recevoir sur sa boîte mail ne sont que la 'partie visible de l'iceberg', car toute infrastructure de communication a des filtres automatiques qui opèrent un premier tri dès réception du mail sur la boîte, et que l'utilisateur ne voit pas. La grande majorité des mails qui circulent sont des *spams*, si bien que l'historien des technologies Finn Brunton a proposé une histoire d'internet par ce prisme (Brunton, 2013).

être très risqués, car difficilement accessibles. On voit alors que pour que les forêts numériques puissent croître sur l'écran d'ordinateur, il n'est pas seulement question de puissance de calcul ou de connaissances en informatique et en programmation, il y a tout un ensemble d'éléments sociaux et organisationnels qui permet à l'écran d'ordinateur d'afficher ces « doubles numériques ».

Le second exemple concerne un évènement qui n'est pas lié à l'anticipation numérique des futurs des forêts, ou en tout cas à la marge. Sans doute, lors d'une balade en forêt publique, avez-vous déjà remarqué que certains arbres comportent des marques de peinture. D'où viennent-elles et à quoi servent-elles ? Ces marques ont été réalisées par des agents forestiers pour sélectionner les arbres que l'on souhaite couper, ou ceux que l'on veut préserver de la coupe. Cette opération s'appelle le martelage, elle tire son nom de l'outil utilisé – le marteau forestier – qu'on emploie pour enlever une partie de l'écorce, et faciliter ainsi le marquage sur l'arbre. Aujourd'hui, le marteau forestier a largement été remplacé par la bombe de peinture. Le martelage est une opération qui matérialise le plan de gestion, ou aménagement forestier. La marque de peinture sert à indiquer les arbres à couper, pour récolter leur bois ou parce qu'ils sont malades. Elle peut aussi indiquer un arbre à préserver car il a une « haute valeur biologique », c'est-à-dire qu'il est « résistant au changement climatique ou bénéfique à la biodiversité forestière »²². Dans certains terrains où le risque d'incendie est élevé, les propriétaires qui ont une habitation à côté d'une 'forêt à risque' sont contraints légalement de débroussailler les petites herbes et broussailles pour éviter la propagation du feu. Les agents forestiers de l'ONF ont quant à eux la charge de couper les 'arbres à risque' qui pourraient favoriser la propagation du feu vers les habitations. S'en suit alors une opération de martelage pour que les agents en charge de couper les arbres à risque puissent les identifier²³. Ainsi, les marques de peinture s'inscrivent dans un ensemble de dispositions légales, mais aussi d'éléments scientifiques et techniques, car les terrains à risque sont identifiés grâce à des modèles de simulation de propagation du feu qui prennent en compte la structure des peuplements forestiers (modèle forestier), la géographie du terrain, mais aussi les prévisions météorologiques, comme notamment la force du vent ou les périodes de sécheresse.

²² <https://www.onf.fr/+2b6:toutsavoirusurlesforets-pourquoi-certains-arbres-sont-marques-en-foret.html>

²³ On peut se référer au reportage de France 3 Région Provence-Alpes-Côte d'Azur du 19 octobre 2017 (<https://france3-regions.francetvinfo.fr/provence-alpes-cote-d-azur/var-decouverte-office-national-forets-1349045.html>).

Le premier exemple montre qu'un artefact scientifique et technologique, comme un modèle forestier, est supporté par des tâches organisationnelles et sociales, tandis que le second exemple montre qu'une pratique de gestion, comme le martelage, est sous-tendue par des dimensions légales et des activités scientifiques, comme la modélisation de la propagation du feu. Ces entrelacements de dimensions sociotechniques, organisationnelles, scientifiques, politiques et juridiques sont au cœur de ce qu'on nomme les 'infrastructures'. Détricoter ces différents éléments porte un nom : « l'inversion infrastructurelle » (Bowker, 1994 ; Star et Ruhleder, 1996 ; Bowker et Star, 1999).

b. Une méthode : « l'inversion infrastructurelle »

La méthode de l'inversion infrastructurelle est utilisée pour la première fois en ces termes par le sociologue des sciences Geoffrey C. Bowker (1994) dans son étude sur le développement de la géophysique au sein de l'industrie des frères Schlumberger pour la prospection du pétrole. Elle constitue l'un des textes fondateurs du courant des *Infrastructure Studies* (voir, entre autres : Bowker, 1994 ; Star et Ruhleder, 1996 ; Star, 1999 ; Bowker et Star, 1999 ; Edwards, 2003 ; Edwards et al., 2007 ; Baker et Millerand, 2010 ; Edwards, 2010 ; Karasti, Baker et Millerand, 2010 ; Edwards et al., 2012 ; Karasti et al., 2016 ; Edwards, 2017).

Inverser l'infrastructure, c'est en premier lieu « porter un regard nouveau » sur les artefacts techniques, scientifiques, culturels ou politiques, et questionner leur apparente simplicité afin de saisir l'ensemble des activités qui concourent à leur création et au fait qu'ils perdurent (Bowker et Star, 1999, p.37). Dans cette optique, ce qui est « au cœur de l'inversion infrastructurelle » comme méthode (Bowker, 1994, p.104), c'est de comprendre que le travail scientifique est intimement lié à un travail organisationnel, permettant de se départir d'une vision chimérique de la science comme application d'une méthode pour découvrir les lois de la nature :

« Le travail scientifique est rendu possible par le travail organisationnel. Communément, on décrit ce que font les scientifiques de la manière suivante : ils appliquent la méthode scientifique au monde naturel et produisent

des lois scientifiques. Dans le cas des Schlumberger, le fil conducteur était une stratégie organisationnelle appliquée simultanément au monde social et au monde naturel, de façon à les faire converger. »²⁴ (*Ibid.*)

Dans le cas particulier de la « science industrielle » des Schlumberger, le travail scientifique est un travail organisationnel. Mais plus généralement, le travail scientifique n'est possible que s'il est supporté par une « infrastructure de connaissance » (Edwards, 2010, p.17) ou infrastructure de recherche, c'est-à-dire « un ensemble robuste de personnes, d'artefacts et d'institutions qui produisent, partagent et font perdurer des connaissances spécifiques sur les mondes humains et naturels »²⁵ (*Ibid.*). Ainsi, il ne faut pas penser une infrastructure seulement dans sa dimension matérielle comme on parle d'infrastructures routières ou d'infrastructures numériques, mais il faut insister sur les dimensions organisationnelles auxquelles ce terme renvoie. C'est d'ailleurs l'origine étymologique du terme 'infrastructure' (Carse, 2017), terme formé par les ingénieurs civils français qui l'utilisaient pour renvoyer à toutes les tâches qu'il était nécessaire d'accomplir avant de pouvoir installer les rails des chemins de fer²⁶ (*Ibid.*, p.27). Dans sa généalogie du terme d'infrastructure, l'anthropologue Ashley Carse inscrit le terme dans une forme de « pensée calculatoire » - *'calculative reason'* – qui est une manière de transformer et de structurer le réel pour le rendre standardisé et manipulable : « [ce terme] renvoie également au désir moderne de rendre l'hétérogénéité sociale et environnementale contrôlable et susceptible d'être soumise à des solutions standardisées »²⁷ (Carse, 2017, p.28). Les infrastructures de recherche forestière ordonnent les forêts, rendent leurs évolutions calculables, et leurs futurs gouvernables.

Cette mise en ordre du réel est primordiale pour comprendre comment s'opèrent la production des futurs des forêts et les stratégies de gouvernement de ces dernières qui lui sont associées. Dans cette perspective, porter le regard sur les infrastructures de recherche forestière, c'est dévoiler les dimensions sociales, organisationnelles et politiques qui sont

²⁴“The scientific work is rendered possible by the organizational work. A common way of describing what scientists do is to say that they apply the scientific method to the natural world and produce scientific laws. In the case of Schlumberger, the constant thread was organizational strategy, applied simultaneously to the social and natural worlds so as to make them converge.” (Bowker, 1994, p.104)

²⁵ “Knowledge infrastructures comprise robust networks of people, artifacts, and institutions that generate, share and maintain specific knowledge about the human and natural worlds” (Edwards, 2010, p.17)

²⁶ “infrastructure referred primarily to the organizational work required before railroads tracks could be laid : either establishing a roadbed of substrate material (literally beneath the tracks) or other work functionally prior to laying tracks like building bridges, embankments, and tunnels.” (Carse, 2017, p.27)

²⁷ “It also flags the modernist desire to render social and environmental heterogeneity manageable and amenable to standardized solutions”(Carse, 2017, p.28)

nécessaires au développement de ces infrastructures, à leur consolidation et à leur maintien. C'est l'une des propositions de la sociologue des sciences Susan Leigh Star :

« Etudiez une ville en négligeant ses égouts et ses sources d'énergie (comme beaucoup l'on fait), et vous perdez des aspects essentiels de la justice distributive et du pouvoir de la planification [...]. Etudiez un système d'information en négligeant ses normes et ses standards, ses câbles et ses paramètres, et vous ratez les aspects tout aussi essentiels de l'esthétique de la justice et du changement. Peut-être que si nous arrêtons de penser aux ordinateurs en termes d'autoroutes de l'information et si nous commençons à les considérer plus modestement comme des égouts symboliques, ce domaine s'ouvrirait davantage. »²⁸ (Star, 2018)

Interpréter le fonctionnement d'un ordinateur comme un réseau de canalisations souterraines, c'est mettre l'accent sur l'ensemble des éléments techniques et sociaux, humains et non-humains qui assurent son bon fonctionnement. C'est aussi mettre en avant les distributions, voire les hiérarchies, sociales qui se forment autour de ce réseau sous-terrain. Ignorer ce qui supporte la connaissance et la gestion des forêts, c'est alors négliger des dimensions politiques et sociales majeures qui cadrent les manières dont on gouverne les forêts.

2. *Quatre caractéristiques des infrastructures de recherche*

a. L'infrastructure est un concept relationnel

Le premier point qui fonde ma sociologie des infrastructures de recherche forestière concerne le déplacement opéré par Susan L. Star et Karin Ruhleder (1996) dans leur article pionnier sur la méthodologie des études des infrastructures. Pour elles, la question de savoir ce qu'est une infrastructure n'est pas pertinente, et il faut plutôt se demander quand il y a une infrastructure (Star et Ruhleder, 1996, p.112). L'infrastructure est un concept relationnel : cela signifie que ce qui est infrastructure pour une certaine catégorie d'acteurs – elles prennent l'exemple du chef cuisinier qui utilise l'eau du robinet – peut être le cœur du travail d'une autre catégorie d'acteur – les plombiers et les ingénieurs en charge du réseau hydraulique de la ville (*Ibid.*, p.113).

²⁸ Je reprends ici la traduction de Tizinia Beltrame et Ashveen Peerbaye parue dans la revue *Tracés* en 2018. "Study a city and neglect its sewers and power supplies (as many have), and you miss essential aspects of distributional justice and planning power [...]. Study an information system and neglect its standards, wires, and settings, and you miss equally essential aspects of aesthetics, justice, and change. Perhaps if we stopped thinking of computers as information highways and began to think of them more modestly as symbolic sewers, this realm would open up a bit" (Star, 1999, p.379)

Dans mon premier exemple, l'infrastructure informatique est stable grâce au travail de l'ingénieur informatique, et permet le travail de l'ingénieur forestier. Dans le second exemple, l'agent forestier qui effectue les travaux de martelage façonne le visage de la forêt dans laquelle le promeneur se balade. Dans cette perspective, il faut mettre en avant la nature duale des infrastructures. D'une part, elles cadrent les actions possibles car elles forment le substrat matériel et organisationnel des productions scientifiques forestières. D'autre part, les travaux des ingénieurs et chercheurs forestiers contribuent à modifier les infrastructures de recherche forestière : ils définissent de nouveaux protocoles de recueil de données, dévoilent des paramètres écologiques qui étaient jusque-là ignorés, ou ils mettent à l'ordre du jour de l'agenda de recherche de nouveaux problèmes (pluies acides, changement climatique). L'ingénieur forestier s'appuie sur les infrastructures de recherche forestière pour récupérer des données, mais il crée également de nouvelles données qui viennent nourrir ces dernières. C'est cette relation qui est visée par l'idée de nature duale des infrastructures.

b. Le cadre spatio-temporel des infrastructures de recherche

Revenons quelques instants aux deux exemples liminaires. Le promeneur ne connaît pas forcément ce que sont les travaux de martelage, et peut penser que les marques de peinture renvoient à des graffitis ou indiquent des chemins de randonnées²⁹. Celui qui connaît ces travaux comprend leur présence, et peut se dire qu'à son prochain passage dans cette forêt, l'arbre qu'il voit devant lui, ne sera sans doute plus là. De manière analogue, les mails de l'informaticien en charge du réseau informatique pour signaler les tentatives de *phishing* viennent mettre en garde les utilisateurs de l'infrastructure numérique que cet email malveillant pourrait venir endommager, par la propagation d'un virus informatique, l'ensemble de l'architecture numérique. On voit alors poindre une autre caractéristique des infrastructures : elles s'appuient sur des connaissances tacites, et, pour intégrer l'infrastructure, il faut comprendre son fonctionnement, il faut « apprendre à en devenir membre » - « *learned as part of membership* » (Star and Ruhleder, 1996, p.113).

Cette entrée dans une « communauté de pratiques » (*Ibid.*) s'explique également par le fait que les infrastructures de recherche instituent un cadre spatio-temporel qui leur est

²⁹<https://www.onf.fr/+2b6::toutsavoirsurlforets-pourquoi-certains-arbres-sont-marques-en-foret.html>

propre. Dans leur définition minimale de l'infrastructure, Star et Ruhleder mentionne le fait qu'il y a infrastructure quand une pratique locale est permise et supportée par une technologie qui se déploie à plus grande échelle (*Ibid.*, p. 114). Ainsi, les infrastructures de recherche sont intimement liées aux investissements matériels et aux collaborations scientifiques qui se déploient autour de ces dernières. Elles rendent possibles des collaborations indirectes, comme la possibilité de récupérer des données produites par d'autres équipes de recherche, ou la capacité d'utiliser un modèle forestier développé dans un autre contexte scientifique, via, par exemple, la plateforme de modélisation CAPSIS. L'infrastructure crée un espace de collaboration, c'est sa dimension spatiale : elle cadre et modifie les collaborations scientifiques (voir par exemple : Baker et Millerand, 2010).

En prenant comme objet d'analyse la production et la circulation de données à partir du réseau américain de recherche écologique à long terme (*US LTER*), les sociologues Helena Karasti, Karen S. Baker et Florence Millerand (2010) montrent que les infrastructures de recherche instituent, également, une temporalité qui leur est propre. Dans le cadre du développement de l'infrastructure de recherche, et notamment le développement de métadonnées qui permettent de classer les données produites par l'infrastructure pour faciliter leur réutilisation par les chercheurs, elles montrent que les développeurs envisagent leurs actions selon une temporalité qui dépasse celle du projet scientifique, et qu'elles nomment la « temporalité de l'infrastructure » (*Ibid.*). Les activités de développement et de maintenance de l'infrastructure se déploient dans une temporalité plus longue que celle des collaborations scientifiques par projet, car cette temporalité concerne des enjeux différents de ceux des projets scientifiques, comme la question du maintien des financements de l'infrastructure³⁰. Elles proposent alors d'étendre la définition de l'infrastructure pour y intégrer la dimension temporelle : « Il y a infrastructure lorsqu'est résolue la tension entre le court et le long terme »³¹ (*Ibid.*, p.400).

Dans cette optique, il faut accorder aux infrastructures de recherche une certaine autonomie et une trajectoire propre qui dépassent les productions et collaborations scientifiques qu'elles supportent. Cette autonomie est également rendue possible par les activités de maintenance qui sont essentielles pour assurer son fonctionnement. C'est

³⁰ Cette dimension était très présente dans mon étude du réseau RENECOFOR, comme on pourra le voir dans le chapitre 4.

³¹ "An infrastructure occurs when the tension between short-term and long-term is resolved." (Karasti, Baker et Millerand, 2010, p.400).

pourquoi, il est important de distinguer l'infrastructure du réseau ; c'est la troisième caractéristique.

c. L'infrastructure se distingue du réseau : l'importance de la maintenance

Le concept d'infrastructure est différent de celui de réseau dans la mesure où le premier fait intervenir un ensemble de pratiques qui visent à maintenir et faire perdurer cette dernière. Ces travaux de maintenance sont invisibles quand l'infrastructure fonctionne correctement, ils deviennent manifestes lorsqu'un bug ou un problème arrive. C'est ainsi que le politiste et historien de la colonisation et des systèmes énergétiques, T. Mitchell, opère la distinction :

« Il ne faut pas que le terme d' « infrastructure » devienne un terme attrape-tout, un peu comme celui de « réseau », pour parler de toutes les choses qui sont reliées les unes aux autres de façon invisible. L'infrastructure a une relation spécifique aux flux, aux matériaux, à la durabilité technique, au travail, au mouvement et à l'interconnexion. Comme nous le rappelle Andrew Barry (2015), du fait que l'infrastructure est faite pour durer, il faut la soumettre à toute une série de travaux d'entretien pour réparer les pannes et prévenir l'usure, mais aussi à des pratiques d'inspection, de vérification du matériel et de surveillance. Tout ceci doit nous permettre de nous éloigner des conceptions trop simples qui identifient l'infrastructure à un réseau, ou qui l'opposent à la superstructure. » (Mitchell, Charbonnier et Vincent, 2018)

Les infrastructures de recherche mobilisent un ensemble d'entités, humaines comme non-humaines, qui participent à son bon fonctionnement. Ce ne sont pas les simples relations du réseau, il y a une matérialité et un fonctionnement de l'infrastructure, qui nécessitent une maintenance spécifique. Par ailleurs, mettre l'accent sur les opérations de maintenance permet de comprendre que pour que les infrastructures de recherche forestière perdurent, il existe un nombre conséquent de tâches organisationnelles et matérielles sans lesquelles les infrastructures ne peuvent continuer à fonctionner.

d. Une histoire matérielle des sciences des forêts via le concept d'infrastructure

La dernière caractéristique qui fonde mon utilisation du concept d'infrastructure est liée aux relations entre production du savoir scientifique et infrastructures de recherche qui supportent le travail scientifique. Les *STS* ont mis l'accent sur les dimensions matérielles et sociales du travail scientifique par l'intermédiaire de concepts comme les « inscriptions »

(Latour, 1987) ou en mobilisant les méthodes de l'ethnographie de laboratoire (Latour et Woolgar, 1988). Ces différentes études insistent sur les dimensions construites des faits scientifiques, et expliquent comment ces derniers sont produits et perdurent. Dans son étude sur les modèles climatiques globaux, P. N. Edwards propose d'utiliser le vocabulaire des infrastructures pour décrire et interpréter la production sociale du savoir scientifique :

« Je préfère le vocabulaire de l'infrastructure, car il traduit les qualités fondamentales de longévité et de fiabilité d'une base technique et institutionnelle soutenant les actions et le travail quotidiens, ainsi que le fait que cette dernière est considérée comme allant de soi »³² (Edwards, 2010, p.19)

La métaphore, ou le vocabulaire, de l'infrastructure permet d'insister sur l'ensemble des tâches quotidiennes qui construisent les faits et les artefacts scientifiques et leur confèrent leur stabilité. Ainsi, pour P. N. Edwards, l'utilisation du vocabulaire de l'infrastructure n'est pas une simple métaphore : c'est « la description précise et littérale des supports sociotechniques qui sous-tendent invariablement les faits et les théories [scientifiques] communément admises » (*Ibid.*, p.19). Envisagées de cette manière, les infrastructures de recherche constituent le soubassement matériel de la production scientifique. C'est l'idée défendue par l'historien des sciences :

« Toutefois, il ne s'agit ni d'une simple analogie ni d'une métaphore. Il s'agit d'une description précise et littérale des supports sociotechniques qui sous-tendent invariablement les faits et les théories [scientifiques] communément admises. Si vous faites l'impasse sur l'infrastructure, il ne vous restera plus que des affirmations que vous ne pourrez étayer, des faits que vous ne pourrez vérifier, des connaissances que vous ne pourrez partager et des données en lesquelles vous ne pourrez avoir confiance. Sans infrastructure, les connaissances sont susceptibles de s'altérer, voire de disparaître. Construisez une infrastructure de recherche, assurez-en une maintenance correcte et vous obtiendrez des connaissances stables, fiables et largement partagées. Le concept d'infrastructure de recherche ressemble à la vénérable notion des paradigmes scientifiques mais il va bien au-delà [de cette dernière] en ce qu'il met en évidence la continuité de la science moderne, qui ne cesse de fonctionner comme un système de production, quand bien même certains instruments, modèles et théories prospèrent et déclinent en son sein. »³³(*Ibid.*)

³² "I prefer the language of infrastructure, because it brings home fundamental qualities of endurance, reliability, and the taken-for-grantedness of a technical and institutional base supporting everyday work and action." (Edwards, 2010, p. 19)

³³ "Yet this is no mere analogy or metaphor. It is a precise, literal description of the sociotechnical supports that invariably undergird facts and well-accepted theories. Get rid of the infrastructure and you are left with claims you can't back up, facts you can't verify, comprehension you can't share, and data you can't trust. Without the infrastructure, knowledge can decay or even disappear. Build up a knowledge infrastructure, maintain it well, and you get stable, reliable, widely shared understanding. The concept of knowledge infrastructure resembles the venerable notion of scientific paradigms, but it reaches well beyond that, capturing the continuity of modern

Dans la ligné des travaux de P. N. Edwards, une étude historique et sociologique des infrastructures de recherche forestière est une histoire et une sociologie matérielles des sciences des forêts. Pour conclure sur la présentation des infrastructures de recherche, on peut également mobiliser les trois fonctions que remplissent ces infrastructures telles qu'elles ont été mentionnées par P. N. Edwards (2017) : surveiller, modéliser, archiver. La modélisation occupe alors une place centrale dans les infrastructures de recherche forestière, notamment pour organiser et traiter les données. Ainsi, faire une sociologie matérielle des infrastructures de recherche forestière, c'est également proposer une sociologie des pratiques de modélisation. C'est la seconde proposition théorique et méthodologique défendue dans cette thèse.

B. Une sociologie des pratiques de modélisation et de simulation des forêts

Les pratiques de modélisation et de simulation jouent aujourd'hui un rôle central dans l'anticipation des futurs des forêts, notamment car il est plus facile d'étudier les dynamiques lentes des écosystèmes forestiers avec ces outils. Elles sont au cœur de la fabrication des futurs des forêts. Par ailleurs, comme l'a montré P. N. Edwards, les « infrastructures de recherche » remplissent trois fonctions : surveiller, modéliser et archiver – *monitor, model and memory* (Edwards, 2017, p.36). Les pratiques de modélisation et de simulation des écosystèmes forestiers s'appuient sur les infrastructures de recherche, et modifient également leurs évolutions. Pratiques de modélisation et de simulation et infrastructures de recherche forestière entretiennent une relation symbiotique.

Je propose une étude sociologique et historique des collectifs scientifiques qui produisent la connaissance des forêts en m'appuyant sur l'étude des pratiques scientifiques, et de la science « en situation », à la suite du 'tournant pratique' des *Science Studies*, opéré à partir des années 1980. Cette option théorique et méthodologique peut se résumer par les propos de l'historien et sociologue des sciences Andrew Pickering (1995). Elle consiste, dans un premier temps, à laisser, en partie, de côté une vision « représentationnelle » de la science qui était celle l'épistémologie et de la philosophie des sciences ; il ne s'agit pas ici d'étudier les

science, which keeps on functioning as a production system even while particular theories, instruments, and models rise and fall within it." (*Ibid.*, p.19)

liens entre le modèle et la réalité qu'il représente : le modèle est-il vrai ? Elle consiste à adopter une vision « performative » de l'activité scientifique : comment les modèles produits fabriquent-ils la réalité qu'ils étudient ? Comment les modèles forestiers façonnent les futurs des forêts ? C'est bien l'un des objectifs de cette thèse, et c'est pourquoi la sociologie des pratiques scientifiques est un ensemble méthodologique et théorique cohérent pour étudier ces phénomènes.

1. Analyser la science « en situation » : le 'tournant pratique' des STS

Le « tournant pratique » est une expression qui a été utilisée pour décrire un ensemble de travaux en *STS* qui émergent dans les années 1970-1980. On peut citer, par exemple, le sociologue britannique David Bloor, initiateur du « Programme Fort » en histoire et sociologie des sciences qui propose, notamment, de traiter avec symétrie des vainqueurs et des vaincus de l'histoire des sciences (Bloor, 1976). David Bloor est l'un des premiers représentants du « tournant pratique » (« *practice turn* ») en sociologie des sciences (Schatzki, Knorr-Cetina et Savigny, 2001). On peut noter par ailleurs, que certains auteurs parlent plutôt de « tendance pratique » (« *practice trends* »), car les méthodes et les savoirs mobilisés pour étudier les pratiques scientifiques sont très variés (Soler et al., 2014, p.3). Ces études s'intéressent à ce que les scientifiques 'font' réellement – « *what scientists actually do* » (*Ibid.*).

Bloor s'appuie sur la philosophie de Wittgenstein qui nous invite à comprendre que les significations que l'on porte sur le monde ne sont pas fixées une fois pour toutes, mais qu'elles résultent de mises en accord et de consensus tacites. Dans cette perspective, pour comprendre la signification accordée par les acteurs scientifiques aux activités de recherches, il faut dévoiler les règles tacites sur lesquelles les acteurs s'accordent : les « règles du jeu ». A partir de cette idée fondamentale, il s'agit d'analyser la science non plus comme un tout unifié, mais comme un ensemble de pratiques scientifiques obéissant à une diversité de règles locales. Le travail scientifique se situe au niveau des pratiques situées des chercheurs, et non plus dans la relation abstraite entre la théorie et l'expérience.

Harry Collins et Trevor Pinch (1993), reprenant l'expression du philosophe Karl Popper – la « logique de la découverte scientifique » – opèrent un glissement de l'épistémologie à la

sociologie des sciences : « Si nos exemples nous ont appris une chose, c'est qu'il n'y a pas de logique de la découverte scientifique. Ou plutôt, s'il en existe une, c'est celle de la vie de tous les jours » (Collins et Pinch, 1993, p.187). C'est à partir des années 1970-1980 qu'émergent ces travaux qui considèrent que pour étudier la science, il faut prendre comme objet d'analyse les pratiques quotidiennes des chercheurs, témoignant d'un changement dans la conception de la science : « de la science comme connaissance à la science comme pratique » (Pickering, 1992). Ces études mobilisent la méthode ethnographique (Latour et Woolgar, 1979) pour étudier la « science telle qu'elle se fait » (Callon et Latour, 1982). Ainsi, elles accordent une place importante à la « matérialité des sciences » (Clarke et Fujimura, 1992), c'est-à-dire aux rôles joués par les instruments ou les collaborations entre chercheurs. Par exemple, il ne s'agit plus de savoir si une expérience valide une théorie, mais comment l'expérience a été préparée et menée. Est-elle transposable dans un autre laboratoire ? Si d'autres chercheurs utilisent cette expérience, la préparent-ils de la même façon ? Ces questions sont abordées, par exemple, dans le cas de la préparation des plasmides, morceaux d'ADN qui permettent aux chercheurs, par exemple, de cloner des gènes pour mener des expériences sur ces derniers (Jordan et Lynch, 1992). Cet intérêt pour la matérialité des sciences traduit, pour le sociologue Andrew Pickering, le passage d'une « vision représentationnelle » de la science, qui a dominé la philosophie des sciences – qui étudie le lien entre la science et ce qu'elle représente, le réel – à une « vision performative » des sciences : les auteurs regardent comment la science agit sur le monde et le façonne (Pickering, 1995, p.5).

Etudier les pratiques scientifiques, c'est reconnaître que quand les scientifiques travaillent, ils « bricolent » – « *tinkering* » – (Knorr-Cetina, 1979), ils composent avec des éléments divers – matériels et techniques, mais aussi sociaux et discursifs – qu'ils tâchent de mettre en adéquation. Andrew Pickering utilise un terme proche de celui de la sociologue autrichienne, il parle de « réglage » (« *tuning* ») pour décrire l'essence du travail scientifique qui se déploie dans un mouvement dialectique entre « résistance » et « accommodation » des éléments non-humains que le scientifique confronte au cours de son travail (Pickering, 1995, p.23). L'intérêt de la théorisation d'A. Pickering est qu'elle confère une capacité d'agir aux éléments non-humains ; le scientifique n'est plus le démiurge platonicien du *Timée*, fabricant unique du monde, mais plutôt l'artisan qui travaille sa matière et s'adapte à la résistance de son matériau, et dont l'œuvre est chaque fois un processus différent. Comme l'ébéniste ne sculpte jamais de la même manière deux bois différents, venant pourtant de la même essence d'arbre, le travail d'accommodation et d'adéquation qu'opère le scientifique s'ajuste à chaque

situation scientifique donnée. Ainsi, c'est « en situation » qu'il faut analyser les manières dont les scientifiques développent des outils et des stratégies pour répondre aux questions qu'ils se posent. Cette idée, défendue par A. Clarke et J. Fujimura (1992), s'appuie notamment sur la sociologie interactionniste d'Howard Becker et d'Erving Goffman.

Décrire une pratique scientifique, c'est ainsi rendre compte des processus d'articulation et d'adéquation qu'opère le scientifique quand il se pose un problème et qu'il essaie d'y répondre. Pour qu'un problème soit « faisable » – « *do-able* » – (Fujimura, 1987), les scientifiques doivent articuler leurs tâches de production de faits à d'autres tâches organisationnelles ou sociales qui se déploient dans trois lieux concentriques : de la paillasse au monde social en passant par le laboratoire de recherche (*Ibid.*).

2. Les principes méthodologiques d'une sociologie des pratiques de modélisation

A partir de cette rapide présentation des études des pratiques scientifiques, on peut à présent préciser les différents éléments qui orientent la sociologie des pratiques scientifiques que je propose de développer dans le cas de la modélisation et la simulation des forêts.

[1] Etudier les pratiques de modélisation, c'est faire porter l'analyse sur le travail quotidien des chercheurs quand ils développent et codent leurs modèles, récoltent les données, rédigent des projets de recherche, entretiennent des collaborations entre eux ou avec les gestionnaires forestiers. Etudier le modèle en soi n'est pas la bonne option théorique, et risquerait d'orienter l'enquête vers une conception représentationnelle de la science. Il est nécessaire d'étudier la modélisation en contexte, c'est-à-dire non seulement le modèle et son développement, mais aussi tous les éléments techniques, scientifiques, politiques et sociaux, humains comme non-humains qui gravitent autour du modèle et qui contribuent à sa formation, son utilisation et sa circulation.

[2] La sociologie des pratiques de modélisation est une étude du travail scientifique en situation. Comment le modélisateur réagit-il quand son modèle 'bogue' ? Que fait-il quand son modèle sort un résultat aberrant ? Le sociologue peut alors regarder le modélisateur en face de son écran pour étudier son comportement. Néanmoins, si plusieurs modélisateurs

m'ont montré comment leurs modèles fonctionnent, l'enquête a accordé une grande importance aux entretiens semi-directifs effectués avec les modélisateurs. Pourquoi tel modélisateur a-t-il décidé de développer un certain type de modèle plutôt qu'un autre ? Pourquoi a-t-il passé autant de temps sur cette fonction en particulier ? Pourquoi certains modélisateurs développent-ils des modèles qui anticipent les évolutions des forêts, tandis que d'autres ont décidé de ne plus le faire ? Tous ces éléments, qui se retrouvent invisibilisés dans le discours lisse et reconstruit des articles scientifiques, émergent lors de l'entretien. Pour comprendre les pratiques des chercheurs, j'ai ainsi cherché à être attentif aux discours de justification de ces derniers. La justification n'est pas à comprendre dans son sens épistémologique – comme Popper distinguait la logique de la découverte de la logique de la justification – mais dans son sens local et quotidien : pourquoi ai-je procédé ainsi plutôt qu'autrement ?

[3] La sociologie des pratiques de modélisation est une sociologie du travail scientifique, et elle opère à l'échelle microsociale. Dans ce cadre, je suis attentif aux routines et aux discussions informelles. Mais je suis également attentif aux manières dont le travail scientifique s'appuie sur les infrastructures de recherche forestière, et comment ces infrastructures se trouvent modifiées par les pratiques des chercheurs. Grâce à l'étude des pratiques et l'étude de l'infrastructure se trouvent alors liées deux échelles d'analyse détaillée tout au long de cette introduction: celle microsociale des pratiques des chercheurs, et celle macrosociale des sciences des forêts.

IV. Détail de l'enquête et présentation du plan de la thèse

A. Présentation de l'enquête

Dans le cadre de la thèse, j'ai réalisé 31 entretiens semi-directifs d'environ une à trois heures avec des modélisateurs, des ingénieurs forestiers, des écologues ou des forestiers de terrain. L'annexe 1 récapitule l'ensemble des entretiens effectués et donne des informations sur les enquêtés (institution, grade, thématiques de recherche, etc.). Ce nombre ne prend pas en compte les discussions informelles que j'ai pu avoir avec certains acteurs, notamment lors de trois évènements scientifiques auxquels j'ai participé : les journées de la modélisation d'IRSTEA (2-3 juin 2015), la réunion annuelle CAQSIG³⁴ (5-7 avril 2016) et les vingt-cinq ans du réseau RENECOFOR (11-13 octobre 2017). Certains entretiens exploratoires ont été menés avec des acteurs qui ne sont pas du milieu forestier mais qui m'ont aidé à comprendre les enjeux liés à l'anticipation des futurs de la nature³⁵.

Voici la répartition des entretiens forestiers selon les institutions où j'ai enquêté :

- Sept entretiens réalisés avec des modélisateurs forestiers du centre grenoblois de l'INRAE³⁶, de l'unité LESSEM (Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne). Six modélisateurs font partie de l'équipe DYNAMICS (Changements globaux, dynamique et gestion durable des espaces forestiers et pastoraux de montagne), le dernier appartient à l'équipe ASTRRE (Approches socio-écosystémiques des territoires, des risques et des ressources).

³⁴ CAQSIG est « la réunion annuelle conjointe des modélisateurs et utilisateurs de Capsis et des chercheurs du réseau CAQ (Croissance, Amélioration, Qualité) du département INRA-EFPA » (<http://capsis.cirad.fr/capsis/documentation/reports/caqsig-2016>)

³⁵ Quatre entretiens plus précisément. Un entretien avec Jacques Theys qui a porté sur le rôle de la prospective en environnement depuis les années 1970. Un entretien avec Audrey Coreau qui a fait sa thèse sur l'anticipation quantitative et qualitative des futurs en écologie. Un entretien avec Denis Couvet qui a porté sur la modélisation en écologie. Et enfin, un entretien avec un modélisateur du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) qui m'a, notamment, permis de comprendre la 'cuisine de la modélisation'. On peut se référer à l'annexe 1 pour avoir plus d'informations sur ces profils d'enquêtés.

³⁶ IRSTEA à l'époque de l'enquête de terrain.

- Cinq entretiens réalisés, à Montpellier, avec des modélisateurs, et un expérimentateur du CEFE (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) qui appartiennent à l'équipe FORECAST (FOREts, Changements globaux, et Adaptation : Simulations et expérimentations).
- Six entretiens réalisés avec des chercheurs en poste à l'INRAE, dont quatre modélisateurs appartenant à l'UMR Silva (Nancy), un chercheur de l'Unité Zoologie Forestière, et un ingénieur de l'UMR AMAP (botanique et bioinformatique de l'Architecture des Plantes).
- Un entretien réalisé avec un enseignant-chercheur en écophysiologie du Laboratoire Ecologie, Systématique et Evolution (ESE) – Paris XI Saclay.
- Deux entretiens réalisés avec des modélisateurs de l'Institut National de l'Information géographique et forestière (IGN).
- Onze entretiens réalisés avec acteurs appartenant à l'ONF, dont cinq effectués avec des ingénieurs et six menés avec des forestiers de terrain (participant au réseau RENECOFOR, ou correspondant-observateurs du Département Santé des Forêts)

La plupart des ingénieurs forestiers en poste à l'ONF que j'ai rencontrés ont fait une thèse, et ont souvent travaillé auparavant dans des instituts de recherche comme IRSTEA ou l'INRA. Dans les profils « chercheurs », tous les chercheurs sont docteurs en écologie ou en science forestière – seul un chercheur était doctorant au moment de l'entretien mais il a soutenu sa thèse depuis. Tous, sauf l'expérimentateur du CEFE, ont utilisé la modélisation dans leur thèse.

Comme on le verra plus en détail dans la suite du manuscrit (chapitre 3), mon terrain d'enquête est assez représentatif du paysage institutionnel des recherches forestières françaises :

- Recherche « fondamentale » au CEFE ou à l'INRA sur les écosystèmes forestiers
- Recherche plus opérationnelle à IRSTEA ou à l'INRA, ou au département Recherche Développement et Innovation (RDI) de l'ONF

J'ai également observé une diversité de modèles et de pratiques de modélisation: modèles fonctionnels et modèles corrélatifs³⁷; modèles à l'échelle de l'arbre (et ses stades de développement) et modèles d'évaluation de la ressource forestière au niveau national ; modélisateurs qui travaillent sur le même modèle qu'ils améliorent pendant toute leur carrière scientifique et modélisateurs « tous azimut » qui développent une diversité de petits modèles 'simples'. Enfin, la diversité des disciplines scientifiques des recherches forestières est également représentée dans mes observations : écologie fonctionnelle, écophysiologie, science forestière.

A cette enquête sociologique s'ajoute l'étude documentaire de la littérature grise : la presse scientifique forestière, les articles et les projets des acteurs interviewés. Le corpus se compose également de rapports d'activité d'institutions ou de réseaux sur lesquels j'ai enquêté, comme le département RDI de l'ONF, les rapports du réseau RENECOFOR ou du DSF.

Mon travail de terrain a suivi une logique de diversification des profils, institutions, activités et types de modèles étudiés, davantage qu'une logique de représentativité. Notamment, une institution aurait pu être incluse : le centre technique industriel Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) à Bordeaux. Sa mission est de promouvoir l'innovation dans la filière industrielle du bois. Il développe et utilise des modèles économiques utiles à la filière industrielle. Cependant, comme la thèse accorde une place importante à l'anticipation des effets du changement climatique sur les écosystèmes forestiers dans les communautés scientifiques et de recherche, l'étude des modèles du FCBA se trouve à la marge de ce terrain d'enquête.

B. Architecture générale de la thèse

Afin d'étudier socialement comment les sciences des forêts et les infrastructures de recherche forestière façonnent les futurs des forêts, ma thèse se déploie en deux parties complémentaires : une partie historique portant sur le développement et l'évolution des infrastructures de recherche forestière, une partie sociologique qui étudie en détail les infrastructures de recherche forestière actuelles.

³⁷ Je discute cette différence « théorique » dans l'annexe 2.

La première partie de la thèse décrit et analyse les évolutions des infrastructures forestières depuis le XVIII^{ème} siècle. Cette histoire est imprégnée du courant des *STS* dans la mesure où elle fait des objets techniques et scientifiques les éléments centraux de l'analyse. Elle s'inscrit également dans la lignée de la sociologie politique de la quantification et de la surveillance des forêts.

Le premier chapitre retrace les débuts de la science des forêts au XVIII^{ème} siècle et détaille les évolutions des savoirs, institutions, collectifs qui visent à connaître et gérer les forêts, jusque dans les années 1970. L'anticipation des futurs des forêts est ici marquée par des préoccupations essentiellement économiques : optimiser la production de bois et moderniser la sylviculture française.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'essor des dispositifs de surveillance des écosystèmes forestiers dans un contexte marqué par une controverse environnementale : les « pluies acides ». C'est à partir de ce moment que les recherches forestières se dotent d'institutions d'observation et de surveillance qui existent encore actuellement, et qui sont centrales dans l'étude des impacts du changement climatique sur les forêts. La surveillance écologique des écosystèmes forestiers s'appuie également sur le développement de l'écologie et l'écophysiologie forestières qui portent une nouvelle compréhension des forêts, qui ne sont plus seulement envisagées comme des ressources économiques.

Le troisième chapitre détaille les différents agendas de recherche des sciences des forêts qui coexistent actuellement, et traite également de l'irruption de la problématique du changement climatique dans les recherches et la gestion forestières.

La seconde partie propose une sociologie des pratiques de modélisation et de simulation des écosystèmes forestiers, pratiques au cœur des dispositifs contemporains de surveillance et d'anticipation des dynamiques forestières. Cette sociologie des pratiques de modélisation est aussi une sociologie du travail scientifique. Elle se compose également de trois chapitres.

Le quatrième chapitre s'intéresse à la production sociotechnique des données forestières en mobilisant l'approche méthodologique des *Infrastructure Studies*. En

« inversant » les infrastructures de recherche forestière, je dévoile les éléments humains, contingents et sociaux qui concourent à la production de ces données.

Le cinquième chapitre se consacre à l'étude des plateformes de modélisation et à l'utilisation du langage informatique dans la production et la circulation de modèles forestiers. Cette sociologie de l'activité scientifique s'appuie sur l'étude des artefacts numériques et informatiques pour montrer comment les acteurs collaborent autour, et à l'intérieur, de ces objets sociotechniques.

Le sixième et dernier chapitre propose une étude des différents profils des chercheurs impliqués, et expose trois types de visions des futurs des forêts auxquelles les chercheurs adhèrent quand ils travaillent et légitiment leurs pratiques. L'étude de ces « engagements épistémiques » (Granjou et Arpin, 2015 ; Granjou, Louvel et Arpin, 2015 ; Granjou, 2016) pour une vision des forêts et de ses futurs témoigne alors de la pluralité de ces futurs. Cette idée est reprise et étoffée dans la conclusion générale qui vise à restituer l' « écologie des futurs des forêts ».

Introduction de la première partie : De la prophétie aux anticipations : deux visions des futurs des forêts

« La France périra faute de bois ». C'est en ces termes que Jean-Baptiste Colbert, contrôleur général des finances de Louis XIV, aurait justifié la nécessité de « mettre de l'ordre et rationaliser la gestion forestière pour enrayer la disparition des surfaces boisées » (Boutefeu, 2005, p.2). Cela aboutit à la promulgation de l'ordonnance de 1669 instituant un code forestier qui détermine des usages autorisés et proscrits des forêts, comme l'interdiction du pâturage des chèvres et moutons dans les « forêts royales, nobiliaires et ecclésiastiques » (*Ibid.*). Colbert lie la richesse et la prospérité de l'Etat français avec la ressource nationale en bois par le prisme d'un futur non-souhaitable qu'il s'agit d'éviter : la mort de l'Etat français. Ici, la politique forestière mise en place avec l'ordonnance de 1669 se trouve légitimée par le recours à une « prophétie de malheur » (Chateauraynaud, 2011, p.344) : pour éviter l'affaiblissement, voir l'effondrement, de l'Etat français, il faut dès à présent mettre en place une stratégie forestière nationale. Dans le cas présent, cette dernière consiste essentiellement à établir des mesures coercitives qui viennent restreindre les usages des bois par la population française.

« La forêt française sera confrontée au cours du 21^{ème} siècle à des défis majeurs. Elle devra s'adapter si elle veut résister au changement climatique, ce dès la première moitié du siècle alors que les effets ne seront vraiment sensibles que dans la deuxième moitié. La société a devant elle des choix à faire dans la gestion du territoire et des ressources naturelles entre l'alimentation, l'énergie et le bois matériau. Cela dans un contexte incertain mais aussi avec des tendances lourdes comme la croissance de la demande mondiale de tous produits » (Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux, 2008 juin, p. 7). Cette citation est extraite d'un travail de prospective réalisé en 2008 par le Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux (CGAAER) pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, et intitulé *La forêt française en 2050-2100*. Ce document vise à poser les bases d'une « stratégie forestière » (*Ibid.*, p.9) qui coordonnerait les actions de l'Etat et des collectivités territoriales – « politique forestière » (*Ibid.*) – et celles des « acteurs professionnels (forestiers et industriels) » (*Ibid.*). Pour ce faire, le ministère s'est appuyé sur « Cinq scénarios d'évolution de la forêt », réalisés par l'INRA. Chaque scénario se concentre

sur une grande tendance, considérée comme le moteur principal de l'évolution des forêts. Le scénario « Tout pour l'énergie » met en avant le bois comme matériau durable et source d'énergie propre (biomasse) et met l'accent sur la production forestière. Les quatre autres scénarios sont les suivants : « Tout pour le développement durable », « Tout pour l'alimentation », « Concurrence alimentation-énergie » et « Les friches forestières ». Les cinq scénarios sont à dessein exclusifs. Ces scénarios ne sont pas des lignes directrices à suivre, il ne s'agit pas de choisir un scénario et de refuser les autres. La prospective consiste à faire dialoguer ces différents scénarios pour identifier quelles vont être les régularités et les oppositions qui émergent à la confrontation de ces derniers. Le rapport en tire notamment les conclusions suivantes : « Dans tous les scénarios, les travaux de régénération des forêts devraient être importants, soit par anticipation, soit par nécessité. Le rôle de la recherche est essentiel pour la sauvegarde de la biodiversité et pour la mise au point des matériels forestiers de reproduction afin de préparer la forêt à l'avenir » (*Ibid.*, p. 7).

Qu'est-ce qui différencie la 'prophétie' de Colbert de la prospective du CGAAER ? Deux éléments centraux distinguent ces deux rapports aux futurs : une temporalisation du futur [1], et une pluralisation des futurs [2].

[1] La prophétie de Colbert propose un futur où l'horizon temporel n'est pas précisé. Le contrôleur des finances établit un lien indissociable entre richesse en bois d'un Etat, sa prospérité et sa stabilité politique. Ce lien intrinsèque entre Etat et ressources en bois annule presque la temporalité : cette relation nécessaire semble exister de tout temps, elle est à la base de la théorie physiocratique de l'Etat³⁸. Les futurs des forêts véhiculés par la prospective du CGAAER sont, quant à eux, temporalisés par le recours au défi politique, économique, social et scientifique que constitue le changement climatique pour les forêts, appréhendées comme milieu naturel, ressource en bois, ou ensemble d'activités économiques et culturelles. Si les effets du changement climatique seront visibles et importants dans la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, il faut agir dès maintenant (première moitié du XXI^{ème} siècle). La prospective détermine un cadre temporel pour l'action : agir avant la seconde moitié du XXI^{ème} siècle pour éviter les effets les plus graves du changement climatique ou pour préparer, dès à présent, les forêts françaises à être plus résilientes. C'est le propre du raisonnement

³⁸ On pourrait alors peut-être user du terme 'prédiction' pour dénoter la vision de Colbert, entendue, ici, comme le résultat d'une théorie. Néanmoins, je préfère réserver le terme 'prédiction' à son sens statistique. On peut se référer au lexique présent dans les annexes pour des définitions plus précises de ces différents termes.

anticipatif : prévoir, projeter ou imaginer le futur « afin de préparer la forêt à l'avenir » (*Ibid.*).

[2] La citation de Colbert n'envisage la forêt que par le prisme de la ressource forestière tandis que la prospective du Ministère détaille les différentes fonctions des forêts : ressource en bois, stockage de carbone, réserve de biodiversité, etc. C'est l'une des autres caractéristiques du style anticipatif : imaginer et faire dialoguer différents futurs possibles pour se préparer à ce qui pourrait se passer. Enfin, si le futur de Colbert témoigne d'une position catastrophiste, celui du CGAAER est pluriel : il fixe des objectifs à atteindre (futur souhaitable) et des risques à éviter (futur non-souhaitable).

Au-delà de ces différences entre ces deux rapports au futur – que l'on peut expliquer par le recours à l'analyse historique, c'est l'objet de cette première partie – il faut noter que, dans les deux cas, le futur des forêts légitime, oriente, voire détermine une politique forestière à entreprendre. La création et la circulation de « visions du futur » peuvent être interprétées comme des « engins balistiques » dont l'ambition est d'infléchir les trajectoires prises par certains dossiers environnementaux, politiques et sociaux (Chateauraynaud, 2011). Tout discours visionnaire est un acte politique. Analyser les futurs des forêts, c'est alors rendre compte des dimensions politiques qui les sous-tendent. Ce mouvement général vers une pluralisation et une temporalisation des futurs des forêts est soutenu par le développement de pratiques de quantification des forêts. La naissance de la science forestière, en Allemagne et en France, au XVIII^{ème} siècle, constitue le point de départ de ce récit historique qui documente le passage de la prévision de la ressource forestière à l'anticipation des futurs des forêts. Deux grandes tendances peuvent être dégagées.

Première tendance, la science forestière opère une mathématisation et une quantification de la ressource forestière. Cette mise en nombres des forêts peut être interprétée comme une forme de gouvernement de ces dernières. Le récit historique détaille le passage de la science forestière focalisée sur la prévision de la ressource aux recherches forestières qui, articulant des savoirs divers (écologie, botanique, pédologie, modélisation), visent à anticiper les futurs pluriels, contrastés, menaçants et optimistes des forêts françaises. Le passage des tables de production – qui donnent à voir un futur linéaire et statique de la ressource – aux modèles dynamiques de croissance – qui opèrent à différentes échelles et agrègent des savoirs

et approches diverses (écologie, écophysiologie, pédologie, scénarios climatiques, etc.) – est un des avatars les plus évocateurs de ce changement.

Deuxième tendance, la prospective du CGAAER considère la forêt comme un enjeu global et mondial pour s'adapter au changement climatique, tandis que la prophétie de Colbert fait de la forêt un enjeu national. Cette première partie retrace la construction de la forêt comme un enjeu politique, économique, scientifique et environnemental global, notamment à partir des années 1970 et l'émergence du problème des pluies acides. Cette globalisation de la forêt s'inscrit dans l'émergence de la notion d' « environnement global » (Grevsmühl, 2014) qui met en branle la création d'infrastructures d'observation et d'expérimentation des écosystèmes forestiers. La mise en données des forêts, et l'anticipation de leurs futurs à l'échelle globale matérialisent une forme particulière de gouvernement de ces dernières que cette thèse compte décrire. L'irruption du changement climatique parachève ce mouvement de globalisation de l'environnement, et met à l'agenda scientifique et politique les 'Forêts-Infrastructures' telles que je les ai décrites dans l'introduction générale de cette thèse.

Cette première partie se constitue de trois chapitres. Dans un premier temps, je fais le récit du développement de la science et des recherches forestières de la fin du XVIII^{ème} siècle aux années 1970. Puis, j'étudie l'affaire des pluies acides qui a constitué un tournant dans la pluralisation des futurs des forêts, avec l'émergence de leurs futurs écologiques, et le développement des infrastructures de recherche forestière contemporaines. Le troisième chapitre retrace l'émergence de la problématique climatique dans les recherches forestières, et décrit comment les deux agendas des recherches forestières (l'agenda sylvicole et l'agenda écologique) ont intégré ce problème. Cette première partie montre alors un triple mécanisme de biologisation, d'écologisation et de climatisation des recherches forestières qui sous-tendent le processus de pluralisation des futurs.

Chapitre 1 : Une biopolitique des forêts : sciences, politiques et recherches forestières en France (1820-1980)

Introduction

Le récit de l'émergence des futurs des forêts débute avec le développement de la science forestière. Ce premier chapitre a pour objet la genèse et les évolutions des infrastructures de recherche forestière, et prend comme point de départ la naissance de la science forestière, en Allemagne et en France, à la fin du XVIII^{ème} siècle. Le développement de la science forestière qui forme les bases d'une sylviculture rationnelle traduit la constitution d'une 'biopolitique' des forêts. Cette 'biopolitique', dans le cas des forêts, s'appuie sur un ensemble de technologies de contrôle et de prévision de la ressource : statistiques et inventaires forestiers. Elle repose également sur le développement de stations de recherche qui produisent et archivent les données nécessaires pour optimiser la production de bois, et gérer plus efficacement les forêts. C'est à cette époque que les forestiers adoptent les principes de gestion qui vont modeler le visage des forêts françaises, notamment la généralisation de la futaie* régulière, et de la « coupe soutenable » (Lowood, 1990). L'ensemble de ces technologies, savoirs et pratiques vise à assurer une production constante et continue de bois à l'échelle du territoire pour satisfaire, notamment, les besoins de l'industrie.

La politique forestière française du XIX^{ème} siècle est avant tout une politique scientifique : l'Etat refonde le corps forestier qui est seul garant du savoir technique pour administrer et gérer les forêts. Symétriquement, le discours scientifique des forestiers du XIX^{ème} siècle, notamment dans le cadre des Restaurations des Territoires de Montagnes (RTM), est un discours politique : il s'agit d'affirmer l'autorité de l'Etat et de légitimer sa politique interventionniste sur les territoires de montagnes (Kalaora et Savoye, 1986). Pour les auteurs de la *Forêt Salvatrice* (Decocq, Kalaora et Vlassopoulos, 2016), étude des discours des forestiers français du XIX^{ème} siècle sur les reboisements, le début du XIX^{ème} siècle

constitue une « nouvelle ère », c'est pourquoi j'ai choisi de faire débiter ce récit historique à ce moment :

« Une nouvelle ère commence, qui se caractérise par un double mouvement : d'une part, les scientifiques vont participer à l'aménagement et aux transformations de l'espace, d'autre part, les politiciens vont tirer le meilleur parti de la science pour transformer et contrôler le territoire. C'est en ces termes que nous voudrions saisir la façon dont les idées généreuses du reboisement qui, au XVIII^{ème}, se prêtaient à des développements scientifico-poétiques vont se transformer en volonté de savoir et de pouvoir (production de savoir par les grands corps d'Etat et interventions instituantes) » (Decocq, Kalaora et Vlassopoulos, 2016, p.100)

Pour ces auteurs, c'est au XIX^{ème} siècle que s'affirme la 'biopolitique' des forêts françaises qui va modeler durablement le visage des forêts occidentales : françaises, allemandes, anglaises, mais aussi les forêts des colonies britanniques et des Etats-Unis : « L'algèbre et la géométrie, bases de la méthode cartésienne de recherche de la vérité indubitable, deviennent les bases de la nouvelle science de la forêt. Grâce à cette méthode, la forêt cesse d'être le lieu de l'errance hasardeuse pour devenir un échiquier ordonné. En devenant quantité mesurable, elle devient géométrique » (Harrison, 1992, p.188). Les forêts s'érigent comme les chiffres s'ordonnent. Quadrillées en parcelles homogènes pour faciliter le calcul de la ressource, les forêts du XIX^{ème} siècle prennent la forme d'un échiquier uniforme et ordonné que le forestier parcourt, comme le commandant passe en revue les effectifs de son armée. Dans cette perspective, les modèles mathématiques produits par la science forestière offre un cas d'étude exemplaire pour apprécier le caractère performatif de ces travaux, et pour explorer les intrications des dimensions « descriptives et prescriptives » (Desrosières, 2008) des statistiques forestières. C'est ce récit conjoint de chiffres et d'arbres, de pouvoir et de savoir, d'une forêt menacée et d'une forêt « salvatrice » qui est l'objet de ce chapitre.

Pour ce chapitre, mon travail a été double. D'une part, je me suis appuyé sur des travaux historiques qui concernent les forêts et leur administration³⁹. J'ai complété d'autre part cet état de l'art par un travail d'archives qui a porté essentiellement sur les revues scientifiques forestières. Ce travail s'appuie également sur quelques textes législatifs et politiques comme le code forestier de 1827, ou le discours du député Auguste Blanqui (1846) devant l'Académie des Sciences qui met en avant la nécessité d'effectuer les travaux de restaurations des territoires de montagnes.

³⁹ On peut se référer aux paragraphes de l'introduction générale de la thèse qui présentent plus en détail ces différents travaux.

Ce chapitre s'articule autour de trois mouvements. Le premier moment (fin XVIII^{ème} siècle – 1880) retrace la naissance de la science forestière allemande et sa diffusion en France par le corps forestier. A partir de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, les forestiers mettent en avant la nécessité des travaux de reboisement pour protéger les populations contre les inondations et la torrencialité. Ce discours constitue les prémisses d'une 'biologisation'⁴⁰ des forêts. Le deuxième moment (1880 – 1945) se concentre sur la création des stations de recherche et d'expérimentation qui matérialisent cette 'biologisation' des forêts. A partir de ce moment, la science forestière⁴¹ n'est plus le seul savoir scientifique à l'œuvre pour connaître les forêts, on assiste au développement des recherches forestières dont le corpus disciplinaire ne cesse de s'étendre (pédologie, phytosociologie, chimie des sols, etc.). Dans le dernier moment (1945-1970), l'Etat français entreprend une politique de modernisation des forêts à la sortie de la Seconde Guerre mondiale, c'est à ce moment que les concepts forestiers se formalisent comme la notion de « station forestière » ou la réalisation de tables de production pour la plupart des essences forestières françaises.

⁴⁰ Par 'biologisation', je renvoie au fait que les sciences des forêts ne vont plus seulement s'intéresser à la ressource en bois et aux préoccupations économiques, mais qu'elles vont également essayer de comprendre les rôles que les forêts jouent dans les cycles naturels, comme la purification de l'air, ou la stabilisation des sols, à partir d'un corpus disciplinaire qui s'étend avec l'intégration de la botanique, de la pédologie ou de la chimie.

⁴¹ Le terme 'science forestière' renvoie aux savoirs développés en Allemagne et en France qui sont l'objet de la première partie de ce chapitre. C'est la traduction du terme allemand *Forstwissenschaft*, la foresterie. Le terme 'sciences des forêts' renvoie, quant à lui, à l'ensemble des savoirs scientifiques qui prennent pour objet les forêts, et incluent donc, par exemple, la botanique, la phytosociologie, ou plus tard, l'écologie forestière.

I. Calculer et prévoir la ressource en bois : la science forestière et le corps forestier en France (fin XVIII^{ème}–1880)

La science forestière allemande émerge à la fin du XVIII^{ème} siècle, notamment en Prusse, et s'inscrit dans le développement des sciences camérales qui peuvent être définies comme une doctrine politique où l'Etat a un rôle moteur dans le soutien aux industries et aux banques, le développement d'infrastructures, promeut la modernisation de nombreux secteurs d'activités, et régule le commerce, l'agriculture et l'accès aux ressources naturelles (Barton, 2002, p.35). L'article d'Henry Lowood « The Calculating Forester » (1990) expose les principes de cette science, et constitue la base de travaux ultérieurs qui analysent la science forestière allemande comme le modèle d'un rapport calculatoire que l'Etat entretient avec ses ressources et ses richesses (Scott, 1998), ou qui voient dans la science forestière allemande les racines historiques du discours sur la gestion durable des ressources naturelles (Hölzl, 2010). Cette « foresterie rationnelle » est « fondée sur une conception itérative de la nature, se reproduisant uniformément, et dont on pouvait prédire avec certitude le futur » (Fressoz et Bonneuil, 2016, p.225). La science forestière du XIX^{ème} siècle se diffuse en France par l'intermédiaire des enseignements de l'Ecole Royale Forestière (ERF) et la presse forestière. Cette science forestière « rationnelle » s'inscrit plus largement dans le développement des statistiques et de la cartographie des ressources et des richesses de l'Etat, et vient légitimer une action volontariste de ce dernier sur la ressource forestière : le code forestier restreint les usages locaux et traditionnels des bois, au nom de l'intérêt général, pour favoriser la production forestière. Les discours sur le reboisement des territoires soumis à des risques naturels (affaissement des dunes dans les Landes, torrentialité et inondations dans les Alpes) reposent sur une conception interventionniste de l'Etat : la doctrine forestière française du XIX^{ème} siècle est « universaliste, centraliste et étatiste » (Kalaora et Savoye, 1986, p.17).

A. La science forestière à la fin du XVIII^{ème} siècle : quantifier et prévoir la ressource forestière

La science forestière se développe pour optimiser la production forestière, dans un contexte où la demande en bois de la part de l'industrie augmente, tandis que les surfaces boisées tendent à diminuer. Après la Révolution Française, on constate une situation de déprise forestière où les forêts représentent alors à peine 10% du territoire métropolitain (contre 30% à l'heure actuelle, d'après les chiffres publiés en 2019 par l'IGN)⁴².

1. « *Nos chênes ne rendent plus d'oracle* » ; quand le futur change de camp

Le développement de la science forestière traduit une nouvelle vision des forêts, une vision rationnelle et géométrique que l'écrivain Robert Harrison lie avec l'idéologie des Lumières. Pour ce dernier, l'article « FORET », rédigé par G. Le Roy, de l'*Encyclopédie* (1757) est symptomatique d'une nouvelle approche de la forêt qui repose sur « une science vraiment rigoureuse de la mesure et de la quantification » (Harrison, 1992, p.187). Cette approche rationnelle peut se résumer à cette citation de G. Le Roy :

« Nos chênes ne rendent plus d'oracles, et nous ne leur demandons plus le gui sacré ; il faut remplacer ce culte par l'attention ; et quelque avantage qu'on ait autrefois trouvé dans le respect qu'on avait pour les forêts, on doit attendre encore plus de succès de la vigilance et de l'économie » (Le Roy, 1757).

L'attitude mystique envers les forêts (le « culte », « l'oracle ») doit laisser place à une observation minutieuse (« l'attention », « la vigilance »). Cette connaissance des forêts (« instruction ») doit s'obtenir par « des expériences traditionnelles bien suivies », « par des observations faites dans beaucoup de bois et de terrains différents » (Le Roy, 1757). Ces éléments constituent les fondements de la science forestière : développer un réseau de placettes de suivi des forêts à l'échelle nationale, dans des contextes forestiers variés afin de mettre au point une information sur la ressource et prévoir son évolution. Enfin, cette gestion

⁴² On dit souvent que c'est ce contexte de déprise forestière qui aurait amené à la promulgation du code forestier, la création de l'ERF, et plus généralement la politique forestière interventionniste de l'Etat français au cours du XIX^{ème} siècle. Andrée Corvol (1987) nuance cette affirmation, et interprète le discours sur la déprise forestière comme un discours de légitimation de l'action de l'Etat. Pour l'historienne, il faut donc inverser le sens de la relation.

rationnelle des forêts repose sur un nouveau rôle conféré à l'Etat comme garant de l'intérêt public, dont la mission est d'assurer l'exploitabilité de la ressource forestière pour les générations futures. Le futur de la ressource nationale en bois devient alors la pierre angulaire de la politique forestière : « La vigilance publique est donc obligée de s'opposer à l'avidité mal entendue des particuliers qui voudraient sacrifier la durée de leur bois à la jouissance du moment ; elle est dépositaire des droits de la postérité ; elle doit s'occuper de ses besoins et ménager de loin ses intérêts » (Le Roy, 1757).

Les trois dimensions mentionnées ci-dessus – l'approche rationnelle et calculatoire de la ressource forestière, prévoir l'avenir de la ressource pour l'intérêt public et les générations futures, et enfin l'action « vigilante » et interventionniste de l'Etat – sont les fondements de la science forestière des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles. Les premiers travaux allemands de science forestière sont plutôt des initiatives individuelles. Certains propriétaires forestiers mènent des essais dans leurs forêts (coupes, éclaircies*) mais ce n'est qu'à partir de la fin du XVIII^{ème} siècle que sont créées les premières écoles forestières en Allemagne. Comme précurseurs de cette foresterie quantitative, Henry Lowood cite George Hartig (1764-1817), Johann Heinrich Cotta (1763-1844), Johann Hundeshagen (1783-1834) et Friedrich Pfeil (1783-1859). Il convient également de noter que certains scientifiques français comme le botaniste Henri Louis Duhamel du Monceau (1700-1782), qui a écrit un *Traité des forêts* (1755-1767), sont lus par les auteurs allemands comme Hartig et Cotta. Philibert Guinier, directeur de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF) de 1921 à 1941, écrit même que c'est avec Duhamel du Monceau que naît la science forestière (Guinier, 1952, p.X). Ses ouvrages sont traduits en allemand, et contribuent à la structuration de la science forestière outre-Rhin. Les ouvrages d'Hartig et de Cotta sont, à leur tour, traduits en français au début du XIX^{ème} siècle, et forment les contenus des premiers enseignements de l'Ecole Royale Forestière (ERF) de Nancy.

Pour Heinrich Cotta, la science forestière articule trois étapes successives (Barton, 1992, p.39-40). La première étape est l'inventaire forestier – « *geometric survey* » – qui consiste à fournir une information quantifiée sur l'étendue des forêts. La deuxième étape est le calcul des stocks de bois à l'échelle de l'arbre, du peuplement puis de la forêt. Enfin la dernière étape vise à intégrer le calcul du stock dans le budget de l'Etat : « Au bout du compte, le forestier caméraliste de Cotta lie le bilan forestier au budget monétaire en déterminant la

valeur du rendement »⁴³. Ainsi se développe une science basée sur deux pratiques centrales : inventorier la ressource et prédire son évolution. Cette approche quantifiée des forêts façonne les principes de la sylviculture* des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles. L'étude de Lowood met à jour trois règles sylvicoles – « *regulae sylviarum* » – qui orientent la science forestière : la « diversité minimale » – « *minimum diversity* » –, le « bilan comptable » – « *balance sheet* » – et la « coupe soutenable⁴⁴ » – « *sustainable yield* » (Lowood, 1990, p.333-340).

2. Transformer la forêt en chiffres

Le principe de « diversité minimale » va modeler le visage des forêts allemandes et françaises. Son application se traduit par la multiplication de forêts mono-spécifiques, c'est-à-dire composées d'arbres de même essence et de même âge. Son application n'a pas de raisons écologiques, mais pratiques : dans un premier temps, il s'agit d'optimiser l'inventaire forestier. Pour ce faire, on va partager la forêt à inventorier en un quadrillage composé de parcelles homogènes : la parcelle va être l'unité de mesure de base de la science forestière, l'unité à partir de laquelle on inventorie la forêt, on calcule et prédit son stock de bois. C'est aussi à cette échelle que l'on va mener les observations et expérimentations sylvicoles comme les coupes ou les éclaircies : « Minimiser la diversité de la nature et reconstruire la forêt pour rendre la vie plus facile aux forestiers et aux experts constituaient des arguments d'autorité typiques des écrits classiques de science forestière. »⁴⁵. Pour Lowood, le principe de « diversité minimale » repose sur une vision de la nature qu'il emprunte au forestier et savant allemand Johann Wilhelm Hossfeld :

« Selon lui, la Nature « ne procède pas par sauts », si bien que la multiplication d'une série de moyennes basées sur une ou deux caractéristiques facilement observables comme la hauteur d'un peuplement d'arbres est tout aussi juste que le travail laborieux que représente l'addition rigoureuse de tous les cas individuels »⁴⁶ (*Ibid.*)

⁴³ «Finally, Cotta's forester qua cameralist linked the forest balance sheet to the monetary budget by determining the value of the yield»(Lowood, 1990, p.330).

⁴⁴ J'ai fait le choix de traduire « *sustainable* » par « soutenable » au lieu de « durable ».

⁴⁵ «Minimizing nature's diversity and reconstructing the forest to make life easier for foresters and assessors were typical of the authoritative writings of the *Forstklassiker*»(Lowood, 1990, p.334)

⁴⁶ «Nature « makes no leap », he claimed, so that a series of multiplied averages based on one or two easily observed characteristics, such as the height of a stand of trees, is as good as an exact and painstaking summation of all the individual cases» (*Ibid.*)

« La Nature ne procède pas par sauts ». On peut la traduire en une quantité chiffrée que l'on peut calculer puis prédire, c'est le principe fondamental de la science forestière des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles. D'une part, on peut connaître le stock en bois d'une forêt entière en calculant le stock de chacune de ses parcelles ; du calcul du stock sur l'échantillon (la parcelle), on peut extrapoler le calcul du stock de l'ensemble (la forêt). Cette extrapolation est rendue également possible par le fait que le calcul concerne des forêts mono-spécifiques.

D'autre part, c'est sur ce modèle d'une forêt homogène et mono-spécifique que vont se construire les tables de production qui visent à estimer le volume potentiel d'une forêt en se basant sur les inventaires successifs réalisés sur les différentes parcelles, sur l'historique des coupes et des interventions sylvicoles. Les tables de production se présentent sous la forme d'un tableau (image 1) qui renseigne des informations caractéristiques d'un peuplement homogène dans un contexte écologique donné : l'âge, le diamètre, l'accroissement de la hauteur ou le volume de bois. Pour les construire, les forestiers relèvent à intervalles réguliers – tous les cinq ou dix ans – les informations nécessaires à la construction de la table sur une station* forestière donnée. Elles permettent ainsi d'estimer et de prévoir le volume de bois futur en comparant les données présentes et les données passées. Les tables de production ont d'abord été développées en Allemagne. Une recherche dans les archives de la presse forestière, permet de dater à 1869 à la première apparition du terme en France (Godchaux, 1869, p.459). Elles sont ensuite mentionnées régulièrement dans la presse forestière française. Elles sont également présentées dans le manuel d'*Economie Forestière* de 1904 de Gustave Huffel (1859-1935), alors directeur de l'Ecole National des Eaux et Forêts. Ce cours, notamment le tome 2, a constitué une des bases des enseignements en science forestière à l'Ecole (Huffel, 1904). Elles apparaissent régulièrement dans la presse forestière française spécialisée à partir de la moitié du XIX^{ème} siècle, mais ce n'est réellement qu'après la Seconde Guerre mondiale qu'elles commencent à être réalisées systématiquement en France pour les principales essences forestières (Decourt, 1999). A la structure tabulaire des tables de production (image 1) répond alors le nouveau visage des forêts, mono-spécifiques et ordonnées comme un échiquier.

A.— Table de production en matière et en argent dressée pour un hectare de taillis en chêne pur.

1	2		AC-CROIS-SEMENT		TAUX D'ACCROISSEMENT		7	8	9	10	11		12		TAUX de PLACE-MENT		15	16
	AGE DES BOIS.	VOLUME DU MATÉRIEL.	Annuel.	Moyen.	Courant.	Moyen.					DES REVENUS ANNUELS (9).	REVENU ANNUEL MOYEN.	Courant.	Moyen.	OBSERVA-TIONS.			
	m.c.	m.c.	m.c.	p. 100.	p. 100.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	p. 100.	p. 100.	fr.				
2	6	3	3	100	200	2	506	6	1006	12	6	1.2	1.2	6	(3-6) On n'a			
4	14	4	3.5	40	77	2.2	521	10	2039	31	8	1.9	1.5	7	pris en considé-			
6	23	5	3.8	27	46	2.5	543	14.3	3113	57	9	2.6	1.8	9	ration dans ces			
8	33	5	4.1	18	33	2.7	573	16.3	4244	89	11	2.8	2.1	10	colonnes que le			
10	44	6	4.4	15	26	2.9	606	21.2	5439	128	13	3.5	2.3	11	matériel aérien			
12	57	7	4.8	14	21	3.2	652	30.9	6719	182	15	4.7	2.7	13	et non les sou-			
14	71	7	5.1	11	18	3.6	718	38.0	8119	256	18	5.3	3.1	15	ches.			
16	84	7	5.3	7.7	16	4	796	42.4	9671	338	21	5.5	3.5	17	(10) La valeur			
18	97	6	5.4	6	14	4.4	882	44.6	11391	427	24	5.1	3.8	19	du sol a été fixée			
20	108	6	5.4	5.3	12	4.8	974	47	13292	521	26	4.8	3.9	19	à 500 francs avec			
22	119	5	5.4	4.4	11	5.2	1070	46.4	15383	616	28	4.3	4.0	20	le taux de 4 pour			
24	129	5	5.4	4	9.3	5.5	1163	46.1	17662	709	30	4.0	4.0	20	100.			
26	139	5	5.3	3.6	8.4	5.8	1257	47.9	20129	805	31	3.8	4.0	20	(15) La rente			
28	148	5	5.3	3.5	7.7	6.1	1354	46.6	22788	900	32	3.4	3.9	19	nette s'obtient en			
30	157	4	5.2	3.1	7.1	6.3	1446	43.6	25634	990	33	3.0	3.9	19	retranchant de la			
32	166	4	5.2	2.5	6.5	6.5	1534	44.1	28658	1078	34	2.9	3.8	19	rente brute les			
34	174	4	5.1	2.4	6.0	6.7	1622	43.8	31486	1166	34	2.7	3.7	18	dépenses annuel-			
36	182	4	5.1	2.2	5.6	6.9	1710	45.4	35234	1256	35	2.7	3.6	18	les d'entretien			
38	190	4	5	2.2	5.3	7.1	1802	47	38792	1346	35	2.6	3.5	17	diminuées du			
40	198	4	4.9	2.1	5	7.3	1897	48.6	42538	1445	36	2.6	3.4	17	montant des pro-			
															duits accessoires.			

Image 1 : Table de production pour un peuplement en taillis de chênes purs (Vaulot, 1882, p.522)

Tout à gauche du tableau est noté l'âge de l'essence, ici le chêne pur, auquel correspond un volume de bois moyen. A partir de ces données, du taux d'accroissement moyen, et annuel, qui est fixe pour une essence forestière selon un traitement sylvicole donné, ici le taillis, et du prix du bois, on peut déterminer la valeur monétaire de la ressource en bois d'une forêt.

Le principe de « diversité minimale » oriente donc tout autant la science forestière que la sylviculture, et transforme la forêt jardinée et composée d'espèces forestières diverses en forêts mono-spécifiques, quadrillées, homogènes et propices à la mise en calcul du forestier. Dans cette perspective, l'objectif de la science forestière est de créer des standards, des valeurs uniques qui vont permettre la conversion de la forêt en stock de bois, puis de convertir ce stock en valeur monétaire sur laquelle on peut appliquer le calcul fiscal. Cette chaîne de conversion repose sur une transformation de la nature en chiffres, et s'inscrit plus

généralement dans les sciences camérales, et plus particulièrement dans le développement d'une 'biopolitique' de la ressource forestière.

3. La 'forêt normale' comme objectif de gestion

Le deuxième principe de la science forestière est la conversion du stock de bois en « bilan comptable » afin de fournir une information constante sur la ressource forestière qui peut être traduite en termes monétaires pour faciliter le prélèvement fiscal opéré par l'Etat. L'administration forestière allemande procède alors à l'inventaire de la ressource qui vise à faire coïncider le mieux possible besoins en bois et production de la ressource pour optimiser une gestion forestière en fonction, notamment, des besoins des industries consommatrices de bois comme la métallurgie, la sidérurgie, le secteur de la construction, ou la marine.

Enfin le dernier principe est celui de la « coupe soutenable » qui repose sur une vision patrimoniale et nationale de la ressource forestière : permettre aux générations futures de pouvoir jouir de la ressource en bois – cette dimension est déjà présente dans l'article de Le Roy (1757). Elle s'appuie également sur une vision économique de la ressource forestière : permettre une production annuelle et constante de bois. On va alors diviser la forêt en un nombre prédéfini de « zones de coupe » (« *cutting areas* ») à partir desquelles on va pouvoir récolter un nombre précis et constant de bois par an. Lowood cite Hartig : « toujours livrer le plus grand volume constant de bois possible »⁴⁷. La « coupe durable » est un principe économique de la gestion de la ressource forestière, elle doit permettre l'approvisionnement constant de bois pour l'industrie et les secteurs stratégiques de la puissance de l'Etat (l'armée, la construction). C'est dans cette notion que Richard Hölzl voit les prémisses de la notion de soutenabilité :

« Dès lors, [le terme] « soutenable » ne désigne pas simplement une production de bois portée à son plus haut rendement mais plutôt toute politique [de gestion] qui rapproche la forêt des idéaux décrits dans le plan de gestion. La manière dont la soutenabilité est comprise dépend de plus en plus des logiques internes de la gestion forestière en tant que sous-discipline de la foresterie scientifique »⁴⁸ (Hölzl, 2010, p.445)

⁴⁷“always deliver the greatest possible constant volume of wood” (Lowood, 1990, p.338)

⁴⁸“‘Sustainable’ now meant not merely the highest production of wood, but rather any policy that brought the actual forest closer to the ideal states described in the management plan. How sustainability was understood depended increasingly on the internal logics of forest management as a sub-discipline of scientific forestry” (Hölzl, 2010, p.445)

« Les idéaux décrits dans le plan de gestion » correspondent à ce qu'on appelle la 'forêt normale' – « *der Normalwald* » – qui renvoie aux manières dont la science forestière inventorie, calcule et prédit la ressource forestière :

« *Normalwald* (ou Forêt Normale) : une forêt normale est une forêt idéale composée de peuplements de même âge et de densité adéquate dont la répartition est équilibrée selon les classes d'âge. Le nombre de peuplements est fonction de la durée des rotations, étant donné que chaque année, une classe d'âge est coupée et renouvelée. En partant de l'hypothèse que le mélange d'essences, les qualités du site, et les qualités et densités des arbres sont similaires, la forêt normale a un accroissement et un volume constants et assure un approvisionnement continu en bois »⁴⁹ (Puettmann, Coates et Messier, 2009, p.5)

La 'forêt normale' est la forêt qui se matérialise dans le quadrillage des parcelles, dans l'application du principe de rotation des coupes (chaque année, on récolte une parcelle différente), dans le développement des tables de production, et dans la généralisation de la forêt mono-spécifique. La 'forêt normale' est un principe de gestion qui devient un objectif de gestion. On perçoit alors l'entrelacement des dimensions descriptives et prescriptives de l'information forestière. La sylviculture rationnelle va tendre à imposer le modèle de la 'forêt normale' : la forêt mono-spécifique :

« En conséquence d'un tel raisonnement, et jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle qui marque l'émergence de nouvelles philosophies, la science forestière s'est concentrée sur la régulation de la nature en fonction des classes d'âge et des masses de bois pour élaborer, à terme, la « forêt normale ». Cela s'est traduit physiquement par la création de forêts mono-spécifiques équiennes. De fait, l'« arbre normal » était passé de l'abstraction à la réalité »⁵⁰ (Barton, 2002, p.43)

La volonté d'optimiser la production en bois tend alors à généraliser l'exploitation de la forêt en futaie. En matière d'aménagement, on distingue traditionnellement deux régimes : le régime du taillis et le régime de la futaie, la différence porte sur la manière dont se fait la régénération du peuplement. Dans le régime du taillis, après la coupe, on plante les arbres à

⁴⁹“Normalwald (or Normal Forest): A normal forest is an idealized forest composed of even-aged, fully stocked stands with a balanced age-class distribution. The number of stands is a function of rotation length, as one age class is harvested and regenerated each year. Under the assumptions of similar species mixtures, site qualities, and tree densities and qualities, the normal forest has constant increment and volume and provides for a continuous supply of wood” (Puettmann et al., 2009, p.5)

⁵⁰ “As a consequence of such reasoning, *Forstwissenschaft*, through to the late nineteenth century, when new philosophies emerged, concentrated on regulating nature according to age classes and wood masses, aiming, ultimately, to construct the « normal forest ». The physical result was the creation of monocultural, even-aged forests. The *Normalbaum* had, in effect, transformed from abstraction to reality” (Barton, 2002, p.43)

partir des rejets de tiges, ou des souches, ce qu'on appelle la régénération végétative. Dans le régime de la futaie, c'est à partir des graines, de semis, que l'on plante que l'arbre va croître. Aussi, les deux régimes se différencient sur la longueur du cycle forestier ; sous le régime de taillis, le forestier coupe plus et donc le peuplement croît moins longtemps, alors que sous le régime de la futaie, on privilégie le temps long, on attend que les arbres croissent jusqu'à leur hauteur optimale pour le stock de bois. Le régime de la futaie va généraliser une gestion forestière qui laisse les arbres atteindre leur taille adulte (entre 80 et 120 ans selon les espèces forestières). Ce sont dans les années 1820 que sont entrepris les premiers travaux de conversion des taillis en futaie (Plaisance, 1966) notamment sous l'impulsion de Bernard Lorentz (1774-1865) qui a été le premier directeur de l'Ecole Royale Forestière. Le concept de « coupe soutenable » en généralisant le régime de la futaie introduit alors le temps long dans la gestion forestière, et donc la notion d'avenir de la ressource. Mais cette temporalité introduite ne fournit qu'une image unidimensionnelle du futur : la prédiction du stock de bois.

B. Les outils de la politique forestière française : le code, l'administration et la presse forestières

L'Etat français n'intervient qu'épisodiquement pour gérer les forêts jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle qui correspond à la création de l'« Etat forestier » (Buttoud, 1983). On peut certes faire remonter la première « politique forestière » à l'époque de Colbert (ordonnance de 1669) dans un contexte politique et économique marqué par le mercantilisme : il faut une politique volontariste de l'Etat pour permettre le développement de l'économie nationale, et notamment de son commerce extérieur. A cette époque, le bois est une ressource stratégique essentiellement pour des raisons militaires (navires de guerre). L'accès aux bois fait l'objet de lois successives (Corvol, 1987). On distingue par exemple les « droits d'affouage communaux » qui concernent les habitants de la commune en question qui peuvent utiliser le bois ou céder leurs droits d'utilisation, des « droits d'usages ordinaires » où le seigneur, par l'intermédiaire d'un contrat, autorise l'utilisation des bois par ses sujets. La Révolution Française met fin à cette organisation et amène un morcellement de la propriété forestière. C'est dans ce contexte, également marqué par une situation de déprise forestière qu'est promulgué le code forestier qui instaure le régime forestier qui régleme la production de bois et l'usage des forêts.

1. Le code forestier : régler les usages des bois

L'historienne Andrée Corvol (1987) a insisté sur la nouveauté du recul de la surface forestière de cette époque. Elle a montré que si la forme de la forêt française évolue pendant les siècles précédents, cette évolution ne concerne que les reins (les bords) des forêts qui régressent quand la population augmente, et s'accroissent en période de guerres. A partir du milieu du XVIII^{ème} siècle la France va connaître une expansion démographique forte et continue qui amène une régression de la surface forestière. A cela s'ajoute un morcellement de la propriété forestière causée notamment par les différents régimes politiques qui marquent l'évolution de l'Etat Français de la Révolution Française⁵¹ à la Restauration, puis au Second-Empire. C'est dans ce contexte qu'apparaissent les premières réalisations d'une politique forestière nationale avec, notamment, la création du code forestier de 1827.

L'Etat français justifie son action juridique sur les forêts en faisant appel au principe d'intérêt général et à la logique patrimoniale : il faut réguler l'usage et la gestion des forêts pour garantir la survie de l'Etat et de son économie – cette vision physiocratique des ressources naturelles est déjà à l'œuvre dans la célèbre citation de Colbert : « La France périra faute de bois ». C'est dans cette optique qu'est promulgué le code forestier de 1827 qui a pour objectif de cadrer juridiquement les usages de la forêt, et de définir l'autorité de l'administration forestière sur la gestion du patrimoine forestier. Le code forestier refonde alors l'administration forestière et définit son territoire juridique et économique d'action. L'administration forestière avait été créée au XIII^{ème} siècle par Louis VII, c'étaient les « Maîtres Eaux et Forêts » qui étaient en charge d'administrer les forêts royales, les forêts des grands princes et les forêts des ecclésiastiques. Ils deviennent « Grandes Maîtrises des Eaux et Forêts » en 1575. Ces Maîtrises sont supprimées à la Révolution Française qui met fin au système des corporations. Les corporations sont considérées par l'idéologie de la Révolution Française comme un frein au progrès économique et social. Il s'agit de libéraliser l'accès au métier. L'administration forestière est donc refondée en 1824 et le recrutement des ingénieurs se fait par un concours d'entrée. L'administration forestière n'est plus une charge héréditaire comme c'était le cas auparavant (Huffel, 1929).

⁵¹ Avec la nationalisation des biens d'Eglise et les forêts royales qui deviennent des forêts d'Etat, on assiste à la création de ce qu'on nomme aujourd'hui les forêts domaniales, les forêts de l'Etat gérées par l'ONF qui constituent un tiers de la surface boisée du territoire français.

Le code forestier marque la création d'un « régime forestier » (Baudrillart, 1827, p.7) : il définit les usages et l'exploitation des différents types juridiques de forêts : forêts d'Etat, forêts domaniales, forêts communales et forêts privées. Le code forestier définit un ensemble d'autorisations et d'interdits : il fixe des taux d'exploitation et réserve des parties du patrimoine forestier pour des secteurs stratégiques, ce sont les « affectations spéciales des Bois à des services publics » : la Marine et les Pont et chaussées (*Ibid.*, p.43). Le corps forestier est en charge de faire respecter les dispositions du régime forestier et détient le pouvoir de sanctionner tous les usages déviants définis par le code forestier qui ne concernent pas seulement la coupe et l'utilisation du bois mais aussi d'autres usages qui peuvent être faits de l'espace forestier. Plusieurs articles du code sont consacrés par exemple au transit du bétail. Ces nombreuses interdictions précisées par le code forestier fait dire à Gérard Buttoud que la fonction de l'administration forestière est « essentiellement répressive » (Buttoud, 1998, p.47). Le « régime forestier » dépasse la simple réglementation de l'utilisation du bois et concerne la forêt comme espace multiple aux fonctions diverses. Ainsi, le corps forestier détient l'autorité juridique sur la gestion des forêts.

L'administration forestière acquiert alors une fonction de police qui vise à encadrer les usages des bois pour permettre leur exploitation rationnelle afin d'optimiser la ressource forestière à l'échelle nationale. Les mesures coercitives contraignent les usages locaux qui relèvent alors, notamment dans les massifs montagneux, du système traditionnel agro-sylvo-pastoral. La promulgation du code forestier fait alors l'objet de vives contestations dans les villages qui ont adopté ce modèle de développement. On peut citer, par exemple, la Guerre des Demoiselles (1829-1832) qui a eu lieu en Ariège, et qui tire son nom du fait que les rebelles s'étaient grimés en femmes pour attaquer par surprise les gardes forestiers, réactivant ainsi une tradition carnavalesque. Cette révolte perdure pendant trois ans, avant que le code forestier ne soit abrogé en Ariège. Restreindre l'usage des forêts par les communautés locales au profit de l'intérêt général légitime la promulgation du code forestier, mais également les travaux de reboisements en Gascogne, puis, les lois sur le reboisement dans les territoires montagneux de 1860 et 1882, comme on le verra par la suite. Ainsi, le « code forestier », dès ses débuts, soutient des travaux d'ordonnancement des forêts, notamment dans des espaces dégradés ou à risque : « ce socle législatif et réglementaire confère autorité aux représentants techniques de l'administration forestière qui s'imposent comme les garants de l'intégrité du patrimoine forestier national. Ainsi, à ses origines, la vocation de la politique forestière n'est pas directement de favoriser les activités productives mais au contraire de soustraire la forêt à

leur appétit et d'engager un programme de restauration des espaces dégradés par des siècles anarchiques » (Bouleau et al., 2016, p.8).

2. L'Ecole Royale Forestière et la presse forestière : formaliser et diffuser les principes de la science forestière

Le domaine d'expertise fixé par le code forestier pour l'administration forestière est essentiellement économique et juridique, concernant la propriété des forêts et l'exploitation et la vente de bois ; comme en témoignent les premiers enseignements dispensés à l'Ecole Royale Forestière (ERF) : des cours d'« économie forestière » et de « jurisprudence forestière ». La création de l'Ecole Royale Forestière et de ses archives permet la centralisation et la médiation de savoirs issus de la science forestière allemande. Dans cette optique, l'Ecole Royale Forestière constitue autant un centre de formation qu'un centre de capitalisation et de diffusion des savoirs utiles à la gestion des forêts. Ces savoirs visent à produire la statistique forestière (information forestière) et orienter l'exploitation des forêts par la prévision de la ressource. Ils témoignent plus généralement d'un nouveau rôle joué par l'Etat dans la connaissance et la mise en ordre de la nature et de son territoire. La science forestière peut être vue, pour l'anthropologue James C. Scott (1998, p.21), comme la « parabole » d'un nouveau rapport que l'Etat moderne entretient avec son territoire :

« Une fois que nous avons vu comment la simplification, la lisibilité et la manipulation fonctionnent dans la gestion des forêts, nous pouvons étudier comment l'Etat moderne applique une approche similaire à la planification urbaine, à l'aménagement rural, à l'administration des terres et à l'agriculture »⁵² (*Ibid.*)

Les outils législatifs, code forestier et lois sur le reboisement, peuvent donc être interprétés comme des dispositifs dont l'Etat use pour asseoir sa 'biopolitique' des forêts. Cette dernière s'appuie sur un autre élément fondamental, et lié aux outils législatifs : le développement de la science et de la presse forestière qui s'inscrivent, plus généralement, dans l'émergence des statistiques d'Etat. Savoir (inventaire, statistique et presse forestière) et pouvoir (code forestier et lois sur le reboisement) sont les deux faces d'une même biopolitique des forêts françaises.

⁵² "Once we have seen how simplification, legibility, and manipulation operate in forest management, we can then explore how the modern state applies a similar lens to urban planning, rural settlement, land administration, and agriculture" (Scott, 1998, p.21)

La presse forestière française spécialisée se développe au début du XIX^{ème} siècle. En 1801 est publié le *Mémorial Forestier* de Goujon dont la publication est reprise dans les premières *Annales Forestières* (1808-1816) fondées par le forestier Jacques-Joseph Baudrillart (1774-1832). Dans ce mémorial, l'auteur « se contenta de faire un recueil de tous les arrêtés ministériels, décisions du Directeur général, arrêtés de jurisprudence et circulaires administratives, publiés dans l'année » (Viney, 1956). Ainsi, à ses débuts, la presse forestière concerne essentiellement les domaines de l'économie, de la jurisprudence, et de la statistique, au sens de la production d'informations utiles à l'Etat dans sa pratique de gouvernement de sa population, de son territoire et de ses ressources.

Le premier numéro des *Annales Forestières* (1808) est particulièrement éclairant pour comprendre le contexte politique général dans lequel elles se développent. Les *Annales Forestières*, nouvellement créées, visent à diffuser les textes de loi, les décrets et les circulaires de l'administration forestière. Elles se structurent autour de deux parties : « la partie réglementaire aura quatre sections ; savoir : 1° Législation ; 2° Jurisprudence ; 3° Dispositions administratives ; 4° Explications » (*Annales Forestières*, 1808, p.6). Cette première section recoupe les fonctions d'administration et de police du corps forestier. La seconde section est « la partie économique : 1° Statistique forestière ; 2° Améliorations » (*Idem*). La « Statistique forestière » est « ce qui (en commençant par les plus importantes), peut faire connaître leur état ancien et leur état actuel, les travaux qui y ont été récemment exécutés, ou ceux dont la confection aura été nouvellement donnée » (*Ibid.*). Ici, le sens statistique prend le sens d'information forestière: information sur l'état passé et actuel, mais également sur l'historique des travaux forestiers réalisés ou en cours de réalisation. La réalisation de ces informations forestières, département par département, s'appuie, en fait, sur la *Description Statistique et topographique de la France*, réalisée en 1807 par Peuchet et Chanlaire. Les auteurs ont proposé, pour la première fois, département par département, une centralisation des informations topographiques et statistiques pour le territoire français. Ce travail s'appuyant sur le nouveau cadastre napoléonien de 1807 vise à noter, pour chaque département : « situation, limites, origine du nom, sol, montagnes, forêts, rivières et canaux, grandes routes, antiquités, productions, commerce, industrie, étendue, population, divisions politiques, militaires, administratives, ecclésiastiques, etc... » (Peuchet et Chanlaire, 1807, p.5). Plus loin, les auteurs détaillent l'objectif de ce travail : « faire connaître non seulement aux Français, mais encore aux étrangers, l'étendue, la richesse et la beauté de l'Empire »

(*Ibid.*). On note ici la perspective physiocratique de l'ouvrage. *Les Annales de 1808* se réfèrent également à d'autres revues : *Le journal des Mines*, *Le Recueil Polytechnique*, *les Annales des arts et manufactures*. L'information forestière produite dans le cadre des *Annales Forestières* s'inscrit alors dans une perspective plus large de connaissance de la richesse de l'Etat. C'est d'ailleurs l'objectif affiché par les nouvelles *Annales* dont la publication recommence en 1842 : « Leur premier objet, leur premier caractère, sera d'établir un lien commun, une correspondance naturelle entre tous les hommes intéressés à quelque titre que ce soit, au même but, la prospérité des forêts » (*Annales Forestières*, 1842, p.5). La mention de la « prospérité des forêts » est un nouveau témoin de cette biopolitique naissante qui se consolide avec les travaux de reboisements effectués à partir du milieu du XIX^{ème} siècle.

C. Les dimensions politiques et « écologiques » du discours sur le reboisement (1800-1880)

Les principes de sylviculture mis en avant par l'Ecole façonnent le visage des forêts françaises, comme c'est le cas du concept de 'forêt normale'. La futaie fait reculer la forêt paysanne, les arbres croissent plus longtemps, les forêts commencent à prendre la forme des forêts de production d'aujourd'hui. Si ces modifications concernent l'ensemble des forêts métropolitaines, deux territoires marginalisés font plus particulièrement l'objet de l'intervention des forestiers : ce sont les travaux de reboisement des dunes littorales de Gascogne qui commencent en 1817 et les restaurations des territoires de montagnes (RTM) qui débutent dans les années 1860. Suite à des déboisements intensifs dans ces zones qui sont liés à l'extension des pratiques agricoles et d'élevage, les dunes risquent de s'effondrer, les inondations et les écoulements de boue en zone de montagne risquent d'augmenter. C'est dans ce contexte que sont décidés ces deux travaux de reboisement. Deux lois successives – 1860 et 1882 – cadrent les reboisements des territoires de montagnes, et introduisent « une gestion étatique de l'espace montagnard » (Kalaora et Savoye, 1986, p.23). Les ingénieurs des Ponts et Chaussées ont alors la mission de délimiter les territoires à reboiser et les ingénieurs des Eaux et Forêts effectuent les travaux (Griset, 2011). Ces travaux de reboisements sont alors une manière pour ces deux corps d'affirmer leur autorité technique et scientifique sur les problématiques de risques naturels, de déforestation et de reboisement.

Les travaux de reboisement et de restauration ont fait l'objet de plusieurs études, notamment celle de Kalaora et Savoye (1985), et plus récemment l'ouvrage de Decocq et ses coauteurs *La Forêt Salvatrice* (2016). Ces différentes études ont mis en avant deux dimensions dans lesquelles s'inscrivent ces travaux, et les discours qui les supportent et les légitiment. Les travaux de reboisement s'inscrivent dans une dimension politique : une doctrine étatiste qui insiste sur le rôle de l'Etat comme garant de la sécurité de ses populations. Puis, les discours sur le reboisement s'appuient sur des travaux en hydrologie – notamment ceux de l'ingénieur des ponts et chaussées Alfred Surrell (1813-1887) – et des travaux sur le climat – ceux de Charles Fourier (1772-1837) – qui insistent sur le rôle bénéfique que la forêt joue dans l'équilibre des cycles naturels, la régulation des températures ou la purification de l'air. C'est le rôle « salvateur » joué par la forêt qui symétriquement envisage le déboisement comme une catastrophe.

1. Une politique étatiste de reboisement

Le développement de la science forestière, les créations du code forestier et de l'Ecole Royale Forestière peuvent être interprétés comme l'affirmation de la puissance et du contrôle de l'Etat sur ses forêts : c'est la « vision de l'Etat » (Scott, 1998) dont la science forestière peut être vue comme une parabole. Dans la première moitié du XIX^{ème} siècle, l'Etat français est confronté à de nombreuses inondations et crues, dont il a la charge de payer les réparations. Par exemple, l'inondation de 1840 aurait causé plus de « 4 millions de francs de pertes » (Corvol, 1987, p.312). C'est à la suite de ces nombreux désastres que le député Adolphe Blanqui (1798-1854), alors membre de l'Académie des sciences morales et politiques et de la « commission de reboisement instituée par ordonnance royale de décembre 1845 », prononce devant l'Académie son rapport intitulé *Du Déboisement des Montagnes* (Blanqui, 1846). Il y dépeint une situation presque apocalyptique dans les territoires montagnards du Sud-est de la France qui présentent « l'image de la désolation et de la mort » (*Ibid.*, p.24-25). Ces territoires, soumis à des aléas naturels catastrophiques (crues, inondations, torrencialité), sont alors vus comme isolés du reste de la communauté nationale, et donc de la civilisation : « N'est-ce pas une situation digne d'intérêt que celle de ce peuple vivant de la vie primitive, à quelques lieues de la civilisation la plus raffinée ? Et n'a-t-il pas droit d'attendre qu'un jour quelque rayon de justice distributive du pays pénétrera jusqu'à lui ? » (*Ibid.*, p.35). Cette « justice distributive du pays », c'est l'action de l'Etat qui doit se

montrer garant de la sécurité de la population de son territoire. Les travaux de reboisement sont alors légitimés par la convocation des idées d'intérêt général et de solidarité de la communauté nationale. Pour ce dernier, seul l'Etat a la puissance de mener les travaux nécessaires afin d'éviter ces catastrophes et permettre de réintégrer ces territoires dans la communauté nationale : « L'Etat, qui dure, a seul le pouvoir de créer les choses durables. Dans les Alpes, plus qu'ailleurs, lui seul est capable de se mesurer avec la nature ennemie, avec l'espérance de la dompter » (*Ibid.*, p.61).

Quels vont être les ressorts de l'action de l'Etat ? Pour les comprendre, il faut s'intéresser à la cause mise en avant par Blanqui : « L'abus du droit de propriété déborde ici de toutes parts », disait naguère l'honorable préfet d'un de ces départements à son conseil général, et il avait raison. C'est par là qu'il faut commencer la restauration des Alpes » (*Ibid.*, p.48). Pour Blanqui, comme pour les forestiers du XIX^{ème} siècle (Decocq, Kalaora et Vlassopoulos, 2016), ce sont les populations agro-sylvo-pastorales qui sont vues comme les « boucs émissaires » des inondations et de la torrentialité, car leurs pratiques, vues comme « archaïques », amènent une déforestation progressive au profit de l'extension des cultures et de l'élevage. A ces pratiques jugées archaïques, renforcées progressivement depuis le début du XIX^{ème} siècle par l'extension de la privatisation des forêts, il faut y substituer une action volontariste de l'Etat en matière de reboisement qui doit forcément s'accompagner par une expropriation de ces communautés : « Il faut que la loi substitue son intelligence et sa volonté à l'insouciance et à l'aveuglement du plus grand nombre ; il faut qu'elle mette un frein à la cupidité qui déboise, comme elle défend un imprudent de mettre le feu à sa propriété, afin de préserver de l'incendie la propriété de son voisin » (Blanqui, 1846, p.48-49).

Ainsi, le discours sur le reboisement est un discours politique qui, au nom de l'intérêt général, condamne les pratiques traditionnelles des populations agro-sylvo-pastorales des Alpes. Pour que l'Etat puisse opérer les travaux de reboisement, il faut d'abord proposer des mesures coercitives afin de faire cesser ces pratiques. C'est la loi de 1860 sur le reboisement qui permet au forestier de cantonner les populations locales à un territoire, voire de les exproprier. Cette loi « extrêmement contraignante et autoritaire, votée au nom de l'intérêt général contre les intérêts particuliers, exprime parfaitement les choix du Corps forestier » (Kalaora et Savoye, 1986, p.17). L'identification des territoires à risque de torrentialité et leur intégration au régime forestier (qui empêche alors l'utilisation des bois par les communautés traditionnelles des Alpes) provoque de nombreuses révoltes dans les territoires concernés

comme en Savoie à Jarrier. Tamara Whited brosse un tableau de cette gestion étatique des forêts et des révoltes qu'elle a pu causer au cours du XIX^{ème} siècle (Whited, 2000). Kalaora et Savoye montrent que la doctrine officielle des forestiers du XIX^{ème} est celle de Blanqui : un discours étatiste qui reboise au nom de l'intérêt général, et au détriment des communautés locales. C'est l'image de la « Sève de Marianne » (Decocq, Kalaora et Vlassopoulos, 2016, p.7).

Ce discours dominant s'oppose, notamment, à celui de Frédéric Le Play, auteur *Des Forêts* (1847) qui considère les forêts non comme un « équipement » ou une « infrastructure » relié au territoire national, mais comme un « milieu » social. Les forêts ne sont pas vues comme une simple ressource en bois, ou comme un ouvrage naturel de protection des populations contre les catastrophes naturelles, mais elles sont un milieu environnemental et social où leur visage est autant façonné par leur dynamique biologique que par les sociétés qui y vivent. La vision le playsienne ne s'impose pas à la doctrine forestière, même si elle a sûrement contribué à opérer une inflexion entre la loi de 1860 et celle de 1882 qui accorde plus de place aux droits des populations locales montagnardes. Decocq et ses coauteurs (2016, p.10) résume avec une concision le discours des forestiers du XIX^{ème} sur les reboisements et la forêt :

« Les forestiers du XIX^{ème} s'inscrivent dans une perspective capitaliste, de préférence étatique plutôt que libérale, la forêt étant vue comme une infrastructure permettant de lutter contre les inondations et les érosions et, donc, facilitant les communications et l'expansion des échanges économiques. Le discours environnemental, de fait, inscrit la forêt dans la modernité, la sylve devient un des éléments moteurs du progrès, de la modernisation. Par sa présence, elle diminue les risques et protège le développement des aléas naturels, elle contribue à la croissance économique et au désenclavement des régions de montagne difficiles d'accès. Pour que ce processus de rationalisation puisse se déployer en toute liberté, il revient aux hommes éclairés, dans un même mouvement, d'assujettir les forces de la nature et le monde pastoral dont la barbarie est l'équivalent social du naturel non maîtrisé. La perspective développée est celle de la domestication de la nature et de sa maîtrise par l'aménagement rationnel, scientifique et technique, la conservation et la restauration du couvert végétal s'inscrivant dans ce processus de rationalisation. Il n'y a pas de remise en cause du processus de modernisation et de prise de conscience des effets pervers qu'il induit par le déploiement de nouvelles activités »

Dans la pensée des forestiers du XIX^{ème} siècle, la forêt est une « infrastructure » nécessaire au développement économique et social du pays. La forêt se construit alors comme une infrastructure par un processus de rationalisation qui vise à rendre homogènes et standardisés le territoire et la société : les forêts et les populations agro-sylvo-pastorales. Cette vision de la

forêt comme une infrastructure du territoire national qui concourt à sa modernisation s'inscrit dans la « pensée calculatoire » des infrastructures, telle qu'elle a été mentionnée par Ashley Carse (2017) dans son article déjà cité lors de l'introduction générale. La forêt est une « infrastructure » sous la coupe du ministère de l'économie jusqu'en 1881. Les forestiers ne sont pas des « défenseurs de la cause environnementale. Ce sont des acteurs de la modernité mus par la croyance en la rationalité et la maîtrise de la nature » (Decocq, Kalaora et Vlassopoulos, 2016, p.122). Néanmoins, le discours sur le reboisement s'appuie sur des travaux scientifiques qui mettent en avant le rôle joué par les forêts dans l'équilibre des cycles naturels. Ce sont les ressorts « écologiques » du discours des forestiers.

2. La forêt : gardienne de l'équilibre des cycles naturels

Deux théories mettent en avant le rôle 'global' joué par les forêts : Alexandre Surrell, dans son *Etude sur les torrents des Hautes Alpes*, lie les inondations et la déforestation, reprenant notamment à son compte les travaux de François Antoine Rauch. Son étude « ébranla l'opinion publique, et [...] devint la doctrine officielle de l'administration forestière » (*Ibid.*, p.75). L'autre théorie est celle de la « dessication » : « le déboisement est la cause de l'assèchement de l'atmosphère et de la terre et, inversement, que le reboisement favorise l'augmentation des pluies » (*Ibid.*) Comme le notent les auteurs, on retrouve cette théorie dans le livre précurseur de la cause environnementale aux Etats-Unis, *Man and Nature*, de G. P. Marsh. Les auteurs notent également l'influence de deux filiations : la filiation hygiéniste met en avant le rôle des forêts dans la purification de l'air – au début du XIX^{ème} siècle apparaissent notamment les « Tableaux topographiques et médicaux »⁵³ qui établissent une relation entre « milieux physiques » et « état sanitaire de la population » ; la filiation utopique – représentée notamment par l'ingénieur des Ponts et chaussées François Antoine Rauch qui publie en 1802 *Harmonie hydro-végétale et météorologique* où il défend l'idée que l'homme doit œuvrer pour « maintenir la constance des choses » : « dans cette perspective, le reboisement, c'est revenir à l'état d'harmonie universelle » (*Ibid.*). Ces différentes théories et filiations mettent en scène une image de la forêt différente de celle de la science forestière. La forêt n'est plus seulement envisagée comme une ressource en bois, mais elle joue un rôle important dans l'équilibre de la nature, elle agit sur le climat, sur l'air, sur l'eau.

⁵³ On peut situer ainsi dans ces travaux les origines des liens entre forêts et santé (ici par le prisme de la conception hygiéniste) qui n'est donc pas nouvelle en France, ou en Europe par le biais de la « sylvothérapie »

Cette nouvelle dimension de la forêt est fondamentale pour deux raisons. Premièrement, ces rôles joués par la forêt sont compris à une échelle plus grande que celle du simple peuplement ou massif forestier. La déforestation a des conséquences sur le climat global. C'est d'ailleurs ce rôle qui est à l'origine de l'enquête de 1821 demandée par le ministre de l'Intérieur français suite au « terrible hiver de 1820-1821 », on y soupçonne un rôle joué par la déforestation (Fressoz et Locher, 2010). Une année plus tard, Charles Fourier publie *De la détérioration matérielle de la planète*, où il « dresse le diagnostic du déclin de la santé du globe » dont la cause est la déforestation. Pour les sociologues et historiens du changement climatique, S. Aykut et A. Dahan-Dalmedico, Fourier et sa théorie de la déforestation est l'un des précurseurs du « régime climatique » (Aykut et Dahan-Dalmedico, 2014, p.60). La forêt apparaît alors comme un 'enjeu global' ; le déboisement est une catastrophe tandis que le reboisement est salvateur pour la planète. Si cette posture catastrophiste des forestiers français s'appuie sur des travaux scientifiques, elle est également un discours politique. Devenue un enjeu, si ce n'est global, au moins national, la forêt doit être protégée pour assurer la richesse de l'Etat et la sécurité de sa population.

La seconde raison est que la mise en évidence des liens entre la forêt, l'air, l'atmosphère ou l'eau confère à la forêt une nouvelle image comme régulatrice des équilibres naturels. Ainsi, de nouveaux savoirs émergent pour comprendre ce rôle : hydrologie, biogéographie, botanique, pour ne citer qu'eux. Ces différents savoirs pluralisent l'approche rationnelle des forêts qui ne sont plus seulement étudiées par le prisme de la science forestière. La forêt n'est plus un simple stock de bois à calculer, prévoir et gérer. Le passage de l'administration forestière sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture, nouvellement créé par le décret du 24 novembre 1881, est symptomatique de cette ouverture des sciences de la forêt à des disciplines qui ne concernent plus seulement l'économie ou le droit, mais les sciences naturelles, la botanique, les sciences du sol ou la chimie – on ouvre un laboratoire de chimie à l'Ecole forestière de Nancy en 1877 (Perrin, 1928, p.146). L'avatar principal de ce nouveau rapport scientifique aux forêts est la création de la « Station de recherche et Expériences forestières » comme annexe de l'Ecole, à Nancy, par l'arrêté ministériel du 27 février 1882 ; c'est l'une des pierres angulaires de la deuxième partie de ce chapitre.

II. La structuration des recherches forestières : introduire l'observation et l'expérimentation en forêt (1880 – 1945)

Avec la création de la Station de recherches et expériences à Nancy s'ouvre une nouvelle période dans la connaissance et de la quantification des forêts françaises. La création de la station de recherches, et son adoption dans la plupart des pays forestiers européens à la fin du XIX^{ème} siècle (Allemagne, Autriche-Hongrie, Suisse, Belgique, les pays Scandinaves) marquent le début des recherches forestières, composées dans un premier temps des sciences naturelles, de la botanique ou de la pédologie. Le développement de ces savoirs s'explique notamment par le fait que la forêt n'est plus seulement appréhendée comme une ressource en bois. On pourrait parler, ici, des prémisses d'une écologisation des forêts. C'est d'ailleurs la thèse défendue par Michel Dupuy (2004) qui s'est intéressé au développement de l'écologie forestière. Pour ce dernier, trois périodes se succèdent qui amènent au développement de l'approche écologique appliquée à la forêt. La première période (1880-1915) est liée à la création des stations de recherche et aux débuts d'échanges scientifiques européens réguliers qui sont propices aux circulations de savoirs divers sur l'objet forêt : botanique, pédologie. Comme le montre Michel Dupuy, c'est à partir de ce moment que l'arbre ne fait plus à lui seul la forêt, mais cette dernière s'ouvre à la flore, à la faune et au sol. La deuxième période (1915-1945) voit l'affirmation de savoirs proches et précurseurs de l'écologie forestière, comme la phytosociologie, et le développement de l'écologie, mais hors du domaine forestier. Enfin dans la dernière période (1945-1980), on assiste à la généralisation des notions de « parcelles » et de « stations » qui sont des notions hybrides – entre théorie et gestion forestières – et les débuts de l'application de l'écologie à la forêt notamment dans le cadre du Programme Biologique International (1964-1974). Le 'triomphe' de l'approche écologique appliquée à la forêt n'est consacré qu'à partir du problème des « pluies acides », comme je le montrerai dans le chapitre 2⁵⁴.

De cette présentation théorique, il faut retenir trois points qui sont intimement liés : création des stations de recherches, dynamique européenne et ouverture des savoirs. Ces trois dimensions sont liées car la dynamique européenne mise en branle à la fin du XIX^{ème} siècle

⁵⁴ Un témoin assez parlant de ce 'triomphe' de l'approche écologique dans l'étude de la forêt est le changement de nom du département de recherches de l'INRA consacré à cette dernière. Créé en 1971 le « département recherches forestières » de l'INRA devient en 2004 le département « Ecologie des forêts, prairies et milieux aquatiques » (chapitre 3).

permet la circulation des nouveaux savoirs et l'adoption à l'échelle européenne du modèle de la station de recherches. Ces trois dimensions émergent car la forêt est devenue un objet global. Je m'intéresse dans un premier temps à la manière dont les stations ont été créées, comment elles ont été justifiées, et comment elles ont évolué. Puis est envisagée la manière dont s'est initiée cette dynamique européenne des recherches forestières, tout en nuanciant sur quelques points son impact.

A. La naissance d'une « machine unique » : les débuts des infrastructures de recherche forestière

Pour les historiens qui ont travaillé sur les institutions de recherches forestières (Griset, 2011) ou sur l'écologie forestière (Dupuy, 2004), la création de la « Station de Recherches et Expériences forestières » à Nancy le 27 février 1882 marque l'apparition de « la notion de recherches forestières » (Griset, 2011). La station de recherche s'inscrit dans les nouvelles orientations scientifiques que l'administration forestière impulse aux sciences forestières. Elle doit permettre de développer l'« expérimentation forestière » en prenant modèle sur la méthode expérimentale. L'expérimentation forestière vise à améliorer les méthodes de sylviculture en testant par exemple l'influence des paramètres climatiques ou de la composition du sol sur la croissance d'une essence. Institutionnellement parlant, cela traduit le changement de tutelle du corps forestier qui passe sous la coupe du Ministère de l'Agriculture. M. Dupuy (2004) montre que ce passage du Ministère des Finances au Ministère de l'Agriculture a lieu dans la plupart des pays européens, et témoigne, pour lui, d'une volonté de rompre avec le « libéralisme forestier » (Dupuy, 2004, p.15), et la trop grande liberté accordée aux propriétaires forestiers privés.

Le centre de gravité disciplinaire des recherches forestières se déplace alors de l'économie et la jurisprudence vers les sciences naturelles, les sciences du sol, la botanique ou la phytosociologie. Le 'front de science' se déplace de l'administration juridique et économique des forêts vers les méthodes d'aménagement et de sylviculture. Les premiers dispositifs expérimentaux sont installés dans des forêts aux alentours de Nancy que l'Ecole est chargée de gérer. Dans un premier temps, ce sont les enseignants de l'Ecole qui créent les dispositifs expérimentaux en lien avec leurs enseignements. En 1887, la station se dote d'un comité

scientifique qui élabore le cadre des expérimentations, ce dernier est essentiellement composé d'enseignants de l'école (Perrin, 1928). G. Huffel, professeur d'économie forestière, installe des placettes de sapinières régulières pour étudier l'influence des éclaircies par le haut ou par le bas sur le rendement. L'enseignement et la recherche forestière sont alors inséparables. Ainsi, les premiers dispositifs concernent des enseignements qui sont donnés à l'école dans le domaine de l'économie forestière ou des sciences du sol. C'est ainsi que G. Huffel importe la méthode des tables de production d'Allemagne pour estimer le volume potentiel d'une forêt mono-spécifique en se basant sur les suivis mis en place à la station de recherche.

La pluralisation des approches disciplinaires qui s'opère dans les stations de recherche peut aussi s'expliquer par des considérations externes aux dynamiques scientifiques. Le décret du 15 octobre 1898 fait passer les domaines de l'eau et de la pêche sous la direction de l'Ecole qui devient alors Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF). Ceci s'explique notamment par une volonté de rationalisation administrative, ou pour dire les choses plus clairement, par une baisse des dépenses publiques. C'est pourquoi notamment on retrouve la pisciculture dans les enseignements de l'Ecole.

1. Introduire la méthode expérimentale dans les recherches forestières

La première station de recherche européenne est installée dans le duché de Bade (1870) puis ce modèle scientifique se généralise à d'autres pays forestiers européens : l'Autriche (1875), la France (1882), la Suisse (1885) ou la Belgique (1896). Cela s'inscrit dans une volonté d'harmoniser les dispositifs de recherches et d'expérimentations forestiers à l'échelle européenne, j'y reviendrai par la suite. On peut, pour l'instant, noter que le transfert s'est fait de l'Allemagne à la France. D'une manière analogue, l'historienne et sociologue des sciences Nathalie Jas (2005) s'est intéressée à l'émergence des stations agronomiques en France qui sont importées d'Allemagne et dont le développement est lié à la part grandissante que la chimie occupe dans les savoirs agronomiques. Dans son article, N. Jas s'intéresse à la manière dont les stations agronomiques ont durablement modifié la conception de l'agronomie et de l'agriculture à la fin du XIX^{ème} au profit d'une déqualification du paysan et de ses savoirs traditionnels. Dans cette perspective, elle s'intéresse aux discours qui viennent légitimer l'importation de ces stations en France. Elle note alors « quatre grands socles » (Jas, 2005) qui

viennent légitimer le développement des stations de recherche. Deux constats opérés pour les stations agronomiques valent également pour les stations de recherches forestières.

Premièrement, N. Jas met en avant l'argument de la prospérité nationale dans la promotion des stations agronomiques. Celui-là se retrouve bien entendu dans le développement des stations forestières qui visent, dans un premier temps, à expérimenter les techniques de sylviculture les plus efficaces pour optimiser la production forestière : éclaircies ou rotations des coupes, par exemple. Le deuxième argument est, pour N. Jas, « la supériorité donnée au laboratoire » (Jas, 2005, p.49). Cette idée est liée à la volonté de développer et généraliser l'approche expérimentale. Cet argument vaut également pour les stations de recherches forestières ; H. Perrin (1928) se place sous le patronage de Claude Bernard pour expliquer pourquoi la station de recherches va permettre de développer les recherches forestières.

Lors de l'exposition universelle de Vienne de 1873 (Mathieu, 1874), les différents pays invités tenaient des stands forestiers où chacun présentait l'état quantitatif et qualitatif de leurs forêts (superficie, composition, type d'essence, régime de propriété), différentes constructions en bois, un état des enseignements forestiers (école forestière, effectifs des étudiants, types d'enseignement) et un état de leurs recherches (stations forestières, leur fonctionnement, les expériences qui y sont menées). Cette partie de l'exposition universelle a fonctionné comme les prémisses des congrès forestiers internationaux, et surtout de l'IUFRO⁵⁵ : l'Union Internationale des Instituts de Recherches Forestières. A. Mathieu, le forestier qui fait le compte-rendu de cette exposition pour la *Revue des Eaux et Forêts*, explique pourquoi il serait intéressant d'importer le principe de la station de recherche du duché de Bade en France : « L'observation directe, la méthode expérimentale sont incontestablement la voie du progrès scientifique ; il n'est pas possible que de temps à autre la pratique n'en récolte les fruits » (Mathieu, 1874, p.160). Observation et méthode expérimentale au service d'une amélioration des pratiques des forestiers, voici comment est légitimé le principe de la station de recherches. La station de recherches forestières centralise alors des données qui sont récoltées dans d'autres stations : « Cette station, station générale, centralise les observations forestières et météorologiques de beaucoup d'autres stations secondaires, disséminées dans toutes les parties du royaume ; elle se partage en cinq sections : section forestière, section de chimie et

⁵⁵International Union of Forest Research Organizations, IUFRO

de physique, section de météorologie, section de physiologie végétale, et section de zoologie » (*Ibid.*). C'est ce mode de fonctionnement que prend la station de recherches de Nancy.

2. *La naissance des infrastructures de recherche forestière françaises*

Un dernier point mis en avant par A. Mathieu a attiré mon attention, et il est fondamental pour la suite de l'analyse. A l'occasion du Congrès agricole et forestier de Vienne qui se tient en marge de l'exposition universelle, les ingénieurs forestiers mettent en avant la volonté, avant même la création des stations dans d'autres pays européens, d'harmoniser les méthodes d'observation :

« Un vœu formel en a demandé l'organisation, sous la réserve que toutes les stations adopteraient des modes uniformes d'observation et seraient reliées entre elles par une entente commune, comme les divers organes d'une machine unique » (*idem*)

On souhaite que les stations de recherches qui se développent aient les mêmes méthodes d'observations, les mêmes protocoles. Mathieu parle de « machine unique ». Cette expression n'est pas sans rappeler la *Vast Machine* de Paul Edwards (2010), expression que l'historien des sciences américain utilise pour décrire l'infrastructure météorologique qui naît à peu près à la même période. Sur le modèle de l'infrastructure météorologique, les stations de recherches et d'expérimentations jettent les bases des infrastructures forestières. Cette idée est renforcée par la dynamique européenne qui est initiée avec la naissance de l'IUFRO.

Un autre argument mis en avant pour légitimer le développement des stations de recherches et les investissements continus pour les faire fonctionner est lié, pour certains auteurs, à la biologie des forêts, et notamment le temps long des cycles forestiers. Les enseignants de l'Ecole et les directeurs de la station insistent sur son rôle structurant dans l'organisation des recherches forestières ; « à l'inverse des autres végétaux, les arbres se développent lentement, dans des conditions complexes sur lesquelles l'homme n'a qu'une influence faible ou nulle, et qui se modifient d'elles-mêmes au cours du temps » (Perrin, 1928, p.139). Il faut une institution durable capable de conduire des expériences sur le long terme et d'en archiver les résultats. Auguste Oudin (1886-1924), inspecteur général des forêts qui a été directeur de l'ENEF et qui a dirigé l'installation de plus de deux cents placettes

d'expérimentation pendant l'entre-deux-guerres, souligne que : « l'expérimentation forestière est donc un travail d'équipe qui ne peut être entrepris que par un organisme spécialisé, disposant de moyens suffisants, et seul capable d'assurer aux expériences entreprises leur continuité indispensable » (Oudin, 1956, p.175). Au moment où elles se développent, les recherches forestières sont donc vues comme inséparables de l'institution qui organise et gère les expérimentations. Pour pouvoir faire de l'expérimentation forestière, il faut un institut de recherche assez durable pour garantir la continuité des expériences, récolter les données et les conserver. Dans cette perspective, la recherche forestière met en branle une logique de conservation du patrimoine scientifique et expérimental forestier. Cet argument est mis en avant aux débuts des créations des stations de recherches et pendant l'entre-deux-guerres, car le premier conflit mondial a détruit un bon nombre des placettes créées avant celui-là.

On peut néanmoins nuancer cet argument qui lie réalité biologique des forêts et structuration de la station de recherche. Certes les arbres croissent lentement, mais on a vu précédemment que la généralisation du principe de la futaie, et donc l'allongement du temps de la rotation des coupes, avait des raisons et des fondements politiques : assurer une productivité constante de la ressource en bois. Ainsi, l'organisation et la structure de la station de recherches, telles que je les ai présentées plus haut, n'avaient rien de nécessaires. Elles s'expliquent tout autant par la réalité biologique des arbres que par la volonté politique et économique d'accroître, de contrôler et de prévoir la ressource en bois. Forêts françaises et stations de recherches forestières sont des « hybrides » latouriens (Latour, 1991), on y décèle l'entrelacement des dimensions 'naturelles' et 'sociales', politiques et scientifiques. C'est bien l'un des traits caractéristiques du raisonnement des *Sciences Studies*.

C'est surtout après la Première Guerre mondiale que l'activité de la station de recherche augmente de façon continue. En 1920, la station est divisée en quatre sections : la première traite de la sylviculture et d'économie forestière, la deuxième de botanique et de la qualité du bois, la troisième concerne la zoologie (aquiticulture et entomologie) et la pédologie, la quatrième traite du reboisement des terrains de montagne (Perrin, 1928). En 1937, elle comporte sept sections : l'ancienne deuxième section est scindée en deux, une section est consacrée à la « botanique forestière » tandis que l'autre se focalise sur les « propriétés du bois ». Deux sections sont créées : une sur la « pédologie forestière » et une autre sur « l'écologie des végétaux ligneux ». On voit bien dans les intitulés des sections de recherche que le corpus disciplinaire des sciences forestières évolue vers une prise en compte plus

grande de l'arbre en tant qu'organisme biologique et de son environnement : chimie du sol, pédologie et climatologie, botanique. Cette inflexion dans les recherches correspond, sur le plan national français, à l'entrée de nouveaux acteurs, essentiellement des universitaires, dans les recherches forestières.

B. La 'biologisation' des forêts : nouveaux savoirs et dynamique européenne des recherches forestières

Pourquoi lier construction d'une dynamique de recherches forestières européennes et l'intégration de nouveaux savoirs comme la pédologie ou la phytosociologie ? Ici, je m'appuie une nouvelle fois sur les analyses de l'historien Michel Dupuy qui a montré comment les savoirs que l'on peut considérer comme les prémisses de l'écologie (botanique, pédologie, puis phytosociologie) se développent dans des centres de formation – pour la période qui m'intéresse ici, essentiellement l'Allemagne et l'Autriche-Hongrie – et se diffusent ensuite dans d'autres pays. Michel Dupuy montre qu'il existe différentes écoles de pensées qui vont dominer le paysage scientifique de certains pays européens. Par exemple, l'influence de la phytosociologie du botaniste suisse Josias Braun-Blanquet (1884-1980) sera assez limitée dans le milieu forestier français, tandis qu'elle rencontre un grand écho dans d'autres pays comme l'Allemagne ou la Suisse. (Dupuy, 2004, pp.139-157). C'est à partir des années 1880 que se multiplient les congrès forestiers nationaux, puis internationaux qui sont des espaces d'échange et d'harmonisation des méthodes et des expériences menées.

1. Une structuration européenne des recherches forestières

L'Union Internationale des instituts de recherches forestières (IUFRO) est créée en 1892 et regroupe l'ensemble des stations de recherches développées à l'échelle européenne et internationale. Les réunions annuelles de l'IUFRO sont l'occasion pour les différents responsables des stations de comparer leurs expérimentations et partager leurs thématiques de recherche. Il faut lier le développement des stations de recherches et la création de l'IUFRO ; ils témoignent d'une volonté d'harmonisation des protocoles et des expériences menées dans les stations à l'échelle européenne qui s'appuie sur le discours 'global' de la déforestation et des dépérissements. Ainsi la dynamique internationale initiée permet la circulation de

différents savoirs et techniques qui vont imprimer leur marque sur les recherches forestières françaises. L'IUFRO est donc le premier vecteur de circulation de nouvelles approches scientifiques sur la forêt comme la phytosociologie de Braun-Blanquet enseignée à l'Ecole à partir de 1923, ou l'« écologie forestière » qui entre dans les enseignements de l'ENEF en 1920 (Griset, 2011). L'IUFRO a joué un rôle non négligeable dans la circulation des théories et des approches écologiques qui ont également percolé grâce aux nombreux voyages d'études à l'étranger effectués par les ingénieurs forestiers de l'école. On trouve dans la presse forestière de nombreuses descriptions de l'enseignement ou de la recherche forestières tels qu'ils sont menés dans d'autres pays européens : le Danemark (Perrin, 1923) ou l'Italie (Saur, 1928), pour ne citer qu'eux.

Concernant l'harmonisation des statistiques forestières, on peut également mettre en avant l'initiative de la « Commission permanente du Congrès international de statistique » dont le compte-rendu de 1874 mentionne une volonté de produire des statistiques forestières à l'échelle internationale. Le congrès souhaite initier une entente à l'échelle européenne :

«Le Congrès recommande que cette entente ait spécialement pour objet une enquête, devant se renouveler tous les dix ans et être faite dans tous les pays à la fois, en même temps que s'opère le recensement de la population, laquelle comprendrait, par districts administratifs aussi restreints que possible et en séparait les régions agricoles les plus importantes, les étendues de terrain qu'occupe la culture agricole et forestière en général ; la culture des produits les plus importants et le résultat d'une récolte moyenne, basé sur celui d'un nombre d'années aussi grand que possible, avec indication des systèmes de culture en usage; les superficies couvertes des différentes espèces de forêts et la masse du bois qu'elles contiennent; le chiffre du bétail et le profit qu'on en tire ; le nombre approximatif des grandes exploitations agricoles, le chiffre de la population rurale, et enfin un aperçu de la consommation. » (p.32)

Malgré ces tentatives d'harmonisation de l'information statistique européenne à l'échelle européenne, la statistique forestière garde une dimension nationale, notamment dans un contexte où les relations géopolitiques entre les différents pays européens se tendent à la fin du XIX^{ème} siècle. Lors d'un exposé oral consacré à Lucien Daubrée et ses *Statistiques et Atlas des forêts de France* (1912) – qui peuvent être considérés comme la première mission d'inventaire forestier systématique du territoire français – Andrée Corvol (2012) note que c'est dans un contexte de concurrence entre différentes puissances que cet inventaire est réalisé : contexte tendu entre la France et l'Allemagne après la guerre de 1870, et le conflit colonial entre la France et l'Angleterre en Afrique. La *Statistique Daubrée* – comme on

l'appelle fréquemment – a alors pour but d'évaluer la ressource en bois, et de démontrer la puissance et la supériorité du territoire français sur ses voisins – les chiffres de la France ne sont pourtant pas aussi bons que ceux de l'Allemagne. Selon les mots de l'historienne, la *Statistique Daubrée* n'échappe pas à « la propagande du chiffre » (Corvol, 2012) : les statistiques forestières ne sont pas de simples descriptions quantitatives de l'état des forêts, elles ont une portée politique dans leur construction, leur utilisation et leur publicisation.

2. *Les recherches forestières se pluralisent : botanique, géographie et phytosociologie*

On peut nuancer cette coopération et harmonisation des recherches et statistiques forestières à l'échelle européenne. Sous l'égide de cette dernière, la production de statistiques forestières s'inscrit tout de même dans des raisons politiques nationales. Néanmoins, l'initiation d'une dynamique européenne a eu pour conséquence la diffusion de nouveaux savoirs qui prennent comme objets la forêt, sa biologie et son environnement. Comme l'ont montré M. Dupuy et P. Griset, de nouveaux acteurs nationaux prennent une place croissante dans les recherches forestières, et orientent les sciences des forêts vers une prise en compte croissante de l'arbre et de son environnement. On peut citer trois personnes clefs qui ont fait déplacer le centre de gravité des sciences des forêts vers une approche qui intègre les variables environnementales. On peut mentionner Charles Flahault (1852-1935), botaniste de l'université de Montpellier, qui a permis une meilleure prise en compte de la botanique dans les recherches forestières. C. Flahault ne faisait pas partie de l'administration forestière, mais il était considéré comme tel par le corps forestier. Henri Perrin écrivait d'ailleurs que Flahault « n'appartient pas à l'Administration forestière ; mais ses travaux ont une telle importance pour [leur] spécialité, et son action en faveur de la forêt est si intense que les forestiers s'honorent de le compter parmi les leurs » (Perrin, 1928, p.151).

On voit que la logique de corps qui a prévalu pendant plusieurs dizaines d'années dans les recherches forestières tend à se fissurer: l'école nationale des eaux et forêts s'ouvre petit à petit à l'université qui amène par exemple des personnes comme Philippe Duchaufour (1912-2000) (formé à l'Ecole des Barres⁵⁶) à faire sa thèse à l'université de Montpellier sous la

⁵⁶ L'Ecole des Barres, créée en 1873, est d'abord une école primaire de sylviculture destinée aux fils de forestiers. Elle se dote d'une école secondaire en 1884. A partir des années 1950, elle forme les « Ingénieurs des

direction de Louis Emberger (1897-1969) (Dupuy, 1992, p.21) qu'il soutient en 1947 : « Recherches écologiques sur la chênaie atlantique française ». C'est surtout après la Seconde Guerre mondiale que les liens entre universités et écoles forestières se renforcent.

On peut également citer Raoul Blanchard (1877-1965), ancien normalien qui devient géographe à l'université de Grenoble. Il fonde en 1913 le *Recueil des travaux de l'institut de géographie alpine* qui devient la *Revue de Géographie Alpine* en 1920. Il oriente alors les recherches forestières vers une prise en compte plus importante des contextes biogéographiques.

La phytosociologie, quant à elle, distingue des 'associations végétales' qui se composent de quatre types d'espèces différentes : les espèces dominantes, essentielles, accessoires et accidentelles. A partir de distributions d'abondance établies grâce aux outils statistiques, le phytosociologue rend raison d'une association particulière selon les critères évoqués plus haut. Flahault développe son approche selon les principes de l'écologie végétale telle qu'elle se développe à l'époque à l'université de Montpellier en l'adaptant au contexte forestier. C'est pourquoi il est considéré comme « l'un des leurs » par les forestiers, et rétrospectivement considéré comme un « intermédiaire entre l'écologie végétale et la foresterie française » pour M. Dupuy. La phytosociologie, en distinguant des types d'espèces (dominantes, occasionnelles, accidentelles) qui forment des 'associations végétales' diffuse la notion de station forestière. Braun-Blanquet fonde en 1929 la Station Internationale de Géobotanique Méditerranéenne et Alpine (SIGMA) à Montpellier, ancêtre du CEPE (Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologies), créé en 1961 – et qui prendra le nom de Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive en 1988. En 1928, Braun-Blanquet publie *Pflanzensociologie*. Son ouvrage est traduit en 1932 en anglais, mais jamais traduit en français. M. Dupuy (2005) note que les idées de Braun-Blanquet se diffusent en Allemagne mais peu en France, à cause des relations franco-allemandes tendues. Bien qu'il installe sa station en France, les idées de Braun-Blanquet n'ont qu'un très faible écho dans les milieux forestiers : « Les forestiers français ont privilégié une autre piste s'appuyant sur l'étude du climat avec Martonne et Emberger s'opposant à l'approche floristique de Braun-Blanquet » (Dupuy, 2004, p.151). Chez les forestiers allemands, l'approche de Braun-Blanquet va être interprétée, dans une certaine mesure comme un retour à la forêt naturelle composée de ces plantes herbacées et ses

Travaux Eaux et Forêts » (ITEF), et devient, en 1965, l'Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux des Eaux et des Forêts (ENITEF).

sous-étages feuillus. Cette idée ne percole pas en France. Pour Decocq et ses coauteurs (2016), ceci s'explique également par le fait que dans le contexte de guerre et dans l'immédiat après-guerre, la France va essentiellement privilégier la production ligneuse. Par exemple, Philibert Guinier (1876-1962) va développer la xylologie* – l'étude de la résistance du bois – notamment pour l'artillerie et l'aviation : « œuvrant pour la patrie, cela a favorisé son accession au poste de directeur de l'Ecole des Eaux et Forêts de Nancy » (*Ibid.*, p.87). Guinier fonde en 1934 l'Ecole supérieure du bois, il a également un rôle, comme Flahault, dans la diffusion de la botanique dans les recherches forestières, ainsi que de l'écologie forestière, comme peuvent en témoigner ses cours de 1932 et 1933 (Guinier et Rol, 1995).

Ces nouvelles approches mettent du temps à percer. C'est à partir des années 1920 qu'elles sont enseignées à l'ENEF, mais c'est réellement après la Seconde Guerre mondiale qu'elles commencent à se généraliser à l'ensemble des recherches forestières dans le cadre de projets de reboisement dans un premier temps, puis dans le cadre de projets de cartographie de la ressource forestière nationale. Néanmoins, il faut être attentif au déplacement des approches qui a eu lieu pendant cette première période. Pour M. Dupuy, on assiste d'abord à « l'intégration de la flore et du sol » qui correspond au développement et à l'enseignement de la botanique et de la pédologie. Dans un article portant sur la « science forestière et la xylologie au VIII^{ème} Congrès international de Botanique », P. Guinier écrit cette phrase qui résume assez bien l'évolution des recherches forestières pendant cette période : « Ainsi s'est ouverte progressivement l'ère d'une foresterie prenant appui sur la connaissance scientifique de l'arbre, de son entourage, de ses relations avec le milieu, aidée aussi par la science du sol, la pédologie. » (Guinier, 1955, p.254).

Parallèlement au développement de ces nouveaux savoirs, les forestiers, notamment en Allemagne, constatent les premiers dépérissements forestiers au début du XX^{ème} siècle. On recherche alors les causes de ces derniers. Deux causes sont mises en avant. La première est la mise en évidence d'insectes ou de champignons qui perturbent le développement des arbres. On assiste alors aux premières études en entomologie (étude des insectes) et ou en mycologie (étude des champignons). Les dépérissements occasionnés par les insectes vont être également un terrain propice pour le développement des premiers pesticides. L'historienne des sciences Sarah Jansen (2002) a montré qu'à cette période les problèmes causés par les insectes dans les forêts ne sont plus vus comme des phénomènes locaux, liés à une placette précise, mais émerge l'idée d'une masse d'insectes qui menace l'ensemble des forêts

allemandes. Ceci permet aux industries chimiques développées pendant la Première Guerre mondiale d'opérer un transfert technologique : des gaz de combat aux pesticides. Des documents déclassifiés montrent que ce transfert technologique permit à l'industrie chimique allemande de continuer ses recherches sur les gaz de combat, malgré les interdictions du traité de Versailles (Jansen, 2002, p.54).

Ainsi, avant la Seconde Guerre mondiale, les recherches forestières se développent sur l'ensemble du territoire français grâce à l'installation de stations de recherche – d'abord à Nancy, puis à Bordeaux, Montpellier ou Fontainebleau. Ce moment coïncide également avec une ouverture disciplinaire. Les recherches forestières concernent alors des disciplines scientifiques diverses, émergentes ou académiques : botanique, climatologie, pédologie, phytosociologie. Ces différents savoirs se développent en marge de l'ENEF qui intègre petit à petit ces nouvelles approches dans ses enseignements. Ces nouveaux savoirs ont participé à former la démarche instrumentale et ingénieure mise en avant par l'Ecole pour connaître et gérer la forêt. Ces nouveaux savoirs doivent permettre aux ingénieurs forestiers de prévoir l'évolution des espaces forestiers et d'estimer leurs potentiels productifs. On voit alors se dessiner la conception typique des fonctions des infrastructures de recherche : données, théories et prévisions. Dans son rapport d'activité sur la Station de recherches et expérimentations, A. Oudin (1956) précise le but des études climatiques pour les recherches forestières :

« Leur but est de recueillir des données sur les différents facteurs climatiques qui agissent sur la végétation et les utiliser pour expliquer les comportements des espèces forestières, et de là à prévoir ce qu'on peut attendre dans une région donnée »⁵⁷ (Oudin, 1956, p.203-204)

Les stations de recherches forestières visent, ainsi, à produire des artefacts des futurs des forêts qui permettent une meilleure gestion de ces dernières. Les futurs produits par les stations de recherches forestières ne sont plus les futurs économiques de la ressource, ils se complexifient, notamment, via le processus de 'biologisation' de la forêt. Les propos de Philibert Guinier dans l'introduction du livre *Sylviculture* d'Henri Perrin (1956), mettent en avant cette 'biologisation' : « Avec le XX^{ème} siècle, s'ouvre, pour la sylviculture, une phase nouvelle. Progressivement s'était manifestée la tendance, bien formulée, par BOPPE, à envisager la forêt comme une société végétale soumise à l'action des facteurs naturels [...] La

⁵⁷ C'est l'auteur qui souligne les termes.

préoccupation biologique prenait le pas sur la préoccupation économique que symbolisait, jadis, le principe, considéré comme fondamental, du rapport soutenu : on doit suivre la nature et non chercher à la régenter d'après un plan préconçu » (Perrin, 1956, p.XVIII)

III. Réformer les institutions et les dispositifs de la biopolitique forestière (1945-1980) : la ‘modernisation’ des forêts françaises

Le contexte d’après-guerre est marqué par une série de réformes qui bouleversent le paysage institutionnel des recherches forestières. C’est dans cette nouvelle organisation que vont se standardiser les outils de gestion des forêts : les tables de production et la notion de « station forestière », ainsi que la cartographie systématique de la ressource réalisée par les missions d’inventaire, utilisant la photographie aérienne. Ces séries de refonte des recherches forestières s’inscrivent dans une volonté étatique de stimuler la production forestière nationale, ainsi qu’une volonté de moderniser la gestion des forêts.

A. Reboiser et inventorier les forêts : la modernisation de la forêt comme infrastructure productive

1. Le Fonds forestier national : un dispositif pour ‘moderniser’ les forêts

Les efforts pour reboiser le territoire français prennent une nouvelle direction et une nouvelle dimension à partir des années 1940, à la suite des deux grands conflits mondiaux. Alors que les premiers travaux de reboisement avaient essentiellement concerné des zones marginales (dunes et montagnes) où il s’agissait de reboiser pour protéger les populations contre les aléas naturels dus à l’érosion des sols, les travaux entrepris après la Seconde Guerre mondiale concernent l’amélioration du potentiel productif des forêts françaises. Par ailleurs, les reboisements du XIX^{ème} et du début du XX^{ème} siècles étaient à l’initiative exclusive de l’administration forestière, et donc étaient effectués en forêts communales ou forêts domaniales. Le Fonds Forestier National est créé en 1946, c’est un compte spécial du Trésor qui est alimenté par une taxe de 3% sur les produits forestiers. Il peut donc financer des projets de reboisement qui concernent autant les forêts privées que les forêts communales ou

domaniales⁵⁸. Les premiers travaux financés concernent les reboisements dans les régions touchées par la guerre et des aménagements forestiers dans les Landes de Gascogne qui ont été touchées par de terribles incendies en 1949. Le FFN finance également des projets de modernisation de l'économie forestière : en 1972, 16 500 kilomètres de routes forestières ont été construites, et à partir de 1966, le FFN finance la modernisation de scieries pour qu'elles s'équipent de machines performantes. En effet, à partir de 1966, un décret enrichit les modalités du FFN qui peut alors financer pépinières et scieries. L'action du FFN se place alors en amont et en aval de l'aménagement forestier. Le FFN vient en appui d'une véritable modernisation de la forêt vue comme une infrastructure productive de bois qu'il s'agit d'associer au mieux au réseau routier national. Le FFN peut être vu comme un véritable continuateur des politiques de 'modernisation' des forêts telle qu'on les a déjà vues auparavant.

La mission du FFN est triple : améliorer la production forestière, assurer la fonction de protection des forêts contre les aléas naturels (incendies, éboulements, inondations) et garantir le rôle 'social' des forêts qui commencent alors à être conçues aussi comme des lieux de détente. C'est le cas, par exemple, de la forêt de Fontainebleau qui a été étudiée par Bernard Kalaora (1979). L'auteur montre que ce « loisir vert » se développe à partir des années 1960, du fait d'un public essentiellement urbain qui pratique alors des activités sportives et culturelles en forêts (randonnées, vélo). Le FFN est donc un instrument politique et économique qui structure les recherches forestières et la filière-bois, et modifie ainsi le visage des forêts françaises. Il a eu un rôle important pour la reconquête des espaces en friche par les forêts.

Les premiers reboisements effectués, le FFN finance ensuite de plus en plus de travaux visant l'amélioration du potentiel productif des forêts (adaptation des essences au contexte biogéographique, adaptation des essences aux fonctions attendues de la forêt : production, protection, récréation). Cette seconde phase de financement débute vers 1960 (Velay, 1972) et coïncide avec la mise en place de l'Inventaire Forestier National (IFN) en 1958. Ces deux institutions sont liées : « La création du Fonds Forestier National en 1946 en soulevant des problèmes de rentabilité rendit nécessaire une connaissance précise du classement des produits forestiers » (Oudin, 1956, p.241). Dans les nouvelles orientations de la politique

⁵⁸ Pour un aperçu plus détaillé de la création, du fonctionnement et des réalisations du FFN, voir le numéro spécial de la *Revue Forestière Française* de 1972.

forestière française, l'inventaire des ressources forestières occupe alors une place stratégique, il doit permettre d'estimer la ressource actuelle et potentielle des forêts et d'orienter les investissements du FFN.

2. Cartographier la ressource en bois : l'Inventaire Forestier National

L'IFN marque de son empreinte les recherches et la gestion forestières sur plusieurs points. Sa mission est de réaliser « l'inventaire permanent des ressources forestières nationales indépendamment de toute question de propriété » (Bazire, 1984, p.14), le FFN lui donne un appui financier. A ses débuts, l'institut réalise l'inventaire des ressources forestières de chaque « région forestière » tous les dix ans. La « région forestière » n'est plus une entité juridique ou administrative, telle qu'elle pouvait être envisagée par le code forestier, elle intègre des facteurs climatiques et pédoclimatiques. Ces « régions forestières » sont caractérisées par des « conditions similaires ou équivalentes du point de vue forestier » (*Ibid.*). Ce glissement de la notion de « région forestière » témoigne du processus de 'biologisation' des forêts, déjà mis en branle à la fin du siècle précédent.

Les relevés d'inventaire comportent deux phases. Dans la première, l'IFN réalise des photographies aériennes de la région forestière : photographies infrarouges et en émulsion panchromatique, ces deux types de filtres photographiques font apparaître des couleurs différentes selon les types de végétation, d'occupation du sol, de couverts forestiers. Ces différentes informations sont traitées par photo-interprétation : on classe les différents clichés grâce à un système de code ou mots-clefs qui caractérisent les régions forestières : catégorie de propriété (domaniale, privée, communale), type de végétation ou volume sur pied. A partir des photographies aériennes, les ingénieurs forestiers utilisent les principes de la photogrammétrie : à partir de la photographie aérienne, on peut déduire les mesures réelles des surfaces des forêts par l'application des principes de la géométrie projective. La photographie aérienne est une « image mesurée » – *das Meßbild* – que l'historien des sciences et des techniques Sebastian Grevsmühl a analysé en détail dans son ouvrage *La Terre vue d'en haut* (2014, p.115-134). Pour ce dernier, le développement des procédés de photographie aérienne et de photogrammétrie contribue à l'émergence d'un nouveau « régime scopique » (Grevsmühl, 2014, p.115) qui s'inscrit dans le développement des techniques de cartographie militaire. La notion d'« image mesurée » s'appuie sur un régime d'objectivité qui confère à

l'image un statut de représentation fidèle de la réalité, c'est le statut de l'« image mécanique » telle qu'elle a pu être décrite par les historiens des sciences Lorraine Daston et Peter Galison, dans leur ouvrage sur l'histoire des régimes d'objectivité (Daston et Galison, 2007).

Dans une seconde phase, l'IFN opère des mesures sur le terrain, après avoir choisi par échantillonnage une placette dans la région forestière considérée. Il utilise également des méthodes statistiques pour réduire les irrégularités dans les photos aériennes (angle de vue ou vitesse de vol qui influencent les photographies), et pour faire correspondre la photo-interprétation aérienne et les données de terrain. L'IFN caractérise donc une région forestière en confrontant les données mesurées sur une parcelle et les photographies aériennes, ce sont les méthodes statistiques qui permettent de passer d'une échelle à l'autre en garantissant la représentativité de l'échantillonnage. Ici, les méthodes statistiques renvoient au second sens du terme : la réduction des erreurs par une théorie des probabilités. Dans quelle mesure la photo-aérienne traitée et la réalité du terrain sont-elles en adéquation ? L'utilisation des méthodes statistiques, qui se développent dans un grand nombre de domaines scientifiques au XX^{ème} siècle – comme en témoigne notamment l'importation de la biométrie* dans les méthodes d'inventaire forestier – permet d'améliorer cette adéquation.

Au-delà de l'appui financier apporté par le FFN, et de l'appui scientifique (les données) que l'IFN fournit grâce à ces inventaires, on peut noter deux éléments importants qui ont été apportés par ces deux dispositifs de politique forestière. Premièrement, avec la notion de « région forestière », l'IFN formalise une nouvelle conception de l'espace forestier qui n'est plus seulement défini comme une entité juridique et administrative, mais aussi par des conditions écologiques, pédologiques et géographiques. Cette nouvelle conception de la région forestière est tout autant une notion descriptive du territoire forestier qu'une notion utilisée par la recherche, car l'IFN fournit des données aux recherches forestières. De plus, en finançant des aménagements forestiers qui ont pour objectif de préserver le rôle économique et social des forêts, le FFN participe aussi à cette nouvelle définition des fonctions de l'espace forestier. On voit alors se dessiner un ensemble de fonctions différentes (production, protection, fonction écologique, fonction sociale) que l'on désigne par la suite par la notion de « multifonctionnalité » des forêts qui s'impose dans les débats et les discours à partir des années 1980 avec l'expression de « gestion durable » des forêts.

Deuxièmement, l'IFN a permis aux méthodes statistiques et biométriques de percoler dans les recherches forestières. Dès les années 1950, les forestiers français mettent en avant les

progrès scientifiques que pourrait constituer l'incorporation des méthodes statistiques et biométriques en recherches forestières. Les premières applications mises en avant par les forestiers concernent l'estimation de la production ; les méthodes statistiques appliquées à l'échantillonnage permettent de faire l'inventaire d'une parcelle plus rapidement, sans avoir à compter les arbres un par un ; les méthodes statistiques permettent la « réduction des données »⁵⁹. Le numéro spécial, datant de 1953, de la *Revue Forestière Française* est assez éloquent sur ce point :

« Nous trouverons dans l'étude des peuplements réguliers l'occasion d'appliquer la notion de « réduction des données ». Rangés par ordre de grosseur croissante, les arbres d'un peuplement se groupent d'une façon plus ou moins serré autour d'une moyenne. Les deux notions de grosseur moyenne et de dispersion peuvent être considérées dans certains cas comme deux grandeurs caractéristiques qui suffisent pour présenter la répartition des grosseurs » (Schaeffer, 1953, p.13)

L'inventaire forestier joint ainsi les deux définitions des statistiques. Il fournit une statistique forestière du territoire français, et pour réaliser cette dernière, il s'appuie sur les méthodes statistiques de « réductions des données » (notion de moyenne) et réduction des erreurs (probabilité).

A l'échelle nationale, la France se dote d'instituts scientifiques qui visent à cartographier et estimer les ressources forestières ou agricoles, et c'est également dans cette perspective que des phytosociologues de Montpellier développent des cartographies d'associations végétales pour « visualiser au mieux les potentialités naturelles des stations » (Dupuy, 2004). Ces travaux de cartographie végétale à l'échelle nationale amènent la création par L. Emberger du Centre des Etudes Phytosociologiques et Ecologiques (CEPE) en 1961. La publication de ces cartes et la participation du centre au Programme Biologique International (PBI) permettent la diffusion de la phytosociologie et de l'écologie, alors balbutiante en France – la première chaire d'écologie en France date de 1955. Néanmoins, l'approche écologique reste minoritaire dans le milieu forestier. C'est à l'occasion de l'affaire des pluies acides que les approches écologiques et écophysiologiques vont gagner en légitimité dans les recherches forestières.

⁵⁹ Voir le numéro spécial de la *Revue Forestière Française* parue en 1953

B. Réformer la recherche forestière : l'intégration à l'INRA et l'écologisation des forêts

1. La restructuration des instituts de recherches forestières

L'après Seconde Guerre mondiale est caractérisé par de nombreux changements institutionnels qui modifient l'organisation des recherches forestières et les orientent vers une 'biologisation' et une 'écologisation' croissante des forêts. Parallèlement, on constate des liens de plus en plus étroits entre l'administration forestière et les universités. Ces deux cultures épistémiques et sociales différentes se rencontrent, non sans frictions. Pour les acteurs du domaine forestier, le passage de la recherche de l'Ecole à l'INRA constitue un tournant. Le passage des recherches forestières de l'ENEF à l'INRA fait partie des Lois d'Orientation Agricole, dites Lois Pisani, votées en 1960 et 1962. P. Griset (2011) précise que pour Edgar Pisani, ministre de l'Agriculture, il fallait engager une politique volontariste de modernisation de l'agriculture et de la forêt, et qu'il était temps que celles-ci intègrent une « volonté commerciale »⁶⁰. Certains acteurs des recherches forestières partagent cet avis, comme Philibert Guinier, qui dans la préface du livre *Sylviculture* d'Henri Perrin, considère que la science forestière et la sylviculture doit s'inspirer des progrès réalisés l'agriculture, notamment dans la sélection des plantes :

« Cette « amélioration progressive » que Parade inscrivait comme un des objectifs de la sylviculture, peut être réalisée avec plus de sûreté aussi bien dans les peuplements existants par sélection raisonnée des sujets les meilleurs que dans les peuplements artificiels pour la constitution desquels on est à même de choisir et de propager les formes les plus avantageuses. Une ère commence où les principes de l'amélioration des plantes, qui ont assuré la prospérité de l'agriculture, deviennent applicables aux arbres forestiers. » (Guinier, 1952, p.XXI).

Cette citation témoigne de cette volonté de 'moderniser' les forêts après la Seconde Guerre mondiale en utilisant, par exemple, la sélection d'essences plus productives ou mieux adaptées, prenant ainsi modèle sur la modernisation de l'agriculture. C'est d'ailleurs dans cette optique que se développent des savoirs stratégiques pour la 'modernisation' des forêts et de la production de bois, comme la génétique forestière ou l'étude de la résistance du bois.

⁶⁰ Extrait d'un discours de Pisani prononcé à l'Assemblée Nationale et cité par P. Griset (2011)

La loi du 22 février 1964 crée un centre national de recherches forestières à l'INRA. La recherche quitte donc l'ENEF dont la mission d'enseignement persiste. L'année suivante, l'ENEF fusionne d'ailleurs avec l'Ecole du Génie Rural pour former l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF). En 1966, le département de recherches forestières de l'INRA compte cinq stations de recherches à Nancy (sylviculture et production ; amélioration des arbres forestiers ; écologie et pathologie forestières ; recherche sur les sols forestiers et fertilisation ; biométrie), une à Bordeaux (recherche sur le pin des Landes) et une à Avignon (milieu méditerranéen et entomologie) (Guehl, Birot et Caquet, 2016). Ces lois ont également eu un impact sur l'organisation des structures d'appui technique et de recherche : en 1965 est créé le CERAFER (Centre national d'études techniques pour l'agriculture, les forêts et l'équipement rural), ancêtre du CEMAGREF.

Cette intégration des recherches forestières fait du cas français un cas exceptionnel dans la mesure où dans les autres pays européens, les recherches forestières dépendent d'universités spécialisées ou de services forestiers (Bouvarel, 1984). L'importance des instituts de recherche (CNRS, INRA...) en France est plus généralement une spécificité nationale dans la mesure où la recherche se fait essentiellement dans les universités dans le reste du monde. L'intégration des chercheurs forestiers au sein de l'INRA ne se fait pas sans heurts et frictions : les chercheurs INRA et les chercheurs ex-ENEF ne font pas partie des mêmes corps de métiers – les chercheurs qui passeront de l'ENEF à l'INRA devront quitter leur ex-corps de métier. B. Kalaora a montré comment les rites et l'appartenance au corps étaient des éléments essentiels dans la construction de l'identité professionnelle des ingénieurs forestiers (Kalaora, 1998). On peut alors comprendre pourquoi certains ingénieurs forestiers ont mal vécu le fait de devoir démissionner de leur corps d'origine (Poupardin et Bouchon, 1995). P. Griset parle d'un sentiment de déclassement pour caractériser la réaction des ingénieurs forestiers qui se sont retrouvés « noyés dans la recherche » à l'INRA (Griset, 2011). On assiste donc à la rencontre de deux milieux professionnels différents, et deux conceptions de la recherche. Grâce aux archives orales de l'INRA – séries d'entretiens oraux retranscrits et accessibles sur internet avec des acteurs clefs du centre, notamment pour notre propos, Pierre Bouvarel⁶¹, Jean Bouchon et Yves Birot – on peut voir comment cette restructuration institutionnelle a amené la rencontre de cultures de recherche différentes

⁶¹ Pierre Bouvarel entre à l'ENEF en 1944 et commence des études en génétique forestière. Il est sollicité pour participer au rapprochement entre l'INRA et l'ENEF. Il intègre l'INRA en 1965 comme maître de recherche. Il sera par la suite directeur du département de Recherches forestières de l'INRA.

2. Les effets de la restructuration : la rencontre de deux cultures scientifiques

Avant ce rattachement, le milieu forestier (recherche, enseignement et gestion) fonctionnait en « vase clos » (Poupardin et Bouchon, 1995). Les liens entre chercheurs de l'ENEF et forestiers étaient très forts, tandis que les relations avec des chercheurs d'autres disciplines et institutions presque inexistantes. L'intégration de la recherche forestière dans un institut de recherche pluridisciplinaire a donc modifié la manière dont on menait la recherche sur les forêts, qui va dans le sens d'une 'biologisation' de ces dernières. Les chercheurs forestiers côtoient alors des chercheurs dont les disciplines sont académiques et déjà institutionnalisées à l'université comme la biologie ou la biométrie. Ce sont ces interactions, notamment, qui ont initié un processus où on demande aux chercheurs forestiers de 'faire de la recherche' au même titre que les autres disciplines.

Ainsi dans cette période d'intégration de la recherche forestière à l'INRA, il y a une volonté des forestiers de garder la mainmise sur leur domaine d'expertise, et donc sur leur profession – sa réglementation et son organisation, son enseignement, sa recherche et ses fronts de science. L'anecdote racontée par P. Bouvarel dans les archives orales de l'INRA sur la résistance des forestiers au rattachement à l'INRA est éclairante (Poupardin Cussenot et Bouvarel, 1995). Alors que le comité scientifique qui opère le rattachement réfléchit à la localisation des futures stations de recherche forestière, P. Bouvarel raconte qu'il est allé rencontrer Louis Emberger pour discuter de la création d'une station de recherche :

« Nous avons pris contact avec les botanistes de l'université de cette ville. Parmi eux se trouvait Louis Emberger, grand botaniste et un des pères de l'écologie végétale en France. Il nous avait invités à déjeuner JF Lacaze⁶² et moi et, au cours du repas, nous lui avons parlé du projet de création dans le Midi de la France d'une annexe de la station de recherches forestières. L. Emberger nous a fait valoir qu'il nous accueillerait très volontiers à Montpellier et était prêt à nous donner toutes facilités, pour redonner vie à la collaboration féconde qui avait lieu jadis sur les pentes de l'Aigoual entre Georges Fabre⁶³ et Charles Flahault. A notre retour à Nancy, nous sommes allés voir R. Rol⁶⁴ pour le mettre au courant de notre entrevue. Nous l'avons vu froncer le sourcil

⁶² Ingénieur des Eaux et Forêts, il intègre l'INRA au début des années 1960. Il mène des recherches sur la variabilité intra-spécifique. En 1983, il devient directeur du département Recherches Forestières du Cemagref.

⁶³ Ingénieur des Eaux et Forêts (1844-1911), il supervise les travaux de reboisement du massif d'Aigoual où il installe un observatoire météorologique.

⁶⁴ René Rol (1896 – 1965), il prend la direction de l'ENEF à la suite de P. Guinier, c'est lui qui dirige l'Ecole au moment de l'intégration des recherches à l'INRA.

et je me souviens encore de sa réponse : « Pas question, l'université va nous bouffer ! ». Tel était encore, à cette époque, l'état des mentalités à l'intérieur du corps forestier »

Il ne s'agit pas forcément de rentrer dans les détails de la restructuration des recherches forestières. Néanmoins, ce qu'on peut retenir, et qui vient corroborer des intuitions de certains de mes enquêtés qui ont commencé la recherche dans les années 1970, c'est que l'ouverture à l'université a permis l'entrée de nouveaux acteurs dans les recherches forestières : des étudiants formés à l'université, dans des disciplines comme la biologie, ou l'écologie, et donc avec un socle de connaissance, on pourrait dire 'moins appliquées' que les enseignements dispensés dans la formation forestière classique des écoles forestières.

Quand elle était encore à l'ENEF, la recherche forestière était considérée comme la « danseuse de l'Administration » (Poupardin et Bouchon, 1995), c'est-à-dire qu'elle n'était pas prioritaire et ne recevait des fonds que s'il en restait. Le passage à l'INRA a ainsi permis à la recherche forestière d'avoir davantage de moyens, d'autant plus que pendant les premières années, les recrutements de personnels à l'INRA se faisaient essentiellement dans ce domaine pour amener à un rééquilibrage des effectifs. Cette période est vue rétrospectivement par les acteurs comme un « âge d'or » de la recherche forestière. A cette époque, la recherche forestière se structure autour de cinq grands thèmes : l'écologie (étude du sol, du climat, des stations forestières), la sylviculture, l'amélioration génétique, la protection des forêts contre les pathogènes et la qualité du bois. Si les premiers recrutements du département forestier concernent essentiellement des spécialistes des forêts (dendrologues, forestiers, écologues), ils s'élargissent ensuite à des scientifiques venant de disciplines scientifiques diverses : entomologistes, généticiens, biologistes des populations. P. Bouvarel (Poupardin, Cussenot et Bouvarel, 1995) raconte dans son témoignage ses efforts continus pour préserver l'identité du département nommé « Recherches forestières » à l'INRA, qui comportait des chercheurs dont les disciplines allaient de l'entomologie ou la biologie à l'écologie forestière ou la génétique. P. Bouvarel a milité pour garder cette identité transdisciplinaire au département de recherche qui a construit la forêt comme objet scientifique dans les années 1960-1970. Dans cette perspective, les recherches forestières ne se circonscrivent pas à une discipline scientifique en particulier mais recourent des savoirs et méthodes diverses.

Les moyens conséquents accordés à la recherche forestière permettent de développer les stations forestières de suivi des forêts. En 1972 est créé le site INRA de Champenoux qui

accueille alors une soixantaine de chercheurs et de techniciens. Situé au cœur des forêts nancéennes, le site de Champenoux permet alors un suivi régulier et systématisé des forêts, grâce au perfectionnement d'outils de sylviculture, comme les tables de production, ou les premiers tests expérimentaux sur les peuplements : mélanges d'espèce, nouvelles techniques de coupes ou de semis. On assiste alors à un changement dans la manière dont on conduit la recherche sur les forêts, vers le développement de liens plus forts avec la recherche à l'INRA, et avec une dimension moins opérationnelle que précédemment. A cet égard, ce que dit Jean Bouchon à propos de son entrée à l'INRA est évocateur :

« [Avant la restructuration] Le travail qui était attendu de nous s'apparentait, en effet, beaucoup à celui des experts forestiers. Nous n'avions pas alors d'expérience autre de la recherche, ni d'arguments pour suggérer de faire autre chose. J'avais toutefois l'impression que ce qui m'était demandé n'était pas vraiment de la recherche. » (Poupardin et Bouchon, 1995)

Pour Jean Bouchon, le rattachement à l'INRA fait prendre conscience aux ingénieurs forestiers qu'ils « ne font pas de la recherche », ou en tout cas que leur activité de recherche s'éloigne des normes habituelles que l'on peut rencontrer à l'INRA. Ainsi la recherche forestière, à cette époque, mène un travail constant pour s'affirmer comme une discipline de recherche en tant que telle. C'est le sens du changement de nom du laboratoire de Jean Bouchon en 1982 :

« C'était la station de sylviculture et de production. Pas mal d'années après, cette appellation nous a posé des problèmes existentiels. Beaucoup de collègues de l'INRA affirmaient, en effet, que ce que nous faisons n'était pas de la recherche. On le constatait en voyant leurs réactions dans les concours : Nous étions assimilés au SAD [département Sciences d'Aide à la Décision], c'est à dire aux gens « qui ne faisaient pas vraiment de la recherche », au sens où l'entendaient alors certains puristes ! J'ai été convoqué, en 1983, par J. Poly⁶⁵ qui m'a demandé de revoir le programme sur lequel je travaillais et de le redéfinir en n'utilisant pas les termes de sylviculture et de dendrométrie. Cela coïncidait à peu près avec le départ de J. Pardé⁶⁶. Nous avons dû revoir complètement notre programme de recherches en n'utilisant plus nos descripteurs et mots-clés habituels. Cet exercice s'est avéré difficile mais il a eu des effets positifs sur le contenu même de nos recherches, même si ironie de l'histoire, la réforme des structures de l'INRA de 1997 conduit aujourd'hui à la réintroduction de la sylviculture comme discipline scientifique⁶⁷. » (*Ibid.*)

⁶⁵ Ingénieur agronome et généticien (1927 – 1997). Il fonde le département de génétique animale de l'INRA, et devient le directeur général de l'INRA en 1978.

⁶⁶ Ingénieur des eaux et forêts (1919 – 2008). Il est un des pionniers de la dendrométrie (mesure de la croissance des arbres) en France. Il participe à la création du centre INRA de Champenoux en 1972.

⁶⁷ Cette 'évacuation' des mots clefs sylviculture et dendrométrie peut aussi s'expliquer par le fait que les approches écologiques et écophysiologiques prennent de l'importance dans les années 1980, notamment dans le

Les propos de Jean Bouchon témoignent d'un déplacement des recherches forestières où la sylviculture est reléguée à une discipline plus opérationnelle que « scientifique ». C'est sans doute à ce moment que se généralise l'expression des « sciences forestières », le pluriel renvoyant alors à ce corpus disciplinaires divers, tandis que la « science forestière » au singulier renvoie à la foresterie rationnelle qui naît à la fin du XVIII^{ème} siècle. Le début de l'histoire de l'intégration des recherches forestières au sein de l'INRA peut se lire comme une volonté de donner un statut de recherche scientifique aux recherches forestières, accompagnée d'un décentrement de ces recherches avec la sylviculture au sens strict. Ce processus d'académisation s'opère par l'intégration de la recherche forestière à l'INRA qui confère des moyens humains et financiers à cette recherche. Les laboratoires se créent, ils s'équipent, les observations et les expériences se développent, les contacts avec l'université et les autres disciplines scientifiques se font plus fréquents. La disparition du mot-clef « sylviculture » à l'INRA coïncide avec une 'écologisation' des forêts dans le contexte de l'affaire des « pluies acides », cette dimension est un des objets du chapitre 2.

C. Formaliser les outils institutionnels et scientifiques de la gestion forestière : l'ONF et la notion de « station forestière »

J'attire l'attention du lecteur sur les deux sens pris par le mot de « station ». Le premier sens dénote les stations de recherches et d'expérimentations où les ingénieurs forestiers mènent des observations (diamètre des troncs, hauteur des arbres, etc.) ou des expérimentations (effets des coupes d'éclaircies sur la production de bois). Le second sens renvoie à une unité biogéographique – la station forestière* – caractérisée par des conditions climatiques, pédologiques (le sol) et topographiques (relief) homogènes. La « station forestière » est un concept de gestion forestière qui permet au forestier de terrain d'identifier les conditions dans lesquelles le peuplement croît, et ainsi d'en déterminer un itinéraire de gestion.

contexte des « pluies acides », où un grand contingent de la recherche forestière est mobilisé pour travailler sur cette problématique pour déterminer l'impact réel des polluants (SO₂ et O₃) sur la santé des forêts

1. *La structuration des organismes de gestion des forêts : la création de l'ONF*

Pour engager une « volonté commerciale » et une « pensée économique » dans la politique agricole et forestière, les lois Pisani créent l'Office National des Forêts (ONF) en 1964, sur le modèle du « *Forest Service* » américain créé à la fin du XIX^{ème} siècle. L'ONF a le statut d'établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), et est donc autonome financièrement. Cette autonomie financière implique le fait que l'ONF donne une grande importance à la vente de bois qui lui permet de financer son activité de gestion. L'ONF prend donc la charge de l'aménagement et l'entretien des forêts domaniales, et il aide les communes à gérer les forêts communales. Pour les forêts privées, les Lois Pisani créent le Centre National des Propriétaires Forestiers (CNPF) en 1964 ; ces structures fournissent des documents de gestion aux propriétaires privés pour les aider à valoriser leur ressource forestière. Le CNPF regroupe onze délégations régionales (CRPF) qui rédigent des schémas forestiers régionaux qui fixent des cadres à l'exploitation des forêts privées.

La création de l'ONF amène deux changements dans la gestion forestière. Premièrement, elle réorganise la structuration du paysage forestier et définit des rôles spécifiques pour chaque institution: l'INRA et le CTGREF (qui devient ensuite le CEMAGREF) mènent la recherche forestière, l'ENGREF s'occupe de la formation des ingénieurs forestiers, le FFN finance les reboisements, l'IFN cartographie les ressources forestières, l'ONF s'occupe de la gestion des forêts dont les missions sont diverses : reboisements, vente du bois, règlement des conflits de propriétés, pénalisation des comportements qui contreviennent au code forestier. Ainsi, la politique forestière du XIX^{ème} centrée sur l'ENEF laisse la place à une politique forestière qui s'exprime dans une multitude d'institutions aux rôles divers et pensées comme complémentaires. C'est ce qui fait, notamment, dire au sociologue Arnaud Sergent que la politique forestière française de la fin du XX^{ème} siècle prend le modèle décentralisé de la gouvernance (Sergent, 2013). Cette partition des rôles a également des conséquences professionnelles. La création de l'ONF a créé le statut professionnel de l'ouvrier forestier (Delaballe, 2016). On peut accéder à ce métier après un Bac professionnel ou un CAP agricole.

Ces réformes dans les institutions publiques s'accompagnent également d'initiatives dans le domaine privé afin de stimuler la production de la filière-bois. On assiste alors au développement de la recherche forestière en amont et en aval de la production forestière. Par exemple, l'Association Forêt-Cellulose (AFOCEL) est créée en 1962 pour mener des recherches sur le potentiel productif des forêts mais aussi sur la qualité des bois, pour améliorer les débouchés de la filière. Le CNPF joue également un rôle de veille et d'information auprès des propriétaires forestiers. Ces deux institutions (AFOCEL et CNPF) sont intégrées progressivement aux réseaux des recherches forestières. Aujourd'hui, par exemple, le CNPF et le FCBA (Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement), qui est le nouveau nom donné à l'AFOCEL, participent à de nombreux colloques sur les questions d'adaptation au changement climatique, avec les instituts de recherches comme IRSTEA ou l'INRA.

2. Formaliser des outils utiles pour le forestier : les tables de production et les « stations forestières »

Parallèlement aux développements de ces outils institutionnels permettant d'améliorer la production forestière nationale, on constate également une standardisation et une multiplication des outils mis à la disposition des gestionnaires pour calculer la ressource en bois d'une forêt (tables de production) et pour adapter les objectifs et pratiques de sylviculture à une forêt particulière (station forestière). C'est avec ces deux outils que sont réalisés les guides de sylviculture qui sont des itinéraires de gestion consacrés à une région forestière homogène.

« Les tables de production sont des tableaux qui traduisent en données chiffrées l'évolution probable dans le temps de peuplements équiens et purs (mono-spécifiques), classés par essence et par classe de productivité » (Décourt, 1999, p.80-81). Elles renseignent alors sur des informations caractéristiques d'un peuplement homogène dans un contexte écologique donné : l'âge, le diamètre, la surface terrière*⁶⁸ ou le volume de bois. Pour les construire, les forestiers relèvent à intervalles réguliers – tous les cinq ou dix ans – les informations nécessaires à la construction de la table sur une station forestière donnée. Elles peuvent se construire de diverses manières, c'est-à-dire à partir de relations mathématiques

⁶⁸ Donnée conventionnelle qui mesure la compétition entre les arbres

simplificatrices entre diverses variables des forêts. Par exemple, on peut construire une table de production en se basant sur la loi d'Eichhorn qui postule que pour un peuplement mono-spécifique et équien – composé d'arbres de même âge – la production potentielle du peuplement est déterminée par la hauteur dominante du peuplement. Cette relation entre production d'un peuplement et hauteur maximale acquiert une signification géographique théorique, c'est la « région de croissance » – *das Wuchsgebiet*. C'est d'ailleurs ainsi que N. Decourt définit le terme de *Wuchsgebiet*. Elle est « l'ensemble des stations où la croissance de l'essence considérée suit une même loi d'Eichhorn. » (Decourt, 1964, p.648). Grâce à la loi d'Eichhorn, on peut agréger des mesures effectuées sur des arbres qui se situeraient dans des stations différentes pour une même espèce et un peuplement équien. Il faut noter que le domaine de validité des tables de production est circonscrit à des forêts homogènes, c'est-à-dire mono-spécifiques et composées d'arbres de même âge. Elles sont donc utiles pour des plantations ou des forêts dites artificielles, mais ne permettent pas de prévoir la ressource de forêts mélangées. Si les tables de production existent depuis le XIX^{ème} siècle, c'est à partir de la seconde moitié du XX^{ème} siècle que les ingénieurs forestiers entreprennent la création systématique de ces tables pour les essences forestières françaises les plus représentées. On peut citer par exemple les tables de production réalisées pour les essences dans les régions forestières suivantes : l'épicéa dans le Nord-est (Decourt, 1971), le douglas (Pardé et Ayrat, 1956) ou plus particulièrement le douglas dans le Massif Central (Decourt, 1967), le pin maritime dans le Sud-ouest (Decourt et Lemoine, 1969), le pin sylvestre en Corse (Decourt, 1965).

La notion de « station forestière » s'est formalisée à la fin des années 1970. En 1979, un groupe de travail est créé, il se nomme « Typologie des stations forestières » et est animé par la Direction des Forêts (l'administration en charge des forêts au ministère) et par l'Institut pour le Développement Forestier (IDF) qui est le service R&D du CNPF. Ce groupe de travail regroupe « toutes les structures touchant à la forêt : administration, gestion, enseignement, recherche, développement » (Becker et Le Goff, 1988). Il adopte la définition de la station suivante :

« Etendue de terrain de superficie variable, homogène dans ses conditions physiques et biologiques (mésoclimat, topographie, composition floristique et structure de la végétation spontanée, sol). Une station forestière justifie, pour une essence déterminée, une sylviculture précise, avec laquelle on peut espérer une productivité comprise entre des limites connues » (*Ibid.*, p.30)

La station doit permettre au praticien de gérer sa forêt en « bon père de famille » (*Ibid.*) c'est-à-dire adopter les principes d'une gestion soutenable, et préserver son capital tout en maximisant la vente de son bois sur le marché. « La notion de station est pour le forestier et plus généralement pour le naturaliste une unité biologique intuitive. Elle correspond à la perception d'un paysage végétal homogène quant à sa composition et occupant une position topographique déterminée. Elle est donc liée à un certain niveau de perception et d'homogénéité » (Bonneau et Timbal, 1973, p.201).

Ainsi, un peuplement forestier se situe dans une station qui est définie comme une unité spatiale aux conditions homogènes eu égard à certaines informations comme l'altitude, l'exposition au soleil, la forme et l'inclinaison de la pente, la température, le type d'humus ou les saisons de croissance (Doucet et Côté, 2009, p.608). A une station forestière particulière correspond donc des essences capables d'y pousser et des principes de gestion à mettre en œuvre, comme la fréquence des éclaircies. A partir de l'étude de la station, on peut calculer un indice de fertilité. La « station forestière » est donc un objet hybride à mi-chemin entre outil descriptif et outil opérationnel permettant une sylviculture adaptée au peuplement forestier correspondant. A partir des années 1980, l'ONF, l'IFN ou encore le CEMAGRF publient de nombreuses typologies de stations forestières. La station est une notion statique : elle fixe l'homogénéité du peuplement forestier eu égard à la station forestière dans laquelle il se trouve (Bonneau et Timbal, 1973). Cette conception statique ne permet pas de comprendre les perturbations possibles qui peuvent peser sur l'écosystème forestier (aléas naturels, insectes, pollutions). Ainsi, si le peuplement dépérit, elle ne permet pas d'en comprendre la cause. C'est d'ailleurs le sens d'une des remarques de Claude Millier (1973), directeur de recherche à l'INRA. La relation entre la station et la production permet « l'action et la prédiction », mais sans que la cause soit explicitée. C'est une relation statistique et statique qui ne permet pas de comprendre le fonctionnement de l'écosystème forestier. Devenu le concept central de la gestion forestière à partir de la fin des années 1970, en lien avec les tables de production, on présage alors pourquoi les « pluies acides » vont mettre dans l'embarras le milieu forestier. Etant statique, elle ne permet pas d'apprécier les évolutions du peuplement forestier en lien avec la pollution atmosphérique. Les « pluies acides » vont commencer à effriter cette notion. L'irruption du changement climatique met à défaut complètement ce concept de gestion. Depuis une trentaine d'années et notamment avec la découverte des changements de productivité des essences forestières dus aux changements climatiques, le concept de station

forestière est battu en brèche, car il présuppose un climat constant. Les changements de productivité observés rendent ainsi de plus en plus incertains les futurs des forêts, dans la mesure où les écosystèmes forestiers ont des dynamiques d'évolution non-linéaires, il devient difficile d'anticiper leurs évolutions par la prolongation des tendances passées. Ces différents éléments complexifient les futurs des forêts, comme je le montrerai dans les deux chapitres suivants.

Conclusion

Les futurs des forêts émergent avec la naissance de la science forestière à la fin du XVIII^{ème} siècle. J'ai montré que ces futurs tendaient à se diversifier, notamment par le processus de 'biologisation' des forêts. Deux grandes tendances se dessinent à partir de ce chapitre historique.

Premièrement, la quantification des forêts est un processus d'ordonnement de la nature qui vise à faire de la forêt une infrastructure du territoire national. Pour ce faire, les ingénieurs forestiers développent des techniques d'inventaire, de quantification et de prévision qui permettent une gestion rationnelle de la ressource en bois. Par l'intermédiaire du concept de « Forêt normale », *via* l'information et l'inventaire forestiers, les calculs et les prévisions de la ressource de bois, les statistiques forestières n'ont pas seulement une valeur descriptive, mais elles ont une dimension prescriptive. En proposant un modèle pour compter, calculer et prédire la ressource, la science forestière tend à généraliser l'adoption d'une gestion qui est basée sur ce modèle scientifique. C'est d'ailleurs l'une des conclusions d'Henry Lowood :

« Des objectifs pratiques avaient encouragé l'utilitarisme mathématique, ce qui sembla par suite promouvoir la perfection géométrique comme signe extérieur d'une forêt bien gérée. A son tour, la disposition rationnelle des arbres offrit de nouvelles possibilités de contrôler la Nature »⁶⁹ (Lowood, 1990, p.341)

Cette vision économique et calculatoire de la ressource forestière s'inscrit plus généralement dans une théorie politique qui fait de la ressource forestière un élément central de la richesse et du pouvoir de l'Etat. Dans cette perspective, se développe une politique forestière étatique destinée à encourager le développement de cette science balbutiante à la fin du XVIII^{ème} siècle par la création d'institutions forestières, et qui vise à restreindre les usages locaux des forêts pour permettre leur exploitation rationnelle et scientifique. Dans cette politique forestière, la forêt devient « une partie de l'infrastructure nationale, une ressource d'Etat » (Barton, 2002, p.53). La quantification des forêts est un processus politique. Cette dimension avait déjà été mise en avant par le géographe anglais David Demeritt dans son étude de la

⁶⁹«Practical goals had encouraged mathematical utilitarianism, which seemed, in turn, to promote geometric perfection as the outward sign of the well-managed forest; in turn, the rationally ordered arrangement of trees offered new possibilities for controlling nature” (Lowood, 1990, p.341)

cartographie et la quantification des forêts américaines au cours du XIX^{ème} siècle : « Le fait de soumettre la forêt à des pratiques standardisées de quantification a transformé un peuplement forestier hétérogène en une quantité apparemment calculable qui permet l'exercice de nouvelles formes de contrôle disciplinaire et de pouvoir gouvernemental précis »⁷⁰ (Demeritt, 2001, p.445). La mise en ordre de la nature, par le processus de quantification, est un processus politique.

Deuxièmement, le discours politique des RTM qui exproprient les communautés locales au nom de l'intérêt général a des ressemblances avec le discours actuel sur la forêt comme « puits de carbone » à l'échelle globale. En effet, l'un des partis pris audacieux de l'ouvrage de Decocq, Kalaora et Vlassopoulos, sur la *Forêt Salvatrice*, est d'analyser rétrospectivement les discours des forestiers du XIX^{ème} siècle à l'aune des enjeux environnementaux du XXI^{ème} siècle, et notamment des changements globaux. Les auteurs traitent le discours de la *Forêt salvatrice* du XIX^{ème} siècle comme un ancêtre du discours actuel sur la forêt comme « puits de carbone » : « la forêt n'est plus considérée comme un milieu, un territoire, mais comme une entité abstraite dont la fonction est réduite à sa capacité à fixer le carbone et à compenser les émissions de gaz à effet de serre des acteurs économiques. » (Decocq, Kalaora et Vlassopoulos, 2016, p.161). Ce discours qui porte sur le rôle global joué par la forêt a pour conséquence « la dépossession des forêts par les usagers et les habitants, au profit des grandes firmes internationales et des ONG mondiales » (*Ibid.*). Aux auteurs de conclure du lien entre les deux argumentaires : les reboisements au nom de l'intérêt général et les forêts comme « puits de carbone » pour lutter contre les changements globaux :

« Le discours généralisé qui, au nom de l'intérêt général « global », occulte toutes les singularités locales et territoriales n'est pas très éloigné de celui développé au XIX^{ème} siècle à une échelle inférieure. » (*Ibid.*, 2016, p.169)

On pourrait pousser l'analyse encore plus loin. L'émergence de la science et de la statistique forestières qui transforme les arbres en chiffres participe de ce même mouvement. Historien de la quantification et de l'usage des statistiques, Theodore Porter note la même abstraction opérée par les statistiques : « Comme les statisticiens du XIX^{ème} aimaient à s'en vanter, leur

⁷⁰ “Subjecting the forest to standardizing practices of quantification transformed heterogeneous forest stand into an apparently calculable quantity available to new forms of precised isciplinary control and governmental power”(Demeritt, 2001, p.445)

science éliminait par la moyenne tout le contingent, l'accidentel, l'inexplicable ou le personnel, et ne laissait subsister que les régularités à grande échelle »⁷¹ (Porter, 1995, p.138). La quantification des forêts opère à grande échelle, et de ce fait abstrait et néglige les réalités locales – qu'elles soient sociales ou écologiques. C'est d'ailleurs le sens politique qu'Alain Desrosières donne à ce qu'il nomme le processus de quantification (Desrosières, 2008, p.10). Le sociologue de la quantification insiste sur les dimensions politiques inhérentes à la création du système d'équivalence qui réduit la réalité étudiée à un nombre calculable. Dans cette perspective, il y a déjà inscrit dans les artefacts quantificateurs (tables de production, modèles, indicateurs) une mise en gouvernement des forêts. La quantification des forêts n'est que la continuation de la politique forestière par d'autres moyens ; la quantification des forêts est une 'biopolitique' de ces dernières. Les analyses de Michel Foucault (2004), citées dans l'introduction générale de la thèse, permettent de saisir le lien étroit qui existe entre quantification des forêts et gouvernement de ces dernières comme l'a montré ce chapitre. La prévision de la ressource occupe une place centrale dans cette 'biopolitique' des forêts. Ce chapitre a montré qu'il y avait un début de pluralisation des futurs des forêts, opéré par le développement des recherches forestières qui renforcent une 'biologisation' des forêts. Cette biopolitique prend un nouveau tournant à partir des années 1980 et la mise à l'agenda politique et scientifique du problème des « pluies acides ». C'est dans ce contexte que se développent les technologies et dispositifs actuels de surveillance des forêts qui sont utilisés aujourd'hui pour évaluer les impacts du changement climatique sur les forêts.

⁷¹ Traduction française de Gérard Marino.

Chapitre 2 : Le futur catastrophiste de la « mort des forêts » : l'affaire des pluies acides et l'essor de la surveillance des écosystèmes forestiers

Introduction

« Nous sommes à la veille d'un Hiroshima écologique » : ces propos sont ceux d'un homme politique allemand, figurant dans l'hebdomadaire *Der Spiegel* du 14 février 1983 (Roqueplo, 1993, p.13-14). Cette sentence catastrophiste renvoie aux futurs présumés des forêts européennes dans lesquelles on constate des dépérissements depuis les années 1970, et dont on attribue la cause aux pluies acides, ou pollution atmosphérique à longue distance. Au début des années 1980, l'affaire des pluies acides commence en Allemagne, puis se propage à toute l'Europe. Il est alors attendu que les recherches forestières statuent sur les effets réels de cette pollution sur les forêts, et déterminent quel composé chimique est responsable des dépérissements visibles qui se matérialisent essentiellement par des jaunissements des feuilles, des défoliations ou la perte des aiguilles des conifères. En 1991, « la page est tournée » (Barthod et Muller, 2006, p.41) : la pollution atmosphérique à longue distance n'est plus considérée comme le seul facteur causant les dépérissements forestiers, et la « mort des forêts » (*das Waldsterben*) n'a pas eu lieu.

Néanmoins, l'affaire des pluies acides a eu des effets durables sur la structuration des recherches forestières dans les années 1980-1990. On a assisté au déploiement d'un réseau d'observation et de surveillance des forêts, au développement de l'approche écosystémique dans l'étude des forêts, à la mise au point de modèles fonctionnels écophysologiques*, et la gestion forestière a adopté une doctrine pour appréhender la « santé » des forêts – la doctrine des trois facteurs : ceux prédisposant, ceux déclenchant et ceux aggravant. C'est pour réduire les incertitudes liées à la mise en évidence des effets des pluies acides sur les forêts que les recherches forestières ont mis au point ces différents savoirs, techniques et paradigmes qui sont, aujourd'hui, au cœur des infrastructures de recherche forestière. C'est dans le contexte controversé des pluies acides que ces infrastructures se sont orientées vers la surveillance des écosystèmes forestiers, et l'anticipation de leurs futurs possibles et pluriels.

Ce chapitre retrace la trajectoire de l'affaire des pluies acides, et décrit comment ce problème d'environnement a eu des effets durables sur les recherches et la gestion forestières. Il s'appuie notamment sur le travail du sociologue des sciences Philippe Roqueplo (1988 ; 1990 ; 1993), mais également sur les nombreux articles publiés par des acteurs ayant participé aux recherches entreprises pour comprendre et analyser les dépérissements forestiers. Nombre d'entre eux ont publié des analyses rétrospectives du problème des pluies acides, à mi-chemin entre analyses historiques et sociologiques et témoignages personnels (Bonneau, 1989 ; Barthod et al., 1993 ; Barthod et Muller, 2006 ; Bouleau et Barthod, 2016). Mon récit s'appuie sur le dialogue entre ces deux sources de littérature, ainsi que l'analyse de rapports qui ont marqué la trajectoire du problème des pluies acides en France, comme le rapport rédigé par le chargé de mission Jean Valroff (1985) pour le Premier ministre et celui réalisé par l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Techniques (OPECST, 1985).

Ce chapitre s'axe autour de deux moments. Je retrace d'abord la trajectoire prise par l'affaire des pluies acides, en dégagant les différentes étapes de construction de ce problème, et notamment le passage de la mort annoncée des forêts au début des années 1980 à la réfutation de cette affirmation au début des années 1990. Si l'affaire des pluies acides a pris la forme d'une controverse socio-environnementale, c'est parce que les recherches forestières ont été confrontées à de nombreuses incertitudes pour statuer sur ce problème. Ces incertitudes, que l'on peut appeler, des incertitudes météorologiques, car elles sont essentiellement liées aux mesures des dépérissements et des effets des polluants sur les forêts, ont amené les recherches forestières à développer de nouvelles approches, de nouveaux savoirs et de nouvelles infrastructures de recherches. La seconde partie de ce chapitre se concentre sur ces changements opérés dans les recherches et la gestion forestières, et montre comment le futur catastrophiste de la « mort des forêts » a eu pour effet d'orienter les infrastructures de recherche forestière vers la surveillance des écosystèmes forestiers, et l'anticipation de leurs futurs pluriels.

I. Les incertitudes métrologiques : au cœur de la dynamique de l'affaire des pluies acides

Le récit de l'affaire des pluies acides s'articule autour de trois moments. Je retrace d'abord comment cette controverse socio-environnementale s'est développée en identifiant les quelques moments-clefs : l'alerte relayée par la presse généraliste allemande, la manière dont ce problème est arrivé en France, et enfin la clôture de la controverse lorsque le problème des pluies acides n'est plus considéré comme le facteur principal des dépérissements observés. Puis, je montre comment la pollution atmosphérique à longue distance a pu être comprise, par les différents acteurs, comme un « risque nouveau » dans le sillage des analyses du sociologue allemand Ulrich Beck (1986). Ce « risque nouveau » met dans l'embarras les recherches forestières qui ont alors des difficultés à comprendre ses effets sur les forêts, d'autant que la notion de « dépérissement » ne fait pas consensus au sein de la communauté des recherches forestières européennes. Enfin, étant donné que les pluies acides sont un phénomène transfrontalier, cette affaire a initié une politique scientifique européenne où les différents Etats se sont dotés d'infrastructures d'observation, et de normes de régulations communes. Cette dynamique achève un mouvement d'harmonisation des dispositifs d'observation et de recherche à l'échelle européenne qui avait été initié dès la fin du XIX^{ème} siècle.

A. Scandale et emballement médiatique ? Trajectoire scientifique, sociale et politique des pluies acides

1. 16 novembre 1981 : le début du scandale

16 novembre 1981, l'hebdomadaire allemand, *Der Spiegel* titre « Pluies acides sur l'Allemagne – La forêt meurt » (*Saurer Regen über Deutschland – Der Wald stirbt*). Le journal allemand se base sur les propos de deux scientifiques allemands, spécialistes des forêts, Peter Schütt de l'Université de Munich, et Bernard Ulrich de l'Université de Göttingen, et fait alors le lien entre deux phénomènes que l'on observe à partir des années 1970. Premièrement, le rejet dans l'atmosphère de particules polluantes qui proviennent de la combustion des carburants automobiles et de la fumée des activités industrielles, et causant

l'acidification des lacs, a entraîné une série de mesures de protection de la qualité de l'air comme le *Clean Air Act* aux Etats-Unis (1970). Cet élément figure d'ailleurs en introduction du rapport de l'OPECST de 1985. Ce rapport visait à évaluer le phénomène des pluies acides et, entre autres, déterminer le lien possible entre pollution atmosphérique à longue distance et les dépérissements forestiers que l'on observe. Ces éléments posent le contexte scientifique de l'époque et montrent quels facteurs étaient, alors, mis en avant et mis en cause. Le second phénomène observé à partir des années 1970 concerne des dépérissements forestiers qui sont constatés dans plusieurs parties d'Europe, notamment en Bavière, dans les Vosges ou en Tchécoslovaquie. Ce n'est pourtant pas la première fois que l'on constate des dépérissements forestiers en Europe, et plus particulièrement en Allemagne. La pollution locale occasionnée par les usines avait déjà été mise en cause au cours des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles (Brüggemeier, 2002). On trouve également d'autres mentions de dépérissements dans des ouvrages de forestiers allemands du début du XX^{ème} siècle sans pour autant que sa cause soit clairement identifiée (Barthod et Muller, 2006). Ce sont ces deux séries de phénomènes, a priori disjointes, qui vont être liées par l'intermédiaire de l'alerte lancée par le *Spiegel* qui lance le scandale médiatique.

L'opinion publique est prise à partie car le *Spiegel* est un hebdomadaire généraliste. Le *Spiegel* s'adresse donc à une communauté plus large que la communauté scientifique ou la communauté des forestiers : l'hebdomadaire alerte l'opinion publique. Ainsi, deux ans avant son émergence en France par l'intermédiaire de forestiers vosgiens et alsaciens, le problème des pluies acides prend la forme d'un scandale médiatique. Cela influence grandement la production d'expertises scientifiques qui visent à mettre en évidence le dépérissement forestier et à comprendre ses origines. Ainsi, la logique d'imputation propre au scandale incrimine des composés chimiques responsables des dépérissements, ces composés proviennent d'activités humaines différentes (industries et automobiles). En mettant en évidence la responsabilité d'un composé chimique plutôt qu'un autre, les expertises scientifiques participent au processus d'incrimination des activités humaines tenues pour responsables des pluies acides qui se traduit par la formulation de mesures coercitives pour réduire les pollutions engendrées par ces activités. Par exemple, en France, la loi du 1^{er} juillet 1985 met en place une « taxe parafiscale sur la pollution atmosphérique » pour créer un fonds afin d'aider les entreprises à désulfurer leurs centrales (Barthod et al., 1993, p. 509). L'accord de Luxembourg du 28 juin 1985 vise à taxer les voitures selon le taux de polluants rejetés dans l'air – cet accord est longuement débattu et fait notamment l'objet de discussions

houleuses entre la France et l'Allemagne (Roqueplo, 1988, p. 285s). Le pot catalytique devient obligatoire en Europe par la directive européenne de 1993. On comprend alors le contexte dans lequel les recherches forestières sont amenées à développer leurs expertises sur le dépérissement forestier : la mise en évidence d'un composé chimique (le dioxyde de soufre SO₂ ou les oxydes d'azote NO_x) expliquant le dépérissement forestier est en même temps l'incrimination des activités dont il provient. Le dioxyde de soufre est produit par les activités industrielles tandis que les oxydes d'azote sont essentiellement produit par les gaz à échappement des automobiles. L'incrimination du composé chimique entraîne alors des mesures politiques. Il y a une intrication des expertises scientifiques et des régulations économiques et politiques.

2. L'alerte passe la frontière : les pluies acides menacent les forêts françaises

Le phénomène des pluies acides devient problème public en France à partir de 1983, lorsque des forestiers alsaciens et vosgiens alertent sur des dépérissements qu'ils ont constatés et qu'ils les lient avec le phénomène des pluies acides, notamment parce qu'ils entendent beaucoup parler de ce phénomène à la radio en écoutant les fréquences allemandes que l'on capte près de la frontière (Roqueplo, 1993). Une délégation de la Confédération Française Démocratique du Travail (CFDT) de l'ONF va alerter la direction sur le problème, dans un contexte où cette fédération syndicale souhaite un débat sur la sylviculture « productiviste » opérée par l'ONF (Barthod et Muller, 2006 ; Bouleau et Barthod, 2016). Pour Christian Barthod, ingénieur forestier, ce contexte a pesé sur la réaction de la direction de l'ONF qui souhaite éviter ce débat sur la sylviculture, car elle craint que les dépérissements observés puissent servir de point d'accroche pour contester le modèle sylvicole de l'ONF. Les phénomènes d'environnement sont des moments réflexifs où les sociétés « entrent en débat avec elles-mêmes » pour le sociologue Philippe Roqueplo (1990) dont les analyses s'inscrivent théoriquement dans une sociologie du risque comme celle d'Ulrich Beck (1986). Pourtant, ce débat n'a pas eu lieu. En juin 1985, la direction technique de l'ONF publie une note de service de trois pages (N°85.D.762) qui affirme que la solution au problème des pluies acides est à chercher dans les causes du phénomène (les émissions polluantes), et non dans l'application d'une nouvelle sylviculture. C. Barthod détaille ensuite les grandes lignes de cette note de service : « Elle refusait la piste des essences résistantes ou de la sélection

génétique, récusait toute tentation de raviver les discussions sur les avantages et les inconvénients de la structure régulière et de la structure jardinée, et encadrait strictement la remise en cause des aménagements, en limitant les libertés à certaines règles de culture et à l'état d'assiette des coupes d'amélioration. Cette note technique ne fut jamais remise en cause. » (Barthod et Muller, 2006, p.29). Cette note est reprise par le rapport Valroff remis en août 1985 (Valroff, 1985) : « Les forestiers affirment que la solution se situe dans la suppression des causes et non dans la mise au point d'une sylviculture nouvelle ». Le rapport Valroff remis au premier ministre passe sous silence les débats existants au sein de l'ONF. La note technique et le rapport annihilent la possibilité d'un débat sur les options de sylviculture au sein de l'ONF. La sylviculture moderne et productiviste n'est pas remise en cause. La régulation porte donc sur les composés chimiques polluants.

3. *Les coupables du scandale : quel composé chimique incriminer ?*

Qui sont les coupables ? Quels composés chimiques sont-ils incriminés ? Et donc quelles activités humaines faut-il rendre responsables du *Waldsterben* ? Une nouvelle fois, la trajectoire prise par le problème des pluies acides comporte des rebondissements et des bifurcations. Dans un premier temps, c'est le dioxyde de soufre (SO_2) qui va être tenu pour responsable des dépérissements forestiers. Cette accusation s'explique, pour Roqueplo, par une « convergence de savoirs » (Roqueplo, 1993, p.16). En effet, le sociologue des sciences note qu'au début des années 1980, on savait que le SO_2 était responsable de l'acidification des lacs canadiens et scandinaves, et qu'il était également responsable de l'état catastrophique de certaines forêts de Tchécoslovaquie, comme celles des Monts Métallifères dont les photographies ont été largement reprises par les médias allemands et français (Roqueplo, 1993). Ainsi avec cette première mise en accusation, ce sont essentiellement les centrales à charbon qui vont être tenues pour responsables des pluies acides.

Par la suite, des travaux de scientifiques allemands et américains mettent en évidence un autre composé chimique comme responsable des dépérissements forestiers : l'ozone (O_3). Or l'ozone est formé, sous l'action du rayonnement solaire, par une réaction entre les oxydes d'azote (NO_x) et les hydrocarbures. Avec l'émergence de l'ozone comme polluant responsable, ce sont les gaz rejetés par les automobiles qui sont alors mis en cause. C'est d'ailleurs l'une des conclusions du rapport de l'OPECST de 1985 : « dans l'état actuel des

connaissances, il semble que seul l’ozone présente une menace réelle pour les cultures » (OPECST, 1985, p. 56). En 1987, le magazine *Environnement Actualité* titre « Les scientifiques « sèchent » sur les pluies acides » à la suite d’un colloque international tenu à Grenoble (Roqueplo, 1993, p.21). Le programme DEFORPA (Dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique) qui a été initié pour statuer sur le *Waldsterben*, rend une partie de ses conclusions dans un article de novembre 1990, écrit par le directeur du programme Guy Landmann (Landmann, 1990) :

« La responsabilité du SO₂ est aujourd’hui à peu près unanimement rejetée par la communauté scientifique [...] Incontestablement, le rôle de l’ozone est jugé comme plus vraisemblable, même si son action réelle fait toujours l’objet de vives controverses [...]. L’ozone semble également en mesure d’aggraver les conséquences de certains stress climatiques, tels que la sécheresse ou les froids hivernaux » (Landmann, 1990).

La dernière phrase de Guy Landmann est fondamentale : la pollution atmosphérique n’est plus considérée comme la principale coupable du dépérissement des forêts, mais peut aggraver des dépérissements qui sont dus essentiellement à des facteurs climatiques. Les conclusions rétrospectives mettent, par la suite, en avant l’importance de la tempête de 1976 qui a fragilisé les peuplements forestiers qui dépérissent dans les années 1980, ainsi que certains épisodes de sécheresse qui ont pu fragiliser, notamment, les sapins vosgiens (Landmann, 1991, p.126). La pollution atmosphérique est alors considérée comme un « facteur aggravant », terme qui fait partie de la typologie construite pour servir de base à la surveillance sanitaire des forêts (cf. II-B-2-b).

On peut conclure que si certains acteurs du monde forestier ont pu parler d’emballage médiatique pour caractériser le phénomène des pluies acides, cela s’explique par une friction entre deux temporalités qui s’affrontent : la temporalité longue de la recherche sur les forêts, et la temporalité courte du scandale médiatique. Le monde forestier est alors pris en tenaille entre une opinion publique scandalisée et des dynamiques politiques et économiques qui pèsent sur les conséquences de leurs expertises. Cela explique en partie pourquoi les pluies acides constituent un élément central dans la mémoire collective du monde forestier. C’est aussi parce que le dépérissement forestier a fonctionné comme un emblème pour la lutte contre la pollution atmosphérique, et cela s’explique par la trajectoire prise par la controverse sur les pluies acides. Le rapport de l’OPECST signalait déjà en 1985 cette analyse :

« Il est quand même ironique de constater que le plus grand intérêt du public se concentre sur l'aspect de la pollution atmosphérique – les forêts – où l'on rencontre les plus grandes incertitudes tant sur les causes que sur les effets. Nous en savons pourtant beaucoup plus sur les conséquences de la pollution atmosphérique sur la santé humaine, sur la dégradation des matériaux, sur l'acidification des eaux de surface ou sur la réduction de la visibilité que sur les effets de cette même pollution sur les forêts. Malheureusement, les incertitudes dans un domaine sont souvent mises en avant pour ne pas prendre de décision dans les autres » (OPECST, 1985)

L'émergence du futur catastrophiste de la mort des forêts résulte ainsi d'effets de cadrages politiques et scientifiques qui ont contribué à faire du dépérissement forestier l'effet majeur de la pollution atmosphérique, alors que c'était le domaine où les expertises étaient les plus incertaines. Certains acteurs forestiers confient, rétrospectivement, qu'ils ont eu le sentiment d'avoir été pris en étau par les intérêts économiques, notamment du secteur automobile français, et que le dépérissement forestier a fonctionné comme une sorte d'épouvantail pour passer sous silence d'autres effets de la pollution atmosphérique, notamment sur la santé humaine (Bouleau et Barthod, 2016). A partir de la fin des années 1980, la pollution atmosphérique n'est presque plus envisagée par l'image du dépérissement des forêts, mais elle est surtout cadrée par rapport aux effets sur la santé humaine (Roqueplo, 1993). Les pluies acides cessent d'être un enjeu central pour les recherches forestières, mais ont produit un héritage durable pour ces dernières : un réseau d'infrastructures, de savoirs et de pratiques qui naît dans le contexte des pluies acides, et qui perdurent encore aujourd'hui. L'affaire des pluies acides a modelé durablement les infrastructures de recherche forestière qui s'orientent alors vers la surveillance des écosystèmes forestiers et l'anticipation de leurs futurs incertains et pluriels. C'est ce qu'on peut nommer le « *monitoring* forestier », ou surveillance continue des forêts.

Comment expliquer la trajectoire prise par la controverse des pluies acides ? Un point fondamental réside dans les incertitudes météorologiques qui sont liées à la confrontation d'un type « nouveau » de pollution : la pollution atmosphérique à longue distance.

B. Nouvelle pollution, « nouveau risque » : incertitudes météorologiques et dépérissement forestier

1. *Les pluies acides comme « risque nouveau »*

Le rapport de l'OPECST est une source fondamentale pour mon travail car il fait état des recherches sur la pollution atmosphérique et sur le dépérissement forestier en 1985. Il donne donc à voir l'état des connaissances passées sur ce phénomène, et ainsi les problèmes que les scientifiques ont rencontré pour évaluer avec pertinence les effets de la pollution atmosphérique. Pour réaliser ce rapport, qui est le premier de l'Office tout jeune créé, la commission d'enquête a auditionné des scientifiques aux disciplines scientifiques diverses, des associations et des entreprises : professeur de sylviculture, maître de conférence en chimie, médecins (pneumologues), ingénieurs des Ponts-et-chaussées, service de l'inventaire forestiers, *Les amis de la Terre*, EDF, Gaz de France, ou le directeur de l'Agence pour la qualité de l'air.

C'est la prise de conscience des problèmes météorologiques (de mesure et de mise en évidence des effets de la pollution atmosphérique) qui met en branle des projets de recherche, des infrastructures de collecte de données et des collaborations scientifiques, dans le domaine des recherches forestières. Ces derniers vont durablement marquer les recherches forestières par, notamment, le développement de modèles écophysologiques, la compréhension écosystémique, l'émergence de la dendroécologie*, la compréhension des mécanismes des forêts en termes de fonctionnements et de dysfonctionnement, ou la généralisation de la métaphore médicale pour suivre l'évolution des forêts et prévenir les problèmes de pollutions ou d'espèces invasives. La pollution atmosphérique à longue distance est plusieurs fois envisagée par le rapport comme un « nouveau type de pollution » dont les traits caractéristiques sont les suivants : une pollution « invisible », « chronique » et « insidieuse » (OPECST, 1985). Il faut également mettre en avant son caractère « transfrontalier » et son action « à longue distance », car les manières traditionnelles de réguler la pollution, avant les années 1970, concernaient essentiellement des pollutions locales, comme les déversements de produits chimiques dans les lacs ou les rivières. Sous cette forme, les pluies acides

exemplifient cette nouvelle conception des risques défendue par le sociologue allemand Ulrich Beck :

« Les risques générés au stade le plus avancé du développement des forces productives – je pense en premier lieu à la radioactivité qui se dérobe totalement à la perception humaine immédiate, mais aussi aux substances polluantes et toxiques présentes dans l’air, l’eau et les produits alimentaires, et aux effets à court et à long terme de ces substances sur les plantes, les animaux et les hommes – se distinguent fondamentalement des richesses. Ils provoquent systématiquement des dommages, souvent *irréversibles*⁷², restent la plupart du temps *invisibles*, requièrent des *interprétations causales*, se situent donc seulement et exclusivement dans le domaine de la *connaissance* (scientifique ou plutôt antiscientifique) qu’on a d’eux, peuvent être transformés, réduits ou augmentés, dramatisés ou banalisés par la connaissance, et *se prêtent* donc tout particulièrement *aux processus de définition sociale*. Les médiums et les options de définition du risque occupent par la même des positions clés dans le domaine sociopolitique » (Beck, 1986, p.41)

Ces « nouveaux risques », dont parle le sociologue allemand, comportent les caractéristiques suivantes : ils sont « invisibles », et donc sont forcément rendus visibles par le concours de la science et de l’expertise. Ils « se prêtent [...] particulièrement aux processus de définition sociale », cela signifie qu’ils se déploient dans des espaces sociaux où la définition et le cadrage de ces risques sont déterminants pour les mesures décidées pour le réguler. L’affaire des pluies acides que j’ai racontée précédemment témoigne de cette importance de la définition sociale du phénomène.

On peut aller un peu plus loin dans la distinction des différents types de pollutions, grâce au rapport de l’OPECST (OPECST, 1985, p.30-31). Il est facile « d’identifier les polluants et les pollueurs avec une assez grande précision » (*Ibid.*, p.30) pour ce qui est de la pollution des eaux douces, et la « pollution atmosphérique de proximité » est « aujourd’hui pratiquement maîtrisée dans les pays industrialisés » (*Ibid.*, p.31). On peut citer par exemple la fin du *Smog* londonien grâce aux mesures prises dans le cadre du « *Cleaner Air Act* », adopté au Royaume-Uni en 1956. La « pollution atmosphérique », quant à elle, pose des défis d’évaluation et de quantification dus à sa nature : « Cette pollution aurait pour caractéristique d’être faiblement concentrée et diffuse, mais chronique et susceptible d’agir à une assez grande distance de sources d’émissions » (*Ibid.*, p.30). Pourquoi la pollution atmosphérique pose-t-elle un défi métrologique et remet-elle en question les manières traditionnelles d’évaluer cette dernière ?

⁷² Souligné par l’auteur lui-même.

Premièrement, son caractère invisible contraste avec les manières dont on a traditionnellement appréhendé la pollution des industries depuis le début du XIX^{ème} siècle : on peut penser aux miasmes, ou aux règlements policiers de la qualité de l'air au XIX^{ème} siècle (Fressoz et Bonneuil, 2016), en apportant une nuance, les effets des pluies acides sont visibles sur les bâtiments. Cette focalisation opérée essentiellement sur un type de pollution locale et visible explique sans doute pourquoi très peu d'études se sont intéressées à mettre en évidence l'impact de la pollution atmosphérique sur les forêts. C'est en tout cas ce que constate le rapport de l'OPECST : « Certains de ces composés sont connus pour être dangereux pour l'homme, et sont même mutagènes ou cancérigènes. Leur action sur les plantes est très peu étudiée et leur analyse systématique dans les milieux forestiers n'a pas été entreprise » (OPECST, 1985, p.48).

Deuxièmement, on a affaire à une pollution en petite quantité mais « constante et chronique » (OPECST, 1985), ce qui la place d'emblée dans la catégorie des « faibles doses » qui constituent un véritable problème métrologique pour l'éco-toxicologie comme pour l'épidémiologie. Traditionnellement, les erreurs métrologiques viennent du fait que l'on extrapole du modèle de comportement à forte dose le modèle à faible dose par un simple rapport de proportionnalité⁷³. Or cette approche ne prend pas en compte certains comportements propres aux faibles doses, comme les effets de seuil, tels qu'ils ont pu être mis en évidence, par exemple, dans l'exposition à la radioactivité ou aux perturbateurs endocriniens (en particulier le bisphénol A) dont la toxicité suit un modèle non-linéaire (Myers, Zoeller et Vom Saal, 2009).

Troisièmement, étant une pollution à longue distance, les pluies acides sont par définition une pollution transfrontalière. Ainsi, les décisions prises pour réduire les émissions de dioxyde de soufre, de dioxyde d'azote et de photo-oxydants doivent être prises à l'échelle européenne. Les différentes conférences interministérielles initient alors des programmes de recherche à l'échelle européenne afin de déterminer si le dépérissement des forêts que l'on constate en Europe est lié aux émissions de ces composés chimiques. Une tentative d'harmonisation des infrastructures de recueil de données nouvellement créées se met alors en place, comme le réseau PIC-Forest ou réseau dit « 16x16 km » (1987) qui renvoie à son maillage : on quadrille le territoire en carré de 16 km de côté avec au centre un dispositif

⁷³ Cela renvoie au paradigme connu en médecine et toxicologie de Paracelse : « Tout est poison, rien n'est poison : c'est la dose qui fait le poison ».

d'observation. La volonté d'harmoniser à l'échelle européenne les dispositifs d'observation des forêts est également mise en avant par le rapport de l'OPECST qui constate que les forestiers allemands et forestiers français ne réalisent pas de la même façon les mesures de dépérissements. En 1983, l'ONF lance un programme d'observation des dépérissements forestiers, essentiellement en Alsace et en Lorraine, pour quantifier le phénomène, et comprendre sa cause. Ils notent par exemple que 38,5% des sapins sont dépérissants en Alsace à l'automne 1984 (OPECST, 1985, p. 61). Mais c'est la définition même du dépérissement forestier qui pose problème.

2. *Qu'est-ce qu'un dépérissement forestier ?*

Qu'est-ce qu'un sapin dépérissant ? Et plus largement à partir de quand peut-on dire qu'un arbre est dépérissant ? C'est en réalité le nœud du problème, et le point sur lequel les observations françaises et allemandes divergent. Les forestiers français considèrent qu'un arbre est dépérissant s'il a perdu plus de 20% de ses feuilles ; les forestiers ouest-allemands considèrent qu'un arbre est dépérissant s'il a perdu plus de 11% de ses feuilles (*Ibid.*, p. 61-62). Donc il y a une divergence concernant ce qu'on appelle un « dépérissement forestier » qui est accentué par le fait que les forestiers de terrain ne mesurent pas le dépérissement avec des instruments de mesure, mais estiment à vue le pourcentage de perte de feuilles. Ce n'est qu'en 1990 que ce sont lancées des « opérations d'intercalibration » entre différents pays européens (Royaume-Uni, Pays-Bas, Suisse, République Fédérale d'Allemagne, et France) qui visent alors à estimer les divergences entre la quantification des dépérissements (Landmann, 1991, p.20). La divergence porte également sur le lien entre la perte de feuillage observé et le niveau de gravité de la « maladie de l'arbre ». On peut voir ci-dessous le tableau réalisé par le rapport de l'OPECST (1985) :

Notation des divers degrés de dépérissement des arbres					
NOTATION DES DEGATS					
France	1	2	3	4	5
R.F.A.	0	1	2	3	4
AIGUILLES OU FEUILLES PERDUES (%)					
France	0 à 9	10 à 19	20 à 59	60 à 99	100
R.F.A. et Suisse	0 à 10	11 à 25	26 à 60	61 et +	100
APPRECIATION DU DEGRE DE GRAVITE DU DEPERISSEMENT DE L'ARBRE	sans indice de dégâts	légèrement atteint	moyennement atteint	gravement atteint	mort

Image 2 : Divergence dans l'évaluation des dépérissements des arbres (OPECST, 1985)

L'échelle de dépérissement n'est pas la même entre la France et la République Fédérale d'Allemagne. C'est la définition même du dépérissement forestier qui pose problème car ce dernier est établi à partir d'indicateurs visibles (défoliation, jaunissement des feuilles), symptômes d'une perte de vitalité. Or, il est tout à fait possible que la pollution atmosphérique déstabilise l'écosystème forestier sans que cela soit directement visible. C'est l'une des remarques de la conclusion générale du second rapport du programme DEFORPA (Landmann, 1991) :

« Identifier un dépérissement suppose en outre que celui-ci soit suffisamment important pour être mesurable avec les outils de mesure classiques (symptômes visibles, modifications de la croissance, taux de mortalité). Cette remarque, apparemment triviale, n'est pas sans intérêt dans le cas de l'impact de la pollution atmosphérique ; on peut en effet imaginer que l'impact d'un polluant soit établi au niveau physiologique ou biochimique par exemple sans que l'on puisse en déceler l'effet à l'échelle de l'écosystème. La détection univoque et la quantification du « dépérissement » – il est clair qu'il s'agit bien là d'un sujet de recherche à part entière – se sont révélés particulièrement difficiles » (Landmann, 1991, p.125)

Les approches écophysiological et biochimiques qui visent à comprendre l'impact de la pollution sur les différentes fonctions de l'arbre à une échelle fine se développent dans le contexte de l'affaire des pluies acides, et permettent une quantification et une compréhension précise du phénomène. Dans la suite de ce chapitre, j'explique plus particulièrement cette nouvelle approche qui percole dans les recherches forestières.

A toutes ces difficultés de compréhension des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts, s'ajoutent également les difficultés à séparer les deux types de pollutions, la pollution locale et la pollution atmosphérique, comme le rapport de l'OPECST le mentionne :

« La question de savoir ce qui dans les défaillances des écosystèmes forestiers est à imputer aux polluants locaux qui agissent à distance relativement faible de leur source n'est pas aussi évidente qu'on pourrait le croire à la lecture de certaines publications. La partie de l'Europe où l'on constate les cas les plus significatifs est relativement peu étendue et très peuplée, ce qui rend la distinction entre les deux formes de pollution particulièrement délicate. Il n'est pas question de nier l'existence d'une pollution atmosphérique à longue distance mais on ne doit pas oublier qu'en Europe, les forêts ne sont jamais très loin des habitations, des usines, et des routes. » (OPECST, 1985, p.67)

Face à ces nombreuses incertitudes et la non-harmonisation des observations à l'échelle européenne, les Pays européens vont décider de se doter d'infrastructures de suivi des forêts avec des protocoles harmonisés. Le rapport de l'OPECST met clairement en avant un besoin de renouveler les recherches forestières qui se sont montrées incapables d'évaluer de manière efficace et robuste les effets de la pollution atmosphérique sur les forêts :

« Il n'existe actuellement pas de preuves scientifiques des causes du dépérissement des forêts. Si l'existence de ces preuves ne doit pas conditionner la mise en œuvre d'une politique de réduction de la pollution atmosphérique, il apparaît indispensable de rechercher les causes d'un phénomène pour l'heure impossible à maîtriser. Certes, actuellement, quelques thérapeutiques sont appliquées – déversement d'engrais et projection de chaux sur les sols des forêts dépérissantes – pour ralentir le processus en cours, mais elles n'apportent qu'une réponse très insuffisante. Une avancée de la recherche fondamentale est donc indispensable si l'on veut apporter une réponse à la mesure du défi actuel » (*Ibid.*, p.77)

C'est pour affronter toutes ces incertitudes que vont se développer les infrastructures de surveillance des forêts, comme le réseau RENECOFOR (Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers) ou le Département Santé des Forêts (DSF). La suite du chapitre (II) détaille plus précisément l'émergence de ces infrastructures de recherche forestière.

C. Une politisation européenne du phénomène des pluies acides

Quel pays est responsable ? Et quelles mesures, à l'échelle communautaire, prendre pour réduire les dépérissements constatés en Suède, en Suisse, en Allemagne ou en Alsace ? Dans son ouvrage, le politologue néerlandais Marteen Hajer (1995) montre bien l'intrication de ces problèmes. Inculper le dioxyde de soufre ou l'ozone des dépérissements des forêts, c'est opter pour des mesures de régulation différentes (désulfurer les usines de charbon, ou généraliser l'utilisation du pot catalytique pour les automobiles), et *in fine*, contraindre certains secteurs économiques dont l'importance varie selon les pays européens. Christian Barthod (Bouleau et Barthod, 2006) se souvient de l'importance jouée par le débat sur l'adoption du pot catalytique comme norme européenne. Les Allemands font pression à l'échelle communautaire pour faire adopter une mesure qui rend obligatoire l'installation de pots catalytiques sur les voitures, justifiant cette mesure par les dépérissements des forêts. En France, l'industrie automobile voit d'un mauvais œil cette mesure qui risquerait de mettre en danger sa filière : « le directeur des forêts était ainsi sommé de prendre parti dans un débat engageant l'avenir d'une filière économique majeure. Cette situation caractérisée par des enjeux débordant les limites traditionnelles du secteur forestier était très inconfortable et ne fit qu'accentuer la tendance naturelle de la direction des forêts à la prudence et à se réfugier derrière les tableaux de chiffres et les hypothèses des scientifiques en cours d'examen » (Bouleau et Barthod, 2006, p.43). On voit donc que les expertises forestières sont imbriquées dans des dimensions politiques et économiques, une étude pouvant servir à affirmer ou discréditer une mesure politique prise en faveur de la protection des forêts. Ainsi, le phénomène des pluies acides est dès le début un phénomène politique et européen. Marteen Hajer montre bien comment, au début de la controverse, le gouvernement suédois tient pour responsable le Royaume-Uni du dépérissement de ses forêts, et prend ainsi un rôle moteur dans les discussions européennes sur ces questions.

Les années 1980 marquent donc un nouveau tournant dans la structuration des recherches forestières. Les dynamiques européennes et internationales qui avaient déjà été initiées à la fin du XIX^{ème} siècle avec la création de l'IUFRO se renforcent. A l'échelle européenne, le phénomène des pluies acides a agi comme un catalyseur. Pour évaluer les dommages causés sur les forêts et envisager des solutions politiques pour éviter la mort des forêts, les Etats d'Europe du Nord et de l'Ouest concernés (Finlande, Suède, Allemagne en

première ligne, France, Angleterre, Pays-Bas, Belgique) se sont regroupés pour définir une politique environnementale commune. C'est une politique scientifique : deux réseaux européens de surveillance des forêts sont créés dont les déclinaisons françaises sont respectivement le réseau systématique de suivi de la santé des forêts (1987) ou réseau 16x16km, et le réseau RENECOFOR en 1992.

Le phénomène des pluies acides a structuré les grandes lignes d'une politique forestière européenne dont l'orientation principale visait à remédier à l'image catastrophiste de la mort des forêts. Cette politique forestière européenne est une politique scientifique (connaître l'impact des pluies acides et d'autres phénomènes perturbateurs comme le réchauffement climatique ou l'érosion des sols), une politique industrielle et économique (réduire les émissions de soufre et d'hydrocarbures qui se transforment en ozone) et une politique forestière (assurer la multifonctionnalité des forêts). En vertu de son caractère transnational, le phénomène des pluies acides a amené un cadrage politique et scientifique européen. Les différentes conférences interministérielles (conférence de Strasbourg en 1990, par exemple) ont élaboré la marche à suivre pour évaluer à l'échelle européenne la réalité et l'extension du phénomène des pluies acides, et initier une politique européenne de réduction des émissions de soufre, d'ozone et de photo-oxydants.

L'Institut Forestier Européen – *European Forest Institute* (EFI) – a été initié par la Finlande et la France en 1992, il a d'abord le statut d'Organisme Non-Gouvernemental. Il a été créé notamment pour préparer le sommet de Rio de 1992, et la conférence d'Helsinki de 1993. Ce n'est qu'en 2005 qu'il acquiert le statut d'organisation internationale. Il vise à améliorer la communication des expertises scientifiques et initier des projets scientifiques européens. Ses domaines d'expertise concernent toutes les dimensions de la gestion et la connaissance des forêts : « Ecologie et gestion forestière », « Marché des produits forestiers », « Analyse des politiques forestières » et « ressources forestières et information ». Les installations des réseaux de santé des forêts et de RENECOFOR s'inscrivent également dans une perspective internationale. En effet, le Programme International Coopératif (PIC) FORÊT a été signé entre la Commission Européenne Economique et l'ONU à la suite de la convention de Genève de 1979 pour évaluer l'impact de la pollution atmosphérique sur les forêts. Ainsi, les pluies acides ont permis le développement d'une politique scientifique européenne par le prisme du dépérissement des forêts, et des forêts menacées.

Il convient dès à présent d'étudier en détail quels effets l'affaire des pluies acides a eu sur l'organisation et la structuration des recherches forestières françaises, c'est l'objet de la seconde partie de ce chapitre.

II. Les recherches forestières mises à l'épreuve des pluies acides : surveiller les écosystèmes forestiers et modéliser leurs dynamiques

En 2017, au colloque anniversaire des vingt-cinq ans de RENECOFOR, Christian Barthod se remémore :

« A la fin des années 1980, beaucoup de choses ont été relativisées. Ce n'était pas la disparition intégrale des forêts, par contre, c'était une somme énorme de questions sur le fonctionnement et les dysfonctionnements des écosystèmes forestiers. C'était également toute une série de questions sur quelles sont les informations que l'on aurait aimées avoir pour gérer cette question, ce débat public, dans lequel le monde forestier a eu l'impression d'être un peu la cible, d'être mis en accusation, de n'avoir pas forcément tous les outils, tout le savoir, toutes les connaissances pour y répondre [...]. Ce qu'il faut retenir, c'est que l'ensemble de ces questions aboutissaient à faire émerger une approche qui n'était plus exclusivement enracinée dans les disciplines forestières traditionnelles, mais qui interpellait beaucoup le milieu de la recherche en écologie forestière » (Barthod et Landmann, 2017).

Pour cet acteur qui a vécu l'affaire des pluies acides, pour statuer sur cette dernière, les ingénieurs et chercheurs forestiers ont dû développer de nouvelles approches. Il s'agit tout d'abord de l'écophysiologie végétale et forestière qui cherche à comprendre à une échelle fine, celle des différentes parties de l'arbre, comment les polluants agissent sur le fonctionnement de ce dernier. L'écologie systémique percole également dans les recherches forestières pour comprendre comment les polluants qui se déposent dans les différents compartiments des forêts (le sol, l'eau, l'air) influencent les dynamiques forestières, et plus particulièrement la croissance des arbres (la dendroécologie). Alors que l'écologie avait du mal à percoler dans les recherches forestières (voir chapitre 1), c'est l'affaire des pluies acides qui contribue à son essor (Dupuy, 2004) aboutissant à la formation et l'académisation de la discipline de l'écologie forestière. La publication, en 1994, du livre de l'ingénieur forestier allemand Hans-Jürgen Otto, *Ecologie Forestière* – traduit en français en 1998 – vient couronner le développement de cette approche qui conçoit la forêt comme une « machine cybernétique » (Kwa, 1987) où les perturbations jouent un rôle fondamental dans les dynamiques des forêts (Otto, 1994, p.321s). Enfin, pour permettre à ces disciplines de développer des modèles écophysiologiques et des modèles écologiques se développent des infrastructures de collecte de données et de surveillance des forêts (RENECOFOR et le DSF).

Ces infrastructures de recherche et de gestion constituent les bases des réseaux de surveillance des forêts qui visent à produire les données idoines pour anticiper les futurs des forêts. Ce sont ces deux tendances – [A] développement de nouveaux savoirs et [B] structuration de la surveillance des forêts – qui sont traitées tour à tour dans ce chapitre.

A. Comprendre le fonctionnement de l'arbre et de la forêt : l'essor des approches écophysiologicals et écosystémiques

1. Etudier le fonctionnement de l'arbre : la mise au point des modèles fonctionnels écophysiologicals

Pour comprendre pourquoi les pluies acides ont permis le développement de l'approche écophysiological appliquée à l'arbre, il faut se remémorer les incertitudes météorologiques concernant la mise en évidence de l'effet des polluants sur la santé des forêts. Traditionnellement, la recherche forestière utilise les tables de production pour prédire les stocks de bois. Cette prévision statistique ne prend pas en compte les conditions pédoclimatiques (sol et climat) qui sont considérées comme 'toute chose égale par ailleurs' via le concept de station forestière qui est « statique » (Bonneau et Timbal, 1973, p. 203) (cf. chapitre 1). Cette vision, statique, de la forêt est donc inefficace pour apprécier l'effet des polluants qui perturbent le fonctionnement des forêts.

Pour comprendre cela, il faut se situer, non plus au niveau de la forêt et de la ressource forestière, mais au niveau de l'arbre. Il est alors nécessaire d'étudier comment les polluants atmosphériques entrent en contact avec l'arbre (sur la canopée et les feuilles ou par le sol), sous quelle forme ces polluants arrivent à son contact (dépôts secs ou dépôts humides), et enfin comment ces polluants agissent sur le fonctionnement (et donc la croissance et la mortalité) de l'essence en question. Le rapport de l'OPECST détaille quelques actions des polluants sur les arbres, il faut noter le niveau de réalité biologique auquel le raisonnement est effectué : « les polluants peuvent pénétrer dans les tissus et agir sur le métabolisme cellulaire qui normalement contrôle l'ouverture des stomates⁷⁴ » (OPECST, 1985, p. 72). « Les

⁷⁴ Ouverture sur l'épiderme de la tige ou de la feuille qui assure les échanges gazeux avec le milieu extérieur

polluants perturbent la symbiose existante entre les racines et le mycorhize* (champignon à longs filaments). Sur un arbre sain, les racines apportent aux champignons les sucres qui leur sont nécessaires et les champignons fournissent à l'arbre d'autres éléments nutritifs qu'ils puisent dans le sol. Les polluants déséquilibrent ce cycle d'échange, provoquant la disparition des champignons et la mort des extrémités des racines » (*Ibid.*). L'ozone et les photo-oxydants « provoqueraient une dissolution des lipides contenus dans la cuticule foliaire ainsi que dans les membranes des cellules. Les détériorations subies par les stomates perturberaient la photosynthèse et donc le régime hydrique et le transport des éléments nutritifs, la croissance de l'arbre est ralentie, simultanément la porosité de la cuticule favorise l'appauvrissement en calcium et en magnésium par lessivages des feuilles. L'ozone provoque l'apparition de tâches sur les feuilles, puis leur jaunissement et une décoloration de celles-ci sur la face supérieure » (*Ibid.*).

On pourrait multiplier le nombre de citations qui montrent l'importance de l'échelle fine de compréhension du processus (cellulaire et moléculaire). La dernière citation expose bien l'approche écophysiological mise en avant par ce type de modèle de fonctionnement des arbres. Le jaunissement des feuilles (propriété phénotypique) est expliqué par l'action de l'ozone qui rend dysfonctionnels les stomates, ce qui empêche la photosynthèse : l'arbre dépérit. Grâce à l'approche réductionniste et écophysiological qui envisage le fonctionnement de l'arbre en termes de flux de matière, les expertises forestières réussissent à dépasser l'embaras dans lequel les incertitudes météorologiques les ont mises. En effet, la compréhension de ce qu'est un arbre dépérissant n'est plus liée à un pourcentage de défoliation ou de jaunissement des feuilles précis, mais à une analyse en termes de cycles biochimiques qui sont évalués grâce à la modélisation écophysiological. Pour statuer sur le dépérissement d'un arbre, il faut étudier les processus de croissance régis par des échanges de matières, au niveau de la physiologie et écophysiological de l'arbre. Comme le mentionne Guy Landmann dans l'introduction du second rapport du programme DEFORPA : « les chercheurs en écophysiological de l'INRA à Nancy ont pris une part active aux recherches » (Landmann, 1991, p.5).

Ainsi, les modèles écophysiological visent à analyser les échanges de matière aux différents niveaux d'organisation de l'arbre, comme entre le mycorhize et les racines. Dans le cas présent, on analyse comment l'effet des dépôts acides sur les stomates perturbe le processus de la photosynthèse, et donc la croissance de l'arbre. Les polluants vont venir

bloquer l'ouverture des stomates qui sont nécessaires au fonctionnement de la photosynthèse. Ainsi, les modèles écophysio­logiques et réductionnistes se développent, du moins pour les recherches forestières, à partir des années 1980 : les équations de la photosynthèse de Farquhar datent des années 1980 (Farquhar, Von Caemmerer et Berry, 1980). L'approche écophysio­logique, aidée de l'expérimentation contrôlée sur les écosystèmes forestiers, constitue alors un nouveau front de science pour les recherches forestières qui visent à comprendre les effets de la pollution sur le fonctionnement de l'arbre, comme le mentionne Guy Landmann dans la conclusion du second rapport du programme DEFORPA :

« Des recherches sur la physiologie à l'échelle de la plante entière, notamment les problèmes relatifs au prélèvement et au transfert de l'eau et des éléments minéraux, sont de nature à éclairer la dynamique des jaunissements ou la dynamique de défoliation. De telles études, intégrant également le problème de l'allocation de l'azote et du carbone, devraient être conduites de préférence dans le cadre de manipulations expérimentales de l'écosystème forestier, parallèlement à des expériences en conditions contrôlées » (Landmann, 1991, p.130)

Ainsi, c'est dans le contexte des pluies acides que les recherches forestières intègrent l'approche réductionniste de l'écophysio­logie végétale. Cette dernière doit être accompagnée du développement d'approches expérimentales *in situ* où on va tester l'influence des différents composés chimiques. Ceci concourt à une scientifi­cation, une quantification et une expérimentation des recherches forestières, et préfigure le développement des *écotrons** où les chercheurs forestiers vont expé­rimer *in situ* et en conditions contrôlées les conditions probables du changement climatique sur de petits écosystèmes. L'écophysio­logie végétale n'est pas la seule discipline qui oriente les recherches forestières vers la prise en compte des dimensions écologiques des forêts. C'est aussi le cas du développement de l'écologie systémique et quantitative. Que partagent ces deux approches ?

L'approche écophysio­logique, fonctionnelle et réductionniste, partage avec l'approche écosystémique l'idée d'envisager le fonctionnement de l'arbre à partir de notions de cycles et d'échanges de matière. L'approche écophysio­logique opère à l'échelle de l'arbre, tandis que l'approche écosystémique appréhende les cycles à l'échelle de la forêt. Les premiers travaux portant sur les cycles du carbone ou sur la photosynthèse s'appuient sur la modélisation telle qu'elle a été développée en hydrologie, car il y a un principe de fonctionnement commun. Serge, écologue 'sénior' au CEFÉ, s'est intéressé à cette époque aux processus d'allocation

des ressources dans le fonctionnement de l'arbre. Il raconte comment il n'a eu cesse de discuter avec son ami hydrologue pour « ses problèmes de modélisation » :

« Et une plante si elle ne fait plus de photosynthèse et qu'elle épuise sa réserve carbonée, elle va mourir. Donc elle est obligée de continuer à fonctionner. Mais elle ne peut pas ouvrir en grand ses stomates pour acquérir tout le carbone qu'elle veut, parce que sinon elle va épuiser la réserve en eau, et elle va mourir de soif. Donc il y a une analogie en termes de modélisation assez frappante entre les modélisations assez opérationnelles, par exemple gérer ces histoires de barrage et le fonctionnement de la végétation. Alors, je ne suis pas modélisateur, mais à cette époque-là, il y avait une discussion entre les gens qui faisaient de la modélisation en écologie et des groupes complètement étrangers à ça, EDF, les hydrauliciens, etc. qui ne travaillaient pas du tout sur les mêmes objets mais finalement avec les mêmes idées de représentation, et puis les mêmes contraintes. Finalement, on a une contrainte sur la ressource qui est aléatoire, et on a une contrainte, on doit respecter un étayage minimum. L'étayage minimum, si on fait l'analogie avec la plante, c'est la quantité de carbone minimale qu'on doit photosynthétiser pour couvrir les besoins de respiration, par exemple. Donc on peut faire des analogies assez proches » (Serge, CEFE).

Ce n'est pas un hasard s'il y a des liens entre modélisation écophysiological et modélisation en hydrologie, ces deux approches partagent une vision commune : comprendre le fonctionnement d'un système par les interactions entre ces différentes parties en termes de flux d'énergie et de matière. Cette vision de l'arbre, et de la forêt, est tributaire d'une même métaphore, celle qui envisage les dynamiques de la nature sur le modèle de la « machine cybernétique » (Kwa, 1987). C'est dans le cadre du Programme Biologique International (1964-1974), et plus particulièrement le *Solling-Project*, réalisé en Allemagne et étudiant les écosystèmes forestiers, que se généralise cette métaphore pour les forêts, et qui contribue à une scientification de l'écologie.

2. L'héritage du PBI pour l'écologie forestière : appréhender la forêt comme une « machine cybernétique »

Etudier la forêt d'un point de vue fonctionnel, c'est analyser les échanges en termes de nutriment et d'énergie entre les différents niveaux d'organisation de l'écosystème. Pour comprendre les fondements de cette nouvelle approche scientifique, il est nécessaire de comprendre son origine. Elle s'est développée dans le cadre du Programme Biologique International (1964-1974), projet scientifique qui visait à développer l'étude globale des grands écosystèmes planétaires. C'est ce programme qui a généralisé l'approche

écosystémique et écophysiological qui s'appuie sur la métaphore suivante : la Nature est vue comme une « machine cybernétique » (Kwa, 1987). Dans le résumé du colloque organisé par l'UNESCO en 1969, *Productivité des écosystèmes forestiers* (Duvigneaud, 1971), qui porte sur les conclusions du PBI concernant les forêts, le botaniste belge Paul Duvigneaud écrit ces quelques phrases qui montrent comment les recherches forestières se sont pluralisées à l'occasion du PBI :

« Le colloque de Bruxelles et la pré-réunion de Gatlinburg ont réussi à réunir, probablement pour la première fois en proportions à peu près égales, des spécialistes dont les activités sont très diverses mais concourent au même but, qui est l'élaboration de modèles illustrant l'écosystème forêt et son fonctionnement ; les climatologues, pédologues, botanistes, zoologistes, microbiologistes, agronomes et forestiers ainsi rassemblés ont pu mesurer à quel point leur collaboration est nécessaire, dans le domaine de l'écologie, science dont il faut souvent montrer qu'elle n'en est qu'à ses débuts, mais dont tous reconnaissent qu'elle est la base de la connaissance de l'environnement, et des combats à mener dans l'avenir pour que cet environnement soit préservé ou amélioré dans le contexte d'une humanité plus nombreuse, mais aussi de plus en plus désireuse d'adapter la technologie à un milieu salubre et beau, source de joie de vivre » (Duvigneaud, 1971, p.687).

L'écologie, qui se scientifie dans le cadre du PBI, mobilise un grand nombre de disciplines pour comprendre « l'écosystème forêt et son fonctionnement ». Ces connaissances visent à mieux gérer les forêts, et à les préserver de différentes sources de perturbations. Ces deux éléments sont fondamentaux pour comprendre le développement de l'écologie forestière quantitative, telle qu'elle se pratique aujourd'hui.

a. Le Programme Biologique Internationale et le développement de l'écologie quantitative

De nombreuses études ont porté sur le rôle qu'a pu jouer le Programme Biologique International dans la promotion de l'écologie systémique (Kwa, 1987, 1993 ; Dupuy, 2004 ; Aranova, Baker et Oreskes, 2010 ; Coleman, 2010) ; programme initié par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), créée en 1948. Ce programme visait à cartographier et évaluer, numériquement, la productivité des grands biomes de la planète : déserts, toundra, forêts tropicales, forêts continentales, prairies, etc. Certaines études montrent, notamment, que le PBI s'inscrit dans une démarche de promotion de l'écologie systémique sur le modèle de la *Big Science* (Kwa, 1993 ; Aranova, Baker et Oreskes, 2010). Par ailleurs, M. Dupuy a constaté une filiation entre les scientifiques allemands engagés dans

le PBI (et notamment le *Solling-Project*) et les études menées sur les dépérissements forestiers en lien avec les pluies acides :

« Le *Waldsterben* a aussi répondu aux attentes inhérentes aux porteurs du PBI en promouvant l'écologie au rang de science reconnue et en donnant un rôle social aux scientifiques, ces derniers devant trouver les solutions pour réguler le phénomène. En Allemagne, les chercheurs engagés dans le *Solling-Project* ont été mobilisés dans l'étude du *Waldsterben* par Ulrich, donnant de fait un caractère écosystémique à ce phénomène. Un des points intrinsèques à la théorie de l'écosystème est sa capacité de prédiction. Les prévisions se sont avérées fausses, mais ont débouché sur des mesures positives pour l'environnement » (Dupuy, 2004)

Pour Michel Dupuy, en Allemagne, il y a une filiation intellectuelle entre le PBI et les études écosystémiques menées dans le cadre de l'étude des pluies acides : comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers, et prévoir leurs évolutions. Le *Solling Project* est porté par la faculté de Göttingen, avec notamment la présence du pédologue allemand Bernhardt Ulrich qui est l'un des scientifiques qui a alerté sur le phénomène des pluies acides en Allemagne. Dans le cadre du *Solling Project*, ce dernier a analysé les compositions des sols forestiers, et notamment leur taux d'acidité (Ellenberg, 1971, p.669). Le *Solling Project* visait à étudier la productivité primaire et secondaire de certaines forêts allemandes en prenant en compte notamment : les échanges de CO₂ et de gaz, la photosynthèse, la production de biomasse par les animaux, l'influence des micro-organismes dans le sol, etc. (*Ibid.*, 1971, p. 667). On note la perspective quasi-exhaustive d'intégrer l'ensemble des mécanismes et des processus de l'écosystème forestier pour étudier sa productivité.

b. Modéliser et contrôler les écosystèmes pour éviter la « destruction de la Nature »

Pour l'historien et philosophe des sciences Chunglin Kwa, le PBI a été l'occasion de développer l'écologie systémique, telle qu'elle a pu être pensée et promue pour les frères Howard et Eugene Odum (Kwa, 1987). Pour C. Kwa, la métaphore cybernétique est centrale et a permis un dialogue fécond entre scientifiques et politiques, plus particulièrement sur la question de la pollution. Dans cette optique, la nature est vue comme une « machine cybernétique » (*Ibid.*) où la question de la déstabilisation des écosystèmes est centrale. Pour C. Kwa, rapportant les propos d'Eugene Odum, « la conceptualisation de la pollution fournit une illustration » (Kwa, 1987, p. 428) de la compréhension systémique de l'écologie. Et, comme il le mentionne plus loin, « l'écologie est préoccupée par la *survie* [des écosystèmes] »

(*Ibid.*). Cette citation vient appuyer une nouvelle fois l'importance du contexte catastrophiste des pluies acides dans l'émergence de l'approche écosystémique. Pour C. Kwa, les écologues sont ainsi des « ingénieurs des écosystèmes » qui visent à contrôler les dynamiques de ces derniers pour éviter leurs effondrements :

« La Nature est appréhendée comme une machine productive qui peut manquer de carburant, être surexploitée ou qui risque d'être déstabilisée d'une autre manière au point de ne pas pouvoir survivre. La métaphore de la machine automatique n'offre que deux possibilités : soit nous parvenons à maintenir les délicats mécanismes de contrôle des états stables des écosystèmes, soit nous échouons et nous provoquons la [mort] destruction de la Nature. En tant qu'ingénieurs des écosystèmes, nous pouvons espérer parvenir à un contrôle parfait. Tel est le programme de l'écologie cybernétique » ⁷⁵ (Kwa, 1987, p.429).

L'écologie systémique, promue par Eugène Odum, vise le contrôle des écosystèmes pour éviter la « destruction de la Nature ». Dans sa thèse de philosophie sur l'histoire des concepts de croissance et d'équilibre en économie et en écologie, le philosophe australien Jeremy Walker (2007) a montré comment l'écologie avait de nombreuses dettes envers certaines disciplines scientifiques et approches. La troisième partie de sa thèse consacrée à l'émergence du concept d'écosystème se nomme : « l'Économie de la Nature. L'Apocalypse Industrielle » (Walker, 2007, p. 195), témoignant ainsi du lien entre l'approche écosystémique, les pollutions et la « destruction de la Nature ».

L'approche énergétique développée par les frères Odum s'inspire de la thermodynamique. Il montre également la filiation avec l'approche cybernétique (Wiener, Von Neumann) qui se développe grâce aux débuts de la simulation informatique dans le cadre du projet Manhattan (Walker, 2007, p. 266). Howard Odum réalise sa thèse sur le cycle du strontium d'origine naturelle (*Ibid.*, p. 268). Avec George Evelyn Hutchinson (1903-1991), Raymond Lindemann (1915-1942) et les frères Eugene (1913-2002) et Howard (1924-2002) Odum, l'écologie acquiert le statut de science quantitative et prédictive et s'éloigne de la dimension qualitative et empirique des naturalistes (Granjou et Walker, 2016). Dans cette quête d'une légitimité quantitative, l'écologie écosystémique d'Howard Odum a bénéficié du soutien constant de la Commission à l'Energie Atomique américaine, ainsi que du bureau de

⁷⁵ "Nature is understood as a productive machine that can run out of fuel, that can be overworked or in some other way faces the possibility of being destabilized so that it cannot survive. The metaphor of the automatic machine permits only two possibilities: either we succeed in maintaining the delicate control mechanisms of the steady states of the ecosystems, or we fail and we cause the death of nature. As engineers of the ecosystems we may hope to achieve perfect control. This is the programme of cybernetic ecology" (Kwa, 1987, p.429)

la recherche navale (Walker, 2007, p. 268). Les bilans énergétiques d'Hutchinson (inspirés par l'étude de 1940 de Lindemann sur la productivité d'un lac) mettent sur le même plan ce qui relève du fonctionnement naturel des écosystèmes et ce qui relève des activités industrielles des hommes (Granjou et Walker, 2016). L'écologie a pour objectif d'analyser les écosystèmes en prenant en compte ces deux dimensions, sans les séparer. On comprend alors pourquoi les ponts sont possibles avec la modélisation hydrologique – au-delà du vocabulaire commun qu'elles partagent : cycle, production, énergie potentielle et cinétique.

La notion d'écosystème appliquée aux forêts va donc se développer à partir des années 1980 pour devenir une approche centrale dans les années 1990 pour les recherches forestières, comme peut en témoigner la publication du manuel d'*Ecologie forestière* d'Otto. Un autre témoin de cette percolation de l'approche écologique peut être vu dans le changement de dénomination du CEPE : Centre d'Etudes Phytosociologiques et écologiques (créé en 1961) qui devient le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE) en 1988.

Comme l'ont montré les historiens de l'écologie M. Dupuy (2004) et JP Deleage (1991), l'approche écosystémique ouvre la voie à la prédiction. On prédit la production d'un lac, ou la production d'une forêt en termes de biomasse. On 'joue' également sur la régulation du système. Ainsi, la modélisation écologique et écophysiological est une modélisation fonctionnelle, basée sur les processus qui s'opèrent à l'intérieur de l'écosystème forestier, ou à l'échelle de l'arbre. C'est un nouveau futur des forêts qui se développe dans ces artefacts. Ce n'est plus le futur probabiliste et linéaire de la prévision de la ressource en bois, c'est le futur fonctionnel et manipulable des processus écologiques et écophysiologicals.

Pour conclure sur ce rôle joué par la modélisation, il faut mettre en avant son rôle joué dans la conception et le fonctionnement des infrastructures de recueil des données : où installe-t-on la placette d'observation ? Quelles données mesure-t-on ? Quel est le pas de temps de la récolte ? Pour combien de temps lance-t-on le dispositif d'observation ? Toutes ces questions ont pour objectif de définir exactement de quels types de données les modélisateurs ont besoin pour construire leurs modèles : « La modélisation devrait également servir de guide et de référence à l'implantation optimale des réseaux de mesure et à la définition de stratégies d'échantillonnage, souvent lourdes et coûteuses » (OPECST, p.83). Il y a donc un lien « symbiotique » (Edwards, 1999) entre modèles et données, et plus généralement entre pratiques de modélisation et infrastructures de données ; ce cas n'est pas

isolé, comme on le verra dans le chapitre 4 (partie II) avec la création du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) « Coopératives de données ». C'est d'ailleurs un des principes de base du *monitoring environnemental*, ou surveillance continue des écosystèmes, tel qu'il a été défini en 1997 par le comité sur l'environnement et les ressources naturelles du Conseil national des sciences et des technologies américaines, qui propose un cadre de travail pour développer le *monitoring* à l'échelle du pays. Guy Landmann y fait référence dans sa communication aux 25 ans du réseau RENECOFOR :

« Ce cadre [de travail] lie les observations systématiques et la surveillance des systèmes et des ressources écologiques à la modélisation prédictive et à la recherche sur les processus [écologiques]. Cette mise en relation fournira les informations nécessaires à l'amélioration de la description des états et tendances des écosystèmes et des ressources naturelles »⁷⁶ (National Science and Technology Council, 1997)

La surveillance de la Nature est intimement liée à la modélisation et l'anticipation des futurs de cette dernière. Les infrastructures de surveillance des forêts visent alors l'anticipation de leurs futurs. Il convient à présent d'envisager comment se sont développées ces infrastructures de surveillance, en détaillant deux réseaux : RENECOFOR et le DSF. On verra alors que la métaphore médicale et la question de la santé des forêts sont centrales dans la structuration de ces réseaux.

B. La surveillance de la santé des forêts : *monitoring* et gestion forestière

L'émergence des infrastructures de surveillance des forêts est intimement liée à ces nouvelles manières d'appréhender les forêts que j'ai détaillées précédemment. Lors du colloque anniversaire des vingt ans du Département Santé des Forêts, Christian Barthod raconte les motivations qui ont présidé à la création du DSF :

« Parmi le petit nombre de convictions fortes que j'évoquais, figurait le sentiment de la complexité qui se cache derrière des questions telles que la santé des forêts, l'équilibre dynamique des écosystèmes, l'identification des interactions et rétroactions en leur sein ou encore la recherche des causes quand une forêt manifeste une situation

⁷⁶ “The framework links systematic observations and *monitoring* of ecological systems and resource with predictive modeling and process research. This linkage will provide the information needed to improve the documentation of status and trends in the ecosystems and natural resources” (National Science and Technology Council, 1997)

de crise. Il y avait un refus viscéral, quasi-épidermique, des discours simples et des approches réductrices qui cherchaient alors souvent à faire de la forêt l'équivalent d'un champ de maïs » (Barthod, 2009).

Refuser de « faire de la forêt l'équivalent d'un champ de maïs », c'est rompre avec la tradition de la science forestière du XIX^{ème} siècle qui envisageait la forêt essentiellement comme une ressource en bois à planter et à cultiver. La compréhension écologique des forêts préside alors au développement des réseaux de surveillance des forêts. Ces réseaux s'appuient sur une compréhension pyramidale de la surveillance qui vise à coordonner les différentes infrastructures. Ils s'appuient également sur l'émergence de la métaphore médicale et de la notion de la santé des forêts qui devient alors un concept central pour la gestion forestière qui vise à prévenir les risques qui menacent les forêts françaises.

1. Piloter les infrastructures de surveillance des forêts : la pyramide du monitoring environnemental

a. Le réseau RENECOFOR

Les incertitudes météorologiques témoignent d'une incapacité des anciens dispositifs de suivi (les placettes de recherche des laboratoires ou de l'ONF) à produire des données et des informations utiles pour les modèles de fonctionnement des forêts, et notamment des informations sur les échanges nutritifs, sur l'acidification des sols ou l'absorption des polluants par l'arbre. C'est dans cette perspective qu'est mis au point le réseau RENECOFOR en 1992, suite à la sixième résolution de la conférence interministérielle de Strasbourg de 1990, pour que les Etats et les institutions internationales signataires coordonnent mieux leurs efforts sur la recherche forestière et la gestion des forêts (Barthod et Touzet, 1994).

RENECOFOR se compose de cent deux placettes de deux hectares qui se situent sur l'ensemble du territoire métropolitain, essentiellement dans des forêts de production : hêtre, sapin, chêne, mélèze ou épicéa. Il existe trois types de placettes qui se distinguent par le niveau de détail des mesures et des données récoltées. Sur toutes les placettes, dites de « niveau 1 », on récolte des données sur la croissance des arbres (avec des dendromètres), sur la composition du sol (on récolte l'eau infiltrée), sur l'état sanitaire des arbres (en ramassant

la litière⁷⁷ des arbres – ce qui tombe). Les forestiers doivent aussi noter des données phénologiques : quand est-ce que les arbres bourgeonnent ? Quand est-ce qu'ils perdent leurs feuilles ? Est-ce que ces moments coïncident avec les dates théoriques de bourgeonnement et de débourrement ? Les vingt-sept sites de « niveau 2 » sont équipés de capteurs qui recueillent les dépôts atmosphériques ou la concentration d'ozone dans l'air. Enfin, les dix-huit sites de « niveau 3 » sont équipés de capteurs souterrains qui permettent de recueillir des mesures sur les concentrations des composants chimiques contenus dans le sol. Les litières sont récoltées tous les mois tandis que les prélèvements d'eau sont effectués toutes les semaines. Dès sa création, le réseau RENECOFOR est en lien avec l'Unité de Services et de Recherche en Analyses Végétales et Environnementales (URSAVE) de l'INRA Bordeaux qui a pour mission de recueillir et analyser tous les échantillons récoltés par le réseau. Tous les échantillons sont stockés dans une « banque de données », qui est un entrepôt situé dans les locaux de l'URSAVE. Les réseaux d'observations, comme RENECOFOR, traduisent un impératif des recherches forestières qui avait amené la création des stations de recherche et d'expérimentation : s'équiper d'infrastructures d'observation et d'expérimentation durables pour produire des données fiables sur les cycles forestiers. Le réseau RENECOFOR, en produisant des données utiles pour les modèles forestiers et les modèles écologiques, s'inscrit dans une visée anticipatrice des futurs des forêts. C'est dans cette perspective que Christian Barthod explique les objectifs de ce réseau :

« Le réseau RENECOFOR visait à mieux connaître le fonctionnement des écosystèmes forestiers et leurs réactions à des perturbations, et à permettre, en lien avec la recherche, l'élaboration de modèles prenant en compte toute la complexité traduite par les données recueillies et permettant d'anticiper les évolutions possibles » (Barthod, 2009).

Ces infrastructures de suivi des forêts s'inscrivent dans ce qu'on appelle le *monitoring* environnemental qui peut être interprété comme un moyen de piloter les recherches forestières en associant les différents niveaux d'observation de la biologie des arbres et de leur environnement (atmosphère, sol).

⁷⁷ Si on trouve des traces de polluants acides dans les litières, cela signifie que l'arbre les a intégrés dans son cycle biochimique.

b. La pyramide du *monitoring* environnemental : coordonner les infrastructures de surveillance des forêts

Au vingt-cinquième anniversaire de RENECOFOR, Guy Landmann, détaille ce qu'il appelle la « pyramide du *monitoring* environnemental ». Tout en bas de la pyramide, on retrouve l'Inventaire Forestier National et ses 7.000 placettes de mesures annuelles (donc 70.000 en tout). Puis, à l'échelle supérieure, se trouvent les placettes d'observation du DSF (500) ou réseau « 16x16 ». Les 100 placettes de niveau 1 et 2 du réseau RENECOFOR se situent au troisième niveau, et les 18 placettes de niveau 3 couronnent la structure pyramidale. Plus on progresse dans la hauteur de la pyramide, plus on gagne en précision et en diversification des mesures. Plus on descend dans la pyramide, plus on gagne en couverture du territoire forestier. Dans son allocution, G. Landmann explique pourquoi l'image de la pyramide du *monitoring* lui plaît tant :

« Il y a une couche de recherche à chaque niveau, ce qui n'était pas forcément évident, et ne l'est pas forcément encore pour tout le monde aujourd'hui. On a eu tendance, c'est un peu historique, à penser que la recherche, c'était vraiment le sommet dans des dispositifs très complexes. Alors que l'inventaire, c'était quelque chose qui se faisait de façon mécanique sous l'ordre du préfet auquel on donnait des données statistiques en fin d'années. Alors, c'est une conception qui n'a pas été la mienne depuis longtemps, mais qui parfois a un peu rendu difficile la compréhension entre différentes communautés de chercheurs en particulier, au niveau français en particulier » (Landmann, 2017)

Pour G. Landmann, l'efficacité de la pyramide tient au fait que les différents niveaux d'observations sont liés par la recherche. Cela signifie que les données récoltées à chaque niveau d'observation peuvent être utilisées par la recherche, et donc venir alimenter les modèles. Les remarques concernant l'inventaire forestier national (développer pour estimer la ressource en 1958) trouvent leur confirmation dans l'évolution des protocoles d'inventaire. Comme l'a montré François Morneau, ingénieur de recherche à l'IGN, dans sa communication à l'anniversaire de RENECOFOR, l'IGN note aujourd'hui des données nouvelles comme l'état des sols, ou la teneur en carbone du sol, utiles pour évaluer les fonctions de stockage du carbone réalisées par les forêts. Toutes les données récoltées aux différents étages de la pyramide sont mises à disposition de la recherche sur la plateforme CASIF⁷⁸, hébergée sur le site du Groupement d'Intérêt Public (GIP) : ECOFOR (ECOSystèmes FORestiers) créé en 1993, au moment charnière entre le passage du problème

⁷⁸ Le catalogue des sources d'informations sur la forêt : <http://casif.gip-ecofor.org>

des pluies acides à celui du changement climatique. Quatre axes président à l'orientation scientifique de ce groupement : « fonctionnement et dynamique des écosystèmes forestiers », « écosystèmes forestiers et gestion durable », « forêts et écosystèmes tropicaux », « système d'informations et d'évaluation » (GIP ECOFOR, 2004).

La pyramide du *monitoring* forestier est indissociable de son pilotage réalisé par le GIP ECOFOR (ce dernier a pour mission d'organiser et de structurer le réseau PIC-FOREST, le réseau RENECOFOR, le réseau GUYAFOR – pour les écosystèmes d'outre-mer – ou le projet BGF – Biodiversité et gestion forestière). La pyramide du *monitoring* est donc une manière de piloter et d'organiser les dispositifs d'observation pour les rendre complémentaires, et fournir un éventail très large de données disponibles pour la modélisation des écosystèmes forestiers. Le *monitoring* environnemental est un dispositif de surveillance au sens foucauldien du terme. Il opère une surveillance continue de l'état et de la santé des forêts par la mise en données des forêts. C'est un processus de « datification » (De Victor et Bensaude-Vincent, 2016) des forêts. Cette mise en données permet l'évaluation de la santé des forêts (on connaît l'importance de la métaphore médicale chez Foucault), mais également la projection de ses futurs écologiques, chimiques, carbonés ou économiques. Cette politique d'anticipation des futurs des forêts s'appuie sur les agents de terrain qui opèrent le recueil des données. Ces derniers doivent donc être également « pilotés », car les observations suivent un protocole très strict pour que les données soient bien harmonisées. En ce sens, il s'agit bien d'une 'conduite de la conduite' pour emprunter l'expression de M. Foucault, qui est fondamentale pour assurer le fonctionnement de l'infrastructure.

2. Diagnostiquer la santé des forêts : le DSF et la doctrine des trois facteurs

La gestion forestière, elle aussi, avec le phénomène des pluies acides intègre une nouvelle vision de la forêt comprise en termes de fonctionnements et de dysfonctionnements qu'il faut surveiller. On peut remarquer la généralisation de la métaphore médicale pour envisager ce nouveau rapport : on parle de « santé des forêts », de « veille sanitaire », le programme DEFORPA propose une partie « remèdes » (solutions) tandis que la pollution atmosphérique est vue comme un « poison ». Les géographes P. Arnould et A. Da Lage ont proposé une analyse des articles sur les pluies acides parus dans la presse forestière, et notent « le recours massif à des images et des formules empruntées au langage médical pour en parler » (Arnould

et Da Lage, 1993, p.398). Cette métaphore est également celle utilisée par Christian Barthod dans son allocution aux vingt ans du DSF :

« Ma femme étant chirurgien, vous me permettez un détour par ce que les chirurgiens appellent la « clinique ». Il s'agit de la médecine qui se fait au pied du lit du malade, sur la base des symptômes, pour diagnostiquer le geste opératoire à faire. C'est un peu l'esprit du métier demandé au personnel du DSF, permanents et correspondants-observateurs » (Barthod, 2009)

a. Le Département Santé des Forêts : un réseau de surveillance de terrain

Le vocabulaire médical se retrouve également dans le Département Santé des Forêts (DSF), qui est basé sur le réseau 16x16, et qui prend ce nom en 1987. Le DSF est composé de correspondants-observateurs qui sont des forestiers de terrain de l'ONF qui consacrent une partie de leur temps au DSF. Ils ont une mission double. Ils doivent se rendre régulièrement sur des placettes suivies par le réseau pour noter les éventuels problèmes : dépérissement ou présence d'un parasite. Ils ont également une mission d'expertise : si un propriétaire constate un dépérissement ou problème dans sa forêt, le correspondant-observateur lui apporte son aide pour identifier le problème et trouver une solution. Les observations des correspondants-observateurs sont notées et ensuite transmises par minitel, puis par ordinateur. Les données transmises par les correspondants-observateurs ont deux usages. D'abord réalisées « tous azimuth », pour citer les propos de Bertrand, correspondant au DSF depuis vingt ans, les observations et le recueil des données se sont systématisés, avec la « mise en place de protocoles particuliers, de suivis spécifiques en fonction des problématiques de chaque région ». Premièrement, elles constituent la mission de veille du DSF : assurer une information continue sur la santé des forêts. De plus, les informations récoltées sont également utilisées par l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) – créé en 2001 – pour produire des indicateurs qui renseignent sur l'intensité du changement climatique, comme le front de colonisation de la processionnaire du pin. Dans cette perspective, le réseau 16x16 se situe à l'interface de la recherche et de la gestion, et met en branle une logique d'évaluation et d'alerte du changement global.

L'organisation du DSF peut, une nouvelle fois, être comprise grâce aux notions de surveillance et d'anticipation qui sont primordiales pour comprendre ce qu'est le *monitoring* environnemental. Premièrement, les observations des correspondants-observateurs sont

adaptées aux contextes régionaux mais elles sont centralisées à l'échelle nationale, dans les bases de données. Deuxièmement, il est aussi demandé aux correspondants d'apporter des expertises exceptionnelles quand un propriétaire constate des dépérissements dans sa forêt. Si un problème est identifié à l'échelle régionale ou nationale et dont l'impact sur les forêts est important, l'ONF peut décider de lancer une « cellule de crise » ; il en existe une sur la processionnaire du pin, par exemple. La « cellule de crise » n'est finalement qu'un suivi plus régulier d'un problème spécifique (par l'organisation de réunions mensuelles par exemple). Néanmoins, on peut noter, une nouvelle fois, l'utilisation d'un vocabulaire proche de celui utilisé dans le domaine de la surveillance ou du contre-terrorisme.

b. La « doctrine » de la santé des forêts : fonctionnement/dysfonctionnement

La compréhension des forêts en termes de fonctionnement/dysfonctionnement a permis, quant à elle, le développement d'une approche pour évaluer et classer les différentes pressions qui peuvent peser sur le fonctionnement de l'écosystème : pollutions, parasites ou ravageurs, événements extrêmes (tempête ou sécheresse). La typologie utilisée est celle des « facteurs prédisposants », « facteurs déclenchants » et « facteurs aggravants ». Cette approche se développe à partir des pluies acides. On trouve leur mention dans le rapport de l'OPECST, et pour Christian Barthod (Bouleau et Barthod, 2006), c'est le phénomène des pluies acides qui a amené la généralisation de cette approche. « Les problématiques de dépérissements sont liées à des facteurs qui prédisposent, qui déclenchent et qui aggravent. Et quand on fait un diagnostic, on met en lumière tous ces facteurs », ce sont les mots de Bruno, directeur d'un pôle régional du DSF. On remarque encore le vocabulaire médical : « diagnostic ». Les facteurs qui prédisposent concernent la plupart du temps les conditions dites stationnelles des forêts : composition des sols, climat, exposition à la lumière. Les facteurs « déclenchants » sont les accidents climatiques (tempête, sécheresse) ou des parasites et espèces invasives comme la chenille processionnaire du pin, ou le champignon la chalarose du frêne. Les « facteurs aggravants » contribuent au dépérissement sur des arbres affaiblis, c'est dans cette catégorie que sera rangée la pollution atmosphérique à longue distance. Dans un article de 2012, l'ingénieur forestier, Michel Vennetier parle de « la leçon des pluies acides » qui a permis le développement de cette typologie de facteurs. Il montre par exemple que la mortalité des sapins en Europe de l'Ouest dans les années 1960-1980 peut s'expliquer par un facteur prédisposant (« erreurs de gestion »), un facteur déclenchant (« sécheresse ») et un

facteur aggravant : la « pollution ». Cette typologie de facteurs témoigne enfin d'un transfert réussi entre la recherche – cette idée émerge dans le cadre du programme DEFORPA – et la gestion – la typologie est à la base de la mission de surveillance du DSF.

Ces différents réseaux de surveillance des forêts, ainsi que les compréhensions écologiques et écophysologiques qui les sous-tendent, jouent un rôle primordial dans la compréhension et l'anticipation des effets du changement climatique sur les forêts françaises. L'irruption de ce problème global est le sujet du prochain chapitre.

Conclusion

J'ai montré quels avaient été les effets du phénomène des pluies acides sur les recherches et la gestion forestière. Les recherches forestières se sont orientées vers les approches écologiques et fonctionnelles qui envisagent les dynamiques forestières en termes de fonctionnement/dysfonctionnement. Ces nouvelles compréhensions des forêts s'appuient sur le développement d'infrastructures de recherche qui visent à surveiller les écosystèmes forestiers, et anticiper leurs futurs.

Dans un article rétrospectif sur les pluies acides, Christian Barthod explique la situation de controverse qui caractérise les difficultés à lier les dépérissements forestiers et la pollution atmosphérique : « au début des années 1980, un vif débat international avait porté sur les effets de la pollution atmosphérique à longue distance sur les forêts. Pour tenter de qualifier globalement l'état de vitalité des peuplements, estimé grossièrement par l'appréciation visuelle de la perte de feuilles et de la coloration anormale du houppier... » (Barthod, 1994). Il faut souligner l'expression « estimé grossièrement ». En effet, ce sont les observations de jaunissement et de perte des feuilles constatés dans les forêts vosgiennes et alsaciennes qui poussent la CFDT de l'ONF à alerter sa direction. Le terme « estimé grossièrement » renvoie ici aux nombreuses incertitudes météorologiques que j'ai expliquées précédemment. C'est pour dépasser cette « estimation grossière » que se développent l'approche écosystémique, la modélisation écophysologique et les infrastructures de *monitoring* environnemental. On assiste à une scientification des recherches forestières où la surveillance des forêts devient continue, systématique et instrumentée. La science forestière avait déjà procédé à cette mise en chiffre des densités, des hauteurs et des accroissements des arbres. Ce n'est plus une mise en chiffre de la seule productivité des forêts, mais bien une mise en série continue et constante de toutes ses composantes, opérée à des échelles diverses : composants chimiques, évolutions phénologiques (les cycles de développement), stock de carbone, etc.

L'essor du *monitoring* environnemental s'inscrit également dans l'émergence d'une politique globale de l'environnement (Jasanoff & Martello, 2004). Les années 1970 marquent le passage d'un environnement pensé comme total à un « environnement global » (Grevsmühl, 2014). La pollution atmosphérique à longue distance est un exemple de cet

environnement pensé à l'échelle globale. D'autres auteurs mettent en avant le lien entre *monitoring* et processus de « datification » de l'environnement (De Victor et Bensaude-Vincent, 2016). Ces derniers montrent que le *monitoring* opère une traduction fondamentale des observations aux données (« *from records to data* »). S'appuyant sur l'émergence de la quantification de la biodiversité, les deux auteurs montrent comment la « datafication » de l'environnement peut être comprise comme un « outil techno-politique pour gouverner la distribution des espèces biologiques »⁷⁹. Les auteurs parlent même de « panoptique de la biodiversité ». Cette référence implicite à Foucault appuie, une nouvelle fois, le lien entre surveillance et anticipation. Dans cette perspective, le *monitoring* est bien un dispositif technico-politique où la surveillance des écosystèmes forestiers existe parce qu'elle se doit d'informer au mieux les décideurs politiques eu égard aux décisions environnementales.

Pour conclure sur le thème des pluies acides, j'aimerais revenir sur les figures menaçantes qui ont présidé à sa médiatisation. Philippe Roqueplo rapporte l'expression suivante : « Nous sommes à l'aube d'un Hiroshima écologique » (Roqueplo, 1993), tandis que Christian Barthod note certains titres de la presse généraliste de l'époque : « Adieu à nos forêts » (Marie-Claire, décembre 1984), « Nos forêts à l'agonie » (Paris Match, janvier 1985) ou « La forêt assassinée » (Le Point, mai 1985 » (Barthod, 2006, p. 27). Le rapport de l'OPECST, quant à lui, indique que « Le danger d'une catastrophe écologique majeure n'est pas à exclure, mais reste à savoir si les phénomènes que l'on constate depuis quelques années sont véritablement annonciateurs de graves bouleversements » (OPECST, 1985, p.33). Le thème de la catastrophe a donc été prégnant dans la manière dont on a envisagé le futur menaçant des forêts françaises et européennes.

Dans leur ouvrage sur la restauration des territoires de montagnes, Decocq et ses coauteurs (2016) montrent que le thème de la catastrophe est un élément important du discours des forestiers du XIX^{ème} siècle : « les forestiers sont les prophètes du catastrophisme » (Decocq, Kalaora et Vlassopoulos, 2016). Ce discours porte sur les dangers de la déforestation, dans un contexte de déprise forestière, que j'ai déjà détaillé dans le chapitre précédent. Pourquoi ce détour par le discours forestier du XIX^{ème} est-il intéressant pour la compréhension de l'affaire des pluies acides et ses conséquences sur les forêts ?

⁷⁹« as techno-political tool to manage the distribution of biological species » (De Victor et Bensaude-Vincent, 2016)

Premièrement, il convient de noter que le discours catastrophiste n'est pas caractéristique des années 1970, ou de notre temps avec la « collapsologie » qui a aujourd'hui le vent en poupe⁸⁰. La figure de la catastrophe est un *leitmotiv* du discours forestier, de la célèbre citation de Colbert « La France périra faute de bois » à l'« Hiroshima écologique » causé par les pluies acides. Philippe Roqueplo a montré l'importance du discours menaçant dans le développement des problèmes environnementaux (1993) tandis que pour JP Déléage a montré, dans son histoire de l'écologie, que cette science est liée à la « conscience des rapports étroits entre les désordres écologiques et ceux de nos sociétés qui naïvement croyaient maîtriser la nature » (Déléage, 1991, p.16).

Deuxièmement, si le discours catastrophiste pour appréhender le futur menaçant et menacé des forêts n'est pas nouveau, je soutiens qu'à partir de la controverse sur les pluies acides, les discours sur les futurs des forêts se sont diversifiés, pluralisés et opérationnalisés. Le discours catastrophiste des forestiers du XIX^{ème} siècle est un discours politique qui plaide en faveur des reboisements en agitant le spectre du désastre écologique et des déséquilibres des cycles naturels. Il lie l'avenir des forêts françaises et celui de la France comme Etat prospère et puissant. Néanmoins, il offre peu de prises à la discussion et à l'anticipation. Avec l'émergence du *monitoring* environnemental et de la modélisation écosystémique, on assiste alors à une pluralisation et une spécification des futurs des forêts. Il est alors possible d'anticiper les comportements des écosystèmes forestiers en faisant l'hypothèse d'une diminution des émissions polluantes, l'hypothèse d'une augmentation des températures ou l'hypothèse d'une réduction de l'acidification des sols. Ce mode d'interrogation des futurs des forêts – 'que se passerait-il si ... ?' – émerge dans le contexte des pluies acides et se consolide avec l'irruption des changements globaux. Ce sont les modifications identifiées dans les recherches forestières (écologie systémique, *monitoring* environnemental, gestion multifonctionnelle des forêts) qui façonnent l'irruption de ces futurs pluriels. Si la figure de la catastrophe offre peu de prises pour prévoir les futurs des forêts, les pratiques d'anticipations, liées à des scénarios spécifiques, permettent une opérationnalisation de ces futurs. Grâce notamment à la simulation informatique ou à l'implémentation des scénarios climatiques dans les modèles forestiers, il est maintenant possible de rendre tangibles les futurs des forêts selon

⁸⁰ Pour l'historien, JB Fressoz la figure de « l'effondrement » chère aux collapsologues tire son origine dans les discours des élites libérales françaises à la suite de la Révolution Française. Ce discours visait à « réprimer les usages de la nature – les communs forestiers en particulier – des masses paysannes libérées des obligations fédérales » (Fressoz, 2018, novembre). Dans cette optique, le discours sur l'effondrement aurait des origines réactionnaires.

tel ou tel scénario, et ainsi d'agir dès maintenant pour faire advenir les futurs souhaitables ou empêcher les futurs non-souhaitables. Alors que le discours catastrophiste des forestiers du XIX^{ème} comporte une filiation utopique : un discours hors du temps et du lieu (*u – topos : sans lieu*), l'anticipation des futurs des forêts est un discours inscrit dans un cadre spatiotemporel précis qui est matérialisé par les scénarios climatiques ou les cartes de prévisions de la ressource forestière. Dans cette perspective, les pluies acides représentent un moment charnière à partir duquel les futurs des forêts sont modélisés et simulés, et orientent ainsi les décisions de gestion.

La matérialisation des futurs des forêts dans les dispositifs de recherche, dans les infrastructures et les modèles témoignent donc d'une spécification, d'une opérationnalisation et d'une pluralisation des futurs des forêts qui est caractéristique de l'anticipation des effets des changements globaux. Les analyses entrevues dans le cadre des pluies acides sont prolongées dans la suite de la thèse dans le cadre du changement climatique : développement de nouveaux modèles (modèles d'aires de répartition), de nouvelles infrastructures de recherche (le réseau ICOS⁸¹) ou de nouvelles pratiques de gestion : migration assistée d'espèces forestières⁸².

⁸¹ *Integrated Carbon Observation System*

⁸² Voir le projet de l'ONF « Giono » (lancé en 2011) : « projet innovant de migration assistée qui consiste à déplacer les espèces localement menacées par le réchauffement climatique pour les faire migrer au nord vers des terres plus clémentes » (http://www.onf.fr/gestion_durable/++oid++5de4/@@display_advise.html)

Chapitre 3 : Les recherches forestières à l'heure du changement climatique : les futurs pluriels et incertains des forêts françaises

Introduction

Après l'affaire des pluies acides, un autre problème environnemental vient alerter la communauté forestière : le changement climatique. Dans ce chapitre, je détaille comment l'irruption de ce dernier a eu des effets sur les infrastructures de recherche forestière. Je m'appuie notamment sur le concept d'agenda de recherche pour montrer comment l'anticipation des effets du changement climatique a durablement marqué les thématiques et les structurations des recherches forestières.

Les deux chapitres précédents avaient pour objectif de détailler les évolutions historiques des recherches forestières. La prévision de la ressource en bois a dominé le paysage scientifique et institutionnel des recherches forestières jusqu'aux années 1970 : c'est l'agenda sylvicole. L'affaire des pluies acides a permis l'émergence des approches écologiques et écophysiological où l'accent est mis sur la compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers : c'est l'agenda écologique. L'agenda écologique ne se substitue pas à l'agenda sylvicole, les deux coexistent, et ce chapitre vise, dans un premier temps, à décrire leur structuration actuelle.

Depuis presque une trentaine d'années⁸³, le changement climatique est devenu un objet central pour les recherches forestières, comme le confirment les analyses bibliométriques (Aleixandre-Benavent et al., 2017) – le nombre d'articles annuel publié sur le changement climatique a été multiplié par six entre 2004 et 2014. Par ailleurs, de nombreux modélisateurs forestiers estiment que le changement climatique est une thématique essentielle pour attirer des financements. Il constituerait dans cette perspective un « point de passage obligé » (Callon, 1986), c'est-à-dire un moyen pour financer leurs travaux en montrant leur

⁸³ Le « réchauffement climatique » apparaissait déjà dans les recommandations de la conférence interministérielle de Strasbourg de 1990 qui 'clôt' l'affaire des pluies acides.

caractère fondamental et nécessaire dans la compréhension du changement climatique. Comment rendre raison de l'émergence du changement climatique dans le milieu forestier ? Quels effets structurels a eu ce dernier sur les recherches forestières ? Ce chapitre vise également à répondre à ces questionnements.

Il y a donc un double objectif à ce chapitre. L'objectif pratique est de décrire les agendas des recherches forestières. L'objectif théorique est de comprendre comment le changement climatique a percolé dans les recherches forestières, et quels ont été ses effets sur la structuration de ces recherches et leurs questionnements. Reformulé en termes d'agenda scientifique, le fil directeur du chapitre est de savoir si l'agenda climatique a remplacé les agendas sylvicoles et écologiques, ou si le processus est plus diffus et plus complexe.

Après avoir précisé en quoi la notion de mise à l'agenda scientifique est un concept utile pour penser les évolutions des recherches forestières et décrire leur structuration actuelle, je m'attache à décrire deux agendas dont j'ai déjà montré la structuration historique : l'agenda sylvicole et l'agenda écologique. Enfin, je m'intéresse aux effets que la mise à l'agenda du changement climatique a eus sur les deux agendas précédents. Pour ce faire, je propose l'hypothèse de la « climatisation » des recherches forestières qui traduit un processus d'alignement des agendas vers la prise en compte du changement climatique et de l'évaluation de ses impacts sur les forêts, en m'inspirant des travaux de Jean Foyer, Stefan Aykut et Edouard Morena et de leurs collègues (2017). La description des agendas accorde une place centrale à la matérialité des sciences (les modèles, les instruments, les articles), ainsi qu'à ses dimensions sociales (collaborations, projets, trajectoires académiques et scientifiques des chercheurs).

I. Les agendas des recherches forestières avant l'irruption du changement climatique

A. L'agenda de recherche : un concept descriptif et relationnel

La notion de mise à l'agenda – « *agenda-setting* » – a d'abord été élaborée en sociologie de l'action publique, et peut être définie comme « l'ensemble des problèmes faisant l'objet d'un traitement, sous quelque forme que ce soit, de la part des autorités publiques, et donc susceptible de faire l'objet d'une ou plusieurs décisions » (Garraud, 1990, p. 27). Cette notion est mobilisée pour expliquer notamment comment les problèmes publics sont construits. Le concept a ensuite été mobilisé par les études sociales des sciences ou *STS* pour décrire l'expansion des activités de recherche par un groupe d'acteurs sur un problème politique, social ou environnemental, comme ce fut le cas pour la biodiversité (Mauz et Granjou, 2010) ou les « migrations climatiques » (Cornil, 2011). Le concept d'agenda est proche de celui de 'cadre' : il renvoie à « la formulation d'un problème sociotechnique dans les discours savants et publics, aux liens établis avec d'autres questions et aux mesures envisagées pour traiter le problème (solutions technologiques ou politiques, approches globales ou locales, etc.), souvent sous-jacentes à son évaluation » (Aykut et Dahan-Dalmedico, 2015, p.46).

La notion d'agenda de recherche permet alors de lier les dynamiques de production du savoir scientifique avec celles politiques de mise en problème et d'action publiques. Elle envisage ainsi les dynamiques de production des savoirs comme des dynamiques de mise à l'agenda politique. Située à une échelle méso-, voir macro-sociale, la notion d'agenda vise à rendre compte des dimensions politiques, économiques et sociales des structurations des recherches forestières. Les deux chapitres précédents ont déjà montré l'intime relation entre le développement des sciences et des recherches forestières et les objectifs politiques, économiques, puis environnementaux et sociaux, de la gestion des forêts. En première analyse, on peut donc définir l'agenda de recherche comme un ensemble de problèmes dont l'évaluation et la résolution sont jugées importantes et pertinentes par les chercheurs et experts à un moment donné. Par exemple, au milieu du XIX^{ème} siècle, à la suite des inondations et glissements de terrains apparus dans les régions montagneuses des Alpes, l'Etat inscrit à l'agenda politique la nécessité de reboiser ces territoires au nom de la solidarité

nationale. Les Restaurations des Territoires de Montagnes (RTM) occupent une place centrale dans l'agenda des recherches forestières de la moitié et la fin du XIX^{ème} siècle. L'Etat fait appel aux ingénieurs des Ponts-et-chaussées pour déterminer les territoires à risque, et aux ingénieurs des Eaux-et-Forêts pour effectuer les travaux de reboisement. On voit bien ici le processus de traduction d'un problème public en problème technique et scientifique, les RTM ayant engendré un certain nombre de pratiques scientifiques nouvelles comme l'identification des territoires à risque ou la sélection d'essences forestières utiles à la fixation des terrains ou l'interception des blocs. De manière analogue, l'affaire des pluies acides inscrit sur l'agenda des recherches forestières l'évaluation de la gravité de ce phénomène qui se matérialise par le développement de programme de recherche comme DEFORPA, et l'essor des réseaux de surveillance des forêts, comme le DSF et RENECOFOR.

Dans leur ouvrage collectif sur la manière dont les médias contribuent à la mise en place d'agendas politiques (Protess et McCombs, 1991), les auteurs proposent une définition du processus de mise à l'agenda qui ne se limite pas à la simple translation d'une sphère à l'autre, mais qui se comprend plutôt en termes de priorités partagées. Dans leur introduction, ils écrivent :

« La mise à l'agenda est un concept relationnel qui définit un lien positif entre les sujets sur lesquels les médias d'information mettent l'accent et l'importance de ces sujets telle qu'elle est perçue par le public de ces médias »⁸⁴ (Protess et McCombs, 1991, p.2).

Pour les auteurs, la mise à l'agenda n'est pas transitive, elle ne translate pas d'une sphère à l'autre. La mise à l'agenda est un concept relationnel, cela signifie qu'il ne s'impose pas aux acteurs, mais que ceux-ci ont leur propre appréhension de l'agenda qu'ils mettent en lien avec leurs pratiques et expériences personnelles des problèmes. La mise à l'agenda n'est donc pas forcément un processus descendant, des acteurs étatiques et politiques au domaine de la science.

La « nouvelle sociologie politique des sciences » (Frickel et Moore, 2006) s'attache à montrer comment des groupes d'acteurs divers (scientifiques, politiques, associations ou ONG) peuvent entrer en compétition pour imposer un agenda scientifique, et donc un cadrage

⁸⁴ "Agenda-setting is a relational concept specifying a positive connection between the emphases of the news media and the perceived importance of these topics to the news audience" (Protess et McCombs, 1991, p. 2)

du problème et des solutions. Le processus de mise à l'agenda scientifique privilégie certains problèmes et enjeux, et en laisse d'autres de côté. Ces derniers sont appelés par les auteurs la « science qui n'est pas faite » – « *undone science* » (Frickel et al., 2009). Dans son étude sur la controverse des pluies acides, le politologue néerlandais Marteen Hajer a retracé sa trajectoire au Royaume-Uni (Hajer, 1995, pp. 104-174). Il montre comment deux coalitions d'acteurs s'affrontent sur le cadrage du type de pollution que constituent les pluies acides, et ainsi les réponses à apporter pour remédier à ce problème. D'un côté, le gouvernement britannique et le ministère de l'Énergie pensent que les pluies acides ne diffèrent pas de pollutions plus traditionnelles comme celle du *Great Smog* londonien, et s'attachent à évaluer les pluies acides à partir d'indicateurs visibles et empiriques. Pour ces acteurs, ce qui compte est trouver les « preuves scientifiques » des effets des pluies acides sur les écosystèmes forestiers et marins (*Ibid.*, p. 118). Cet agenda de recherche est contesté par une autre coalition d'acteurs formée par la Commission Royale sur la pollution environnementale, le comité spécial sur l'environnement de la *House of Commons*, et des ONG comme Les Amis de la Terre. Ces derniers essaient d'imposer une nouvelle manière d'appréhender la pollution que sont les pluies acides, une pollution invisible et chronique qui échappe à la « perception sensuelle directe » (Hajer, 1995, p.127). Ils cherchent, par ailleurs, à légitimer l'installation de nouveaux dispositifs de surveillance de la qualité de l'air en dehors des villes, en s'appuyant sur l'hypothèse de la « mort des forêts ». De plus, pour eux, ce qui compte n'est pas tant l'évaluation des effets des pluies acides sur les écosystèmes que l'appréhension des risques que l'on court à l'inaction, car « le temps est compté » (*Ibid.*, p.117). Il faut prendre des mesures pour réguler ce phénomène dès maintenant. Ainsi, chaque coalition d'acteurs milite pour une conception particulière des pluies acides qui se traduit *in fine* dans des expertises qui se font, des expertises qui ne sont pas faites, et dans une certaine relation entre l'expertise scientifique et la décision politique. Sur ce point, la première coalition d'acteurs veut attendre d'avoir des preuves indubitables de la réalité et de la gravité du phénomène. La seconde coalition d'acteurs souhaite que des décisions en termes de régulation soient prises dès à présent, malgré cette situation d'incertitude. L'affaire des pluies acides telle qu'elle est racontée par Marteen Hajer au Royaume-Uni illustre les relations souvent conflictuelles entre deux agendas de recherches en compétition et portés par des groupes d'acteurs divergents.

La mise à l'agenda scientifique est donc un processus résultant de rapports de force entre différents groupes d'acteurs qui luttent pour imposer leur vision de la 'science qui compte'. Les agendas scientifiques sont construits et portés par des acteurs-entrepreneurs, de

la même façon que les problèmes publics sont mis à l'agenda par des groupes sociaux (Frickel et Gross, 2005). Enfin, en tant qu'ensemble de questions et de réponses, l'agenda de recherche concerne également les promesses scientifiques liées aux développements de nouvelles méthodes scientifiques ou de nouvelles technologies. Comme cela a pu être montré dans le cas de la biodiversité, les agendas recourent aussi un « investissement pratique dans un projet de connaissance et de gouvernance » (Granjou, 2016, p. 132) lié à une certaine vision de la 'science qui compte'. L'approche en termes d'agenda de recherche permet alors de distinguer les pratiques et disciplines scientifiques qui sont au cœur de l'agenda (« *done science* »), de celles qu'il faudrait développer (« *what should be done* »), et celles qui sont laissées de côté (« *undone science* »), mais qui peuvent faire l'objet d'une revendication active par un autre groupe d'acteurs qui tentent d'imposer son agenda (Frickel et al., 2009). C'est le cas par exemple de la seconde coalition d'acteurs présentée par Marteen Hajer qui souhaitait l'installation des dispositifs de *monitoring* de la qualité de l'air hors des villes pour évaluer précisément l'impact des pluies acides sur les écosystèmes forestiers. La mise à l'agenda et l'articulation des priorités de recherche est donc un « processus relativement fluide » (Frickel et al., 2009, p.22) qui résulte de stratégies politiques :

« L'observation la plus notable est peut-être que le repérage des domaines de recherche laissés de côté relève d'une politique du savoir plus large, dans laquelle des groupes multiples et concurrents (universitaires, financeurs gouvernementaux, industries et organisations de la société civile) luttent pour l'élaboration et la mise en œuvre d'agendas de recherche différents »⁸⁵ (Frickel et al., 2009, p.21)

Je propose donc de définir l'agenda scientifique comme un ensemble de problèmes (politiques, sociaux, environnementaux, économiques, sanitaires, etc.), portés par un groupe d'acteurs (scientifiques, gestionnaires, politiques), et traduits en discours et pratiques scientifiques (artefacts, arrangements institutionnels, collaborations, métrologies, protocoles expérimentaux, etc.) qui cherchent à définir, comprendre, évaluer ou hiérarchiser les problèmes, et proposer des solutions pour y remédier. En tant que concept relationnel, l'agenda de recherche ne doit pas être compris comme une traduction transitive, comme quelque chose qui s'impose au chercheur. Même si l'agenda tend à se cristalliser dans des pratiques et dispositifs durables (institutions, méthodologies, artefacts), il faut être aussi

⁸⁵ "Perhaps the most significant general observation is that the identification of undone science is part of a broader politics of knowledge, wherein multiple and competing groups—including academic scientists, government funders, industry, and civil society organizations—struggle over the construction and implementation of alternative research agendas." (Frickel et al., 2009, 21)

attentif à la manière dont les acteurs mobilisent l'agenda scientifique pour légitimer leurs anciennes pratiques (processus de re-labellisation). Ainsi il faut rappeler que les acteurs ont toujours la liberté de prendre leurs distances avec l'agenda de recherche, que ce soit en menant leurs recherches comme auparavant (« *business-as-usual* ») ou en voulant imposer un nouvel agenda.

B. L'agenda sylvicole : prévoir la ressource, orienter la gestion

Ce premier agenda concerne les problèmes et pratiques que l'on peut regrouper sous le terme de sylviculture définie comme l'art de cultiver les forêts. Il émerge à partir de la naissance de la science forestière à la fin du XVIII^{ème} siècle, et se structure tout au long des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles. Trois ensembles de problèmes permettent d'appréhender l'agenda sylvicole. Le premier concerne la description et l'évaluation de la ressource en bois, au niveau national comme au niveau local : inventorier et cartographier les forêts. Le deuxième ensemble porte sur la prévision de la ressource : pour concilier la conservation du patrimoine forestier et les demandes sociétales et industrielles, les ingénieurs forestiers mettent au point des outils capables d'indiquer aux forestiers quand effectuer les coupes selon l'essence forestière considérée. Enfin le dernier ensemble prolonge le deuxième dans la mesure où il s'agit d'améliorer les techniques de gestion des forêts. Le premier chapitre a déjà présenté en détail l'ensemble des institutions qui participent à l'agenda sylvicole, ainsi que les problèmes qui le caractérisent. Je ne reviendrai donc pas sur les manières d'inventorier et de cartographier les forêts et la ressource forestière. Pour éviter les redites avec le premier chapitre, j'ai choisi de me concentrer sur la présentation de deux artefacts centraux dans l'agenda sylvicole : les modèles de croissance et les guides de sylviculture.

1. Prédire la récolte, prévoir la sylviculture : les modèles de croissance

La volonté de concilier la préservation des ressources forestières et la satisfaction des besoins de l'industrie et de la société exige non seulement l'évaluation et la connaissance de la ressource mais également la possibilité de la prévoir. C'est dans cette optique qu'ont été mises au point les tables de production en Allemagne. Comme mentionné dans le premier chapitre, c'est à partir des années 1950 que se systématisent la création des tables de production

pour la plupart des essences forestières du territoire français. Les tables de production s'appuient sur la dendrométrie qui est l'ensemble des techniques qui permettent de mesurer les arbres. La dendrométrie apparaît au XIX^{ème} siècle, c'est surtout à partir du milieu du XX^{ème} siècle qu'elle se perfectionne grâce à l'utilisation des statistiques et des méthodes d'échantillonnage qui font gagner beaucoup de temps aux ingénieurs forestiers. On peut citer le manuel de *Dendrométrie* (1998) – dont la première édition date de 1961 – des deux ingénieurs forestiers Jean Pardé et Jean Bouchon qui ont beaucoup œuvré à perfectionner les méthodes de la dendrométrie et qui ont développé plusieurs tables de production et modèles de croissance. Ce manuel constitue encore aujourd'hui une référence pour la mesure des arbres et de la ressource forestière.

Les tables de production concernent des forêts mono-spécifiques, et ne permettent donc pas de prévoir la ressource de forêts composées d'au moins deux essences différentes. De plus, elles sont caractérisées par une certaine rigidité dans la mesure où elles donnent des valeurs chiffrées mais ne permettent pas de tester plusieurs scénarios sylvicoles. C'est en partie pour résoudre ces problèmes que les ingénieurs forestiers ont développé les modèles de croissance des arbres grâce notamment aux développements de l'informatique et de nouvelles méthodes statistiques, comme le calcul bayésien* qui permet l'inférence de variables corrélatives à partir de données d'observation. Ce type de statistiques se trouve alors très utile pour déterminer les variables qui expliquent la croissance des arbres à partir de données empiriques comme celles produites par l'IFN. C'est au début des années 1990 que se développent les premiers modèles de croissance pour les grandes essences forestières françaises, comme le hêtre – modèle *Fagacées* (Dhôte, 1990) – l'épicéa en forêts mélangées – modèle *Moutains* (Courbaud, 1997), devenu par la suite *Samsara* – ou le douglas – *SimCoP* (Ottorini, 1995). Les premiers modèles de croissance sont des modèles corrélatifs, cela signifie qu'ils agrègent une grande quantité de données de croissance des arbres, fournies la plupart du temps par l'IFN, par l'ONF ou par les équipes de recherche elles-mêmes. A partir de ces données qui détaillent la croissance des peuplements à différents intervalles de temps, le modélisateur cherche une corrélation statistique entre la croissance de l'arbre et un paramètre qu'il a choisi – pour le modèle *Mountains*, le modélisateur a choisi de prendre comme variable l'exposition au soleil liée à l'inclinaison de la pente. Une fois que cette relation a été déterminée et calibrée grâce à d'autres données de croissance, le modélisateur a la possibilité de créer un simulateur de croissance : il rentre les paramètres de la forêt qu'il souhaite étudier, et le simulateur « fait pousser virtuellement les arbres » en fonction de la

relation établie précédemment. Le modélisateur peut alors voir comment la forêt devrait évoluer théoriquement, il a aussi la possibilité, pour certains modèles comme *Samsara*, d'intégrer des actions sylvicoles comme des coupes d'arbres ou des éclaircies.

Les modèles de croissance des arbres ont été développés à IRSTEA, à l'INRA – notamment l'unité « Croissance, Production et Qualité des Bois » à Nancy – ou au FCBA à Bordeaux, ce dernier proposant son expertise pour des propriétaires privés ou des industriels de la filière-bois. Le LERFOB⁸⁶ (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois) est emblématique de l'agenda sylvicole. Brice, actuellement chercheur à l'IGN, a réalisé sa thèse dans ce laboratoire. Au cours de notre entretien, il revient sur la philosophie du laboratoire :

« Son directeur adjoint avait d'ailleurs une formule pour résumer la ligne de pensée de ce laboratoire : le LERFOB, c'est « du plant à la planche », de ce qui est très en amont, des arbres dans leur milieu naturels, jusqu'au produit fini : la planche. C'était un clin d'œil à la formule que l'on rencontre en agronomie : « de la fourche à la fourchette ». Donc, le LERFOB dépendait d'une approche intégrée, à la fois le long de la filière, c'est-à-dire depuis le développement des forêts dans leur milieu biologique, à l'aval technologique, on pourrait dire »

Le LERFOB mène des recherches qui vont « du plant à planche ». Je ne pense pas que ce soit un simple « clin d'œil » comme le mentionne Brice. Dans le premier chapitre, j'ai montré qu'après la Seconde Guerre mondiale, l'Etat avait mené une politique de soutien à la science forestière par la création de nombreuses institutions, dans une volonté de moderniser la connaissance et la gestion des forêts, en prenant exemple sur la politique de modernisation de l'agriculture. Les propos de Philibert Guinier (1953), déjà cités dans le chapitre 1, confirment cette hypothèse⁸⁷.

Les modèles de croissance portent la plupart du temps sur les forêts de production, mais il faut aussi noter des travaux de modélisation portant sur les forêts de protection. Les ingénieurs forestiers modélisent par exemple l'interception des blocs de pierre par les peuplements forestiers, comme c'est le cas à IRSTEA Grenoble (Berger et Dorren, 2010).

⁸⁶ Ce dernier a fusionné le 1^{er} janvier 2018 avec l'UMR de l'INRA EEF (Ecologie et Ecophysiologie Forestière), j'y reviendrai dans la suite du chapitre, car cette fusion est, pour moi, caractéristique d'une hybridation des agendas sylvicoles et écologiques liée à la mise à l'agenda du changement climatique.

⁸⁷ « Une ère commence où les principes de l'amélioration des plantes, qui ont assuré la prospérité de l'agriculture, deviennent applicables aux arbres forestiers » (Guinier, 1952, p.XXI)

Si on prête attention aux nombres et types de modèles de croissance, ne serait-ce qu'en France, au milieu des années 1990, on constate un foisonnement de modèles qui portent souvent sur une essence, ou sur un contexte géographique ou écologique particulier. Conscient que ce foisonnement peut entraver le transfert vers les gestionnaires comme l'ONF, un modélisateur de l'INRA et proche de l'ONF, Philippe Dreyfus a proposé la création d'une plateforme de modélisation qui regrouperait des modèles de croissance. Ainsi, c'est en 1995 que CAPSIS (Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture) voit le jour. J'ai pu rencontrer l'ingénieur informaticien en charge de la plateforme, et assister à un des colloques annuels qui réunissent l'ensemble des utilisateurs : modélisateurs et gestionnaires qui utilisent la plateforme. La première chose qui m'avait frappée était que presque toutes les institutions qui ont trait à la forêt étaient représentées : IRSTEA, INRA, CEFÉ, FCBA, ONF, CNPF (Centre National des Propriétaires Forestiers). Aujourd'hui, plus de soixante dix modèles sont sur la plateforme CAPSIS. Elle est utilisée par les ingénieurs de l'ONF en charge de rédiger les guides de sylviculture, comme Serge, ingénieur au département Recherche-Développement-Innovation (RDI) de l'ONF.

2. Orienter la gestion forestière : les guides de sylviculture

L'ONF a un département Recherche Développement Innovation qui est composé de cinq antennes régionales, et d'un département national. Le département RDI assure un soutien financier, matériel et scientifique à des projets de recherche grâce notamment aux conventions-cadres qu'il entretient avec des instituts de recherche comme l'INRA ou IRSTEA. Il a également pour mission de réaliser le transfert des connaissances de la recherche aux forestiers de terrain. Pour ce faire, il rédige des guides de sylviculture qui documentent les principales régions forestières et proposent des itinéraires sylvicoles. J'ai pu discuter avec Serge de l'antenne nationale qui est en charge de la rédaction des guides de sylviculture, et qui utilise des modèles de croissance pour les rédiger, comme le modèle *Fagacées*, modèle « qu'il utilise beaucoup ». J'ai pu aussi m'entretenir avec Luc qui travaille à l'antenne Sud-est du département RDI de l'ONF dont la thématique principale porte sur le changement climatique. Tous deux sont responsables de la rédaction des guides de sylviculture qui sont des documents de gestion qui visent à aider les forestiers dans leurs pratiques de gestion. Les guides font plusieurs centaines de pages. Je prends comme exemple le guide des Alpes du Sud pour en détailler sa philosophie (Ladier, Rey, Dreyfus, 2012).

Chaque guide est consacré à une région forestière particulière, c'est-à-dire homogène eu égard aux conditions climatiques et biogéographiques. Celui sur les Alpes du Sud a été rédigé dans le cadre d'une convention entre l'ONF et IRSTEA Grenoble. Le guide propose dans un premier temps un diagnostic régional des enjeux et des pressions qui concernent les peuplements forestiers de la région. Dans un second temps, il propose des itinéraires sylvicoles en fonction de l'essence forestière et des objectifs de gestion fixés : est-ce une forêt de protection ou une forêt de production? Pour les forêts de protection, par exemple, le guide précise tout d'abord le risque à considérer (érosion, glissement de terrain, chute de bloc), l'enjeu associé à ce risque, et la stratégie de gestion à adopter qui concilie la connaissance du risque avec celle de l'essence. La stratégie de gestion, ou itinéraire sylvicole, donne à lire les interventions possibles qui s'offrent au forestier : par exemple, à partir de quel âge ou de quel diamètre doit-il réaliser les coupes ou les éclaircies ? Pour les forêts de production, le guide propose une stratégie de gestion pour chaque essence forestière présente dans la région considérée. Pour chaque essence, le guide mentionne les courbes de croissance théorique : c'est la relation entre l'âge du peuplement et la taille de la hauteur dominante. Ces courbes sont les « sorties »⁸⁸ des modèles de croissance. Puis, en fonction des objectifs sylvicoles et des conditions d'exploitabilité de la ressource, le guide propose des itinéraires à suivre : quand et comment couper les arbres ? Quand réaliser les éclaircies ? Faut-il réaliser une gestion en taillis ou en futaie ? Il précise également avec quelle autre essence on peut associer celle du peuplement dans les cas où il serait nécessaire d'effectuer des reboisements.

Serge précise que les guides sont élaborés à l'aide des modèles de croissance et de l'expérience de terrain : « c'est un dialogue entre les deux » selon ses mots. Les guides sont des recommandations proposées par l'ONF aux forestiers de terrain. Ainsi, les agents de terrain ont toujours la liberté de suivre les recommandations des guides, ou de refuser de le faire. Pour bien gérer sa forêt, il ne suffit donc pas seulement à l'agent de terrain d'appliquer le guide de sylviculture, comme a pu le préciser Serge dans notre entretien :

« Les guides donnent des recommandations pour tous les cas de figure possibles, c'est-à-dire, grosso-modo, quand vous êtes face à un peuplement de tel âge, voici ce qu'il faudrait faire. Mais ils disent aussi qu'il faut garder les plus beaux arbres : on enlève les plus moches, et on garde les plus beaux. Et donc là, il y a une application du forestier sur le terrain qui est énorme, car c'est lui qui décide lequel est le plus beau. Donc ce sont

⁸⁸ Les modélisateurs utilisent souvent les termes « entrées » pour parler des données que l'on injecte dans le modèle, et « sorties » pour parler des résultats. Ce vocabulaire est, je suppose, la traduction des termes anglais : *input/output*

vraiment des recommandations, ce n'est pas un document à mettre dans les mains de quelqu'un dont ce ne serait pas le métier, car ce serait incompréhensible » (Serge, Direction Nationale R&D ONF)

Les guides de sylviculture ne peuvent, ainsi, se passer de l'expérience de terrain des agents forestiers, et de leur regard entraîné et exercé à reconnaître, par exemple, quels sont les « beaux arbres ». La marge de manœuvre des agents de terrain est donc grande. D'autant plus que les agents forestiers n'ont pas toujours le temps de lire les recommandations ou notes de service de l'ONF, comme me l'a précisé un agent forestier de l'ONF : « J'ai à peu près une cinquantaine de mails par semaine. Déjà tu en as dix qui ne servent à rien, et puis pas mal de notes de services. Mais bon, les notes de services, elles font vingt pages, c'est long. Et puis elles sont rédigées par des gens assis dans leurs bureaux ! ». L'agent insiste sur le fait que les notes de service de l'ONF sont souvent trop générales : « on nous demande d'appliquer des trucs qui sont totalement déconnectés du terrain ! ». A l'inverse, Dominique, chercheur à l'INRA qui a travaillé à la direction de la recherche à l'ONF pendant de nombreuses années, regrette la flexibilité des recommandations :

« Moi je suis arrivé à l'INRA au moment où l'ONF commençait à s'intéresser de plus en plus aux modèles dynamiques dans une perspective de constructions de normes sylvicoles. Alors, à l'époque, on disait normes sylvicoles, maintenant, on dit plutôt guides, car normes ça paraît trop normatif. Moi je trouve qu'ils feraient bien de revenir au mot « norme », parce qu'en fait, c'est vite le boxon dès qu'on n'assume pas le côté normatif de ces outils. En gros, ça veut dire : « Les mecs, faites ce que vous voulez ! »... et ça, dans une boîte comme l'ONF, ça ne marche pas, ce côté totalement permissif ... enfin bref, c'est une parenthèse » (Dominique, chercheur ONF et INRA)

Les recommandations ne sont pas toujours appliquées, et inversement, les modèles de croissance peuvent se tromper, comme me l'a rapporté Serge : « On a fait un guide de sylviculture avec un modèle et trois ans après, sur le terrain, il n'y a rien qui marchait. On a dû faire marche arrière et refaire le guide de sylviculture en utilisant un autre modèle. Ce qui a eu un effet dévastateur sur les utilisateurs des guides car ils se disent : oh lala, ces ingénieurs, ils se sont complètement plantés ! ». Les relations entre ingénieurs forestiers et agents de terrains peuvent, ainsi, être conflictuelles. D'un côté, certains ingénieurs pensent qu'une trop grande liberté est conférée aux agents de terrain, alors que pour affronter le défi du changement climatique qui pèse sur les forêts, il faudrait développer une stratégie concertée qui associe la recherche et la gestion. D'autre part, les agents forestiers pensent parfois que les travaux des chercheurs sont déconnectés des réalités de terrain, et peuvent trouver leurs

propos hermétiques. Je me souviens des sourires échangés avec les agents de l'ONF lors du colloque des 25 ans du réseau RENECOFOR⁸⁹, quand le débat entre chercheurs a porté sur le type de modèle – corrélatif ou fonctionnel – qui serait le mieux armé pour anticiper les effets du changement climatique sur les forêts. Les transferts de connaissance entre recherche et gestion ne sont donc pas sans embûches.

Enfin, l'agenda sylvicole est marqué par des relations très fortes entre les ingénieurs forestiers des principaux centres de recherche forestière comme l'INRA ou IRSTEA et les ingénieurs forestiers qui travaillent soit à la direction de l'ONF, soit au département Recherche Développement et Innovation. Au-delà des nombreux lieux d'interactions entre ces deux profils de chercheurs (les colloques CAPSIS, des colloques à l'INRA qui associent les instituts de recherche et les organismes de gestion comme l'ONF ou le CNPF, notamment depuis la mise à l'agenda du changement climatique, j'y reviendrai), il faut noter que parfois ces deux 'types' de chercheurs sont une seule et même personne. Clément, chercheur à IRSTEA, a réalisé sa thèse en écologie et science forestière à IRSTEA et à l'ESE (laboratoire Ecologie, Systémique, Evolution). Ensuite, il a travaillé pendant cinq ans au département RDI de l'ONF pour ensuite revenir à IRSTEA. Serge, avant d'intégrer le département RDI de l'ONF, a fait sa thèse au CEMAGREF, puis a travaillé quelques années à l'IFN. Ces trajectoires sont souvent emblématiques des ingénieurs forestiers qui travaillent à l'ONF : thèse réalisée à l'INRA ou IRSTEA, puis poste au département RDI de l'ONF.

C. L'agenda écologique : comprendre les processus fondamentaux des écosystèmes forestiers

Ce deuxième agenda émerge à partir du milieu du XX^{ème} siècle, notamment avec le Programme Biologique International, mais c'est l'affaire des pluies acides qui consolide sa structuration dans les recherches forestières (chapitre 2). Si l'agenda sylvicole se concentre sur la production de bois et la croissance des arbres, l'agenda écologique envisage la forêt comme un système écologique régi par des lois de transfert de matière. Il ne s'agit plus de permettre l'exploitation rationnelle des forêts mais bien de comprendre leur fonctionnement écologique. La croissance des arbres est alors vue d'un point de vue écologique : comment les

⁸⁹ L'un des objectifs de ce colloque était de présenter les résultats de la recherche sur les écosystèmes forestiers français à partir des données récoltées par le réseau. J'y reviendrai dans le chapitre 4.

flux de carbone ou d'eau se répartissent-ils dans les différentes parties de l'arbre : racines, branches, tronc, tige, feuilles ? Comment, au sein d'un même peuplement, les arbres entrent-ils en concurrence pour la ressource en eau ? Est-ce que la diversité interspécifique (entre plusieurs espèces) ou intraspécifique (une même essence mais variable d'un point de vue génétique) favorise-t-elle la stabilité de l'écosystème ? Quelles sont les stratégies d'adaptation des arbres face à une forte sécheresse ? Tels sont les questionnements que l'on peut regrouper dans l'agenda écologique. Pour détailler la structuration de cet agenda, je m'intéresse dans un premier temps aux modèles fonctionnels, puis je détaille la production de données expérimentales, à partir de l'exemple du site expérimental de Puéchabon qui appartient au CEFE.

1. Les modèles fonctionnels : expliquer les mécanismes des écosystèmes forestiers

Le CEFE est emblématique de l'agenda écologique. Pour M. Dupuy (2004), le CEPE (ancien nom du CEFE) est fondé d'abord pour participer au projet de cartographie des groupements végétaux à l'échelle nationale, afin de « visualiser au mieux les potentialités naturelles des stations » (Dupuy, 2004, p 208). Ces travaux correspondaient également à une demande politique et économique, dans un contexte où la France souhaite moderniser son agriculture, le CEPE a été créé la même année que les lois Pisani. « La moitié des chercheurs historiques du CEFE étaient des agronomes », selon Jacques, chercheur qui travaille dans ce laboratoire depuis plus de trente ans. Pourtant aujourd'hui, le CEFE est considéré comme un laboratoire d'écologie dit 'fondamentale' où les chercheurs ont très peu de liens avec la gestion. Le CEFE est un laboratoire CNRS. Les écologues rencontrés s'intéressent plutôt à des processus écologiques fondamentaux. Voici comment Jacques décrit son travail scientifique :

« Donc, moi, ce qui m'intéresse, c'est de compter de mètres-cube de flotte, de compter des kilos de carbone produits par la photosynthèse, et ensuite de regarder comment tout ça vit dans l'écosystème, comment c'est mobilisé dans le tronc, dans les racines, dans les bois. Et je regarde ce qui se transforme en matière organique, et comment cette matière organique se décompose et à quelle vitesse. Donc ce qui m'intéresse vraiment, c'est de décrire les processus et les mécanismes. C'est vraiment ce qui m'intéresse en écologie, et c'est ma définition de l'écologie fonctionnelle » (Jacques, CEFE)

L'intérêt scientifique de Jacques porte sur l'étude des processus fondamentaux, notamment les flux de carbone et d'eau qui régissent le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Contrairement à l'agenda sylvicole, l'agenda écologique ne s'intéresse pas à la production économique de bois : il ne s'agit pas de mieux comprendre pour produire plus, ou pour produire mieux, c'est-à-dire en permettant à la forêt d'assurer ses différentes fonctions (sociales, économiques ou de protection). Charlotte, écologue au CEFÉ qui travaille sur la phénologie*⁹⁰ des plantes, insiste sur le fait qu'elle, non plus, ne s'intéresse pas aux forêts par l'angle de la production. Elle explique cela par son parcours académique :

« Comme moi j'ai une formation en écologie, écologie de l'évolution, par rapport aux autres chercheurs qui ont développé le même type de modèle, je n'étais pas focalisée sur la croissance, la production de la forêt, etc. Moi j'étais plutôt focalisée sur le concept de *fitness*, donc une valeur sélective qui est la résultante de la probabilité de survie et de succès de reproduction annuelle »

Le modèle de Charlotte simule tous les stades de développement de la plante, il fait 'pousser virtuellement' des plantes en fonction des conditions climatiques – la niche climatique. Mais à la différence des modèles sylvicoles, Charlotte ne s'intéresse pas à la production des forêts, son intérêt concerne le développement de l'essence et ses conditions de survie selon les conditions climatiques. Le concept de niche climatique vient des travaux de George Evelyn Hutchinson, zoologue américain qui est l'un des premiers avec son élève Raymond Lindeman à proposer une méthode formelle pour évaluer la productivité des écosystèmes. La niche d'une espèce représente l'ensemble des conditions où l'espèce peut survivre. On fait alors la distinction entre la niche potentielle de l'espèce – l'ensemble des conditions où l'espèce peut survivre théoriquement – et la niche réalisée de l'espèce – l'ensemble des conditions où on trouve réellement l'espèce. Le concept de niche est un concept central tant dans l'agenda écologique que dans l'agenda sylvicole. L'adéquation entre le parcours académique de Charlotte (écologie fondamentale) et ses intérêts de recherche (écologie fonctionnelle) se retrouve dans les trajectoires académiques d'autres chercheurs. L'agenda sylvicole est la plupart du temps pris en charge par des chercheurs formés en science et écologie forestières à l'ENGREF (AgroParisTech), et l'agenda écologique est traité par des chercheurs qui ont un parcours plus général en écologie, et plus particulièrement en écologie forestière. Néanmoins,

⁹⁰ La phénologie est l'étude des stades de développement des plantes, comme la floraison, la maturation des fruits ou la chute des feuilles.

cela n'est pas toujours le cas, comme le montre le parcours de Mathieu, chercheur au CEFE et travaillant sur les liens entre stabilité et diversité des écosystèmes forestiers :

« Alors, moi, comme parcours initial, j'ai fait la formation des ingénieurs forestiers, la FIF à Nancy, qui est une formation réalisée par l'ENGREF Nancy. A la fin de ce cursus, j'ai fait notamment un stage, donc c'était au CEMAGREF Aix-en-Provence. C'était pour un projet sur un stage très opérationnel, pas du tout orienté recherche, mais bon mine de rien, ça m'a mis un peu en contact avec ce monde de la recherche. Et donc après le stage, étant donné que l'ingénierie forestière en tant que telle ne m'intéressait pas tant que ça, je trouvais que ça manquait un peu de fondamental justement, j'ai décidé de faire un nouveau Master d'écologie, le Master d'écologie de Paris [...] Alors pourquoi j'ai choisi de venir ici au CEFE ? En fait moi j'avais fait ma thèse ici. Alors c'est vrai que je les connaissais déjà, mais j'avais eu des propositions pour aller dans d'autres labos en France, mais dans les faits ce qui me plaisait, bon outre la position géographique, c'est le fait d'avoir un labo où l'écologie de l'évolution était bien représentée, et notamment au niveau des forêts où il y a des aspects écophysiologicals de représenter dans les labos mais ces aspects communauté par contre n'étaient pas présents et du coup, je trouvais qu'il y avait une niche à occuper sur ces aspects-là »

Les questionnements de Mathieu recourent l'agenda écologique malgré son parcours initial assez emblématique des chercheurs qui traitent des problèmes de l'agenda sylvicole. Par ailleurs, Mathieu héberge son modèle dans CAPSIS, car il se révèle être opérationnel pour les gestionnaires forestiers. Le modèle de Mathieu permet de simuler des successions forestières de diverses essences. L'utilisateur initialise le modèle avec un certain nombre d'essences (deux ou trois). Il peut ensuite simuler le développement des peuplements et regarder comment les arbres poussent selon la composition des mélanges. Dans certains cas, c'est une essence qui va prendre le dessus sur les autres, et à l'état final, la parcelle ne comportera plus qu'une essence forestière. Dans le cas où le mélange est stable et productif, les deux essences peuvent croître ensemble. On voit alors l'intérêt du modèle de Mathieu pour les gestionnaires, notamment dans un contexte de changement climatique où les peuplements mélangés sont censés être plus résilients. Mathieu, comme l'ensemble de l'équipe FORECAST (FOREts, Changements globaux et Adaptation : Simulations et expérimentations) utilise très peu les données de l'IFN contrairement aux chercheurs de l'agenda sylvicole. Mais il bénéficie des données expérimentales du site de Puéchabon qui est géré par un chercheur de l'équipe, Lionel, écophysiological au CEFE. Pour Charlotte, ce site expérimental est l'un des dispositifs qui fédèrent l'équipe :

« Donc oui on essaie de monter des projets communs, on a un site expérimental que l'équipe porte, qui existe depuis longtemps mais autour duquel on essaie aussi de structurer nos activités de recherche qui est le site de

Puéchabon. Alors ça ne suffit pas comme site pour moi et Mathieu, car on travaille à des échelles assez larges mais en tout cas, ça nous permet d'explorer de façons plus précises certaines questions sur un site où on a tout un historique, tout le suivi du fonctionnement de l'écosystème depuis 96, ce qui est pas mal. » (Charlotte, CEFE)

2. *Produire des données expérimentales : le site de Puéchabon*

Le site de Puéchabon est créé en 1984 par des chercheurs du CEFE pour étudier la croissance des arbres dans un régime forestier de taillis. A la suite du protocole de Kyoto (1997), les chercheurs du CEFE participent aux réseaux européens *ICOS (Integrated Carbon Observation System)* et *MEDEFU* qui visent à *monitorer* les flux de carbone et d'eau dans les forêts européennes et méditerranéennes, ainsi qu'à estimer le stockage du carbone. C'est dans le cadre de ce projet qu'est installée la première tour à flux sur le site, haute de douze mètres, et qui mesure les échanges de dioxyde de carbone, d'eau et de gaz entre l'écosystème forestier et l'atmosphère. L'équipe renouvelle régulièrement des participations à des projets européens pour assurer les financements de ce site expérimental dont la perdurance dans le temps est une condition nécessaire et absolue pour produire des données utilisables par les modélisateurs forestiers. Le site est également équipé d'une expérience d'exclusion de pluies avec un toit mobile depuis 2007 (cf. II-B-1 de ce chapitre). Puéchabon est un site expérimental qui se distingue des sites d'observations – comme le réseau *RENECOFOR* – dans la mesure où on intervient directement sur l'écosystème forestier pour modifier son fonctionnement. Mais comme l'a mentionné Charlotte, le site de Puéchabon ne fournit des données que sur une forêt locale peuplée de chênes verts. Pour son modèle, Mathieu a besoin d'autres données. C'est pourquoi, il est un grand utilisateur du réseau *RENECOFOR* qui produit un grand nombre de données sur les écosystèmes forestiers dans toute la France.

RENECOFOR produit ainsi une quantité de données, disponibles dans une base de données et qui sont utilisés par les modélisateurs pour alimenter leurs modèles de croissance ou leurs modèles écophysologiques. Depuis 1992, cent trente articles qui utilisent les données du réseau ont été publiés dans des revues à comité de lecture (Nicolas et al., 2017). De plus, le réseau semble répondre aux deux agendas ; d'une part, les sites ont été placés uniquement dans des forêts de production (agenda sylvicole), d'autre part, les données récoltées comme la composition des litières ou les taux d'azote dans les sols peuvent être mobilisées dans des travaux qui répondent aux problèmes de l'agenda écologique. Ainsi, comme *CAPIS*, *RENECOFOR* permet le rapprochement des agendas sylvicoles et écologiques, notamment

dans le contexte de l’irruption du problème du changement climatique. La seconde partie de ce chapitre est consacrée à l’étude de l’émergence du changement climatique dans les recherches forestières, et les effets qu’il a eus sur la restructuration des deux agendas présentés précédemment.

Avant de détailler comment l’étude du changement climatique a percolé dans les recherches forestières, on peut reprendre la typologie proposée par Scott Frickel et ses coauteurs pour détailler, dans ces agendas, la ‘science qui est faite’, celle qui ‘devrait être faite’, et celle qui est ‘laissée de côté’, du point de vue des acteurs.

Agenda	Qu’est-ce qui est fait ou devrait être fait (d’après les acteurs) ?	Qu’est-ce qui reste non-fait ?
Agenda sylvicole	1/ Développer des modèles utiles aux forestiers. 2/ Augmenter la quantité de données disponibles sur les arbres en développant des réseaux d’observation ou la mutualisation des données 3/ Evaluer la ressource nationale en bois	1/ Etudier et modéliser les processus fondamentaux qui expliquent le fonctionnement des écosystèmes forestiers. 2/ Produire des données expérimentales sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers.
Agenda écologique	1/ Développer des modèles de compréhension du fonctionnement des forêts (photosynthèse, allocation du carbone, cycle de l’eau ou de l’azote) 2/ Allier modélisation et expérimentation pour étudier le fonctionnement des écosystèmes dans des conditions extrêmes	1/ Développer des modèles qui soient directement utilisables par les ingénieurs forestiers pour orienter la gestion forestière 2/ Prévoir précisément la ressource en bois future

Tableau 1 : La structuration des problématiques de recherche des agendas sylvicoles et écologiques.

II. Les recherches forestières face au changement climatique : l'anticipation des futurs des forêts au cœur des agendas de recherches.

Dans les productions françaises consacrées au changement climatique, le livre de S. Aykut et A. Dahan, *Gouverner le climat ? 20 ans de négociations internationales* (2014), est sans nul doute une référence centrale. De l'alerte scientifique aux promesses de la COP21 de Paris en 2015, les auteurs détaillent avec précision comment le problème a été cadré, et les dynamiques qui ont orienté sa construction comme problème international global. S'appuyant sur les travaux de l'historien des sciences Paul N. Edwards (2010), les auteurs expliquent que le cadrage du changement climatique comme problème global est en partie lié aux infrastructures météorologiques et aux sciences climatiques – la « collecte de données à l'échelle globale » et « la fabrication de données globales ». Un autre élément qui explique ce cadrage est l'émergence de l'idée d'« environnement global » (Grevsmühl, 2014 ; Mahrane et Bonneuil, 2014) à partir des années 1960 dont le PBI est l'un des avatars les plus parlants. Le changement climatique serait alors aujourd'hui vu « comme paradigmatique de la crise écologique globale » (Aykut et Dahan, 2014, p. 52). Ces analyses pourraient laisser penser que la mise à l'agenda du changement climatique s'est imposée dans tous les domaines : politiques, scientifiques, économiques et sociaux. Qu'en est-il pour les recherches forestières ? L'agenda climatique a-t-il remplacé les agendas sylvicoles et écologiques ? On constate plutôt un rapprochement et une convergence des agendas sylvicoles et écologiques vers le problème climatique. Pour détailler ce processus, on peut faire appel au concept de « climatisation » qui a été formulé dans le cadre des analyses portant sur les négociations climatiques (Aykut, Foyer et Morena, 2017). Par ce concept, les auteurs décrivent les manières dont certains acteurs ont pu intégrer la problématique climatique dans leurs argumentations afin de pouvoir s'asseoir à la table des négociations. L'historienne des sciences Amy Dahan-Dalmedico (2010) a, quant à elle, montré la façon dont les sciences climatiques ont développé des modèles intégrant de plus en plus de paramètres, notamment biologiques, dont les surfaces terrestres et la végétation. Les modèles globaux du climat intègrent aujourd'hui les échanges entre la biosphère, l'atmosphère, les écosystèmes marins et terrestres.

L'enquête que j'ai menée montre que ce mouvement global a eu des effets locaux sur les productions scientifiques, les collaborations et les arrangements institutionnels dans le cas des recherches forestières. Trois tendances permettent de caractériser les modalités du phénomène de « climatisation ». Premièrement, on peut constater que les agendas sylvicoles et écologiques ont intégré la problématique climatique dans leurs recherches. Cela se traduit, notamment, par le développement de nouveaux protocoles de mesure, l'émergence de nouveaux 'fronts de science' comme l'estimation du stockage potentiel du CO₂ par les forêts, ou l'anticipation des effets des sécheresses sur la physiologie des arbres. Deuxièmement, l'enquête met en évidence un processus de rapprochement, voire d'hybridation, des différents agendas à plusieurs niveaux : collaborations entre chercheurs (projets en commun ou articles rédigés à plusieurs mains) ou développement de plateforme de comparaison des différents types de modèles. Ce processus de rapprochement des agendas n'est pas sans effet sur les financements des recherches forestières. Dans cette optique, certains chercheurs militent pour une préservation des anciens agendas. Troisièmement, le processus de « climatisation » des recherches forestières s'appuie sur le développement de pratiques d'anticipation du changement global et de ses effets sur les forêts. L'anticipation du changement climatique occupe aujourd'hui une place centrale dans la vision de la 'science qui compte' des deux agendas.

Dans un premier temps, je retrace comment le changement climatique s'est 'imposé' dans les recherches forestières, en regardant comment la communauté forestière a été interpellée par plusieurs événements, et plus particulièrement la sécheresse de 2003, et la 'fuite' dans la presse des premières cartes d'aire de répartition des essences forestières françaises qui prévoyaient alors un futur catastrophiste pour le hêtre : sa disparition supposée à l'horizon 2100. Ces deux événements ont contribué à la mise à l'agenda politique et scientifique du changement climatique dans la recherche et la gestion forestières. Dans un second temps, j'analyse quels ont été les effets de l'irruption du changement climatique dans les agendas écologiques et sylvicoles.

A. La communauté forestière soucieuse des effets du changement climatique dans les années 2000

La mise en évidence du phénomène du changement climatique et de ses effets sur les forêts n'émerge pas dans les années 2000. Dès le début des années 1990, la communauté forestière est consciente des dangers que ce phénomène peut causer sur l'avenir des forêts françaises. Le « réchauffement climatique » apparaissait déjà dans les recommandations de la conférence interministérielle de Strasbourg de 1990 qui clôt l'affaire des pluies acides. Dans une interview pour le journal de 13h d'Antenne 2 du 19 décembre 1990 (Antenne 2, 1990 décembre), Jean-François Lacaze, alors directeur de recherches à l'INRA, alerte déjà qu'« un certain nombre d'espèces exigeantes en eau vont progressivement disparaître, c'est le cas par exemple du sapin et de l'épicéa ». Néanmoins, c'est véritablement dans la première moitié des années 2000 que le changement climatique va alerter la communauté forestière. Il devient alors devenir un problème majeur qui a des conséquences durables sur la structuration de la recherche et de la gestion forestières. C'est tout d'abord la sécheresse de 2003 qui met en émoi le milieu forestier par ses conséquences visibles sur les feuillus et les résineux. Puis, la parution dans le journal *La Croix*, en août 2004 (Verdier, 2004, août), des premiers résultats du projet de recherche CARBOFOR alerte les forestiers publics et privés, notamment car ils prévoyaient la disparition presque totale de l'aire de répartition du hêtre en France à l'horizon 2100. Ce futur catastrophiste, comme dans l'affaire des pluies acides, à son époque, va alors avoir des conséquences durables sur la recherche et la gestion forestières.

1. *La sécheresse et la canicule de 2003 : un « avant-goût » du futur ?*

En 2003, la France est touchée par une canicule et une sécheresse aux conséquences écologiques et sanitaires importantes. Cet été a marqué la mémoire collective de la communauté forestière. Pour Luc, ingénieur à la RDI de l'ONF, cet épisode a provoqué une prise de conscience à l'ONF concernant l'adaptation des forêts au changement climatique : « Cet aspect adaptation au changement climatique, je dirais qu'il a pris aussi de plus en plus d'importance. On s'y était relativement peu investi jusqu'en 2004-2005, jusqu'à ce qu'on s'inquiète justement des conséquences de la sécheresse de 2003, il n'y avait pas de veille scientifique qui était assurée sur le sujet ». La même idée est défendue par Corinne,

actuellement à la direction territoriale de l'ONF, mais qui travaillait à l'époque à l'IFN. Elle m'a raconté que l'IFN s'était alors beaucoup investi pour mesurer les impacts de cette sécheresse sur la ressource nationale en bois.

A l'hiver 2004, la revue trimestrielle coordonnée par l'ONF, les *Rendez-vous techniques*⁹¹, consacre un premier article sur le diagnostic et les conséquences de la sécheresse de 2003 (Flot, 2004) sans pour autant que le lien ne soit fait avec le changement climatique. Pour réaliser le diagnostic des effets de la sécheresse sur les peuplements forestiers ont été mobilisés les deux réseaux de surveillance des forêts : le DSF et RENECOFOR. A l'hiver 2006, les *Rendez-vous techniques* consacrent un dossier sur l'« expertise sécheresse et canicule 2003 » (Valeix, 2006). L'article de Martine Rebetez et ses coauteurs qui visent caractériser en détail cet « évènement exceptionnel » et statuer sur son lien avec le changement climatique, conclut que « l'analyse des températures depuis le début du XX^{ème} siècle montre que l'augmentation du nombre de jours chauds en été est manifeste, mais que les conditions de l'été 2003 furent tout de même exceptionnelles, même dans un contexte de réchauffement général » (Valeix, 2006, p.17). Néanmoins, pour les auteurs, l'augmentation des gaz à effet de serre a « au moins doublé le risque de voir un été aussi chaud que celui de 2003 » (*Ibid.*). Ils concluent alors que « les conditions qui ont régné en Europe en été 2003 peuvent donc être considérées comme la résultante d'une combinaison entre le réchauffement global des températures et des conditions de répartition des pressions [atmosphériques] exceptionnelles sur l'Europe et l'Allemagne » (*Ibid.*). On imagine alors que les conditions climatiques futures vont jouer un rôle dans la répétition de ces évènements extrêmes que constituent les sécheresses et les canicules. D'ailleurs, cette idée figure dans l'article du journal *La Croix* qui met sur la scène médiatique les cartes d'aires de répartition réalisées dans le cadre du projet CARBOFOR : « Au Nord des espèces ne trouveront plus d'habitat : il y a un gros risque de disparition des biotopes des zones froides en haute montagne ou dans les vallons froids des plaines. Au Sud, les conditions devenues trop drastiques se traduiront par des dépérissements importants. L'été 2003 en a donné un avant-

⁹¹ Les *Rendez-vous techniques* est une revue publiée par l'ONF qui vise à améliorer le transfert de connaissance de la recherche à la gestion, et concerne tous les sujets qui touchent la gestion forestière : « Aussi, ces « rendez-vous » sont-ils ouverts à tous les champs de l'activité de production de l'Office, à l'aménagement, aux sylvicultures, à la gestion de la biodiversité, à la mobilisation des bois bien entendu, mais également, sans caractère limitatif, à la prise en compte des dimensions sociales et d'accueil de la forêt, et d'une manière générale à la mise au point des techniques au service nos activités conventionnelles. Ils auront également comme fonction de prendre en compte et de faire connaître des expériences utiles de forestiers de tous horizons, français ou étrangers. » (Drège, 2003).

goût. » (Verdier, 2004, août). Cet article et les cartes du projet CARBOFOR alertent la communauté forestière sur les dangers possibles du changement climatique.

2. « *La fin du hêtre ?* » : les cartes du projet CARBOFOR

Le projet CARBOFOR visait à estimer la séquestration du carbone dans les écosystèmes forestiers français, et à simuler l'impact de différents scénarios climatiques et sylvicoles sur les aires de répartition des essences forestières françaises. C'est le volet D1 du projet « Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises » (Loustau, 2004) qui a produit les cartes qui ont alerté la communauté forestière. C'est la mise au point de modèles climatiques passés et actuels (le modèle AURELHY de Météo-France) et de modèles climatiques futurs (le modèle ARPEGE) qui ont donné la possibilité aux modélisateurs du projet d'intégrer les scénarios climatiques futurs dans leurs modèles pour simuler les futurs des écosystèmes forestiers. Le modèle ARPEGE a été déterminant dans la possibilité de réaliser ces simulations car il a une résolution spatiale adéquate avec les modèles forestiers, comme le raconte Bastien, écologue à l'UMR Silva et participant au volet D1 du projet CARBOFOR :

« A l'échelle globale, tu avais un climat qui ressemblait à un climat global, mais dès que tu commences à regarder régionalement ... nous à Nancy, c'était le climat du Sahara, pour 2050/2100... donc on ne faisait pas grand-chose avec ces modèles climatiques. Puis est arrivé le modèle ARPEGE dans les années 2000, où là on a un détail de mailles beaucoup plus intéressant car on était à 50 km, c'est encore gros, mais il y a plusieurs points sur le territoire, plusieurs scénarios climatiques, du dur, du mou, du +2°, du +4°, ... du coup, c'est tentant d'injecter ce climat-là dans tes modèles... ».

L'amélioration de la résolution des modèles climatiques développés par Météo-France a rendu possible la projection des aires de répartition des grandes essences forestières françaises à l'horizon 2100. Les modèles d'aires de répartition sont des modèles corrélatifs. Leur construction suit trois grandes étapes. Premièrement les modélisateurs du projet ont à leur disposition la répartition observée du hêtre, telle qu'elle est produite par l'IFN (image 3). Ces données renvoient à la niche réalisée du hêtre. Cette essence se trouve dans le quart Nord-est de la France, et dans les régions montagneuses comme les Alpes et les Pyrénées.

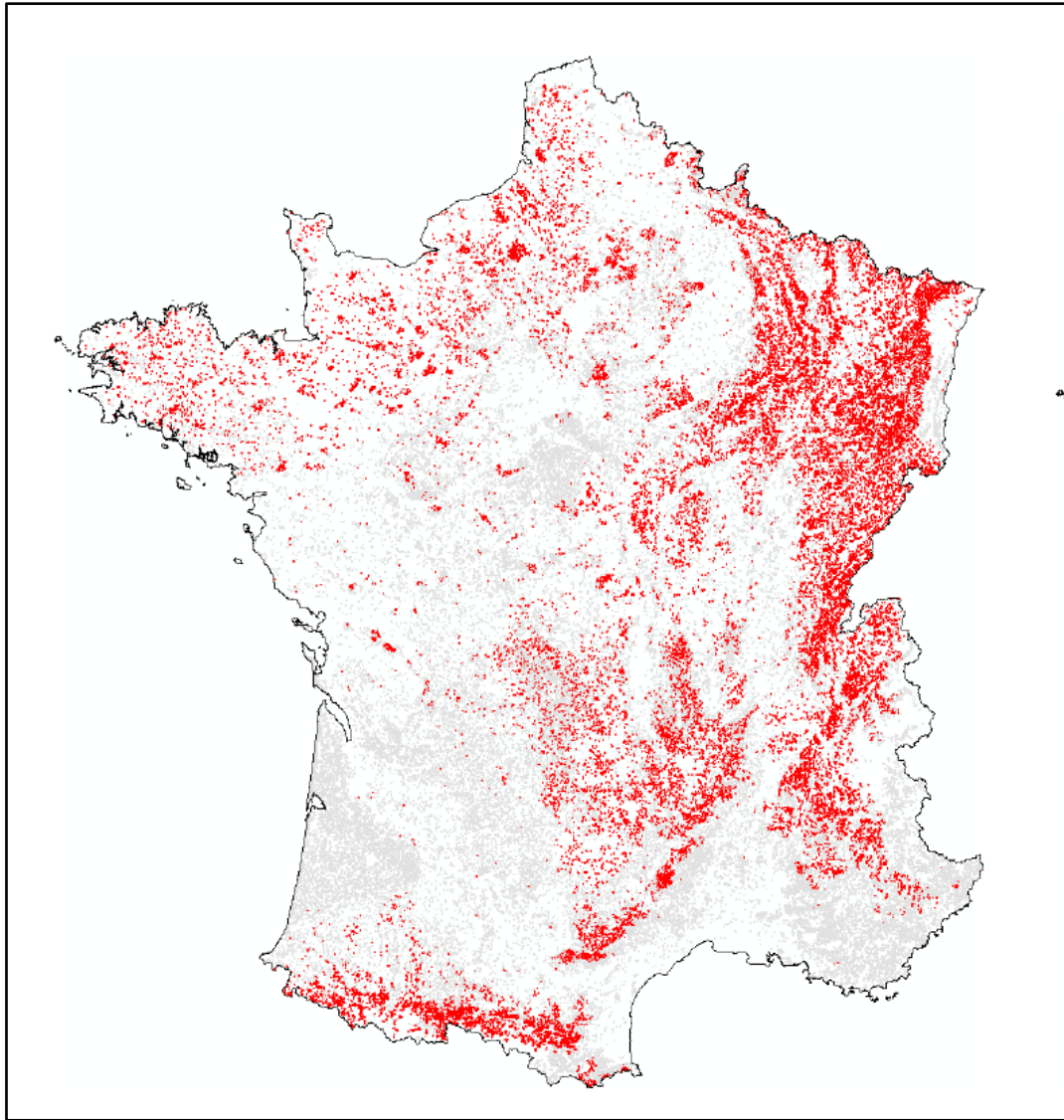


Image 3 : Présence du hêtre en France telle qu'elle est observée par l'IFN (Badeau et al., 2004)⁹²

Les chercheurs peuvent ensuite modéliser l'aire de répartition actuelle du hêtre, en couplant les données produites par l'IFN et le modèle climatique actuel (AURELHY). Cette étape est primordiale, car c'est grâce à la modélisation de l'aire actuelle (image 4) que l'on peut ensuite extrapoler à l'aire future (image 5). Comme le modèle d'aire de répartition couple les données de présence de l'essence avec le modèle climatique AURELHY, la présence du hêtre est exprimée en probabilités de présence, dont l'échelle se trouve à droite de la carte de modélisation (image 4). Les zones en rouge et rouge foncé correspondent assez bien aux zones de présence observée dans les données de l'IFN.

⁹² Les cartes ont été reproduites avec l'accord de l'auteur.

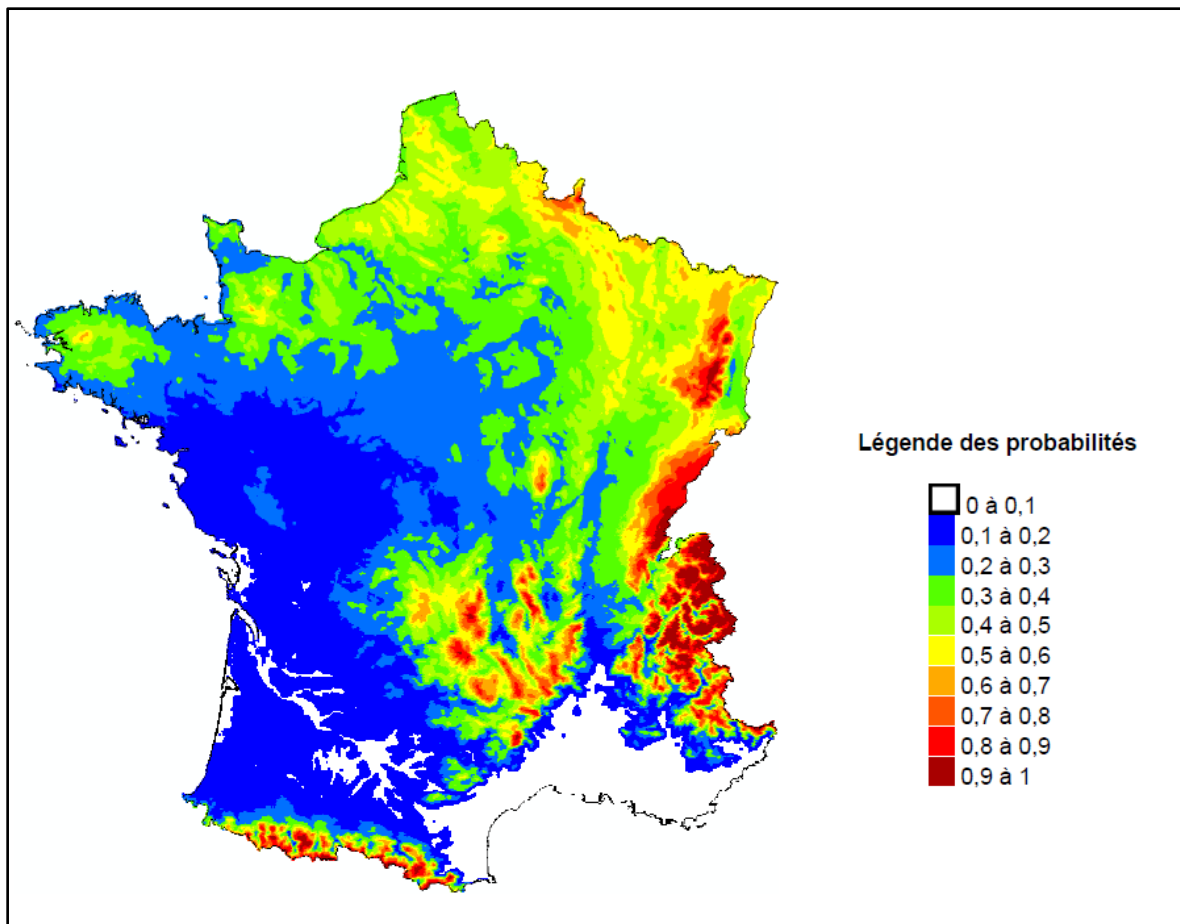


Image 4 : Modélisation de l'aire de répartition du hêtre (Badeau et al., 2004)

Enfin, grâce à ce modèle (image 4), on peut projeter l'aire de répartition future du hêtre en le couplant au modèle climatique ARPEGE. C'est ce qui a été fait pour l'horizon 2100 sur l'image 5. On voit alors que la probabilité de présence du hêtre est très faible partout en France, à l'exception de quelques zones montagneuses comme une partie des Vosges ou des Alpes. Les hêtres présents en plaine auraient alors disparu des paysages forestiers français en 2100.

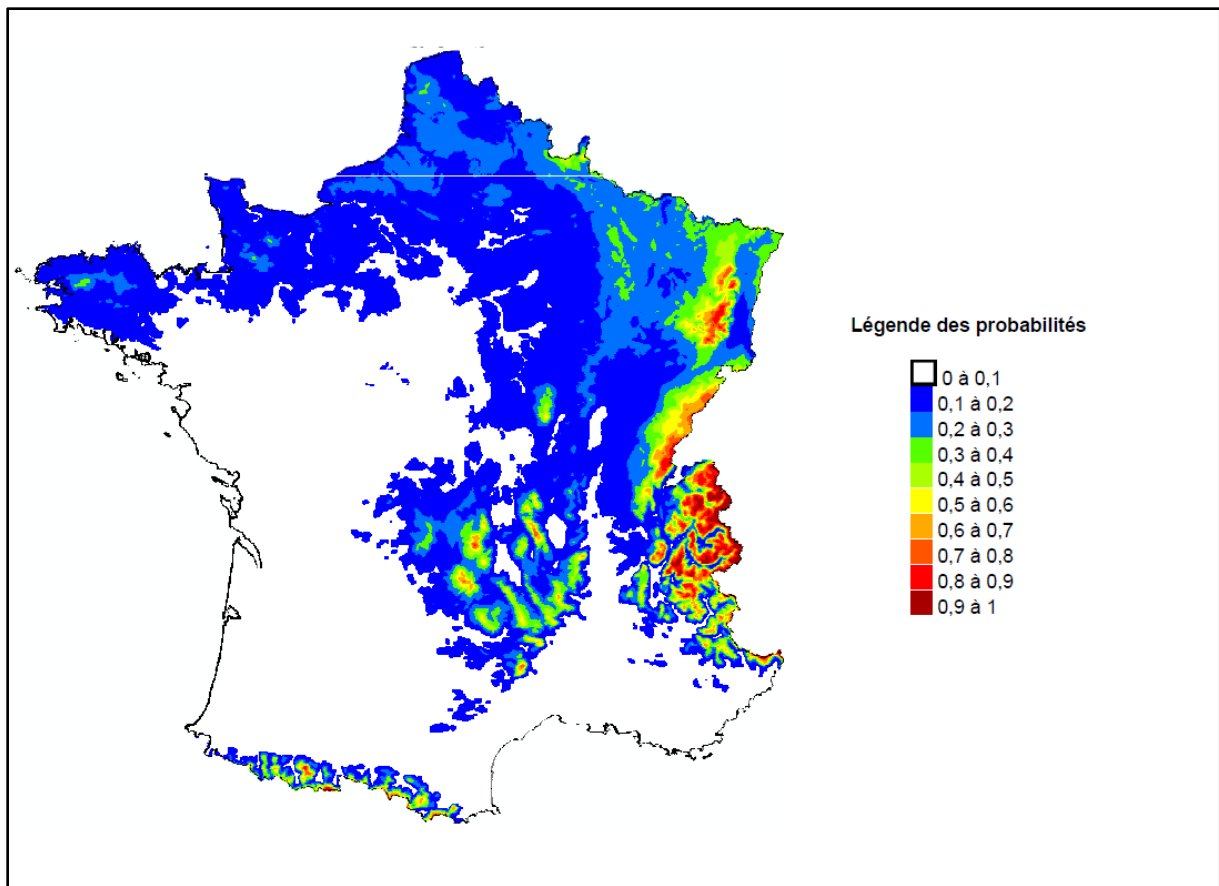


Image 5 : Extrapolation de l'aire de répartition du hêtre en utilisant les données climatiques futures, ici 2100 (Badeau et al., 2004)

Les premières cartes du projet CARBOFOR projetaient ainsi à l'horizon 2100 une très forte régression de l'aire de répartition du hêtre, voire une quasi-disparition de l'essence qui aurait été cantonnée à quelques régions montagneuses. C'est ce résultat, relayé par la presse, qui a alerté le milieu forestier. Bastien qui a participé au projet m'a raconté comment cela s'est produit. L'encadré 1 retrace l'histoire de la 'fuite' des résultats dans la presse généraliste française, plus précisément le journal *La Croix*.

Encadré 1 : La ‘fuite’ des cartes CARBOFOR dans la presse : le milieu forestier en émoi (extrait d’entretien avec Bastien)

« Le souci, c’est que ce projet CARBOFOR qui était un gros projet ANR, a été suivi par une journaliste de *La Croix*. Elle venait souvent nous voir, et elle est passée à l’été 2004 me voir au labo’, et je lui ai montré des résultats de recherche, les premières cartes, justement, hêtre et chêne vert. Et voilà, et là-dessus on a discuté, et je me suis barré en vacances. Elle en a profité pour faire un article qui a repris mes cartes de projection qui disaient « extension du chêne vert », et ce sera « la fin du hêtre. ». C’est marrant, c’était en 2004, tu recherches aujourd’hui sur *Google*, ce sont ces cartes-là qui vont sortir en premier, ça a été sorti partout, dans le monde entier, c’est un truc de fou ! Bien sûr, sans les *warning* que j’avais pu lui donner, et même sans l’explication scientifique qu’il y avait derrière ! Et là il s’est passé une chose relativement intéressante, c’est que tu dis que bon, *La Croix*, ce n’est quand même pas le journal qui est le plus lu en métropole. Bon j’aurai fait *Le Monde*, *Libé*, pourquoi pas... et bien ça a été le début du grand bordel, car cette information a percolé directement au niveau le plus bas des gestionnaires forestiers, vraiment les gens de terrain. Ils ont pris ça en pleine gueule, car évidemment ils n’étaient pas au courant de ce genre de recherche, c’était notamment à l’ONF. Ils se sont dits : « c’est quoi ces résultats ? On nous cache tout, on nous dit rien, on nous demande de faire des plans d’aménagement comme on fait depuis 50 ou 100 ans, ce n’est pas soutenable, c’est quoi ce bordel !!!! » C’est remonté... et puis la hiérarchie nous a appelé directement : « C’est quoi ce bordel ? Vous vous foutez de notre gueule...on n’est pas au courant de vos résultats, ça arrive dans la presse ». La réponse qu’on leur a dit est la suivante : « chers gens de l’ONF, ça fait 10 ans que vous ne participez plus aux programmes de recherche, ça fait 10 ans que vous ne vous intéressez plus à ce qui se fait à l’INRA, ça fait 10 ans que vous êtes englués dans vos problèmes de restructuration et de marché, etc... Que vous ne soyez pas au courant, c’est un peu normal. Donc voilà, désolé... » Et puis l’autre réaction, de la forêt privée, a été beaucoup plus constructive, et moi c’est une époque vraiment où j’ai parcouru toute la France, parce que les gens de la forêt privée ont dit : « C’est quoi ce résultat ? On veut comprendre, donc vous allez venir nous expliquer. » Et c’est à ce moment qu’avec une collègue, on a fait le tour des CRPF et IDF de France pour expliquer ce qu’on avait fait, comment on l’avait fait et quelles en sont les implications. Donc vraiment deux réactions totalement différentes, voilà... ça c’était la genèse... »

La sortie des cartes du projet CARBOFOR dans la presse a pris de court les forestiers publics et privés. A la suite de la publication de ces cartes, Bastien et une collègue sont allés rencontrer les différents CRPF pour expliquer les résultats, en insistant également sur les nombreuses incertitudes qui pèsent sur la projection dans le climat futur des aires de répartition potentielles. Les participants du projet du CARBOFOR ont par la suite publié un article dans les *Rendez-vous techniques* (Landmann et al., 2007) et dans *Forêt-Entreprise* (Landmann et al., 2008) pour nuancer le pronostic catastrophiste paru dans la presse sur les projections de l’avenir du hêtre en France. Cet article publié dans la revue de l’ONF et la

revue du CNPF vise donc à « rassurer » forestiers publics et privés. On peut citer la manière dont l'article fait référence à cette affaire :

« Été 2004 : la publication par les médias de cartes montrant, avec une grande précision apparente, l'évolution possible de la forêt française d'ici la fin du XXI^{ème} siècle suscite l'émotion dans les milieux forestiers français [...]. L'aire de répartition du hêtre régresserait fortement, se cantonnant au Nord-est et aux régions de montagnes. Au-delà du choc visuel provoqué par ces cartes, issues du projet Carbofor, on assiste à la prise de conscience, dans les milieux forestiers de l'importance des enjeux du changement climatique. Mais comme lors de la psychose qui a saisi les médias au sujet des pluies acides dans les années 80, n'y a-t-il pas une part d'inquiétudes infondées ? » (Landmann et al., 2008, p.28)

La suite de l'article revient ensuite sur la manière dont ont été construites ces cartes, et insiste sur les nombreuses incertitudes qu'elles comportent. Que retenir de cette affaire des cartes CARBOFOR ? Comme dans le cas des pluies acides, l'irruption d'un futur catastrophiste – la « fin du hêtre » – a mis en émoi le milieu forestier, et a mis en branle une série de restructurations dans les institutions forestières, pour lesquelles le changement climatique est devenu la menace majeure qui pèse sur l'avenir des forêts françaises. Comme dans le cas des pluies acides, le pronostic catastrophiste a été revu à la baisse, mais a marqué durablement les institutions forestières. Je détaille une partie de ces restructurations, avant d'analyser en détail comment les agendas sylvicoles et écologiques ont intégré la problématique climatique.

3. L'intégration du problème climatique dans les institutions de gestion forestière

Dans l'encadré 1, Bastien insiste sur le fait que depuis une dizaine d'années, il y a une déconnection entre le milieu de la recherche et la gestion publique. C'est dans cette perspective qu'est initié le Réseau Mixte Technologique (RMT) AFORCE qui est « un réseau français pour l'Adaptation des Forêts au Changement climatique », et qui naît du constat que « la répétition des événements climatiques extrêmes ainsi que l'augmentation des dépérissements en forêt inquiètent les gestionnaires qui font remonter à la recherche leurs interrogations dès 2006 »⁹³. Il est créé en 2008 et regroupe des partenaires de la recherche et de l'enseignement supérieur comme AgroParisTech, le FCBA, l'INRA, IRSTEA, Météo-France ou le GIP-ECOFOR, des partenaires de la gestion comme le CNPF, l'ONF, l'IGN, et

⁹³ <https://www.reseau-aforce.fr/n/objectifs-du-reseau/n:402>

associe également certaines structures comme le DSF, le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation ou le Ministère de la transition écologique et sociale. Ce réseau vise à améliorer les échanges entre tous ces partenaires, notamment en organisant des colloques, ou en publiant des rapports sur l'intensité du changement climatique, et ses effets attendus sur les forêts françaises.

Le 20 octobre 2005, l'ONF et l'INRA organisent conjointement un colloque : « La forêt face au changement climatique. Adapter la gestion forestière » (Legay et Mortier, 2006) où sont présents les participants du projet CARBOFOR, des membres du département RDI de l'ONF et des chercheurs de l'INRA. Ce colloque avait pour objectif de faire une synthèse des travaux scientifiques sur les effets du changement climatique sur les forêts, mais aussi de répondre aux interrogations que les agents forestiers se posent sur le problème climatique. Le colloque se tient quelques mois avant la refonte des documents d'orientation de la gestion forestière – les directives régionales d'aménagement (DRA) pour les forêts domaniales et les schémas régionaux d'aménagement (SRA) pour les forêts communales – et a également pour objectif d'intégrer la problématique climatique dans ces différents documents qui cadrent la gestion des forêts publiques. Ainsi, la synthèse du colloque mentionne deux « piliers » sur lesquels doit reposer l'action du forestier face au changement climatique : « anticiper les changements : choisir les essences et les provenances les plus adaptées, dynamiser les sylvicultures » et « accompagner le changement : gérer les crises provoquées par les aléas, faire face aux dépérissements, récolter les peuplements surannés ». Le DSF, également, n'est pas en reste et intègre à partir de 2007 l'observation des effets du changement climatique (Flot, 2009). J'analyse à présent en détail par quels mécanismes s'est opérée l'intégration de la problématique climatique dans les recherches forestières grâce au concept de « climatisation ».

B. Les agendas écologiques et sylvicoles face au changement climatique : « climatisation » et hybridation des agendas

Quels effets a eu l'irruption du changement climatique sur les agendas des recherches forestières ? De nombreux modélisateurs m'ont dit que le changement climatique était aujourd'hui un mot-clef indispensable à faire figurer dans les projets de recherche pour acquérir des financements à l'échelle nationale, et encore plus à l'échelle européenne. Dans le

cadre de gros projets type ANR ou ERC, il y a souvent un volet – « *work-package* » – qui est consacré à la simulation du phénomène étudié sous l’hypothèse du climat futur, en utilisant les scénarios climatiques du GIEC ou de Météo-France (modèle ARPEGE). Cela rendrait les « projets plus attractifs » pour les financeurs. On peut néanmoins dépasser cet argument stratégique et pragmatique. En effet, l’enquête montre qu’il y a une tendance dans chacun des agendas à intégrer le changement climatique comme enjeu ou comme élément de contexte. J’étudie ces processus qui sont marqués par des continuités et des discontinuités pour les deux agendas successivement. Je détaille d’abord ce processus pour l’agenda écologique, car il semble a priori être le mieux ‘armé’ pour étudier les effets du changement climatique sur les écosystèmes forestiers.

1. Le changement climatique dans l’agenda écologique : un simple élément de contexte ?

L’agenda écologique est orienté vers la compréhension des mécanismes des écosystèmes forestiers, et donc n’a pas vocation à prévoir ou prédire leurs états futurs. Le ‘front de science’ pour les chercheurs porte plutôt sur la connaissance des lois écologiques. Ainsi, l’agenda écologique n’a été que fort peu intéressé par la robustesse de la projection dans l’avenir. Ceci semble changer avec la mise à l’agenda du changement climatique. En effet, ce dernier devrait bouleverser le fonctionnement des écosystèmes forestiers que l’on avait considéré comme stable d’un point de vue climatique et temporel – surtout dans l’agenda sylvicole qui a formé la notion de « station forestière » et les tables de production. Avec la mise à l’agenda du changement climatique, les chercheurs de l’agenda écologique auraient orienté leurs recherches vers la prise en compte et l’évaluation des impacts de ce dernier. Plusieurs modélisateurs m’ont expliqué que cette tendance s’expliquait par une « demande sociétale », comme le montre cette citation de l’entretien réalisé avec Charlotte :

« Je pense clairement que c’est en partie à cause du changement climatique que ça s’est développé cette écologie prédictive ... Hum ... parce que sinon, pour quelle autre raison ça aurait pu se développer comme ça ?... [silence]... On y serait peut-être venu de façon naturelle mais beaucoup plus tard quoi... Je pense que oui, ça a vraiment forcé les choses. D’ailleurs, moi, je l’ai dit, quand j’ai conçu le modèle pour comprendre l’importance de la phénologie dans la *fitness*, ce n’était pas du tout dans l’objectif de faire des projections, et c’est vraiment à cause du changement climatique qui au fil des années s’est imposé comme donnée en fait que voilà... J’aurai très bien pu rester sur des recherches purement fondamentales, ne pas utiliser le changement climatique, et ne

pas faire de projections avec le modèle, j'aurai très bien pu, mais... Pour moi et la plupart des autres chercheurs, je pense que c'est qu'on veut répondre aux sollicitations de la société et essayer d'utiliser les modèles qu'on a pu développer pour établir des projections sur ces questions »

Le changement climatique s'est progressivement imposé comme une « donnée », c'est-à-dire un fait scientifique sur lequel il y a un consensus scientifique international. Les propos de Charlotte montrent que l'étude des effets futurs du changement climatique sur les écosystèmes forestiers, et sur la phénologie des arbres en particulier, est une 'recherche qui compte' pour elle. On voit alors que le processus de climatisation joue sur la science qui devrait être faite. Cet argument permet à la fois de se départir de la simple vision stratégique et pragmatique de la référence au changement climatique, et témoigne d'une inscription de ce dernier dans l'agenda écologique.

Le processus de climatisation a également des effets sur la conception des infrastructures d'observation et d'expérimentation. Depuis 2007, le site expérimental de Puéchabon comporte une expérience d'exclusion de pluies (Projet ANR *Drought+*⁹⁴). Il s'agit d'un toit mobile qui se situe au dessus des couverts forestiers et qui est actionné quand il pleut, pour empêcher que la pluie ne tombe sur la partie de la forêt voulue, afin de simuler expérimentalement une exclusion de pluie, ici de 30% par rapport aux moyennes actuelles. Lionel, expérimentateur en charge du site, me raconte comment et pourquoi ils ont pensé à cette expérience :

« Les expériences que l'on fait à Puéchabon sont quand même basées sur des scénarios climatiques, ce n'est pas une invention. Si on a fait 30% de précipitations en moins, c'est parce que les modèles climatiques en région méditerranéenne prédisent 30% de précipitations en moins pour l'été. A la base, ça a été quand même dimensionné par rapport aux scénarios climatiques. Et ensuite, le but, c'est d'utiliser ces résultats-là pour améliorer nos capacités à anticiper la réaction des arbres. Et en fait, le but c'est ça, c'est d'essayer d'anticiper un peu le climat futur et de voir dans quelles mesures les arbres et les écosystèmes répondent à ces changements. Voir les mécanismes, leur évolution dans le temps, comme la productivité. On le sait sur notre site, mais ce n'est pas forcément généralisable. Par contre ce qu'on arrive à voir, c'est ce qui répond en premier chez les arbres, et ça, c'est plus généralisable »

Si l'expérience enlève 30% des pluies grâce au toit mobile, c'est parce que les scénarios du GIEC projettent une réduction de 30% des pluies dans le pourtour méditerranéen.

⁹⁴ Projet porté par le CEFE (le modélisateur hydrologue Serge Rambal) : « Vulnérabilité des écosystèmes méditerranéens soumis à de fréquentes sécheresses », projet financé par l'ANR.

L'expérimentation découle de la problématique climatique, telle que formulée par les scénarios du GIEC.

Néanmoins, le processus de climatisation est plus complexe que ne le suggère l'image d'un problème qui s'impose comme une obligation aux chercheurs. En effet, de nombreux modélisateurs disent qu'ils travaillent sur le changement climatique, même si ce n'est pas un concept qu'ils mobilisent de manière opérationnelle, mais plutôt comme un élément de contexte. Voici comment Lionel envisage les choses :

« Donc c'est le postulat de départ, c'est de dire qu'il y a un changement climatique qui va se traduire par une augmentation des sécheresses, le seuil de température, les échelles de précipitation, comment les arbres vont réagir à cela. Après, c'est un peu la justification... c'est un peu le truc de départ. Je ne travaille pas directement sur les changements climatiques, mais c'est un peu ce qui justifie pourquoi on s'intéresse à la sécheresse et pas au contraire, pourquoi on ne regarde pas l'irrigation... Si on s'intéresse à la sécheresse, c'est parce que l'évolution climatique nous dit que c'est ce qui va se passer, en tout cas pour les forêts méditerranéennes »

Lionel ne travaille pas sur la sécheresse par plaisir ou par hasard. C'est parce qu'on projette qu'avec le changement climatique, la fréquence et l'intensité des sécheresses vont augmenter que c'est un objet de recherche intéressant, que ces études font partie de la 'science qui mérite d'être faite'. J'ai également remarqué que certains chercheurs qui travaillent sur le changement climatique conduisent les mêmes recherches que celles qu'ils menaient avant sa mise à l'agenda. L'encadré 2 reprend une partie de la discussion que j'ai eue avec Grégoire, écologue à l'UMR Silva, et maître de conférences en écologie à AgroParisTech. Grégoire travaille sur les liens entre la présence de la flore forestière, les conditions climatiques et les conditions chimiques du sol. En croisant les données de présence de la flore et les conditions climatiques et géochimiques, il détermine la niche des espèces considérées.

Encadré 2 : Changement environnemental et changement climatique : la re-labellisation des thématiques de recherche comme modalité de la « climatisation » (extrait d'entretien avec Grégoire)

« Antoine : Pour revenir sur la question du changement climatique ou changement global, vous avez l'impression de travailler sur cette question ?

Grégoire : Ah oui, oui, clairement !! Ça occupe, en termes de recherche, alors recherche et recherche appliquée, ça occupe de l'ordre de deux tiers de mon temps. Donc c'est un axe important de ma recherche, et ça se traduit par des publications.

Antoine : Pour que je situe bien ce que vous entendez par là, vous prenez en compte vos travaux, pas seulement ceux où vous pouvez injecter des scénarios climatiques, mais aussi ceux où vous réfléchissez sur le fonctionnement d'un arbre ? Sur la qualité du sol ?

Grégoire : Oui, bah à partir du moment où ça change ! Il y a deux aspects. Il y a un aspect un peu statique. Par exemple, je peux réfléchir à l'aspect suivant : comment varie la croissance ou la présence d'une espèce en fonction de la propriété du sol. Donc là je ne considère pas que ce soit un impact du changement climatique, si je le considère de façon stable dans l'espace. Après je peux aussi le considérer de façon évolutive, et donc là je considère que ... ce n'est pas du changement climatique, c'est du changement environnemental... et dans mon travail de recherche, je fais vraiment les deux. La niche, c'est considérer comme stable dans le temps, donc c'est une partie de mon activité de recherche, et je regarde aussi comment ça évolue. Ce ne sont pas les mêmes données, ou on ne les prend pas de la même façon. Pour moi, ce n'est pas le même travail. Et puis même pour la réflexion, je peux réfléchir à comment ça marche pour la croissance par rapport à un facteur, mais je peux réfléchir aussi à comment c'est censé évoluer dans le temps, et ... l'un va bien avec l'autre. Si ça pousse mieux, plus il y a de l'azote dans le milieu, ce n'est pas du changement climatique. Mais si je réfléchis à l'influence des dépôts azotés, bah je me dis que ça devrait augmenter avec le temps, et là, ça peut être du changement climatique ! C'est deux parties de mon travail, que je sépare dans ce que je dis là... »

On le voit dans l'encadré, pour Grégoire, travailler sur l'évolution temporelle des niches des espèces est, pour lui, également travailler sur le changement climatique. Pour Grégoire, dès qu'il y a de la temporalité introduite dans l'étude de la flore, ou des processus écologiques, cela concerne le changement environnemental, et *in fine* le changement climatique. De plus, la dernière phrase est assez importante. Dans le cadre de notre entretien, et par soucis de pédagogie, Grégoire sépare les deux parties de son travail : d'un côté, regarder d'une façon statique l'effet de l'azote sur la croissance de la flore, d'un autre côté, étudier l'effet de l'augmentation des dépôts azotés dans le temps sur la croissance de la flore. Ce qu'il sépare

dans son discours est en fait lié en pratique. Les propos de Grégoire rendent sensible une des modalités de la climatisation : le processus de re-labellisation. Grégoire travaille depuis des années sur le changement environnemental qui peut être re-labellisé en « changement climatique ».

Ainsi, étant donné que l'agenda écologique étudie l'évolution des flux de matière dans le temps sur le comportement des écosystèmes, il semblerait que l'irruption du changement climatique dans cet agenda n'ait pas bouleversé la manière dont les chercheurs mènent leurs recherches. Le changement climatique est alors introduit comme élément de contexte des recherches, comme justification des travaux, ou *via* un processus de re-labellisation. Cette dernière modalité du processus de « climatisation » se retrouve également au sein de l'agenda sylvicole.

2. La « climatisation » de l'agenda sylvicole : développer la bioéconomie et anticiper la gestion forestière future

Dans l'agenda sylvicole, les artefacts et outils de connaissance des forêts ont longtemps reposé sur une hypothèse de stabilité et d'évacuation du climat : tables de production, station forestière, modèle de croissance. Dans cette perspective, on pourrait penser que cet agenda est sérieusement mis en défaut par le changement climatique. Depuis une dizaine d'années, on constate la mise à l'agenda de la bioéconomie dans le domaine des recherches forestières. La bioéconomie forestière, telle qu'elle est définie par l'Institut Européen des Forêts (EFI) qui s'appuie sur le cadre développé par l'Union Européenne, est un « modèle [économique] alternatif » qui vise à « minimiser la consommation globale d'énergie et de matériaux et maximiser la part des ressources renouvelables dans le système économique. » (Winckel, 2017, p.11). Dans cette optique, la bioéconomie forestière peut concerner des activités économiques aussi diverses que la production de biomasse forestière, le paiement pour les services écosystémiques – et plus particulièrement le stockage du carbone – l'utilisation des résidus des scieries pour fabriquer de nouveaux objets. Le concept de bioéconomie semble pourtant s'apparenter à un concept « fourre-tout » (Mittra et Zoukas, 2020). Certains auteurs pensent même qu'il serait devenu, aujourd'hui, un concept qui aurait perdu son sens originel, et décrirait « une autre réalité, soutenu[e] par les lobbies de l'agriculture, de la chimie et des biotechnologies, et diffusé[e] par des institutions internationales. » (Pahun, Fouilleux et

Daviron, 2018). Le terme a le vent en poupe dans les recherches forestières, comme le confirme le rapport de l'EFI, et les propos que certains enquêtés m'ont rapportés, comme Victor.

C'est dans la perspective de l'évaluation des potentialités de la biomasse forestière que s'est développé le projet ANR EMERGE (Elaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Energie) dont l'un des objectifs était « la refonte des outils de dendrométrie dans le contexte de nouveaux enjeux d'estimation de la ressource en bois » (Maillet, 2014, p.17) et plus particulièrement dans l'évaluation de la biomasse forestière produite par les forêts. Ainsi, on perçoit la volonté d'adapter les approches traditionnelles de l'agenda sylvicole – ici la dendrométrie – pour estimer comment le bois stocke le carbone à toutes les échelles de la production.

Victor, chercheur à IRSTEA, a travaillé sur l'estimation des stocks du carbone dans les forêts pendant sa thèse (développement d'un module pour le modèle *Fagacées*). Récemment, il s'est investi sur la question de la bioéconomie en lien avec le changement climatique à l'échelle territoriale, et notamment en mobilisant le concept de services écosystémiques. Il s'agit pour lui de prévoir les effets du changement climatique sur les services écosystémiques forestiers (stockage du carbone, service de production, de protection, réserve de biodiversité), et de développer des « outils de simulations à l'échelle du territoire pour proposer des valeurs à [s]es collègues qui font de l'économie ou de la sociologie pour aider la prise de décision » sur les devenirs des forêts. La climatisation de l'agenda sylvicole opère également un rapprochement des sciences des forêts et des sciences humaines et sociales. Victor travaille également avec des collègues sociologues d'IRSTEA Bordeaux pour développer des outils de simulation et d'anticipation des futurs des territoires forestiers en associant les acteurs (forestiers de terrain, ou forestiers privés, collectivités locales, etc..) à ces démarches d'anticipation. Or, pour Victor, travailler sur la bioéconomie ne bouleverse pas ses pratiques de recherche. Comme Monsieur Jourdain s'étonnait de faire de la prose sans le savoir, ce serait un peu la même chose avec la bioéconomie :

« Moi, mon sentiment, c'est qu'on fait tous de la bioéconomie sans le savoir, un peu comme Monsieur Jourdain. Moi quand je fais des modèles de croissance et que je produis des volumes en sorties de mes modélisations, il suffit de convertir un mètre-cube de bois en sa valeur en euros pour que ce soit de la bioéconomie. » (Victor, IRSTEA)

Les propos de Victor sont intéressants, car de la même manière que la science forestière du XIX^{ème} siècle convertissait le volume de bois en valeur fiscale, il suffit ici de traduire le volume de bois en euros. On retrouve alors une des modalités de la climatisation entrevue lors de la sous-partie précédente : le processus de re-labellisation des thématiques de recherche pour ‘coller’ aux thèmes qui figurent dans les premières lignes de l’agenda de recherche.

En suivant la trajectoire de développement d’un modèle comme celui développé à IRSTEA – le modèle *Samsara* – on peut également déceler comment l’agenda sylvicole a intégré petit à petit la problématique climatique. Ce modèle dont la version précédente s’appelait *Mountains* vise à simuler la croissance et la sylviculture des forêts de montagne des Alpes, composées de sapins, d’épicéas et de hêtres. Le modèle *Samsara* n’intègre pas de façon explicite les variables climatiques, il prenait en compte, notamment, dans sa première version l’inclinaison de la pente du terrain où croît la forêt qui joue un rôle sur l’interception de la lumière du soleil par les couverts forestiers. Charles, le chercheur qui a créé le modèle *Samsara*, recrute Laurent pour un stage de Master 2. Laurent est alors chargé d’intégrer la variable climatique dans le modèle *Samsara*, pour que le modèle, calibré sur les forêts alpines, puisse simuler l’évolution des sapinières, hêtraies, pessières, hors du contexte alpin. Lors de son stage, Laurent travaille sur des données de longue durée, notamment les données anciennes de l’administration forestière, mais aussi des données de gestion récoltées par l’ONF. Laurent souhaite continuer dans la recherche, et avec Charles, ils développent un projet de thèse qui a donc pour but d’intégrer la variable climatique dans le modèle *Samsara*. L’ONF accepte de financer une partie de la thèse, notamment car il est demandeur d’outils de simulation de scénarios sylvicoles. Charles et Laurent cherchent alors un financement annexe. Ils participent à un appel à financement de l’ADEME qui portait sur l’anticipation des effets du changement climatique. C’est pour coller aux demandes de l’ADEME que les deux chercheurs vont intégrer la notion de changement climatique dans le projet de thèse. Voici comment Laurent me raconte l’histoire du projet qui est en accord avec l’hypothèse de la « climatisation » :

« Donc à la base, ce qui est marrant, c’est que quand on a développé le sujet, on ne parlait absolument pas de changement climatique. Ce que je te disais, c’est qu’à la base, c’était plutôt le côté opérationnel pour l’ONF, ils voulaient que le modèle tourne dans diverses situations environnementales, donc le calibrer à partir de données de gestion, et que la croissance et la régénération d’un peuplement donné soient un peu réalistes. Mais l’idée

n'était pas vraiment de faire des projections du changement climatique. C'est pour l'ADEME qu'on a pris cette orientation-là avec le sujet pour entrer dans des cases » (Laurent, IRSTEA)

S'ils ont intégré la simulation de ces forêts mélangées sous l'hypothèse du changement climatique, c'est pour « rentrer dans les cases » de l'ADEME. Néanmoins, il ne faut pas penser que l'intégration du changement climatique dans le projet de recherche n'est qu'une simple stratégie de financement. Laurent « rejoint [les opinions] de l'ADEME » et pense qu'il faut développer dès à présent des logiques d'adaptation des forêts au changement climatique. De plus, la simulation des futurs de ces forêts mélangées à partir des scénarios climatiques est, pour lui, un résultat important de sa thèse en termes scientifiques et en termes de gestion. La simulation des états futurs des hêtraies, sapinières, pessières est, pour Laurent, une 'recherche qui compte'.

L'exemple de l'intégration de la variable climatique dans le modèle de croissance *Samsara* est important, car il témoigne également du fait que les modèles sylvicoles tendent à intégrer des variables qu'ils considéraient, précédemment, comme 'toutes choses égales par ailleurs', et plus particulièrement les variables climatiques et édaphiques⁹⁵. Ce cas témoigne d'un des effets de la climatisation des recherches forestières : une convergence, voire une hybridation, des agendas sylvicoles et écologiques vers l'anticipation des effets du changement climatique sur les forêts françaises.

3. Une hybridation des agendas comme effet de la « climatisation » : l'essor d'un régime d'anticipation ?

L'un des résultats de mon enquête pointe vers une convergence des deux agendas vers l'anticipation des impacts du changement climatique sur les écosystèmes forestiers. Cette convergence peut être appréhendée à divers niveaux : celui des artefacts scientifiques, et plus particulièrement des modèles, celui des centres de recherches, et enfin celui des approches disciplinaires des sciences des forêts. Cette convergence des agendas s'opère par la mise à l'agenda d'une nouvelle 'recherche qui compte', celle qui vise à anticiper les effets du changement climatique pour adapter, dès maintenant, les forêts à ces conditions futures.

⁹⁵ Qui concerne le sol.

a. La convergence des agendas sylvicoles et écologiques

Dès 2004, lors du colloque « La forêt face au changement climatique » (Legay et Mortier, 2005), la communauté forestière met à l'agenda le « besoin d'outils pragmatiques d'aide à la décision pour gérer les risques et les opportunités liés au changement climatique » (*Ibid.*, p.5). Pour cela, il n'est pas question de faire *tabula rasa* des outils développés précédemment pour orienter la gestion forestière. Dans cette optique, les acteurs pensent qu'il faut que les catalogues de stations forestières développés à partir des années 1970-80 permettent d'identifier les stations les plus menacées par le changement climatique⁹⁶. Pour ce faire, la base de données *Ecoplant*, réalisée à l'INRA Nancy et qui caractérise les stations forestières à partir de données floristiques, doit permettre d'évaluer quelles stations sont les plus menacées : « L'Etat, les collectivités, les gestionnaires forestiers ont beaucoup investi pour élaborer les catalogues de stations forestières. Il convient de les valoriser notamment en identifiant de façon objective les couples à risques stations/essences. Ce travail scientifique, auquel la base de données ECOPLANT mise en place par l'ENGREF Nancy peut contribuer puissamment, mériterait d'être conduit de façon généralisée » (*Ibid.*, p.29). La temporalité des recherches forestières n'est pas celle des affaires et des problèmes environnementaux. Elles peuvent souvent entrer en conflit, comme je le montrerai également avec l'étude du réseau RENECOFOR dans le chapitre suivant. Il convient donc toujours de valoriser au mieux l'existant. C'est aussi le cas des modèles de croissance où les acteurs participant au colloque mentionnent explicitement le fait qu'ils doivent, à présent, intégrer « des variables climatiques et édaphiques explicites qui permettent des simulations liées aux changements globaux » (*Ibid.*, p.21). Cette orientation de la recherche semble témoigner d'une convergence des modèles sylvicoles et des modèles écologiques qui se sont développés dans des contextes scientifiques, sociotechniques et politiques différents. L'encadré 3, qui est un extrait de l'entretien réalisé avec Dominique, ingénieur forestier à l'INRA et à l'ONF, retrace l'émergence de ces deux familles de modèles.

⁹⁶ « Valoriser les catalogues de stations qui couvrent les 2/3 du territoire lors des choix d'essences, même s'ils n'ont pas été conçus dans la perspective du changement climatique » (Legay et Mortier, 2005, p.24).

Encadré 3 : Vers une convergence des modèles sylvicoles et des modèles écologiques ? (extrait d'entretien avec Dominique)

« Au début des années 90 il y avait les premiers colloques qui s'appelaient : « Contrastes entre les modèles dendrométriques et les modèles à base de processus – *process-based model* », ce sont les premiers colloques en 1991 sur ces sujets-là. A l'époque, on cherchait à contraster ces deux familles de modèles parce qu'ils s'étaient développés de manière indépendante. Les modèles dendrométriques – *empirical models* – c'est comme ça qu'on disait à l'époque, ils s'étaient spécialisés dans la qualité de la prédiction dans un domaine bien précis et dans un but d'aide au sylviculteur en gros. Et les modélisateurs spécialisés sur les processus, c'était plutôt dans un but cognitif on va dire, ils cherchaient plutôt à synthétiser le fonctionnement des écosystèmes, sans nécessairement avoir comme objectif de faire de la prédiction, par exemple prédire toute la production du Canada à partir de données climatiques ou autres. En revanche, dès que les questions de changement climatique ont émergé, on s'est rendu compte que cette dichotomie ne marchait plus. D'un côté, les modèles purement empiriques sans représentation explicite des facteurs du milieu comme le climat, le sol, etc., ils savaient que leurs hypothèses tombaient à l'eau, notamment celle de stationnarité du milieu. Et de l'autre côté, les gens qui faisaient les modèles processus se rendaient compte qu'on allait avoir besoin d'eux, pas seulement pour enseigner l'écologie aux étudiants, mais aussi pour faire des simulations de ce que les forêts allaient devenir sous changement climatique. Et là, les impératifs de robustesse, de réalisme sylvicole de prédictions devenaient plus importants. Ça oui, c'est un changement important qui est intervenu entre temps, cela dit on n'a pas vraiment convergé là-dessus, chacun fait évoluer ses outils. »

Les modèles corrélatifs et sylvicoles et les modèles fonctionnels et écologiques se sont développés dans des contextes et des agendas différents. Le changement climatique serait une opportunité pour que ces deux familles de modèles convergent. Dominique nuance ses propos en pensant qu'aujourd'hui les chercheurs font évoluer leurs outils en autonomie. La climatisation n'aurait pas eu d'effet de convergence et d'hybridation des agendas. L'enquête pointe des résultats différents. En effet, il y a bien des processus de rapprochement des agendas qui se situent à divers niveaux, et notamment au niveau des laboratoires de recherche, mais aussi des disciplines que l'on recoupe sous le nom des « sciences forestières ».

Premièrement, l'UMR Silva témoigne du rapprochement des agendas. En effet, elle résulte de la fusion du LERFOB qui était emblématique de l'agenda sylvicole, et de l'UMR EEF (Ecologie et Ecophysiologie Forestière) qui s'inscrit dans l'agenda écologique. Ces deux UMR ont fusionné le 1^{er} janvier 2018. On peut interpréter cela comme un témoin de la climatisation qui opère alors un rapprochement d'approches et de disciplines : la science forestière, la dendrométrie, l'économie forestière d'un côté, l'écologie et l'écophysiologie

forestière, de l'autre. On peut néanmoins nuancer cette hypothèse sur un point : de nombreuses fusions de centre de recherches et d'universités ont lieu en France depuis une dizaine d'années. Le 1^{er} janvier 2020, IRSTEA et l'INRA ont fusionné pour prendre le nom INRAE : l'Institut National de Recherche en Agriculture, alimentation et Environnement. On retrouve des fusions analogues dans les grandes universités françaises, comme l'Université de Paris.

L'autre échelle d'analyse concerne le corpus disciplinaire des sciences des forêts, ou des « sciences forestières »⁹⁷. Comme je l'ai montré dans les deux chapitres précédents, les sciences des forêts ont déplacé leurs corpus disciplinaires vers une 'biologisation' (pédologie, phytosociologie, botanique, ...) et une 'écologisation' (écologie forestière, écophysiologie) de l'objet forêt. Avec l'irruption de la problématique climatique, j'ai montré qu'il y avait des tendances à la convergence entre l'agenda sylvicole et l'agenda écologique. Or, cette convergence, voire hybridation, n'est pas forcément bien vécue par tous les acteurs. Dans l'encadré 4, Brice, chercheur à l'IGN, regrette que la revue forestière de l'INRA, *Annales des Sciences forestières*, lors de son passage en langue anglaise, ait abandonné le pluriel pour se nommer *Annals of Forest Science*. Pour lui, cela brouille les pistes et fait perdre son sens, et sa légitimité, à la science forestière – *Forestry* – c'est-à-dire la science qui concerne la sylviculture. Les propos de Brice témoignent également d'une défense de sa discipline, la science forestière, qui, pour lui, est dissolue dans les recherches forestières.

⁹⁷ Il est important de noter le pluriel pour comprendre l'argument de Brice.

Encadré 4 : Science forestière et sciences forestières : une défense de la foresterie (extrait d'entretien avec Brice)

« Vous avez peut-être vu la revue qui s'appelle *Annals of Forest Science* (...). Pour moi ce journal n'est pas un journal d'annales de science forestière, c'est un journal d'annales de recherches forestières. Ça n'est pas de la science forestière. Et ce que je vois, c'est qu'au fond ces journaux-là, et que ce mot de « science forestière », il a quelque part été perverti, parce que la forêt a cessé d'être une ressource stratégique. Elle a été remplacée par le charbon, le pétrole, et l'électricité et le ciment sont arrivés (...). De sorte que petit à petit, on peut dire, cette science a pu se diversifier, il y a eu spécification, et on se retrouve aujourd'hui à faire de l'écologie, de l'écophysiologie, de la génomique, tout ce qu'on veut sur les forêts (...). Moi je trouve qu'au niveau de fond, en termes de structuration des recherches, ce n'est pas efficace, car s'il y a une discipline qui doit exister et qui doit s'appeler *Forest Science* au singulier, on sait ce que c'est, c'est le nom *Forestry*. Quand on est en train de parler de recherches sur les forêts, on n'est pas obligé d'invoquer le terme de science forestière, on pourrait utiliser le terme de « recherches forestières », et au fond, assumer l'idée, parce que c'est ça qui n'est pas assumé... c'est l'idée qu'au fond une grosse partie des contingents et des moyens qui sont mis au service des sciences forestières, c'est-à-dire des recherches forestières, n'est en réalité plus au service de la science forestière. Alors, faut-il s'en plaindre ou pas ? Moi je n'émet pas de jugement de valeur là-dessus. Ce que je dis, c'est que de toute façon, l'effort qui est fait aujourd'hui en termes de science forestière, singulier, est à mesure du caractère stratégique de la ressource forestière, ça, c'est un fait ! »

Parce que la forêt a cessé d'être une ressource stratégique, pour Brice, la science forestière se retrouve petit à petit dissolue dans les recherches forestières. Cela a des conséquences en termes de financement de la recherche, et notamment une baisse significative, pour Brice, des moyens et des effectifs alloués à la science forestière qui concerne la mesure, l'évaluation et la prévision de la ressource forestière. L'évolution des corpus disciplinaires des recherches forestières n'est donc pas forcément bien vécue par tous les acteurs, et notamment ceux dont les recherches s'inscrivent dans l'agenda sylvicole.

La convergence des agendas sylvicoles et écologiques se déploient sous la bannière de l'anticipation des effets du changement climatique sur les forêts que je détaille dans la suite de et fin de ce chapitre.

b. L'anticipation du changement climatique : affronter un éventail de futurs ouverts

La mise à l'agenda de l'anticipation du changement climatique sur les futurs des forêts peut s'appréhender à partir de plusieurs témoins. Au niveau des institutions de gestion des forêts, et notamment de l'ONF, on constate le déploiement de projets qui visent à agir dès maintenant pour adapter les forêts au climat futur. C'est le cas du projet GIONO⁹⁸ lancé en 2011, projet de migration assistée d'essences résistantes au climat futur. Les équipes de l'ONF ont fait pousser dans des *arboretums* des essences sélectionnées dans le Sud de la France. Ces essences ont été plantées en 2019 en forêt de Verdun. Ce projet s'appuie sur l'anticipation de l'augmentation des températures et la modification des conditions climatiques. Les ingénieurs de l'ONF prévoient que les essences du pourtour méditerranéen pourront affronter les conditions climatiques futures que l'on anticipe se réaliser en forêt de Verdun lors de la prochaine révolution forestière. C'est d'ailleurs le sens de la notion d'adaptation qui concerne forcément une révolution forestière, c'est-à-dire le remplacement d'une génération par une autre génération.

Au niveau des pratiques des chercheurs, on perçoit l'émergence d'un raisonnement anticipatif qui renvoie à la formulation 'que se passerait-il si...?'. Les chercheurs 'jouent' avec les scénarios futurs, pour identifier, par exemple, quelle partie de l'écosystème va réagir en premier à un changement de régime climatique. Cette démarche est au cœur des pratiques d'anticipation des futurs des forêts : évaluer et prévoir les dysfonctionnements des forêts tout en diversifiant les scénarios climatiques possibles. L'encadré 5 reprend un extrait de la discussion que j'ai eu avec Laurent, alors doctorant à IRSTEA.

⁹⁸ <https://www.onf.fr/+2f9::projet-giono-en-images-le-grand-exode-climatique-des-arbres.html>

Encadré 5 : Scénario optimiste et scénario pessimiste : le ‘style’ du raisonnement anticipatif (extrait d’entretien avec Laurent)

« Antoine: Tu ne te focalises pas sur le scénario moyen que les gens utilisent la plupart du temps ?

L : Euh, je ne suis pas sûr que les gens utilisent la plupart du temps le scénario moyen, ceux qui travaillent mal peut-être [rires]. Il ne faut pas faire ça. Ça peut avoir un intérêt de n’étudier que le scénario le plus sévère pour dire, et c’est ce que je fais dans mon étude, pour dire : bah prenons le pire cas, et finalement, on n’arrive pas à une catastrophe, c’est que dans tous les autres cas, ça se passera bien. Et inversement, on pourrait prendre le scénario le moins sévère, et si on arrive vers une catastrophe, c’est qu’elle va arriver de toute façon. Mais prendre le scénario moyen, ça ne me paraît pas intéressant... »

Dans cette citation, Laurent explique pourquoi il vaut mieux utiliser le scénario le plus sévère ou le scénario le moins sévère, mais en tout cas, jamais le scénario moyen. Ici, on voit comment Laurent affirme quelle est la bonne pratique en la distinguant de la mauvaise pratique : « ceux qui travaillent mal ». Pour Laurent, la bonne pratique à avoir concernant l’implémentation des scénarios climatiques est une pratique ‘heuristique’. La pratique ‘heuristique’ de la simulation vise à identifier ce qui est susceptible de changer, ou non, sous l’hypothèse la plus sévère. Si rien ne se passe sous l’hypothèse la plus sévère (+ 6°C), c’est qu’il est probable que l’écosystème résiste au changement climatique quelle que soit son intensité réelle. Cette pratique témoigne d’un nouveau rapport au futur. On accepte qu’il soit incertain et il prend la forme d’un éventail large de futurs possibles.

Cette conscience que le futur est incertain, et que pour l’anticiper il faille imaginer plusieurs scénarios futurs possibles se matérialise enfin également dans les politiques scientifiques à l’échelle européenne. Le projet ARRANGE (*Advanced Multifunctional Forest Mangement in European Mountain Ranges*) est un projet ERC centré sur les services écosystémiques en forêts de montagne. Comme l’explique Clément, modélisateur à IRSTEA qui a participé au projet, ce dernier s’inscrit dans une véritable politique d’anticipation des futurs des forêts de montagne : « l’objectif est bien d’être capable de restituer, sous forme de rapport ou une forme quand même digérable, au moins pour les gens de l’Europe, et idéalement par les gens concernés par les sites d’étude, quelles sont les vulnérabilités des peuplements et de la forêt face aux différents scénarios climatiques, et comment on peut éventuellement mieux adapter les écosystèmes forestiers à ces scénarios-là ». On retrouve cette idée que les futurs des forêts sont incertains, ouverts et multiples. Cette pluralisation des

futurs est emblématique de la mise à l'agenda du changement climatique, et clôt ce mouvement de complexification des futurs que j'ai détaillé dans l'ensemble de cette première partie.

Conclusion

L'irruption du changement climatique et la mise à l'agenda de l'anticipation de ses effets sur les forêts achève ainsi ce mouvement de pluralisation, de temporalisation et d'opérationnalisation des futurs des forêts qui était l'objet de la première partie de cette thèse. Comme je l'ai détaillé dans ce chapitre, le développement des modèles climatiques que l'on peut coupler avec les modèles de croissance ou les modèles écologiques donne la possibilité aux chercheurs et ingénieurs forestiers d'anticiper les futurs pluriels des forêts françaises dans les climats futurs. Les agendas sylvicoles et écologiques des recherches forestières ont alors mis au cœur de leurs programmes de recherche l'anticipation des effets du changement climatique. C'est ce processus que j'ai nommé la « climatisation » des recherches forestières dont j'ai détaillé les différentes modalités.

La première modalité est le développement de nouveaux modèles ou de nouveaux protocoles dans les infrastructures de surveillance des forêts qui visent à évaluer les effets du changement climatique sur les écosystèmes forestiers, notamment après la sécheresse de 2003 qui a marqué la communauté forestière.

La deuxième modalité concerne le processus de re-labellisation, où les chercheurs intègrent la problématique sans faire dévier drastiquement leurs orientations de recherche de leur cap initial. Ce processus de re-labellisation ne doit pas être interprété comme la marque d'un opportunisme des chercheurs qui souhaitent que leurs travaux soient financés. La plupart du temps, ils intègrent la problématique climatique car elle fait partie, pour eux, de leur vision de la 'science qui compte'.

Enfin la troisième modalité de la climatisation concerne la convergence, voire l'hybridation, des agendas sylvicoles et écologiques. Les modèles sylvicoles et les modèles écologiques tendent tous deux à anticiper les effets du changement climatique, tandis que se multiplient les initiatives pour intégrer les variables climatiques dans de nombreux dispositifs ou artefacts. Cette convergence ne se fait pas sans heurts, et certains chercheurs ressentent même une certaine amertume à ce que les recherches forestières se soient si complexifiées, et aient abandonné leur orientation traditionnelle : inventorier, évaluer et prévoir la ressource en bois. Néanmoins, à l'heure où la bioéconomie devient un sujet 'à la mode' dans la recherche

forestière, comme peut en témoigner le rapport de l'EFI (Winckler, 2019), il n'est pas certain que la science forestière traditionnelle ne reprenne pas ses lettres de noblesses dans les politiques de recherche nationales. Elle reçoit, d'ailleurs, toujours des financements conséquents dans les pays du Nord de l'Europe dont le bois est, traditionnellement et encore aujourd'hui, une ressource stratégique.

Conclusion de la première partie : les ‘futurs menaçants’, moteurs de l’évolution des recherches forestières

« La France périra faute de bois », « Nous sommes à l’aube d’un Hiroshima écologique », « La fin du hêtre ». Ces trois pronostics catastrophistes sur l’avenir des forêts ont successivement modifié le visage des recherches forestières, et la structuration de leurs infrastructures de suivi et de surveillance des forêts. Il semblerait alors que les futurs menaçants, dans les problèmes environnementaux, aient des effets structurants sur les recherches et les sciences environnementales. C’est pour éviter que ces futurs catastrophistes n’adviennent que sont lancés des programmes de recherche qui visent à statuer sur ces futurs. Dans les trois cas mentionnés ci-dessus, si les pronostics ne se sont pas réalisés, ils ont néanmoins eu des effets durables sur les sciences et la gestion des forêts.

La prophétie de Colbert, même si elle est énoncée environ cent cinquante ans avant la naissance de la science, de l’administration et des recherches forestières en France, témoigne de l’importance de l’inventaire et de la prévision de la ressource en bois aux XIX^{ème} et XX^{ème} siècles. La forêt doit être administrée juridiquement, et la création de l’ERF confère à aux infrastructures forestières une fonction de contrôle de la ressource qui se traduit par la mission de police assurée par le corps forestier. Les débuts des recherches forestières et la volonté de créer une « machine unique » (Mathieu, 1874) à l’échelle européenne mettent en branle une logique de ‘biologisation’ des forêts qui ne sont plus simplement appréhendées comme une ressource en bois. Le contexte d’après-guerre oriente les recherches et la gestion forestières vers des logiques économiques où les forêts sont considérées comme faisant partie de l’infrastructure productive nationale.

La « mort des forêts » annoncée dans le contexte de l’affaire des pluies acides a contribué à une ‘écologisation’ des forêts qui sont alors appréhendées comme des écosystèmes soumis à des perturbations et dont on cherche à comprendre et modéliser les dynamiques. Les recherches forestières se tournent alors vers des approches réductionnistes, comme l’écophysiologie végétale qui vise à déterminer les échanges de matière au sein de l’arbre, et des approches holistes, comme l’écologie forestière qui étudie la forêt dans ses

relations avec le sol, l'air ou l'eau. Ces deux approches s'appuient sur l'essor des infrastructures de surveillance des écosystèmes forestiers (le DSF et RENECOFOR) qui fournissent les données idoines à la modélisation de ces derniers. Ces infrastructures ont également pour mission d'assurer une veille sanitaire pour statuer sur les menaces qui pèsent sur les forêts, et prévenir leurs occurrences. L'affaire des pluies acides met à l'agenda des recherches forestières la volonté de contrôle des écosystèmes grâce au développement de l'écologie systémique où la métaphore de la Nature comme une « machine cybernétique » (Kwa, 1987) est centrale.

La sortie dans la presse des premières cartes d'aires de répartition des essences forestières à l'horizon 2100 a constitué, comme les pluies acides, un choc pour la communauté forestière qui s'est alors rendue compte que le changement climatique bouleversait certains savoirs traditionnels de la science et la gestion forestières, et notamment l'hypothèse de stabilité des stations. La sécheresse et la canicule de 2003 et leurs conséquences visibles sur les forêts (dépérissement, rougissement des épinettes des conifères, défoliations) ont été interprétées, par certains acteurs, comme un 'avant-goût du futur', et a contribué à faire imaginer à la communauté forestière les conséquences possibles du changement climatique, qui s'était imposé comme fait scientifique depuis une dizaine d'années. L'histoire se répète. La sécheresse et la canicule de 2019 ont placé sur le devant de la scène médiatique les forêts, menacées par les conditions climatiques futures, mais également sources d'espoir pour atténuer les émissions de gaz à effets de serre, ou rafraîchir les villes, devenues des serres lors des épisodes caniculaires. Ce futur dual traduit ce triple mouvement qui s'est opéré dans l'évolution des futurs des forêts.

[1] Un mouvement de pluralisation : on anticipe les futurs économiques, écologiques et sociaux des forêts françaises. [2] Un mouvement de temporalisation : grâce au couplage des modèles climatiques et des modèles de croissance ou des modèles écologiques, l'anticipation des effets des changements globaux sur les forêts fournit des étapes dans leurs évolutions possibles. Cette temporalisation permet d'affiner les politiques forestières que l'on souhaite développer, et de mettre au point une 'sylviculture d'anticipation' dont le projet GIONO est emblématique. [3] Un mouvement d'opérationnalisation des futurs : la modélisation et la simulation du changement global sur les écosystèmes forestiers donnent la possibilité aux recherches forestières d'orienter les plans de gestion. Ces 'futurs numériques', ceux produits par les modèles et les simulateurs forestiers, deviennent manipulables. Chercheurs et

ingénieurs forestiers peuvent alors ‘jouer’ avec ces différents scénarios pour restreindre l’éventail des futurs possibles, méthode caractéristique du style anticipatif pour affronter le futur pluriel et incertain du changement climatique.

Ce triple mouvement s’appuie sur divers artefacts scientifiques qui sont au cœur des recherches forestières. L’étude de ces artefacts utilisés pour prévoir, projeter et anticiper les futurs des forêts a montré qu’ils s’inscrivent dans des contextes scientifiques, socio-économiques et politiques. Chacun d’entre eux est *in fine* emblématique d’un rapport particulier aux futurs des forêts.

[1] Les tables de production, données chiffrées sur les évolutions de la ressource, donnent à voir un futur linéaire – de type $ax + b$ – et cadré : le futur presque certain de la prédiction statistique où la préoccupation économique domine. Aux colonnes chiffrées des tableaux répondent les forêts mono-spécifiques et productives qui s’érigent comme les nombres s’ordonnent. Elles traduisent la primauté de la préoccupation économique sur la gestion des forêts françaises, et l’affirmation du pouvoir de l’Etat sur une ressource naturelle dont il s’agit de rationaliser l’exploitation.

[2] Les modèles écophysologiques et écologiques développés dans le contexte des pluies acides renvoient à un futur incertain et pluriel. Avec ces modèles, on peut jouer sur la régulation de l’écosystème, et voir, à une échelle très fine – qui traduit également une percée du réductionnisme dans les sciences de la vie (génétique, biologie des populations) – comment les arbres poussent, comment ils se développent et comment ils dépérissent. Les phénomènes de perturbations sont au cœur des théories de l’écologie forestière, et la mise en évidence des effets de la pollution sur les écosystèmes a été l’occasion de développer l’approche cybernétique d’une écologie qui vise le contrôle des écosystèmes⁹⁹. Cet intérêt pour les processus qui déstabilisent les écosystèmes forestiers traduit le contexte menaçant des pluies acides, et la résurgence des problèmes environnementaux à partir des années 1970.

[3] Aujourd’hui, les modèles sylvicoles et les modèles écologiques sont couplés avec des modèles climatiques futurs, comme ceux développés par Météo-France (modèle ARPEGE). Ces artefacts renvoient alors à ce futur global du changement climatique. Les futurs des forêts

⁹⁹ Le terme « cybernétique » vient du grec *kybernêtikê* qui signifie « l’art de piloter », comme le rappelle le philosophe canadien Jean-Baptiste Vidalou, dans son essai (2017).

sont menaçants (déforestation, sécheresses accrues) et en même temps porteurs de promesses (stockage du carbone). C'est un futur incertain et dual. Cette pluralité de modèles – à une conférence sur le programme de la Fondation de la Recherche pour la Biodiversité, l'écologue Paul Leadley appelait de ses vœux une « modélo-diversité » – traduit un monde global et complexe, mais dont on essaie de prévoir et d'anticiper, à différentes échelles, les devenir antagoniques : éviter l'effondrement écologique imminent (la prophétie catastrophiste de la collapsologie) ou contrôler le 'Système-Terre' grâce à la toute-puissance technologique et prométhéenne de l'Homme (les techno-prophéties éco-modernistes de la géo-ingénierie).

Après ce premier moment historique, j'étudie à présent les infrastructures de recherche forestière actuelles dont les fonctions principales sont la surveillance des écosystèmes forestiers et l'anticipation de leurs futurs.

Introduction de la seconde partie : Sociologie des infrastructures de recherche forestière contemporaines

Un doux matin de mai 2015, j'arrive au Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE) à Montpellier pour rencontrer Mathieu, écologue forestier. Je passe devant la plaque commémorative dédiée à Louis Emberger, botaniste et fondateur du centre de recherche en 1968, et je m'engouffre dans le bâtiment à structure cylindrique dont le centre est éclairé par un puit de lumière venant du toit vitré. Au second étage, j'arrive devant le bureau de Mathieu qui m'attend pour commencer l'entretien. Son bureau est, sans nul doute, semblable à celui de beaucoup de chercheurs : un tableau blanc orné de formules mathématiques, d'inscriptions et de signes divers, de nombreux papiers sur le bureau, les étagères, et les armoires. Sur le bureau de Mathieu trône un outil essentiel pour son travail : l'ordinateur. Après avoir discuté de son parcours, de ses travaux de recherche et de ses relations avec l'ONF, je demande à Mathieu s'il peut me montrer comment fonctionne son modèle de simulation. Il accepte de me montrer le modèle développé par son ancien directeur de laboratoire lors de son post-doctorat en Suisse, qu'il essaie de modifier pour l'adapter à ses questionnements de recherche. C'est un modèle de succession forestière, c'est-à-dire qu'il vise à représenter comment un espace forestier est colonisé par une essence pionnière, et comment par la suite une autre essence peut prendre la place de cette dernière. C'est un modèle dit cohorte-centré, cela signifie que les points du graphique représentent des 'paquets d'arbres'. Il se tourne vers son ordinateur, et ouvre l'invité de commande : « Il peut y avoir une fenêtre plus *user-friendly*, mais je passe par les commandes console, on n'est pas obligé, mais c'est mieux, car c'est plus propre ». Après avoir entré quelques lignes de codes dans l'invité de commande, l'écran affiche un quadrillage. Ce quadrillage représente le « sol nu » à partir duquel « on peut faire une évolution pendant cent ou deux cents ans, voir l'espèce pionnière qui s'installe, et puis on peut encore continuer et voir la succession forestière ».

Pour que les 'arbres virtuels' apparaissent sur le quadrillage, sous la forme de cercles de couleur différente où chacune d'entre elles représentent une espèce d'arbre, Mathieu doit initialiser son modèle, c'est-à-dire qu'il doit indiquer au simulateur des données d'entrée à partir desquelles il va faire 'pousser virtuellement les arbres'. Ces données d'entrée sont

représentées sur le quadrillage par des cercles de couleur de différentes tailles, c'est la situation initiale. « Alors, là, on est en 1950, on va faire évoluer de cent ans ... et on fait tourner... ». « Faire tourner le modèle », c'est pour les modélisateurs demander à l'ordinateur de calculer l'évolution de cette 'forêt virtuelle' à partir des données d'entrée et des équations d'évolution du système. Cette opération dure à peine une petite minute. Sur l'écran, on voit que les cercles ont évolué, certains grandissent, d'autres rétrécissent, d'autres encore débordent sur un autre carreau du quadrillage (image 6).

Si la première série de calculs s'effectue en à peine une minute, à un moment donné, l'écran se fige : « Bon bah, là, il est bloqué ... qu'est-ce qui se passe ? ... ah oui, je lui ai demandé de faire une liste de tout ! ... alors comment on fait déjà ? ». Sans le vouloir, Mathieu a demandé au simulateur d'effectuer les calculs qui se traduisent par les mouvements de ces cercles de couleur sur le quadrillage, mais également au simulateur d'indiquer le type et le nombre d'espèces qui ont colonisé cette forêt virtuelle, qui se sont développées, ou qui ont disparu. C'est l'affichage de ce très grand nombre de données qui a fait 'boguer' l'ordinateur. Au bout d'un certain temps, l'ordinateur affiche néanmoins le résultat de cette nouvelle forêt virtuelle en 2050 (Image 6).

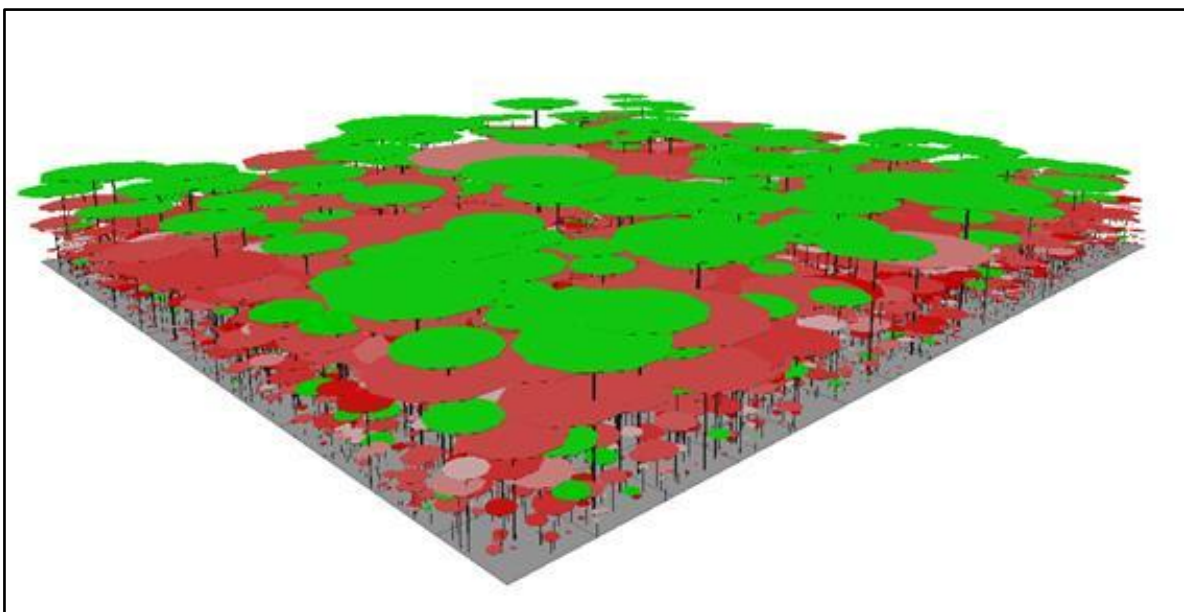


Image 6 : affichage du modèle Forceps (Xavier Morin (CNRS-CEFE, Montpellier), Harald Bugmann (ETH Zürich, Switzerland), Lorenz Fahse (University of Landau, Germany) avril 2013)

La taille des cercles représente l'aire du feuillage. Ici, la variable de croissance des arbres est l'interception de la lumière par les couverts, modulée par le climat. Les cercles foncés

représentent les conifères, tandis que les cercles clairs représentent les feuillus. La couleur verte et la couleur rouge distinguent différentes orientations de l'espèce par rapport à l'ombre, et donc *in fine*, par rapport à l'interception de la lumière.

Cette anecdote montre la facilité avec laquelle les modèles de simulation font 'pousser virtuellement' des forêts : il suffit à l'utilisateur de préciser des données d'entrée et le nombre d'années sur lequel il souhaite voir l'évolution, et en à peine une petite minute, le résultat se manifeste, ici, sous la forme d'un quadrillage, mais aurait pu également se présenter sous la forme d'un graphique, ou d'un tableau chiffré. C'est cette facilité presque déconcertante qui fait dire aux modélisateurs que le simulateur de croissance est de type « presse-bouton » ; cela signifie, dans leur esprit, qu'un simulateur sortira toujours un résultat qu'il soit en accord, ou non, avec la physiologie et la biologie de l'espèce étudiée. « Encore faut-il savoir quelles données met-on en entrée ? » pourrait-on objecter. Certes, mais de nombreux simulateurs de croissance, comme ceux qui sont hébergés sur la plateforme CAPSIS, comportent des jeux de données d'exemple qui permettent à l'utilisateur de tester la manière dont le simulateur fonctionne. Néanmoins, pour que le simulateur sorte un résultat cohérent avec la réalité écologique de l'écosystème étudié, les données d'entrée doivent tout de même avoir une signification physiologique et biologique, c'est-à-dire qu'il faut que ces données représentent des mesures qui ont été effectuées sur des forêts existantes.

En effet, si on postule que la simulation permet de faire de l'expérimentation virtuelle grâce à la traduction algorithmique des équations écologiques du système étudié qui fait 'pousser les arbres', alors on comprend bien l'importance d'avoir des données d'entrée qui caractérisent précisément la forêt ou l'écosystème étudiés. Dans cette perspective, si un modèle peut toujours sortir un résultat, il est clair que sa cohérence est grandement liée aux données qu'on y injecte quand on le fait tourner. Mais il faut également prendre en considération le fait que les modèles ou les simulateurs sont construits grâce à de nombreuses données. En effet, les données interviennent à toutes les étapes du processus de modélisation, que ce soit au moment de mettre en équation le système, ou pour tester le modèle afin de savoir si les résultats qu'il produit sont cohérents ou non. La date de ma rencontre avec Mathieu n'est pas sans importance. Si son simulateur affiche un résultat en à peine une minute, c'est grâce à la puissance de calcul de son ordinateur qui opère des milliers et des milliers de calcul en à peine une seconde. Il est certain que si cette rencontre avait eu lieu trente ans auparavant, au moment où les ordinateurs fonctionnaient avec des disquettes, les

calculs n'auraient pas pris une minute, mais des heures, voire des jours entiers. A ceci près, et la précision est importante, que si nous avions été trente ans auparavant, le modèle développé n'aurait pas été aussi complexe, aurait été composé de moins d'équations et de moins de paramètres pour permettre au simulateur de tourner plus vite. L'augmentation de la puissance de calcul a permis d'intégrer un nombre croissant de paramètres et d'opérations.

Le point important que je souhaite mettre en lumière dans cette introduction est avant tout la facilité déconcertante avec laquelle le simulateur de Mathieu fonctionne. Cette facilité liée à l'approche « presse-bouton » du simulateur tend à invisibiliser les nombreux assemblages nécessaires à la construction et à la mise en fonctionnement du simulateur. Les données qui servent à construire et à initialiser le modèle proviennent de dispositifs d'observation ou d'expérimentation, souvent développés et maintenus pendant des dizaines d'années pour produire des données utiles aux chercheurs forestiers. Ce processus d'invisibilisation est caractéristique des infrastructures de recherche et des infrastructures numériques. L'objectif de cette seconde partie de la thèse est d'entrer au cœur des infrastructures de recherche forestière qui visent à surveiller les forêts et anticiper leurs futurs. Elle s'inscrit pleinement dans le courant des *Infrastructure Studies*, tel qu'il a été présenté dans l'introduction, et s'appuie sur la méthode de « l'inversion infrastructurelle » (Bowker, 1994 ; Bowker et Star, 1999). La facilité d'utilisation des modèles de simulation masque les arrangements sociotechniques, économiques et politiques nécessaires au maintien des infrastructures qui supportent ces modèles. Il y a de nombreuses « petites mains de la société de l'information » – pour reprendre l'expression du numéro spécial de la Revue d'Anthropologie des Connaissances (Denis et Pointille, 2012) consacré à ce sujet – qui participent au maintien des infrastructures numériques, et le renversement de l'infrastructure permet de les rendre visibles.

Cette seconde partie s'axe autour de trois chapitres qui visent, chacun à leur manière, à expliquer sociologiquement comment ces arbres peuvent « pousser virtuellement », et pour quelles raisons les chercheurs et ingénieurs forestiers décident de le faire (ou le refusent). Dans cette optique, l'étude des infrastructures de recherche forestière est aussi une sociologie du travail scientifique des ingénieurs et chercheurs forestiers.

Le chapitre 4 « Infrastructures, *monitoring* et modélisation : la production sociotechnique des données forestières » détaille comment, à l'échelle du travail scientifique,

les données sont récoltées et fabriquées. Ce travail de collecte de données est intimement lié aux modèles qui les utilisent. Ces relations entre modèles et données s'inscrivent, plus généralement, dans une politique des infrastructures de surveillance des forêts qui traduisent l'objectif du *monitoring* environnemental : surveiller la Nature pour la gouverner.

Le chapitre 5 « Modéliser et simuler les forêts : les dimensions sociales des langages et artefacts informatiques » étudie la place qu'occupe les artefacts informatiques (modèles, simulateurs, plateformes de modélisation, langages informatique) dans le travail des chercheurs et ingénieurs forestiers. Il vise à rendre compte des dimensions sociales et des collaborations qui se jouent autour et à l'intérieur de ces artefacts. Loin d'être un langage purement technique, ou une langue parfaite (Eco, 1994), le langage informatique est un langage social.

Le chapitre 6 « Trois visions des futurs climatiques des forêts : les 'engagements épistémiques' des chercheurs et ingénieurs forestiers » s'appuie sur les discours de justification des acteurs pour montrer que chercheurs et ingénieurs forestiers partagent des visions des futurs des forêts différentes et concurrentes. Selon leurs trajectoires scientifiques et leur profil de recherche, les chercheurs adhèrent à une vision particulière des futurs des forêts, j'en distingue trois : le 'futur-risqué', le 'futur-disruptif' et le 'futur-passé'.

La sociologue des sciences et des techniques, Susan L. Star, écrivait qu'étudier les infrastructures, c'était étudier des « choses ennuyeuses » (Star, 1999, p.379), mais que cela permettait de dévoiler ce qui était auparavant négligé et rendu invisible, comme les « travailleurs invisibles » (Mauz et Granjou, 2011) : ceux qui récoltent les données sur les écosystèmes (les gestionnaires, les agents forestiers). L'invisibilisation, au cœur du fonctionnement des infrastructures, masque les efforts répétés et entrepris à plusieurs niveaux pour qu'elles fonctionnent et se maintiennent. Aussi, cette seconde partie rend, en quelque sorte, hommage aux nombreux efforts réalisés par toutes celles et ceux, humains comme non-humains, qui permettent à l'écran de Mathieu de jouer, en une fraction de seconde, ce ballet de cercles colorés.

Chapitre 4 : Infrastructures, *monitoring* et modélisation : la production sociotechnique des données forestières

Introduction

Pour construire leurs modèles de simulation des futurs des forêts, chercheurs et ingénieurs ont besoin de données forestières. Elles interviennent à toutes les étapes du processus de modélisation. Ce chapitre est centré sur la production sociotechnique de ces données, et s'appuie sur le concept d'infrastructure de recherche, tel que je l'ai développé dans l'introduction générale. Pour comprendre comment l'ensemble des éléments techniques et sociaux, humains et non-humains, interagissent dans la production de faits scientifiques supportés par les infrastructures de recherche, je me réfère à la métaphore proposée par P. N. Edwards (2003 ; 2010) qui suggère d'interpréter les infrastructures de recherche comme des systèmes physiques newtoniens. L'auteur met en avant la notion de « force » qui est avant tout une notion descriptive et pédagogique : il s'agit d'imaginer l'infrastructure comme un système physique soumis à des forces contraires. Dans la mécanique newtonienne, l'absence de mouvement, ou l'état d'équilibre, ne résulte pas d'une absence de force, mais au contraire résulte de sommes de force contraires, mais équivalentes. En poursuivant l'analogie pour l'étude des infrastructures de recherche, il faut comprendre que pour que l'infrastructure perdure et se maintienne, de nombreux efforts sont entrepris par une myriade d'acteurs pour assurer son bon fonctionnement. Déclinant cette image à plusieurs endroits, P. Edwards mobilise le terme de « frottement » (*friction*) pour décrire l'énergie et le temps nécessaires à la transformation des données collectées en données numériques, ou la traduction d'un modèle dans un autre langage informatique que celui dans lequel il avait été codé. Cette métaphore est au cœur de ce chapitre et du chapitre suivant.

Quels liens entretiennent les données et les modèles dans les pratiques des chercheurs et ingénieurs forestiers ? Comment sont fabriquées les données forestières, plus particulièrement les données utiles à l'anticipation des futurs lointains des forêts françaises sous l'hypothèse

des changements climatiques ? Comment fonctionnent les infrastructures de recherche forestière, et plus particulièrement, celles qui visent à produire des données sur les écosystèmes forestiers, à surveiller leurs évolutions, et à anticiper leurs futurs ? Comment caractériser ce qu'on appelle le *monitoring* environnemental ? Quelles visions de la 'gouvernance de la Nature' met-il en jeu ? Ces différentes questions orientent ce quatrième chapitre qui s'appuie sur trois hypothèses. Premièrement, pour étudier la modélisation et la simulation des écosystèmes forestiers, il est nécessaire d'étudier la production des données forestières, ces deux processus de fabrication sont intimement liés. Le terme « modélisation » est parfois utilisé par abus de langage pour désigner des pratiques scientifiques différentes, mais qui se rejoignent sur un point : le traitement par calcul informatique de données numériques. Deuxièmement, la 'fabrication' des données forestières est un processus coûteux, surtout en temps humain. Ainsi, les ingénieurs et chercheurs forestiers déploient un certain nombre de stratégies pour réduire les 'frottements' de la production de données. Enfin, il est nécessaire de se pencher sur les dimensions humaines et sociales des infrastructures de recherche forestière pour comprendre comment elles se développent, se maintiennent, perdurent, voire se modifient. J'explore ces questionnements à trois niveaux différents dans les trois parties successives de ce chapitre. Dans un premier temps, ce chapitre définit la modélisation et explore comment les données et les modèles sont fabriqués à l'échelle du travail scientifique. Ce travail apparaît comme fastidieux et fortement régulé. En outre, les infrastructures de collecte de données entretiennent un lien consubstantiel avec les pratiques de modélisation et de simulation. Comprendre ce lien me permet de démontrer comment ces pratiques orientent la structure, les objectifs et les protocoles des infrastructures. Le deuxième temps porte sur la façon dont les chercheurs forestiers "fabriquent" les données, en étudiant notamment les bases de données numériques forestières. Enfin, j'étudie le fonctionnement des infrastructures de recherche en m'appuyant, entre autres, sur le récit du colloque anniversaire des 25 ans du réseau RENECOFOR pour mettre en évidence les dimensions sociotechniques et humaines du développement, du fonctionnement et du maintien des infrastructures de recherche. Grâce à cette étude du développement 'incrémental' des infrastructures, l'analyse se situe dans un dernier moment au niveau des politiques scientifiques, et décrit le développement de ce qu'on peut appeler le *monitoring* environnemental et ses dimensions politiques, dont le but est de surveiller les forêts pour anticiper leurs évolutions futures.

I. Une diversité de modèles pour une diversité de données

« Pour comprendre le modèle, il faut repartir des données » m'a dit Laurent. Certes, mais je considère qu'il faut également avoir à l'esprit comment se construisent les modèles afin de savoir quelles données sont utiles pour les ingénieurs et chercheurs forestiers. Ce chapitre débute ainsi par une présentation des différents modèles utilisés pour anticiper les futurs des forêts *via* la fabrication des données forestières. Cette démarche s'appuie sur l'idée que modèles et données entretiennent des liens consubstantiels.

A. Une multitude de pratiques de modélisation : quelques définitions liminaires

Une grande partie des travaux de l'épistémologue Franck Varenne est consacrée à la modélisation et la simulation dans les sciences naturelles ou les sciences sociales (Varenne, 2003; Varenne, 2004 ; Varenne, 2011 ; Varenne, 2012 ; Varenne, 2013 ; Varenne et Silberstein, 2013 ; Varenne et Silberstein, 2014). Son approche se situe à la frontière de la philosophie et de l'histoire des sciences. Elle vise à inscrire l'épistémologie de la modélisation dans la dynamique historique du développement des sciences et des techniques et les évolutions des paysages institutionnels de la recherche, comme il a pu le faire dans sa thèse de doctorat portant sur la modélisation de l'architecture des plantes (Varenne, 2004). En 2013 et en 2014, il coordonne avec Marc Silberstein un ouvrage somme – presque mille pages éditées en deux volumes – intitulé *Modéliser et Simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*. Cet ouvrage regroupe des contributions de modélisateurs, philosophes ou historiens, et propose un panorama presque exhaustif des pratiques de modélisation et de simulation dans les sciences. Vingt-deux chapitres décrivent et expliquent la place et le statut de la modélisation et de la simulation dans la « Physique, les sciences de la Terre et de l'Univers », dans les « Sciences du Vivant » et dans les « Sciences Sociales ». On y trouve donc des contributions démontrant l'usage massif de la modélisation dans des domaines éloignés comme les « simulations numériques des grandes structures de l'Univers » (Chapitre 12), les « modèles mathématiques du développement et de la croissance de l'architecture des plantes » (Chapitre 22) ou les « modèles et les simulations en histoire »

(Chapitre 33). Un défi est donc d'organiser et de mettre en lien cette diversité de pratiques de modélisation. F. Varenne introduit d'emblée que l'unité que l'on peut conférer aux modélisations et aux simulations n'est peut-être qu'une unité sémantique ; les mêmes substantifs, modèles et simulations, dénoteraient des pratiques différentes :

« Comment les [NB : les verbes *modéliser* et *simuler*] définir indépendamment même de la pratique et de la visée de connaissance précises dans lesquelles ils s'inscrivent à chaque fois ? Nous sommes donc dangereusement reconduits des substantifs aux verbes, des modèles à la pratique de modélisation » (Varenne et Silberstein, 2013, p.9).

Il ne faut pas se laisser abuser par notre structure langagière qui tend à essentialiser des actions et des pratiques en des objets. Ainsi, pour sortir des pièges du nominalisme, il est nécessaire de revenir aux pratiques concrètes des chercheurs et aux rôles que les modèles jouent dans leurs travaux, pour comprendre précisément ce que signifient modéliser et simuler les forêts et leurs futurs. C'est l'objectif des paragraphes suivants.

1. Un modèle pour toute une carrière ou une pluralité de petits modèles

Développer un modèle peut être l'œuvre de toute une carrière scientifique, le fruit de nombreuses collaborations, ou simplement l'affaire de quelques jours de travail. Charles, modélisateur en croissance des arbres à IRSTEA, travaille sur le même modèle depuis vingt-cinq ans. Il a supervisé trois doctorants qui ont travaillé sur son modèle pour qu'il intègre de nouvelles variables comme la compétition entre les arbres ou la formation de dendro-micro-habitats, à savoir les cavités dans les arbres où les oiseaux peuvent faire leur nid qui représentent, dans cette optique, un indicateur de biodiversité forestière. Le modèle de Charles a été calibré sur les forêts alpines composées de sapins, de hêtres et d'épicéas. En 2013, Charles recrute Laurent, un doctorant qui a déjà travaillé avec lui pendant un stage de Master 2 dans lequel il avait pour mission d'étendre le domaine de validité du modèle hors du contexte alpin, pour que le modèle puisse rendre compte des dynamiques de toute forêt française composée de sapins, de hêtres et d'épicéas. La thèse de Laurent a été cofinancée par l'ONF qui était demandeur d'un outil capable de modéliser ces types de forêts dans n'importe quel contexte géographique, afin d'améliorer la rédaction des guides de sylviculture. Recruter un doctorant ou un post-doctorant pour qu'il développe une nouvelle fonctionnalité dans un modèle est chose assez courante, comme peut également en témoigner la thèse de Victor,

chercheur à IRSTEA qui a travaillé sur le modèle *Fagacées* pour y implémenter un module qui permet d'estimer le carbone que stocke un peuplement. Chaque nouvelle version du modèle de Charles cristallise ainsi des collaborations scientifiques spécifiques

A l'autre extrémité du gradient se retrouve François, modélisateur à l'UMR Silva et maître de conférences à AgroParisTech, qui se définit lui-même comme un « modélisateur tous azimuts ». François développe fréquemment de « petits modèles » pour estimer par exemple la productivité d'une forêt particulière dans un futur proche. Il construit ces petits modèles dans différents contextes, que ce soit pour expliquer la modélisation à ses étudiants ou suite à une commande de l'ONF pour estimer la ressource d'une forêt. François a fait des modèles sur les chênaies-hêtraies de Catalogne, sur le pin d'Alep ou sur les associations de chênes, de hêtres et de charmes dans les forêts du Québec. Alors que Charles a comme objet d'étude les forêts alpines, François ne s'intéresse pas à une forêt particulière. Son objet d'étude serait plutôt le modèle en lui-même.

Ainsi, la première diversité dans les pratiques de modélisation concerne le rôle que joue le modèle pour le chercheur : le modèle peut être un simple outil, parmi tant d'autres, pour répondre à un questionnement scientifique (François). Le modèle peut aussi être la pierre angulaire autour de laquelle s'organisent d'autres travaux de recherche (Charles).

A la diversité dans l'utilisation des modèles s'ajoutent d'autres différences. Ces premières distinctions ne se visent pas l'exhaustivité mais servent à se repérer dans la grande diversité des modèles. Certaines d'entre elles sont théoriques, et il n'est pas certain, qu'en pratique, les limites soient si étanches, comme c'est le cas pour les modèles fonctionnels et les modèles statistiques (voir : annexe 2¹⁰⁰).

2. *Formalisation, modélisation et simulation*

On peut distinguer trois familles de modèles : le modèle de données, le modèle forestier ou le modèle écologique, et le modèle de simulation.

¹⁰⁰ Cette annexe discute la distinction souvent opérée dans la littérature en modélisation et en écologie entre « modèle statistique » et « modèle fonctionnel ».

Le modèle de données permet de formaliser des données expérimentales ou des données d'observation. Concrètement, il s'agit, grâce aux méthodes de traitement statistique, d'analyser un très grand nombre de données pour mettre en évidence une ou plusieurs variables qui semblent être déterminantes pour comprendre la structuration et l'évolution du système étudié. C'est une mise en ordre des données où l'utilisation de logiciels de traitement statistique, comme le langage *R*, permet de traiter un nombre extrêmement important de données en quelques secondes. Plus généralement, la formalisation appliquée à un très grand nombre de données permet de trier et de structurer ces dernières, c'est une technique pour séparer le bon grain de l'ivraie, pour distinguer la 'variable' du 'bruit'. Comme a pu le montrer l'historienne et philosophe des sciences autrichienne Karin Knorr-Cetina (1999, chapitre 3), le « bruit » est l'un des principaux « ennemis »¹⁰¹ des physiciens qui travaillent au CERN. Je fais un constat analogue pour les modélisateurs forestiers, comme je le montre dans une autre section de ce manuscrit (chapitre 5). Le modèle de données vise donc à identifier une variable, à la différence des modèles forestiers ou modèles écologiques qui interviennent chronologiquement après que les données aient été traitées et organisées. Le modèle forestier est la traduction en fonctions mathématiques du système étudié, comme la croissance d'une essence forestière. C'est cette mise en équation que l'on peut appeler à proprement parler « modélisation ». Ces équations peuvent par la suite être traduites en langage informatique : ce sont les modèles de simulation ou simulateurs qui font « pousser virtuellement les forêts », comme sur l'écran de Mathieu.

3. L'échelle spatiotemporelle du phénomène étudié conditionne les données à collecter

L'extrême diversité des modèles forestiers et écologiques s'explique également par le choix de l'échelle spatiale et temporelle du phénomène étudié. Chaque modèle développé à une échelle spatiotemporelle particulière nécessite d'obtenir des données spécifiques, dans un processus qui reste à explorer. On ne développe pas un modèle de dynamique forestière à l'échelle du globe avec des données provenant d'une seule parcelle forestière. D'où l'énergie dépensée par les modélisateurs pour construire les données adéquates pour leur modèle – c'est l'un des éléments que l'on peut regrouper sous le terme de « friction des données » – « *data-friction* » (Edwards, 2010).

¹⁰¹ Le vocabulaire guerrier est utilisé par les physiciens eux-mêmes.

En premier lieu, les modèles de dynamiques forestières à l'échelle globale visent à rendre compte de l'évolution planétaire ou continentale des forêts. L'un des modèles les plus connus est le modèle LPJ¹⁰² – il sert ensuite de base au modèle ORCHIDEE, modèle numérique développé par le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE). ORCHIDEE modélise la dynamique des écosystèmes terrestres, et il est couplé avec un modèle de dynamique de l'atmosphère afin de rendre compte de l'évolution des interactions entre biosphère et atmosphère. Ces travaux sont utilisés, notamment, dans le cadre des scénarios du GIEC. Le modèle LPJ a donc besoin de données qui se situent à l'échelle globale et continentale. Il mobilise la plupart du temps des données produites par les dispositifs d'observation et d'expérimentation à l'échelle européenne (ICOS) ou à l'échelle globale.

A une échelle plus fine, les modèles forestiers peuvent rendre compte de l'évolution de la ressource forestière d'un pays. Ces modèles peuvent évaluer la ressource en bois disponible, et projeter l'évolution probable de cette ressource dans le temps. Ils nécessitent des jeux de données à l'échelle nationale sur les grandes régions forestières de la France. Il faut archiver au moins trente à quarante ans de données, car les écosystèmes évoluent lentement : c'est la 'fabrication des données de long terme', j'y reviendrai par la suite, c'est un enjeu majeur pour les ingénieurs et chercheurs forestiers. Dans cette perspective, ces modèles s'appuient fortement sur les données produites par les inventaires forestiers nationaux.

A une échelle inférieure se trouvent les modèles qui visent à reproduire et comprendre la dynamique d'une forêt en particulier, comme le modèle de Charles. Une fois encore, il existe une diversité de manières de développer ce genre de modèle, tout dépend du questionnement de recherche. Il existe des modèles dits cohorte-centrés qui visent à comprendre les successions forestières, c'est-à-dire comment une essence forestière va être amenée à prendre la place de celle pionnière. Dans ce modèle, on modélise alors des 'paquets d'arbres', comme dans le modèle que Mathieu m'a montré. La construction des modèles de ce type s'appuie sur des données à l'échelle de la forêt, capables de rendre compte des interactions entre plusieurs essences forestières. Le modèle de Charles est, quant à lui, dit 'individu-centré', il modélise la croissance de chaque arbre sur une parcelle en fonction de la manière dont il peut intercepter la lumière. Pour construire son modèle, Charles a besoin de données précises sur les forêts de

¹⁰² L'acronyme tire son nom des trois villes dans lesquelles il a été développé : Lund, Postdam, Iéna (*Jena* en allemand)

hêtres, d'épicéas et de sapins des Alpes. Ces données peuvent être collectées dans les documents de gestion de l'ONF qui gère les forêts publiques – et dans le contexte alpin, les forêts publiques représentent 40% des forêts¹⁰³. Quand Laurent a essayé d'étendre le domaine de validité du modèle de Charles hors du contexte alpin, il s'est appuyé sur les inventaires et les bilans de coupe réalisés par les agents de l'ONF nommés les somniers. Ces documents, produits par l'administration forestière depuis une centaine d'années, récapitulent pour une forêt particulière toutes les interventions du forestier : éclaircies ou coupes. Ces modèles de croissance, héritiers des tables de production, sont aussi appelés modèles dendrométriques.

Enfin, même s'ils ne sont pas des modèles forestiers à proprement parler, il faut mentionner les modèles dits phénologiques qui visent à reproduire tous les stades de développement d'une plante dans le temps et au fil des saisons : croissance, bourgeonnement, floraison, débourrement*. Ces modèles simulent à une échelle très fine le développement des bourgeons, par exemple. Ils sont utilisés, notamment, pour voir comment les changements climatiques peuvent affecter la saisonnalité de développement des plantes ou des arbres. Ces modèles fonctionnels sont « très gourmands en données », d'après Charlotte, et fonctionnent à pas de temps journalier. Tous les jours, en fonction des conditions météorologiques, ils simulent la réaction des plantes. A cette échelle très fine spatialement et temporellement se retrouvent également les modèles écophysiologicals, comme les modèles de photosynthèse ou les modèles qui rendent compte du fonctionnement des stomates, comme ceux développés dans le contexte de l'affaire des pluies acides.

Finalement, ce tableau de la diversité des modèles et des simulateurs montre la nécessité d'acquérir une pluralité de données. N'importe quel phénomène ne peut pas être modélisé avec n'importe quelles données. A présent, il s'agit de regarder à quelles étapes du processus de modélisation interviennent les données.

¹⁰³ Ce chiffre est supérieur à la moyenne nationale (un tiers) et s'explique par le fait que le territoire alpin a été grandement reboisé dans le cadre des Restaurations des Territoires de Montagnes (RTM) au XIX^{ème} siècle.

B. Construire un modèle : un processus non-linéaire et itératif

1. *En théorie, une construction 'idéale' linéaire des modèles ...*

La diversité des pratiques de modélisation et de simulation ne doit pas pour autant masquer certaines régularités à l'œuvre dans ces travaux scientifiques. Malgré toutes ces variations, un modèle « a toujours ses étapes classiques : conceptualisation, définition des équations, calibration, validation », pour citer les propos de Clément, modélisateur à IRSTEA. Je vais revenir succinctement sur ces différentes étapes pour décrire le travail scientifique qui s'y opère, tout en gardant à l'esprit le type de données nécessaire à sa réalisation. Cette construction est toutefois 'idéale' puisque construire un modèle n'est pas un travail linéaire et successif, mais au contraire non-linéaire et itératif. Ce schéma des étapes provient des manuels d'écologie et de science forestière, et ne doit pas masquer le fait que la construction et la concrétisation d'un modèle recouvrent des éléments plus complexes que les modélisateurs ont à articuler.

La « conceptualisation » est la première étape de la construction du modèle, c'est l'*arkhè* du modèle dans les deux sens du terme, ce qui est premier logiquement et chronologiquement. Tout le reste du travail découle de la question à laquelle le modélisateur souhaite répondre. La question, ou le but du modèle, peut être directement liée à des objectifs de gestion, comme par exemple, estimer la ressource forestière d'une forêt particulière. Le modèle peut aussi répondre à des questions écologiques comme par exemple : comment un arbre va-t-il physiologiquement répondre à une sécheresse ? La conceptualisation détermine toutes les autres étapes du développement du modèle car comme me l'ont répété à maintes reprises mes enquêtés : « un bon modèle est un modèle qui répond à la question que tu te poses ».

La « mise en équation » consiste à établir des liens entre les variables pertinentes du système étudié. La première version du modèle de Charles met en lien la croissance de l'arbre avec l'interception de la lumière par le couvert forestier ; plus l'arbre est capable d'absorber la lumière, plus il va croître. Comme Charles modélise des forêts de montagne, l'inclinaison de la pente du terrain où se situe sa forêt joue un rôle prépondérant. Ainsi, le modèle de Charles met en lien un processus physiologique (la croissance de l'arbre) avec un facteur énergétique

(l'absorption de la lumière) et un facteur topographique (l'inclinaison de la pente). Dans la première version du modèle, les autres facteurs qui peuvent intervenir dans la croissance des arbres (disponibilité en eau, interactions entre différentes essences forestières, acidité du sol, ...) sont considérés 'toute chose égale par ailleurs'. La détermination des équations de fonctionnement du système peut se faire à partir d'une connaissance théorique du phénomène étudié, c'est le cas par exemple des équations de la photosynthèse de Farquhar (Farquhar, Von Caemmerer et Berry, 1980). On parle alors de « modèle basé sur les processus », de « modèle mécaniste » ou « modèle fonctionnel » – tous ces termes sont synonymes. La connaissance théorique du système se traduit en équations de fonctionnement qui mettent en lien les variables qui expliquent le comportement du système. En l'absence d'une connaissance fine du processus étudié, les modélisateurs peuvent déterminer les équations de fonctionnement du système grâce à des analyses de corrélation sur de grandes bases de données, par exemple les données produites par l'IFN, en utilisant l'inférence bayésienne. Ce sont les « modèles corrélatifs », « modèles statistiques », « modèles phénoménologiques », ou les « modèles empiriques » – tous ces termes sont également synonymes.

La « calibration » consiste à ajuster la valeur des paramètres du modèle pour les faire correspondre aux données expérimentales. La calibration peut s'opérer grâce à des données récoltées sur des parcelles d'observation, si le modèle veut projeter la dynamique d'une forêt en particulier, ou elle peut être conduite grâce aux bases de données de l'IFN, si le chercheur souhaite calibrer un modèle qui projette des dynamiques à une échelle spatiale plus grande, celle de la France par exemple. Si un modèle a été calibré sur un type de forêt particulier, par exemple une forêt mono-spécifique de hêtres, et que quelqu'un souhaite l'utiliser pour un autre type de forêt, il est alors nécessaire de re-calibrer le modèle.

Enfin la « validation » consiste à comparer les « sorties » du modèle, à savoir ses résultats, avec des données observées pour voir si le modèle réussit à reconstruire la dynamique du système étudié. Si le modèle est calibré pour rendre compte de la dynamique d'une forêt particulière, comme la forêt de Saint-Hugon près d'Allevard qui est composée essentiellement de sapins, on injecte dans le modèle des données passées, par exemple de la période 1970 à 2000. Ensuite, le modèle pourra prédire l'évolution de cette forêt pour les années suivantes. En comparant les sorties du modèle avec les données présentes (2010-2018 par exemple), le modèle peut être validé, si ses sorties sont en accord avec les données d'inventaire.

Voilà donc la construction 'idéale' d'un modèle écologique ou d'un modèle de dynamique forestière. Or comme l'ont déjà montré les auteurs qui se sont intéressés aux modèles climatiques (Edwards, 1999 ; Edwards, 2010) ou aux modèles élaborés par les géosciences (Oreskes, Shrader-Frechette et Belitz, 1994), cette construction idéale peut être remise en cause à chaque étape du processus de modélisation.

2. ... *En pratique, une relation « symbiotique » entre modèles et données*

La modélisation statistique, dans la mesure où elle vise à faire émerger les variables pertinentes à partir d'un grand jeu de données, ne présuppose pas de théorie explicative à la sélection des données. C'est l'idée directrice de l'inférence bayésienne. Le traitement statistique permet au modélisateur de sélectionner des variables pertinentes, la confrontation à la théorie peut intervenir par la suite quand il s'agit de voir si les variables qui ont émergé sont en accord avec les connaissances que l'on peut avoir de la physiologie et de l'écologie de l'espèce étudiée. Cette fonction de « filtre » que réalise la modélisation témoigne également du rapport particulier qui existe entre modèle et données. On aurait tendance, dans une vision représentationnelle de la science (Pickering, 1995, p.5), à interpréter la relation entre le modèle et les données comme le rapport entre la théorie et l'expérience. Le modèle est créé à partir des données, comme la théorie nous vient de l'expérience. Le modèle est validé par les données, comme la théorie peut être validée par une expérience cruciale – « *experimentum crucis* » – au sens baconien du terme. Or, penser ainsi le rapport entre le modèle et les données, c'est être abusé par le terme trompeur de 'données' ; elles seraient ce qui nous est donné, c'est-à-dire quelque chose que l'on reçoit sans travail créateur, sans qu'elles ne soient fabriquées.

Dans ces travaux portant sur la modélisation dans les sciences du climat, P. N. Edwards (1999 ; 2010) a montré la relation intime et hybride qu'entretiennent le modèle et les données dans la découverte scientifique et la construction des savoirs. Son enquête restitue avec précision comment fonctionnent les modèles climatiques, c'est-à-dire comment ils sont construits et comment ils sont validés (1999). Certains phénomènes sont difficilement modélisables à cause de leur structure complexe, c'est le cas, par exemple, du rôle que jouent les nuages dans le réchauffement climatique. Pour construire leurs modèles afin d'intégrer le rôle des nuages dans l'absorption des rayons solaires, les modélisateurs articulent la littérature

météorologique et les données d'observation (Edwards, 1999, p. 444). A partir de ces deux sources, ils construisent leur modèle d'absorption des rayons solaires par les nuages en réglant – « *tuning* » – les paramètres du modèle en prenant en compte les observations, mais aussi la littérature météorologique, ainsi que leur intuition personnelle. Cette étape que l'on appelle la paramétrisation du modèle est un dialogue entre les données issues de l'observation, les connaissances des systèmes physiques et chimiques, et les partis-pris méthodologiques et épistémologiques des modélisateurs :

« Paramétriser signifie ajuster les valeurs de coefficients et même, parfois, reconstruire des équations afin de produire un meilleur modèle global. « Meilleur » signifie soit que le résultat est plus proche des observations, soit qu'il est plus proche, du point de vue du modélisateur, de ce qu'un modélisateur a appelé la « plausibilité physique » du changement »¹⁰⁴ (*Ibid.*, p.444).

L'étape de la paramétrisation montre que les modèles sont dépendants des données. Leur construction se fait toujours dans un aller-retour entre les données et les équations du modèle. Dans le cas précis mentionné par P. N. Edwards, on constate même que le modèle est reconstruit à partir des premiers résultats qui en sortent. Le processus de paramétrisation remet en cause le modèle linéaire de la construction des modèles. C'est ce processus itératif et non-linéaire qui fait dire à P. N. Edwards que les modèles sont « chargés de données » – « *Data-laden models* » (Edwards, 1999).

Dans les recherches forestières, les mêmes problèmes se posent, et ce, même à des échelles spatiales plus fines. Reprenons le travail de Laurent qui avait pour objectif d'étendre le domaine de validité du modèle de Charles à l'ensemble des forêts composées de l'association suivante : sapins, épicéa et hêtres. Pour réaliser ce travail, Laurent s'est appuyé sur deux sources de données assez différentes. L'encadré 6 reproduit le moment de l'entretien où il m'explique précisément la méthode qu'il a mise en œuvre pour que le modèle de croissance puisse être adapté à d'autres contextes géographiques.

¹⁰⁴«Tuning means adjusting the values of coefficients and even, sometimes, reconstructing equations in order to produce a better overall model result. "Better" may mean that the result agrees more closely with observations, or that it more closely corresponds with the modeler's judgment about what one modeler called the "physical plausibility" of the change" (Edwards, 1999, p. 444)

Encadré 6 : Paramétriser le modèle avec des données hétérogènes (extrait d'entretien avec Laurent).

« Alors, il faut comprendre les données pour comprendre la méthode. Moi j'aime bien repartir des données, car ça permet de bien comprendre ce qui se passe. Donc dans les données de calibration que j'utilise, les données de gestion sont de deux types. Il y a les données d'inventaire qui donnent le nombre d'arbres par classe de diamètre et par essence à un instant donné. Une année, ils ont compté et mesuré tous les arbres, et identifié leur espèce. Ça donne une idée de la composition et de la structure en taille d'un peuplement à une date donnée. J'ai ça pour des parcelles données sur différentes périodes de temps. Ça donne une photographie. Et entre chaque inventaire, j'ai les bilans des coupes qui ont été faites dans les parcelles. Donc ça me donne l'information des arbres qui ont été retirés de la parcelle. Avec ces deux informations-là, le but du jeu est de reconstruire, de reproduire la dynamique passée du peuplement en partant de l'inventaire le plus ancien, en enlevant les arbres en suivant les informations qui sont dans les données de gestion, les données de coupe, et puis arriver à simuler la dynamique temporelle comme ça au fur et à mesure du temps, pour arriver jusqu'à la date de l'inventaire le plus récent de la parcelle. Et l'idée est de faire coller la reproduction du modèle, en partant de l'inventaire initial pour arriver à l'inventaire final. Pour faire ça, c'est basé sur un grand nombre de simulations. Et l'idée, c'est qu'à chaque simulation, on va tirer des valeurs différentes pour les paramètres du modèle, selon un plan d'échantillonnage défini *a priori*. Et donc pour chaque simulation, on va avoir un jeu de paramètres différents pour le modèle qui va faire que la dynamique temporelle va être différente. L'état initial et les coupes ne changent pas pour chaque simulation, à chaque fois, c'est la même histoire qui se reproduit. Sauf que pour chaque valeur de paramètres, on va arriver à un état final différent. C'est en comparant l'état final simulé, qui est différent pour chacune des simulations, avec l'état final observé qu'on peut en déduire les valeurs de paramètres qui permettent au mieux de rendre compte de la dynamique observée. Dans l'idée, c'est cela, après il y a tout un tas d'algorithmes qui permettent de cibler au mieux les valeurs de paramètres qui permettent de coller au mieux à l'observation. »

Laurent dispose de deux types différents de données. Il dispose des données d'inventaire qui sont une « photographie » à l'instant t de la composition d'une forêt. Il dispose également des bilans de coupe qui lui permet de savoir quelles interventions forestières ont été faites entre deux « photographies ». Le but du travail de Laurent est d'adapter le modèle à un contexte géographique différent de la première version du modèle qui avait été calibré sur les hêtraies, sapinières et pessières des Alpes. Les paramètres du modèle ont donc été choisis pour coller au contexte alpin. Le travail de Laurent est donc de trouver les valeurs de ces paramètres hors du contexte alpin, et pour ce faire, il paramétrise son modèle en effectuant un très grand nombre de simulations afin de trouver empiriquement les valeurs pertinentes des paramètres. Le modèle est donc ici reconstruit à partir des données. C'est une sorte de « modélisation inverse » qui est en accord avec les observations de P. N. Edwards faites sur le processus de paramétrisation. Laurent explique ainsi sa méthode : « Donc en fait, j'ai développé une

méthode de modélisation inverse, par calcul bayésien approché, pour calibrer certains paramètres du modèle à l'aide de ces données de gestion forestière qui sont en fait des données de suivi de parcelles forestière sur plusieurs décennies ».

Symétriquement, si on regarde de quelles manières les données sont produites, on constate que le recueil de données est un travail et une technique : les « données » ne sont pas données, mais fabriquées. P. N. Edwards montre comment une grande partie des données qui alimentent les modèles globaux du climat ne sont obtenues que grâce à un lourd appareillage technologique (photographie satellite, correction statistique pour éliminer le 'bruit', simulation Monte-Carlo pour introduire de la stochasticité dans la distribution des variables). C'est ce que P. Edwards nomme « rendre les données globales » – « *Making Data Global* » (Edwards, 2010, p.251). Comme je le montre dans la suite de ce chapitre, on peut faire un constat analogue dans le domaine de la forêt où les acteurs cherchent à 'fabriquer des données de long terme'. De plus, la modélisation et la simulation jouent un rôle prépondérant dans la conception et le fonctionnement des infrastructures de collecte de données.

Ainsi, les données sont dépendantes du modèle, et même construites en partie par ce dernier, les « données sont filtrées par les modèles » – « *Model-filtered data* » (Edwards, 2010). Ces rapports « hybrides » (Sismondo, 1999) ou « symbiotiques » (Edwards, 1999) qu'entretiennent modèles et données montrent que les pratiques de modélisation consistent en un « aller-retour permanent » entre les données et le modèle. Cet « aller-retour permanent » n'est pas une simple mise en forme ou standardisation des données. C'est ce processus qui définit la modélisation comme un travail d'articulation entre la construction du modèle, la mise en forme des données, les connaissances écologiques et physiologiques du système étudié, les objectifs du modèle ou les contraintes techniques et scientifiques. C'est parce que la modélisation, comprise comme un travail d'assemblage et d'articulation, est un processus créatif qu'on ne peut pas soutenir que le modèle n'est qu'un simple intermédiaire entre une théorie et le réel. Le modèle n'est pas transitif, il n'est pas une simple compilation de données observées selon des règles logiques, mais il est le produit du travail créateur du modélisateur. Ce statut épistémologique de la simulation est notamment défendu par le philosophe américain Eric Winsberg dans un article de 1999 :

« En d'autres termes, la confiance que nous avons dans nos résultats de simulation dépend de la présence de plusieurs facteurs, dont aucun n'est garanti par nos connaissances théoriques. Elle dépend de ce que nous savons

sur nos ordinateurs et sur nos techniques graphiques. Elle dépend de la confiance que nous avons dans les divers modèles *ad hoc* que nous utilisons – confiance que nous tirons de l’expérience [acquise] en laboratoire et par l’observation. Elle dépend de notre capacité à calibrer les modèles en les confrontant à des résultats empiriques. Enfin, elle dépend bien sûr de nos capacités implicites d’observateurs à juger le degré de ressemblance entre différentes classes d’images, capacités que nous acquerrons souvent en tant qu’expérimentateurs, observateurs et simulateurs qualifiés. Comme nous l’avons vu en détail, l’épistémologie de la simulation n’est pas simplement une épistémologie mathématico-logique mais bien une épistémologie empirique »¹⁰⁵ (Winsberg, 1999, p.290).

L’anaphore « elle dépend » met en lien les différents éléments que le modélisateur articule dans sa pratique de modélisation : sa connaissance des ordinateurs, la confiance qu’il peut avoir dans les modèles *ad hoc*, sa capacité à calibrer les modèles à partir des données d’observation et ses choix de modélisation. Dans la droite lignée des travaux d’Edwards, de Sismondo et de Winsberg, je propose donc de définir la modélisation comme un travail créateur d’articulation où les liens entre modèles et données sont consubstantiels.

Le modèle est donc « toujours un compromis » pour reprendre les mots d’un modélisateur : créer un modèle, c’est mettre en balance des éléments divers comme l’objectif visé par le modèle, les connaissances écologiques et physiologiques du système, les données recueillies grâce aux inventaires, les techniques statistiques disponibles, ou maîtrisées par le modélisateur, les collaborations qu’il est possible de nouer. Il s’agit, à présent, d’analyser comment les données forestières sont fabriquées, tout en gardant à l’esprit que la fabrication des données forestières est liée au modèle que l’on souhaite produire. Si les données n’ont pas été produites dans le but de modéliser la dynamique de la forêt, alors les modélisateurs doivent ‘bricoler’ les données pour qu’elles puissent alimenter proprement le modèle. Dans cette perspective, la « fabrication de données de long terme » est essentielle pour l’anticipation des futurs des forêts.

¹⁰⁵“In other words, the confidence we have in our simulation results depends on several factors being in place, none of which is guaranteed by our theoretical knowledge. It depends on facts we know about our computers, and about our graphical techniques. It depends on the confidence we have in the various *ad hoc* models we use – confidence we derive from laboratory and observational experience. It depends on our ability to calibrate models against empirical results. And finally, it depends on our tacit abilities as observers to make judgments about the degree of resemblance between different classes of images; often abilities acquired in the role of skilled experimenters and observers, as well as in the role of skilled simulators. The epistemology of simulation, as we have seen at length, is very much an empirical epistemology, and not merely a mathematic-logical one” (Winsberg, 1999, p. 290)

II. La ‘fabrication’ des données forestières

La production et la ‘fabrication’ de données idoines pour construire et utiliser les modèles qui visent à anticiper les futurs des forêts est un enjeu fondamental. Les scientifiques ne peuvent modéliser les forêts sans acquérir les ‘bonnes’ données. Ainsi, je m’intéresse dans les paragraphes suivants aux manières dont ingénieurs et chercheurs forestiers ‘fabriquent’ les données forestières. D’une part, comme la production de données est une tâche chronophage, les chercheurs forestiers mettent tout en œuvre pour valoriser les données déjà récoltées, grâce à la création de bases de données qui structurent les collectifs de recherche, ainsi que des projets qui visent à mutualiser les données entre différentes équipes, ou différents laboratoires. D’autre part, pour anticiper l’évolution des forêts, les chercheurs et ingénieurs forestiers ont besoin de données sur le long terme. Or celles-là n’existent pas toujours. Ils développent alors diverses stratégies pour ‘fabriquer des données de long terme’ qui deviennent un enjeu d’autant plus fondamental avec l’irruption de la problématique climatique.

A. Réduire les coûts de production : « valoriser l’existant »

1. *Le ‘bricolage’ des données forestières*

Si la production de données pour construire, calibrer et tester les modèles a un coût financier non-négligeable, il faut insister sur le fait que le coût le plus important concerne le temps de travail. Lors d’un pot de départ d’un doctorant du centre grenoblois d’IRSTEA, je rencontre Simon, un doctorant en écologie qui a commencé sa thèse deux ans après moi. Nous discutons de l’avancée respective de notre thèse, il me dit qu’après une période un peu creuse, il a beaucoup de travail pour traiter toutes les données qu’il a acquises. Quand je lui demande pourquoi il a eu une période où il n’a pas beaucoup avancé sur son travail, il me répond : « Bah je faisais de la broderie ! ». En fait, Simon doit installer sur des parcelles forestières des dispositifs pour récupérer la litière des arbres. Pour ce faire, on place des bacs composés de filets de mailles différentes pour intercepter ce qui tombe des arbres. Dans les bacs, on tend des filets aux mailles concentriques et enchâssées pour effectuer un premier tri des éléments récupérés en fonction de leur taille (au centre de l’image 1). Et il faut une certaine dextérité

pour réussir à fabriquer ces filets : « Donc voilà, des heures passées derrière une machine à coudre pour construire ces trucs-là, et puis je suis pas doué ! ». La « culture du bricolage » – « *tinkering* » chez Karin Knorr-Cetina (1979) – caractéristique des pratiques scientifiques telles qu’elles sont envisagées par les études sociales des sciences et des techniques (Jouvenet, 2007) prend ici tous ses sens, au propre comme au figuré.



Image 7 : Collecteur de litière, installé sur une placette d’observation RENECOFOR dans la forêt domaniale de Larivour (Photographie de Luc Croisé¹⁰⁶)

La production de données forestières est un élément central du travail des ingénieurs et chercheurs forestiers, il ne faut pas la voir comme une tâche annexe ou subalterne. Premièrement, parce que la manière dont on récolte les données influence la production des modèles qu’elles viennent alimenter, comme je l’ai montré précédemment. Deuxièmement, depuis quelques années, la revue *Annals of Forest Science* a lancé une rubrique « *Data*

¹⁰⁶ Je tiens à remercier Luc Croisé qui travaille pour le réseau RENECOFOR de m’avoir donné l’autorisation d’utiliser ses photographies. En effet, j’avais moi-même photographié, avec mon téléphone portable, ces différents éléments quand j’avais pu effectuer une campagne de mesure avec Guillaume (voir infra). Or, quelques semaines après notre rencontre, mon téléphone portable a rendu l’âme. Cet épisode fâcheux a, non sans une pointe d’ironie, fini de me convaincre de l’importance de la sécurisation des données dans le travail de recherche, que ce soit pour mon enquête ou pour les recherches menées par les ingénieurs et chercheurs forestiers, comme je le montrerai dans la suite de ce chapitre, ainsi que dans le chapitre suivant.

paper » où il est possible de publier des jeux de données forestières (Fady et al., 2014). C'est une des valorisations scientifiques possibles pour ce travail souvent long et fastidieux, et qui s'inscrit dans une volonté politique des centres de recherche, comme l'INRA, de promouvoir la « science ouverte » qui vise à rendre accessible à tous la recherche scientifique et les données qu'elle produit.

Troisièmement, l'acquisition de données peut se mener dans le cadre de collaborations et de projets scientifiques qui sont entièrement consacrés à cette mission. C'est le cas par exemple du projet ANR BIO-PRO-FOR auquel Mathieu a participé. Il s'agissait alors de récolter des données sur des forêts mono-spécifiques et des forêts mélangées le long d'un gradient climatique, partant des Alpes et allant jusqu'au pourtour méditerranéen. Ce projet a produit plus de trois mille carottes¹⁰⁷ d'arbres qu'il faut analyser, puis numériser pour qu'elles puissent être utilisées ensuite dans les modèles. Mathieu a pu bénéficier de l'aide d'une personne recrutée en CDD pendant deux mois pour mener à bien ce travail de fourmi.

Acquérir ou produire des données est donc un travail coûteux, en argent comme en temps. C'est un des éléments de la « *data-friction* ». C'est pourquoi les modélisateurs essaient le plus possible de 'valoriser l'existant', c'est-à-dire de profiter des données déjà récoltées, soit par l'IFN, soit par le réseau RENECOFOR, soit par d'autres équipes de recherche ou d'autres laboratoires. Les collaborations scientifiques nouées autour des données sont donc nombreuses. Lionel, qui est en charge du site expérimental de Puéchabon au CEFÉ, raconte que les modélisateurs le contactent souvent pour qu'ils puissent avoir accès aux données produites sur le site. Il regrette d'ailleurs que les modélisateurs ne lui demandent que les données, et que la collaboration n'aille pas plus loin, pour co-construire par exemple les questionnements de recherche. Comme il le dit, souvent dans les projets, on donne aux expérimentateurs une liste de contraintes et de choses à noter, et la collaboration s'arrête là.

Conscients donc du travail immense nécessaire pour produire des données forestières, les chercheurs essaient donc de valoriser au mieux celles déjà existantes. C'est pourquoi aujourd'hui les bases de données ont une grande importance pour les modélisateurs car elles leur permettent de manipuler de grands jeux de données sans devoir, à chaque fois qu'ils commencent un nouveau projet, passer par la phase d'acquisition des données. C'est en partie

¹⁰⁷ Une carotte est un prélèvement de bois effectué dans le tronc d'un arbre

pour cela qu'a été créée, à l'UMR Silva, la base de données *EcoPlant*. Je vais détailler la construction de cette base de données et le rôle qu'elle a par la suite joué dans la structuration des recherches à l'UMR Silva.

2. *Les bases de données, éléments structurant des équipes de recherche : l'exemple d'EcoPlant*

La base de données *EcoPlant* a été créée à partir de 5.000 placettes forestières réparties dans toute la France métropolitaine, sur lesquelles ont été menés des relevés floristiques. Ces derniers consistent à répertorier l'ensemble de la végétation présent sur la placette : les essences d'arbres mais également les plantes herbacées ou les fleurs. Les relevés floristiques reposent sur les principes de la phytosociologie selon lesquels une configuration particulière de végétaux correspond à des conditions géographiques, topographiques et pédologiques particulières. Ces données floristiques, figurant dans *EcoPlant*, n'ont pas été récoltées par une seule équipe de recherche mais elles ont été construites *via* des études passées et la réutilisation de données anciennes, notamment la base de données *Sophy* qui est une base de données créée à partir de la littérature en phytosociologie (plus de 100.000 placettes). Les données floristiques ont été couplées avec des données d'analyse du sol qui ont été récoltées sur les mêmes parcelles et ensuite analysées en laboratoire. Ainsi, la base *EcoPlant* couple les données floristiques et les données de sol – essentiellement la teneur en pH – et permet de faire de la bio-indication. Cela signifie qu'en regardant sur la base de données toutes les occurrences d'une essence forestière ou d'une plante herbacée, on peut déterminer dans quelles conditions de pH, elle peut se développer. Inversement, à partir de la végétation d'une parcelle forestière, on peut déterminer un intervalle de pH pour l'acidité du sol.

EcoPlant est aujourd'hui utilisée par la gestion forestière dans le cadre du changement climatique pour identifier au mieux les stations forestières dites « à risque » (voir chapitre 3), mais aussi de manière plus opérationnelle par les gestionnaires forestiers pour avoir des informations plus précises sur la qualité et l'acidité des sols. Elle est également utilisée par certains modélisateurs comme données d'entrée à leurs modèles, comme c'est le cas pour Victor, chercheur à IRSTEA : « Ses [celles de Grégoire, le développeur d'*EcoPlant*] sorties de modèles sont les entrées des miens par exemple. Ses sorties de modèles sont les valeurs bio-indiquées, moi je les utilise comme variables d'entrée pour mes modèles ». On voit

l'importance que jouent les bases de données, à la fois pour faciliter les collaborations entre modélisateurs, mais aussi pour faciliter le transfert entre recherche et gestion. Si ces différentes communautés utilisent la base de données *EcoPlant*, elle n'a pourtant pas la même signification pour ces différentes communautés. Pour Grégoire, qui a développé la base, il s'agit d'un outil central dans ses recherches. Pour Victor, la base *EcoPlant* fournit les données pour paramétrer ses modèles. Pour l'ONF, *EcoPlant* permet d'anticiper les stations forestières les plus menacées par le changement climatique. Dans cette perspective, *EcoPlant* constitue bien un « objet-frontière » (Star et Griesemer, 1989), c'est-à-dire un objet qui permet une coordination du travail scientifique entre différentes communautés d'acteurs sans pour autant que ces derniers attachent les mêmes intérêts et significations à cet objet.

Aujourd'hui, cette base sert de support à certaines thèses réalisées à l'UMR Silva. Quand les données idoines ne sont pas encore disponibles, le doctorant récolte les données, il les code dans la base, et elles peuvent ainsi être utilisées plus tard par d'autres chercheurs. La base de données structure l'équipe. Deux choses à retenir de la présentation de cet artefact. Premièrement, la base *EcoPlant* facilite le travail des chercheurs dans la mesure où pour certains questionnements de recherche, ils n'ont pas à récolter individuellement l'intégralité de certaines données. Pour Grégoire, *EcoPlant* a eu un effet démultiplicateur sur la production de thèses dans l'équipe de laboratoire :

« Ça a changé la façon de faire les thèses dans l'équipe. On est passé de thèses où les gens récupéraient leurs propres données – classement des thèses avec des relevés, et donc au maximum, un petit nombre de centaines de placettes – à des thèses où les gens utilisaient des bases de données, et complétaient avec des données propres à leur questionnement. Donc on est passé *a minima* d'un facteur 10 à un facteur 100 en termes de quantité de données, depuis les années ... c'est entre 2000 et 2005 que ça a basculé. Donc ça, c'est intéressant, et c'est aussi ce qui a permis à l'équipe de s'intégrer dans la recherche internationale, car on ne l'était pas trop auparavant » (Grégoire, INRA)

Deuxièmement, *EcoPlant* a même permis au laboratoire de gagner en visibilité à l'international, car cette base peut être utilisée par d'autres équipes de recherche, partout dans le monde. On retrouve bien là l'une des caractéristiques de l'infrastructure : elle instaure un nouveau cadre spatial qui facilite les collaborations à distance (Star et Ruhleder, 1996). La base de données *EcoPlant* réduit les frictions qui sont à la base de la récolte de données et qui consomment de l'énergie et du temps de travail. *EcoPlant* standardise également les données récoltées. Cet artefact est, selon P. N. Edwards, un standard qui fonctionne comme

« lubrifiant » (Edwards, 2010, p. 251), au sens mécanique du terme, c'est-à-dire qui réduit les forces de frottement.

La base *EcoPlant* supporte une partie des travaux menés à l'UMR Silva, en ce sens, elle constitue une infrastructure de ce laboratoire de recherche. Mes observations montrent enfin que la récolte des données suit également la hiérarchie des postes dans la recherche – cela n'est pas propre aux recherches forestières, le sociologue des sciences Terry Shinn avait déjà montré que cette répartition des rôles est assez classique de l'organisation sociale des laboratoires. Le travail de 'petites mains' est opéré par les 'juniors' (stagiaires, CDD, doctorants), tandis que le directeur pilote la recherche (Shinn, 1988). Ce sont les doctorants qui récoltent les données et qui construisent les modèles. Ils sont souvent aidés par des stagiaires de master pour acquérir les données, les homogénéiser, ou pour coder une partie du simulateur. Les ingénieurs de recherche continuent à modéliser, mais ils vont moins sur le terrain. Les directeurs de recherche quant à eux ont essentiellement une mission d'encadrement de la recherche, parfois ils ne modélisent presque plus. C'est en partie les propos que m'a tenu Charles, chercheur à IRSTEA : « Bah finalement, de moins en moins, je fais des simulations moi-même, ce sont plus les doctorants. Bon ça m'arrive, j'ai quand même des périodes de développement de modèle, mais c'est vrai que maintenant je passe plus de temps à concevoir les projets, concevoir les modèles ».

Conscients du phénomène de « frottement des données », les chercheurs tentent de « privilégier l'existant » pour réduire l'énergie et le temps consommés à récolter, produire et harmoniser les données. Dans cette perspective, les bases de données jouent un rôle important, car conçues comme des « standards », elles permettent de réduire l'énergie et le temps dépensés par les acteurs. C'est aussi pourquoi, les données constituent une sorte de « patrimoine scientifique » qu'il faut préserver – ce discours était assez palpable lors de mes observations du réseau RENECOFOR, comme je le montre dans la suite de ce chapitre.

3. Le partage et la mutualisation des données

La mutualisation des données est un processus décisif pour rendre efficaces les collaborations scientifiques. Dès les débuts du développement de la modélisation dans les recherches forestières, les scientifiques ont eu cette question à l'esprit. Je détaille dans un

premier temps le Groupement d'Intérêt Scientifique « Coopérative des données » qui est un réseau national qui regroupe plusieurs instituts scientifiques, et qui vise à mutualiser les différentes données récoltées par les équipes de recherche. Dans un second temps, je décris les différents dispositifs et rapprochements institutionnels qui concourent aux processus de mutualisation de données pour construire des modèles. Je montre alors que les liens consubstantiels entre données et modèles se retrouvent également à cette échelle d'analyse, celle de la conception et du fonctionnement des dispositifs de mesure.

a. Le GIS Coopérative des données

Le GIS COOP ou « Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers » est fondé en 1994 par l'INRA, AgroParisTech, le FCBA, l'IDF, IRSTEA et l'ONF. Il vise à mutualiser les données des équipes de recherche pour permettre le développement de modèles de croissance. Dominique, chercheur à l'INRA puis en détachement scientifique à l'ONF, a participé à la création de ce groupement. Voici comment il raconte l'histoire de ce réseau :

« Cette coopérative a joué un rôle important pour moi, car d'abord, j'ai contribué en tant que chercheur à l'installation de premiers dispositifs qui nous permettaient de mettre au point le protocole, les deux se faisaient en même temps : le protocole n'était pas écrit d'avance, on le mettait au point à travers l'installation des premiers essais pour chaque espèce. Et, ce qui était vraiment très intéressant de ce point de vue, c'est qu'on utilisait déjà des modèles, on faisait des simulations pour créer le protocole expérimental de la nouvelle génération d'essais qu'on était en train d'installer. Donc, c'est vraiment un truc qui me plaisait car c'est vraiment un travail en boucle, un peu itératif »

Dominique raconte les liens intimes qu'entretiennent modèle et données. Des modèles de croissance étaient déjà utilisés pour mettre au point les premiers protocoles expérimentaux du GIS qui va installer des placettes d'observation dans certaines forêts françaises. Dominique explique également que pour pouvoir rédiger les protocoles d'observation, des modèles de croissance étaient croisés avec des données de placettes d'observation, comme celles installées par la Station de recherches et d'expérimentations de Nancy entre 1880 et 1940. Les modèles développés à partir de ces données permettaient alors de savoir quelles données étaient utiles pour construire les modèles, et d'adapter les protocoles expérimentaux en fonction de ces demandes. Des données pour des modèles, et des modèles pour améliorer la qualité des données, car une donnée n'est pas bonne intrinsèquement, mais en vertu du

questionnement scientifique auquel elle va pouvoir répondre. Il faut noter également que le GIS COOP est créé la même année que la première version de la plateforme de modélisation CAPSIS. Ces deux réseaux participent au *monitoring* environnemental, tel qu'il est envisagé par l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi) : « La démarche « Observation-Expérimentation-Modélisation » constitue le socle des sciences de l'environnement » (AllEnvi, 2019)¹⁰⁸.

Ainsi le GIS COOP s'appuie sur six instituts de recherche, chacun ayant un référent en charge de rédiger les protocoles et de mutualiser les données. Dominique a été référent INRA, Clément est aujourd'hui le référent IRSTEA. Les premiers dispositifs ont été installés dans des forêts de chênes sessiles, de douglas, de pins maritimes, de pins laricio, et dans des forêts hétérogènes. Pour comprendre ce choix, il faut revenir au contexte historique de développement du GIS COOP. Au début des années 1990 se développent les premiers modèles de croissance des arbres, ou modèles dendrométriques. Noël Decourt, grand artisan des tables de production françaises dans les années 1960-70, résume dans un article le principe de fonctionnement de ces modèles, vingt ans avant leurs premières réalisations :

« L'idéal serait d'arriver à l'expression mathématique des liaisons existant entre la hauteur, la densité, l'âge et la dimension des produits. L'ensemble d'équations de croissance¹⁰⁹ ainsi obtenu, permettrait l'étude théorique de n'importe quel modèle de sylviculture (et notamment les éclaircies) et de ses répercussions économiques, avec pour résultat le choix *a priori* de la sylviculture la plus rentable » (Decourt, 1964, p. 653)

Les propos de N. Decourt illustrent le fait que le développement des modèles de sylviculture a des objectifs économiques, le but étant de s'orienter vers une sylviculture plus rationnelle, et donc plus rentable. C'est également cette optique qui anime les protocoles et les données récoltés par le GIS COOP. Ses dispositifs d'observation installés doivent permettre de fournir des données pour améliorer les modèles de croissance : les acteurs vont donc mesurer la hauteur dominante, la surface terrière*¹¹⁰, la densité du peuplement. Toutes ces informations doivent permettre aux modèles dendrométriques d'améliorer les itinéraires sylvicoles. Dans cette perspective, les placettes du GIS COOP ont d'ailleurs été essentiellement installées dans

¹⁰⁸ <https://www.allenvi.fr/groupe-transversaux/infrastructures-de-recherche/les-soere/que-sont-les-soere>

¹⁰⁹ C'est l'auteur qui souligne

¹¹⁰ « La surface terrière d'un peuplement correspond à la surface de toutes les sections transversales des troncs, à 1,30 m de hauteur, des arbres présents sur un hectare de forêt. Elle s'exprime en m²/ha ». Elle exprime ainsi une surface boisée.

les forêts les plus productives de France. Le GIS COOP s'inscrit dans l'agenda sylvicole, tel que je l'ai défini dans le chapitre précédent.

Le GIS COOP est un cas d'étude intéressant dans la mesure où il constitue à la fois une infrastructure de recueil de données, mais il est également un réseau de mutualisation de données de recherche. Tout un premier travail a été effectué pour standardiser et valoriser des données déjà existantes sur les forêts françaises. Le GIS COOP (Bédéneau et al., 2001) a également eu pour tâche de centraliser et d'harmoniser d'autres sources de données, comme les placettes permanentes d'observation installées par l'ENEF dans les années 1880, les essais statistiques sur les éclaircies (1950 – 1980), ainsi que les placettes temporaires utilisées par N. Decourt pour élaborer ses tables de production.

b. Mutualiser et partager les données : les « Systèmes d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement » (SOERE)

Si le GIS COOP est un bon exemple de réseau de recueil et de mutualisation des données qui s'inscrit dans l'agenda sylvicole, il faut, tout de même, noter que le *monitoring* environnemental se déploie aussi dans l'agenda écologique. En effet, en France, le *monitoring* environnemental se traduit par l'existence de dispositifs d'observations. Ceux-ci peuvent concourir à la labellisation dite SOERE, ou « Systèmes d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement » soutenus par AllEnvi, l'Alliance Nationale pour la recherche en environnement qui regroupe tous les instituts de recherche liés à l'environnement comme le CNRS, le CIRAD, l'INRA, IRSTEA, l'IGN, le MNHN, et bien d'autres encore. Tous les cinq ans se déroule une campagne de labellisation pour permettre à de nouveaux dispositifs d'observation et d'expérimentation d'acquérir la mention SOERE, synonyme de soutien financier apporté par l'Etat. En France, le SOERE « F-ORE-T » pour « Fonctionnement des écosystèmes forestiers soumis à des modifications naturelles ou anthropiques », a été créé en 2002. Il est soutenu par le GIP ECOFOR, acteur majeur de la structuration des recherches forestières depuis le début des années 1990 et l'émergence des questions climatiques en lien avec la percolation de l'écologie forestière.

Le dispositif « F-ORE-T » semble alors plutôt s'inscrire dans l'agenda écologique des recherches forestières. Il est composé de quinze sites ateliers, dont dix en France

métropolitaine, comme le site de Puéchabon utilisé par le CEFE. Les sites sont « lourdement instrumentés et sont destinés à la description, la quantification et la modélisation du fonctionnement des écosystèmes forestiers » (GIP ECOFOR, 2018)¹¹¹. Les sites sont équipés de tours à flux qui permettent de mesurer notamment les échanges de carbone ou d’azote entre les arbres, le sol et l’atmosphère. A Puéchabon, le site est également équipé de rails surélevés (environ 4-5 mètres du sol) qui permettent aux expérimentateurs de déplacer un toit mobile au-dessus d’un bout de la parcelle, permettant ainsi de mimer des conditions de sécheresse pour les arbres. Le dispositif « F-ORE-T » intègre également le réseau RENECOFOR.

Le développement de ces réseaux d’expérimentation et d’observation s’inscrit également dans une dynamique européenne. J’ai déjà mentionné la création du réseau RENECOFOR à la suite de la controverse sur les pluies acides. Le site-atelier de Puéchabon a été au début installé grâce à un projet européen, le projet ICOS – *Integrated Carbon Observation System* – qui a été développé pour observer et mesurer les échanges de flux dans les écosystèmes forestiers, grâce aux tours à flux. Si aujourd’hui le dispositif se retrouve dans le SOERE F-ORE-T, c’est parce qu’en 2006, l’Union Européenne a décidé d’arrêter le financement de ce dispositif. Pour lui permettre de fonctionner encore, le CEFE a pu bénéficier de l’appui du GIP ECOFOR.

La mutualisation des données est opérée par de multiples soutiens institutionnels qui visent ainsi à organiser et piloter une recherche sur le long terme en sciences de l’environnement, et plus particulièrement sur les forêts. Or, comme les données sur le long terme ne sont pas toujours disponibles, ingénieurs et chercheurs forestiers développent des stratégies pour les ‘fabriquer’.

B. Fabriquer des ‘données de long terme’ : le chercheur forestier comme historien

Les forêts croissent lentement par rapport à d’autres écosystèmes, et il arrive que les perturbations du fonctionnement de l’écosystème deviennent visibles bien après leurs occurrences. De plus, l’anticipation des effets du changement climatique sur les forêts crée le

¹¹¹<http://www.gip-ecofor.org/f-ore-t/mesures.php>

besoin, pour les modélisateurs, de données qui concernent plusieurs révolutions forestières, c'est-à-dire une période temporelle d'au moins une soixantaine d'années. Dans cette perspective, la production de données sur le long terme est centrale pour développer les modèles adéquats. La 'fabrication de données de long terme' peut s'opérer de deux manières. Premièrement, il peut s'agir de récupérer des données anciennes, et de les harmoniser pour qu'elles puissent être injectées dans les modèles. Ce processus d'harmonisation consomme beaucoup d'énergie car les données proviennent souvent de sources diverses et éparses. Puis, les ingénieurs et chercheurs forestiers développent des 'astuces' qui leur permettent de fabriquer ces données, même si elles n'existent pas.

1. L'harmonisation des données anciennes : un travail titanesque mais sous-évalué

Les modélisateurs ont besoin de données sur le long terme pour développer leurs modèles de croissance. Certaines données ont été récoltées dès le XIX^{ème} siècle dans les stations de recherche et d'expérimentation. Par la suite, la plupart des laboratoires de recherches forestières ont développé leurs propres dispositifs d'observation ou d'expérimentation. Toutes ces données proviennent de sources différentes. Pour les intégrer dans les modèles, il faut donc d'abord les harmoniser : c'est une des tâches les plus consommatrices d'énergie et de temps. Ce processus d'harmonisation commence, pour les données les plus anciennes, par une numérisation de ces dernières puisque les données qui datent du XIX^{ème} siècle sont stockées dans des registres de l'ENEF ou dans des documents de gestion. C'est ce qui a été entrepris dans le cadre du projet EMERGE qui « réunit pour la première fois toutes les données disponibles de volumes, de biomasse et minéralomasse des différents partenaires [du projet] : plus d'un million de tiges cubées par l'IFN représentant l'ensemble de la ressource forestière française. Plus de 120.000 tiges représentatives des arbres des forêts gérées et issues des travaux de R&D pour établir des tarifs de cubages. 30.000 fiches de cubage tiges+ houppiers, découpe 0, réalisées dans les années 1930 à 1950 : archives INRA et FCBA numérisées grâce au financement de l'ANR » (Dhôte et al., 2015, p. 30). Cette tâche titanesque, par le nombre de données à numériser, a été financée à moitié par un projet ANR, et à moitié par l'ONF. Le coût total du projet était de 2,3 millions d'euros; l'ampleur du financement correspond à l'ampleur de la tâche.

Pourtant, si les ingénieurs forestiers ont conscience de l'importance de ces données récoltées sur le long terme, ce n'est pas forcément l'avis des financeurs. Lors de notre entretien, Brice, chercheur à l'IGN, me parle des dispositifs d'observation qui ont été installés dans les forêts françaises au XIX^{ème} siècle. Pour lui, ces données sont fondamentales pour la science forestière, car elles permettent d'acquérir actuellement des données sur la deuxième génération d'arbres qui ont poussé sur ces placettes d'observation : « et ça, c'est quand même génial, car pouvoir observer une même forêt à cent cinquante ans d'écart, en se demandant ce qui a changé, et ce qui est stable, je veux dire, c'est absolument génial ! ». Pourtant, cet avis ne semble pas être partagé par les financeurs. Brice raconte par la suite comment Dominique a essayé de montrer l'importance de financer l'harmonisation de ces données anciennes, en vain :

« Et justement, Dominique faisait partie de ces gens qui se sont battus à un moment, en disant que c'est fondamental d'avoir ce suivi intergénérationnel des forêts par ce type de réseaux permanents de seconde génération, mais c'est quelque chose qui est aujourd'hui inaudible ! Je vous assure que vous ne vous ferez jamais financer ça, et au contraire, vous risquez même de subir une perception a priori négative, on va vous dire : oh lala, ce sont des choses qui viennent du XIX^{ème} siècle, c'est vieux, c'est rassis, ça sort du placard, on s'en fiche de tout ça ! » (Brice, chercheur à l'IGN)

Comment expliquer ce refus de financer cette harmonisation des données anciennes ? Pourquoi n'est-ce pas une 'science qui compte' pour les financeurs ? Deux explications peuvent entrer en jeu. Premièrement, il y a une sorte de 'technophilie' à l'œuvre dans les promoteurs du *monitoring* environnemental, qui se retrouve, notamment, au niveau de certaines institutions comme l'Académie d'Agriculture¹¹². L'accent est mis sur les nouvelles technologies capables de produire des données inédites comme la technologie de télédétection du LIDAR (*Light detection and ranging*). Cette technologie de recueil de données est basée sur les techniques de spectrométrie infrarouge. Le LIDAR projette à cent quatre-vingt degrés par un laser impulsif des rayons infrarouges. Quand le rayon laser touche l'objet à mesurer, il revient par la suite au radar. Ainsi, grâce à la vitesse constante de la lumière, on peut calculer par exemple la distance entre le radar et l'objet mesuré. Le LIDAR serait révolutionnaire pour les méthodes d'inventaire car il permettrait de cartographier une forêt entière, sans passer par l'échantillonnage et l'interpolation. De plus, les données produites par le Lidar sont spatialisées et peuvent être couplées avec un Système d'Information

¹¹² Cette technophilie est caractéristique d'une vision des futurs des forêts que j'ai nommé le 'futur-risqué' des forêts. Je détaille cette vision, ainsi que deux autres concurrentes, dans le dernier chapitre de ce manuscrit.

Géographique (SIG). Le développement de cette technologie fait partie de l'axe « Promouvoir le suivi et le pilotage intelligent des forêts » du plan de français recherche innovation pour la filière forêt-bois 2025 (Vedele, 2016). Cet accent mis sur les nouvelles technologies s'exprime également dans les politiques scientifiques qui promeuvent la surveillance continue des écosystèmes forestiers, *monitoring*, comme le montre la troisième et dernière partie de ce chapitre.

Deuxièmement, si les financeurs ne voient pas l'intérêt de financer les travaux d'harmonisation des données, c'est peut-être parce qu'ils ignorent comment les modélisateurs forestiers travaillent concrètement. Pour P. N. Edwards, les climatologues sont avant toute chose des historiens (Edwards, 2010, p. 431) – je fais le même constat pour les modélisateurs forestiers. Voici comment l'historien des sciences décrit le travail des climatologues :

« Leur travail n'est jamais terminé. Cette discipline pousse chaque génération de climatologues à réexaminer les mêmes données, les mêmes événements, à fouiller dans les archives pour dénicher de nouvelles preuves, à corriger une interprétation antérieure ou à trouver une nouvelle façon de déduire l'histoire [qui se cache] derrière les chiffres. Tout comme pour l'histoire humaine, nous n'obtiendrons jamais un récit unique et incontestable du passé climatique mondial »¹¹³ (*Ibid.*)

Comme les climatologues, les ingénieurs forestiers travaillent sur des données produites depuis longtemps, et ne cessent de les réinterpréter pour comprendre les évolutions passées, et futures, des forêts. Le travail de thèse de Laurent est assez emblématique de ce travail continu de réinterprétation des données. Un autre exemple frappant de cette dimension historique du travail des modélisateurs forestiers m'a été donné par Baptiste, ingénieur forestier à IRSTEA qui travaille sur la modélisation d'éboulements et l'interception des blocs de pierre par les forêts. L'historique topographique des terrains de montagne est un facteur important pour la modélisation des chutes de blocs. Certaines données topographiques sont répertoriées dans d'anciennes cartes, mais ce n'est pas toujours le cas. Régulièrement, Baptiste contacte des présidents d'association de collectionneurs de cartes postales. Il cherche de vieilles cartes postales représentant les massifs alpins, certaines d'entre elles peuvent donner une image des conditions topographiques anciennes des massifs. Pendant notre entretien, Baptiste me montre

¹¹³“Their work is never done. Their discipline compels every generation of climate scientists to revisit the same data, the same events – digging through the archives to ferret out new evidence, correct some previous interpretation, or find some new way to deduce the story behind the numbers. Just as with human history, we will never get a single, unshakeable narrative of the global climate's past.” (Edwards, 2010, p.431)

un diaporama qu'il avait réalisé pour un colloque sur les forêts de protection et les restaurations de territoire de montagne. Dans l'une des diapositives se trouve copié un tableau¹¹⁴ du XVIII^{ème} siècle qui reproduit, en toile de fonds, une avalanche qui a eu lieu en 1693 : « Tu vois, sur la montagne peinte en arrière-plan du tableau, on voit des blocs. Là sont dessinés des glissements de terrain, du ruissellement d'eau. On voit les blocs aussi. Et la forêt sur un versant. Donc ça, ça nous donne des informations ».

Le modélisateur forestier n'est pas seulement un informaticien qui développe et code des modèles. C'est aussi un « détective » pour reprendre l'image convoquée par Clément, modélisateur à IRSTEA qui s'appuie sur livre de Ray Hilborn et Marc Mangel (1997) : *The Ecological Detective*. 'Détective' ou 'historien', ces deux images utilisées pour caractériser le rapport que le modélisateur entretient avec ses données, nous montrent les dimensions interprétatives du travail du modélisateur. C'est une 'connaissance par traces', comme l'histoire, qui relève de ce que Carlo Ginzburg nomme le « paradigme de l'indice » (Ginzburg, 1980).

Pour conclure sur ce point, on peut également se souvenir des analyses de P. Edwards sur ce qu'il appelle « le présent qui dure » – « *the long now* » – des infrastructures numériques. Il ne faut pas penser que les infrastructures informatiques émergent *ex nihilo* et révolutionnent la production, le stockage et l'archivage des données. Le « présent qui dure » des infrastructures numériques commence il y a deux cent ans, quand l'Etat commence à produire et archiver des données nécessaires pour gouverner les populations et son territoire :

« Le 'présent qui dure' du développement de la cyber-infrastructure a été amorcé il y a environ 200 ans, à l'époque où deux séries de changements ont commencé à se produire dans l'organisation du savoir et dans le monde de la recherche. Ces changements ont accompagné – graduellement – l'émergence d'une infrastructure de l'information visant à les soutenir : augmentation exponentielle des activités de collecte d'informations par l'Etat (les statistiques) et par ceux qui travaillent sur le savoir (les encyclopédistes) d'une part, développement connexe de technologies et pratiques organisationnelles pour trier, filtrer et stocker l'information, d'autre part »¹¹⁵ (Edwards et al., 2007, p.3)

¹¹⁴*Gemälde in der Kirche zu Moos im Passeiertal, zum Gedenken an die von einer Lawine im Jahre 1693 verschütteten Bergknappen am Schneeberg*

¹¹⁵«For the development of cyberinfrastructure, the long now is about 200 years. This is when two suites of changes began to occur in the organization of knowledge and the academy which have accompanied – slowly – the rise of an information infrastructure to support them : an exponential increase in information gathering activities by the state (statistics) and knowledge workers (the encyclopedists) on the one hand and the

On retrouve l'idée, déjà avancée dans l'introduction de ce manuscrit, qu'une infrastructure est caractérisée par le travail organisationnel. La conservation des données forestières est un enjeu central. Elle met en branle une rhétorique qui s'inscrit dans une logique patrimoniale, comme on pourra le voir dans l'étude approfondie du réseau RENECOFOR. Or, quand ces données ne sont pas disponibles, ou quand les chercheurs n'ont pas les financements pour pouvoir les harmoniser, et ainsi, les utiliser, ils peuvent tout de même développer des astuces pour fabriquer ces données de long terme.

2. Créer des données de long terme : l'astuce du 'space for time'

Pour fabriquer des données de long terme, les modélisateurs ont plusieurs techniques. En effet, en l'absence d'un réseau de *monitoring* des forêts (dont le principe est d'effectuer des mesures à différents instants temporels au même endroit, j'y reviendrai), les modélisateurs doivent trouver des moyens de compenser l'absence de ces données. Pour ce faire, ils peuvent multiplier le nombre de mesures, compensant ainsi « un biais géographique » « par le nombre de placettes ». C'est le sens par exemple des propos de Grégoire qui travaille sur le changement environnemental de la flore forestière à de grandes échelles spatiotemporelles :

« On a des données anciennes et on essaie de leur associer des données récentes, au même endroit... sachant que ... normalement la façon de le faire quand on étudie un phénomène dynamique, dans les conditions naturelles, c'est de faire une placette, et on y retourne régulièrement. Sauf que cela, ce sont des dispositifs très lourds, donc on a au maximum une dizaine de placettes. Donc nous, on ne fait pas ça. On accepte de ne pas retourner exactement à l'endroit où la placette a été faite, car elles ne sont souvent pas disposées très précisément. Par contre, on utilise des dizaines de milliers de placettes. Donc on compense les biais géographiques – le bruit créé par l'écart géographique entre chaque coupe de placettes – par le nombre de placettes. »

On le voit une nouvelle fois, le 'bruit' est l'ennemi du modélisateur. Une autre astuce développée par les modélisateurs qui souhaitent anticiper les effets du changement climatique sur les forêts consiste à « remplacer le temps par de l'espace » – « *space for time* ». Dans l'encadré 7, Victor m'explique cette astuce qui consiste à suivre l'évolution de plusieurs forêts composées de même essence, et dont les conditions biogéographiques, édaphiques et climatiques peuvent être considérées comme similaires. Ainsi, au lieu de suivre l'évolution

accompanying development of technologies and organizational practices to sort, sift and store information.” (Edwards et al., 2007, p.3)

d'une seule hêtraie sur cent cinquante ans, on observe l'évolution de plusieurs hêtraies d'âge différent, sur une période plus courte, ici cinq à dix ans.

Encadré 7 : L'astuce du 'space for time' (extrait d'entretien avec Victor).

« Le 'space for time', on peut le faire pour tout un tas de facteurs, par exemple tout ce qu'on appelle la chronoséquence*, c'est du 'space for time'. Si on veut étudier la croissance d'une espèce, c'est un des problèmes que l'on en a forêt, si on met une expérimentation, on doit attendre 100 ans, donc c'est un peu loin, donc on va par exemple ... si on veut modéliser une croissance de hêtraie, on va prendre une hêtraie de 10, 20, 60, 80 ans en essayant de les avoir dans des conditions identiques au niveau du sol, et on va les suivre sur 5 à 10 ans, et on va dire que cette chronoséquence est représentative de la croissance globale de l'espèce. De cette manière, c'est une méthode pour substituer l'espace au temps. [...] On a, donc, quand même des accroissements, c'est-à-dire des petites trajectoires temporelles sur un nombre restreint d'années par rapport à la croissance forestière, mais un nombre important d'années par rapport au financement d'un projet ! Parce que, si on veut, dix ans pour la forêt, c'est rien, mais pour un projet c'est énorme ! Donc là, on a quand même des trajectoires temporelles »

Le 'space for time' est donc une technique qui permet de compenser l'absence de données de long terme en étudiant plusieurs forêts homogènes. Cette technique est d'ailleurs utilisée pour anticiper les effets des changements climatiques sur les essences forestières. En suivant l'évolution de certaines essences forestières dans le Sud de la France, on peut alors anticiper leur comportement futur dans des régions situées plus au Nord, sous l'hypothèse d'une augmentation des températures ou de la fréquence des sécheresses telle qu'elles sont pressenties par les scénarios du GIEC. Cette technique d'anticipation est au cœur du projet GIONO mené par l'ONF dont la première étape avait été de planter et d'observer dans des *arboretums* des essences dans le Sud de la France, puis d'opérer, au cours de l'année 2019, la migration assistée de ces mêmes essences en forêt de Verdun.

La fin de l'extrait d'entretien avec Victor est également éclairante. Elle met en jeu trois temporalités différentes qui peuvent entrer en conflit : la temporalité longue de la croissance des forêts et des révolutions forestières (100 ans), la temporalité plus courte des recherches forestières (10 ans), et la temporalité encore plus courte du financement des projets (3-4 ans). Ces tensions entre ces trois temporalités différentes sont au cœur des stratégies déployées par les acteurs pour assurer le maintien des infrastructures de recherche, malgré la réduction, voire la disparition, de certains financements, comme cela a été le cas du réseau

RENECOFOR. La dernière partie de ce chapitre vise à étudier en détail la trajectoire scientifique et politique de ce réseau.

III. Trajectoires techniques, sociales et politiques des infrastructures de recherche forestière : le *monitoring* et la surveillance des forêts françaises

Les deux premières parties de ce chapitre étaient consacrées à la production des données forestières à l'échelle des pratiques scientifiques. Dans la suite de ce chapitre, je souhaite maintenant comprendre quelles sont les dimensions sociales et routinières des infrastructures de recherche. L'étude de ces infrastructures met en évidence les activités de maintenance qui sont essentielles pour assurer leur fonctionnement. Sur ce point précis, les *Infrastructure Studies* donnent des clefs d'analyse précieuses pour décrire et analyser la nature sociotechnique des infrastructures.

Premièrement, les infrastructures de recherche sont techniques et sociales (Edwards et al., 2007), le sociologue des sciences ne doit pas *a priori* distinguer ces deux caractéristiques. Dans cette optique, les auteurs utilisent le terme de « passerelle » – « *gateway* » pour décrire des interfaces capables de relier deux infrastructures. C'est le cas, par exemple, de la possibilité d'accéder à la plateforme de modélisation CAPSIS directement par le langage *R* et d'appliquer les fonctions de *R* aux données et aux modèles de CAPSIS. Ces passerelles sont sociotechniques :

« Les passerelles sont souvent considérées à tort comme des « technologies », c'est-à-dire uniquement comme du matériel ou des logiciels. Une approche plus adéquate les conçoit comme la combinaison d'une solution technique et d'un choix social, c'est-à-dire d'un standard, qui doivent tous deux être intégrés aux communautés de pratique des utilisateurs actuellement en place. C'est pour cette raison que les passerelles ne fonctionnent que rarement d'une manière parfaite »¹¹⁶ (Edwards et al., 2007, p.16)

Au sein de l'infrastructure, la solution à un problème est toujours technique et sociale. C'est d'ailleurs cette double nature qui fait que les solutions apportées comportent toujours des problèmes résiduels.

¹¹⁶“Gateways are often wrongly understood as “technologies”, i.e. hardware or software alone. A more accurate approach conceives them as combining a technical solution with a social choice, i.e. a standard, both of which must be integrated into existing users' communities of practice. Because of this, gateways rarely perform perfectly.” (Edwards et al., 2007, p.16)

Deuxièmement, le fonctionnement des infrastructures repose sur des normes et des conventions : quel protocole d'observation appliquer ? Sous quel format les données doivent-elles être communiquées ? Comment avoir accès aux données enregistrées ? Sont-elles soumises à une licence qui contraint leur utilisation ? L'accès à certaines bases de données nécessite d'avoir un identifiant institutionnel tandis que d'autres sont en libre accès. L'infrastructure est donc supportée par une communauté d'acteurs. L'entrée dans cette dernière nécessite un temps d'apprentissage des normes et des conventions qui règlent son organisation.

Troisièmement, le développement des infrastructures est incrémental. Cela signifie que durant la trajectoire de l'infrastructure, il peut y avoir des changements d'objectifs ou de protocoles. Certaines infrastructures naissent dans un certain contexte – les pluies acides pour RENECOFOR – mais perdurent alors que ce contexte semble dépassé. On verra dans la suite du chapitre les différentes modifications qu'a subies RENECOFOR pour intégrer les problématiques du changement climatique ou de la biodiversité dans ses objectifs.

Dans un premier temps, je détaille le fonctionnement des infrastructures de recherche en me focalisant sur les activités de maintenance pour rendre saillantes les dimensions humaines et sociales nécessaires à son fonctionnement. Dans un second temps, je reviens plus précisément sur les trajectoires et les bifurcations des infrastructures, pour enfin préciser ce que je nomme la 'politique implicite' du *monitoring* environnemental.

A. Précarité et maintenance des infrastructures de recherche : RENECOFOR, une « aventure humaine »

Toute infrastructure de l'ampleur de l'IFN ou de RENECOFOR a une existence précaire, soumise aux aléas et aux bifurcations des politiques scientifiques nationales et européennes. Je décris pourtant ici par quels moyens les infrastructures réussissent à perdurer. Pour ce faire, il faut passer outre le processus d'invisibilisation pour rendre compte des nombreux acteurs qui participent au maintien de l'infrastructure. Les contre-forces déployées par les acteurs pour compenser l'entropie intrinsèque se situent sur deux plans que je vais traiter successivement.

Premièrement, il s'agit de comprendre que les infrastructures d'inventaire et de *monitoring* sont essentiellement des « aventures humaines » pour paraphraser les propos de Manuel Nicolas, ingénieur ONF qui pilote le réseau RENECOFOR. Deuxièmement, sur le plan des discours, la rhétorique qui vise à maintenir l'infrastructure – pour des raisons financières mais pas seulement – met en branle une argumentation où les données produites par l'infrastructure constituent un patrimoine scientifique à sauvegarder. Il est alors intéressant de remarquer que le discours patrimonial caractéristique du milieu forestier (Decocq, Kalaora et Vlassopoulos, 2016), des politiques forestières (Sergent, 2013) ou des relevés taxonomiques pour produire des données sur la biodiversité (Granjou et al., 2014) se retrouve également pour appuyer et légitimer les infrastructures d'inventaire et de *monitoring*. D'une certaine manière, ce discours a un effet performatif dans la mesure où mettre en avant le caractère patrimonial des infrastructures de données est aussi une stratégie pour assurer leur maintien.

Comment les données sont-elles récoltées ? Comment garantir une permanence dans les relevés et les méthodologies mis en œuvre ? Les paragraphes suivants répondent à ces questions et s'appuient sur une observation participante que j'ai réalisée lors du colloque du vingt-cinquième anniversaire du réseau RENECOFOR qui s'est tenu en octobre 2017. Avant d'entrer plus en détails sur les caractères humains des infrastructures de données, il est nécessaire de préciser quelques éléments de contexte.

1. Le contexte des 25 ans de RENECOFOR : le futur du réseau est menacé

Le vingt-cinquième anniversaire du réseau RENECOFOR¹¹⁷ s'est tenu en octobre 2017 au palais des congrès de Beaune, et fait suite au colloque du quinzième anniversaire du réseau qui avait donc eu lieu en 2007. Comme je l'ai déjà mentionné dans le chapitre 2 de ce manuscrit, le réseau a été initié à la suite de la controverse sur les pluies acides, et s'intègre à un vaste réseau européen de suivi des écosystèmes forestiers, le réseau ICP de niveau 2 de *monitoring* des forêts européennes. Le réseau a été initié pour une période de trente ans. Le colloque anniversaire a donc lieu cinq ans avant la fin présumée de ce réseau qui à l'heure actuelle n'a toujours pas été renouvelé. L'histoire financière du réseau n'est pas sans

¹¹⁷ Pour plus d'informations, on peut consulter le site de l'ONF qui resitue le colloque, et qui met à disposition toutes les présentations qui ont été filmées pendant ces trois jours (<http://www.onf.fr/renecofor/sommaire/colloque>).

rebondissements. En 2006, l'Union Européenne décide d'arrêter les financements du réseau ICP, car la question des pluies acides est censée être résolue. Néanmoins, le réseau RENECOFOR, partie française du réseau ICP européen, perdure grâce aux financements conjoints des ministères de l'Agriculture et de l'Ecologie, de l'ADEME et de l'ONF. Au niveau des ministères, la décision n'a pas été encore prise de savoir si le réseau allait être financé au-delà de la période des trente ans. C'est donc dans cette situation d'incertitude eu égard à son avenir que se tient le vingt-cinquième anniversaire de RENECOFOR.

Plus de trois cents personnes participent à ce colloque : des modélisateurs, des écologues, des ingénieurs de l'ONF, des membres d'agences environnementales comme l'ADEME. Des agents-forestiers de terrain qui effectuent les mesures pour le réseau sont également présents, en grand nombre d'ailleurs, et sont tout de suite reconnaissables à leurs habits verts. Le colloque a plusieurs objectifs. Premièrement, il s'agit de faire un bilan des productions scientifiques qui mobilisent les données produites par le réseau. Au moment du colloque, la base de données comporte plus de quatre-vingt millions d'enregistrements, et plus de cent cinquante articles scientifiques et quinze thèses ont été réalisés à partir des données produites. Publiciser les données et les résultats de modélisation produits grâce au réseau RENECOFOR a deux objectifs. D'une part, il s'agit de montrer le travail accompli aux financeurs, dans cette perspective, le colloque est une forme de rapport d'activités des travaux menés, en cours et à venir. D'autre part, il s'agit de montrer à l'ensemble des participants du réseau – des agents de terrain qui effectuent les mesures aux financeurs – en quoi ce qu'ils font est important pour le maintien de l'infrastructure. Ainsi, quand les modélisateurs sont appelés à la tribune pour présenter leurs travaux, ce n'est pas seulement pour tenir au courant la gestion des avancées de la recherche, mais c'est avant tout pour montrer aux agents de terrain pourquoi ce qu'ils font est utile. A de nombreuses reprises, les modélisateurs ont insisté sur la « valeur inestimable » qu'ont pour eux les données récoltées et produites par l'ensemble du réseau. François Lebourgeois, maître de conférences en écologie forestière à l'UMR Silva, conclut d'ailleurs sa présentation en s'adressant ainsi aux agents de terrain : « Sans vous, je ne pourrai pas faire mon métier ». Il est important de montrer aux agents forestiers de RENECOFOR que les données qu'ils récoltent sont utiles pour la recherche, car, comme on le verra par la suite, les tâches de ces agents nécessitent une certaine rigueur de travail et un engagement continu. Pour maintenir cet engagement, il est considéré comme important que les agents comprennent pourquoi ils réalisent ces mesures.

2. *Le fonctionnement social de RENECOFOR*

Un des principes fondamentaux du *monitoring* des forêts est la continuité du processus de récolte des données ; le protocole doit demeurer le même, et le suivi doit être fait d'une manière continue et à intervalles de temps régulier (Ferretti et Fischer, 2013) – j'y reviens plus précisément dans la suite de ce chapitre. Il ne doit pas y avoir de rupture dans le relevé des données, c'est pourquoi l'agent de terrain en charge d'une placette RENECOFOR est toujours accompagné d'un suppléant qui peut prendre sa place quand il est malade ou en congés. Les agents de terrain doivent donc respecter une certaine discipline afin d'assurer cette continuité. Cette discipline concerne tout autant le suivi régulier des placettes d'observation, que la manière dont on récolte les données. En effet, comme a pu me le dire Guillaume : « Il faut faire comme le protocole dit ». L'image 8 représente une photographie d'une placette d'observation RENECOFOR sous couvert forestier. On voit qu'elle est protégée par un grillage pour éviter les dégradations humaines, ou animales – les cerfs, par exemple, ont tendance à venir manger les semis. L'écriteau explique en quelques mots ce qu'est RENECOFOR et demande aux badauds de ne pas perturber ce qu'il s'y passe : « Pour que ces observations et mesures soient fiables, il est important de ne pas perturber l'intérieur de cet enclos. RESPECTEZ DONC S'IL VOUS PLAÎT CET ENCLOS pour ne pas perturber et anéantir des années de travail. Merci ».



Image 8 : Site RENECOFOR, sous-couvert forestier, en forêt domaniale d'Anost, Saône-et-Loire. (Photographie de Luc Croisé)

Les agents de l'ONF ont la possibilité d'effectuer cette mission complémentaire pour le réseau RENECOFOR qui leur assure, selon leurs dires, un « complément de salaire non négligeable ». Le suivi des placettes d'observation est mensuel pour la plupart des mesures, sauf pour les relevés hors couverts forestiers qui s'effectuent hebdomadairement. Les agents RENECOFOR suivent un protocole précis à l'aide d'une fiche qui précise toutes les mesures à effectuer. Cette fiche est ensuite envoyée à l'antenne nationale de RENECOFOR qui stocke et trie les données.

Les relevés hors-couverts consistent à récupérer ce qui se trouve dans les bacs à neige et les totalisateurs. Ces derniers sont de gros cylindres en PVC qui récupèrent notamment l'eau de pluie. Quand ils sont situés sous le couvert forestier, l'eau est récupérée, dans les totalisateurs, grâce à un système de gouttières, afin d'intercepter, notamment, l'eau qui tombe des feuilles (image 9). Ces relevés durent environ quinze minutes. Les relevés sous couvert forestiers durent quant à eux plus longtemps, environ trois heures, car on y récupère en plus de l'eau stockée dans les totalisateurs, les litières des arbres.



Image 9 : Gouttières et totalisateurs sous couvert forestier (Photographie de Luc Croisé)

Récupérer la litière est la tâche la plus longue : il faut enlever le filet emmaillé, mettre ce qui a été récupéré dans un sac, puis remettre le filet, et bien le tendre pour être sûr de ne rien laisser de côté. A la fin des relevés, l'agent de terrain doit ensuite trier tout le contenu des litières. Il faut séparer les brindilles, les insectes, les feuilles, les aiguilles. La plupart du temps, ce tri est effectué par les agents eux-mêmes, chez eux. Jean-Jacques m'a raconté la colère et la peur de sa femme quand elle a vu sur la table de la salle à manger le contenu de toutes les litières à trier, et une araignée qui prenait la fuite vers la cuisine. Guillaume, que j'ai accompagné lors d'un relevé, donne à trier les litières à un couple de retraités en échange de services qui leur rend, Guillaume est ancien bûcheron et aide ces propriétaires privés à s'occuper de leur forêt.

Les contenus des litières, des totalisateurs et des bacs à neige sont ensuite envoyés à l'antenne régionale de l'ONF qui se charge de centraliser les différents échantillons et qui les envoie ensuite au centre de stockage. Tous les échantillons matériels sont analysés et stockés dans un énorme entrepôt. Quelle n'a pas été ma surprise quand j'ai demandé à Jean-Jacques ce qu'il faisait de tous ces échantillons. « Bah, les échantillons sont envoyés et ensuite stockés dans la base de données ». Je lui demande : « Mais quand tu parles de base de données, c'est quoi ? C'est des données numériques ? », « Non, non, un vrai gros entrepôt, avec tout ce qu'on récolte ! ». Cet entrepôt est situé dans l'Unité de Services et de Recherche en Analyses Végétales et Environnementales (URSAVE) de l'INRA Bordeaux. Cette petite anecdote

témoigne une nouvelle fois du processus d'invisibilisation caractéristique des infrastructures de données.

3. *Maintenir l'engagement des agents de terrain*

Pendant les pauses du midi du colloque, les participants sont invités à déjeuner ensemble, je me retrouve à une table essentiellement composée d'agents forestiers. Le deuxième déjeuner est rythmé par une petite animation à l'initiative des organisateurs du colloque. On décerne les 'Oscars' des meilleurs agents RENECOFOR : celui qui a récolté le plus d'échantillons ou celui qui est le plus ancien dans le réseau, par exemple. On décerne même le prix de celui qui a été l'agent de terrain le plus vaillant. Il revient à un agent vosgien qui pendant une période où il avait beaucoup neigé, a dû aller faire ses relevés en traineau. Les murs du Palais des Congrès sont ornés d'affiches qui présentent des portraits de tous les acteurs participants au réseau : agents forestiers, analystes des données, financeurs de l'ADEME, modélisateurs. La scène où ont lieu les présentations est fleurie et une maquette miniature qui représente une forêt avec un dispositif d'observation RENECOFOR est placée dans le hall. Tous ces éléments esthétiques, que l'on pourrait appeler la scénographie du colloque, contribuent à fédérer les acteurs autour du réseau. Toutes ces anecdotes racontées montrent les efforts constants qui sont déployés pour assurer le bon fonctionnement de l'infrastructure. Ces éléments sont de l'ordre d'un « travail affectif » (Anderson, 2009 ; Brunet, 2018) qui a pour but de maintenir l'engagement des agents RENECOFOR.

C'est parce que RENECOFOR est une « aventure humaine » que de nombreux efforts sont déployés pour assurer son fonctionnement. Il faut que les agents responsables des placettes assurent un suivi régulier, continu et standardisé, *condition sine qua none* à la production de données de qualité qui pourront ensuite être utilisées dans des travaux de modélisation. C'est la même chose pour les relevés de terrain effectués par l'IFN. Comme a pu le dire Jean-Daniel Bontemps, chercheur à l'IGN, dans une émission de radio (Chauvière et Bontemps, 2017, juin), il faut être passionné pour être forestier en charge des mesures d'inventaire, car il faut travailler quelles que soient les conditions météorologiques ou topographiques. La mission d'inventaire sur le terrain n'est pas une simple balade en forêt, il faut parfois accéder à des terrains difficiles, en pente ou surélevés, avec tous les instruments nécessaires aux mesures qui pèsent leur poids.

Les dimensions sociales des infrastructures ne doivent donc pas être oubliées. Considérer l'infrastructure comme une organisation sociale, c'est premièrement, mettre en évidence le fait que chaque élément de l'infrastructure, humain ou non-humain, a un rôle spécifique. Dans le cas de RENECOFOR, les agents de terrain récoltent les litières des arbres et les trient. Ces échantillons sont ensuite envoyés au centre de données qui analyse les échantillons et les numérise. Ces données numériques sont alors mises à disposition des modélisateurs qui leur permettent de construire des modèles pour analyser, par exemple, la réponse des arbres à une augmentation des dépôts azotés. Les modèles permettent aux scientifiques de publier. La cellule de l'ONF en charge du réseau RENECOFOR utilise ces articles pour montrer aux financeurs et aux maîtres d'ouvrage les plus-values scientifiques du réseau, et assurer ainsi le financement de l'infrastructure. Si l'infrastructure garde son financement, alors les agents de terrain peuvent continuer leurs relevés, et recevoir le complément de salaire délivré pour la mission RENECOFOR. La boucle est bouclée, et chaque acteur a contribué à faire fonctionner et perdurer l'infrastructure de recherche. Cette infrastructure sociale s'appuie sur des institutions qui garantissent son bon fonctionnement.

Néanmoins, l'infrastructure est menacée, dans le cas de RENECOFOR, par la fin des financements du réseau prévu pour 2022. C'est pourquoi les différents acteurs mettent en branle une logique argumentative qui vise à montrer le caractère patrimonial des données de RENECOFOR. D'une certaine manière, pour sauvegarder les forêts françaises, il faut également sauvegarder les données récoltées sur ces dernières.

4. La conservation des données : Sauvegarder le « patrimoine scientifique »

A de nombreuses reprises, le terme de « patrimoine scientifique » a été utilisé lors du colloque des vingt-cinq ans de RENECOFOR pour caractériser les données produites par ce réseau. Anne Probst, écologue ayant participé au réseau RENECOFOR dès sa création, tient ses propos, non sans une pointe d'humour : « ça n'a pas de sens de financer RENECOFOR pour trente ans. Moi j'y vais franco, il faut le faire sur un siècle ! ». Un siècle, le temps d'une voire deux révolutions forestières, cela conférerait des données de long terme très précieuses aux futurs ingénieurs et chercheurs forestiers. Un autre intervenant compare le réseau à un grand cru : « RENECOFOR, c'est comme un bon vin, avec le temps, ça se bonifie ! ». La

nécessité d'avoir des données sur le long terme est un élément essentiel des recherches forestières. Cette importance est déjà mise en avant dès la création des premières Stations de recherche et d'expérimentation à la fin du XIX^{ème} siècle (cf. chapitre 1). Or la temporalité des infrastructures de recherche n'est pas toujours au diapason des temporalités de l'action politique et des financements des dispositifs, comme lors de l'arrêt des financements par l'Union Européenne. Si le financement s'arrête, faut-il penser que les données ne sont plus utiles ? En aucune façon. J'ai montré comment certaines pratiques mises en œuvre par les ingénieurs et chercheurs forestiers visaient à compenser les biais générés par les données lacunaires. La 'fabrication des données sur le long terme' est une solution aux trajectoires subies par les infrastructures de recherche, voire à leur disparition. Les infrastructures de recherche subissent des réorientations, intègrent de nouveaux protocoles de mesure, peuvent changer leurs métrologies. Pourtant elles gardent aussi une certaine inertie dans leurs trajectoires. Ce sont ces dimensions que j'explore à présent.

B. Trajectoires, bifurcations et inerties des infrastructures de recherche forestière : RENECOFOR et l'IFN

Les infrastructures de recherche s'inscrivent dans un certain agenda scientifique qui façonne leur structure, leurs objectifs et leurs protocoles. Pourtant la temporalité des agendas scientifiques n'est pas forcément toujours la même que celles des infrastructures de recherche. Une fois qu'elles ont été créées, les infrastructures de recherche génèrent des inerties que les *Infrastructure Studies* nomment des « dépendance de sentier », « *path dependance* ». Ces inerties s'expliquent notamment par les processus de routinisation qui sont à l'œuvre dans la structure sociotechnique des infrastructures et qui sont vitaux pour assurer leur maintien :

« Les habitudes individuelles et les routines organisationnelles sont des modes d'organisation très efficaces du comportement, mais elles peuvent être fortement résistantes au changement »¹¹⁸ (Edwards et al., 2007, p.17)

¹¹⁸ « Individual habits and organizational routines are highly efficient modes of organizing behavior, but they can be strongly resistant to change » (Edwards et al., 2007, p.17)

1. Intégrer l'étude du changement climatique et de la biodiversité dans RENECOFOR

Pour saisir les changements qui ont eu lieu dans la structuration et l'organisation du réseau RENECOFOR, je m'appuie sur les rapports d'évaluation qui pointent les biais et les faiblesses du réseau mais donnent également à voir les évolutions possibles. Développé dans le cadre du problème des pluies acides, RENECOFOR peut-il être utile pour étudier les effets du changement climatique sur les forêts françaises ? Le rapport d'évaluation de 2006 (Probst et al., 2006) pointe certains biais qui sont liés à la localisation des placettes d'observation. Ces dernières ont été placées dans des forêts publiques (gérées par l'ONF), à savoir des forêts de production qui concernent les grandes essences forestières françaises : pins, sapins, hêtres, chênes, charmes, etc. S'appuyant sur les documents de référence de l'installation des placettes d'observation, le rapport d'évaluation note la remarque suivante : « Il semble que l'on doive éliminer [...] les stations très défavorables où les changements mineurs des conditions d'environnement peuvent conduire à des fluctuations exagérément fréquentes de l'état de santé des peuplements » (Probst et al., 2006, p. 66). Les stations forestières de faible productivité ont été à dessein exclues du réseau RENECOFOR, car il y est difficile de mettre en évidence un effet des dépôts acides sur les arbres. Le choix des forêts productives est un choix scientifique : il permet de mettre en évidence plus facilement les effets des pluies acides sur les écosystèmes forestiers. Dans cette perspective, le réseau met en avant la nécessité de croiser les données produites par RENECOFOR avec d'autres sources de données pour permettre aux modèles d'évaluer les effets du changement climatique sur les forêts. Bastien, écologue à l'UMR Silva, a plus de réserve sur cette question :

« Et oui, le réseau RENECOFOR est le seul réseau que l'on a en France où on a un suivi à long terme des peuplements, donc où on acquiert de la donnée, mais il ne répondra jamais à aucune question sur le changement climatique ! Jamais ! On le vend comme ça, mais jamais ! Car les gradients de climat sont pas bons, les placettes ont été installées uniquement dans des forêts domaniales, ça représente quoi de la surface forestière en France ? Rien ! Elles ont été installées uniquement dans des zones forestières de bonne croissance, on a choisi des peuplements de bonne fertilité »

Faut-il maintenir avec Bastien que le réseau RENECOFOR ne pourra jamais répondre à des questions sur le changement climatique ? En lui seul, peut-être que non. Néanmoins, les modélisateurs qui mobilisent les données produites par le réseau utilisent d'autres sources de

données, comme les données d'inventaire, des données récoltées par les équipes de recherches ou les données de gestion. C'est le cas, par exemple, de Mathieu qui a utilisé les données de RENECOFOR mais qu'il a complété avec d'autres sources comme les données de l'ONF, et des données qui ont été produites dans le cadre d'un projet financé, ANR BIO-PRO-FOR. Une nouvelle fois, on décèle que le travail des ingénieurs et chercheurs forestier se rapproche de celui de l'historien, c'est une 'connaissance par traces'. C'est l'objet de l'encadré 8 qui reproduit la suite de l'entretien que j'ai eu avec Bastien sur le fait que le réseau RENECOFOR ne peut pas mettre directement en évidence les effets du changement climatique sur les forêts françaises.

Encadré 8 : « On n'a qu'une partie de l'histoire » (extrait d'entretien avec Bastien)

« Bastien : - A l'heure actuelle, il n'y a aucun réseau qui peut te permettre d'avoir des réponses sur le comportement climatique de l'espèce sur des gammes de climat qui sont assez étendues. On n'a qu'une partie de l'histoire, aucun réseau ne peut te donner la courbe complète.

Antoine : - C'est intéressant quand tu dis une partie de l'histoire, car au final, une grande partie de votre boulot, c'est, comme tu disais, de construire et retrouver ... si on veut projeter, il faut reconstruire le comportement passé pour pouvoir comprendre...

Bastien : - Oui, c'est tout à fait ça ! C'est la pratique de recherche ! »

Les ingénieurs et chercheurs forestiers procèdent comme les historiens, ils cherchent à reconstruire une partie de l'histoire de l'évolution des forêts pour pouvoir projeter leurs comportements futurs. Eux aussi, ils pratiquent l'inversion infrastructurelle pour comprendre d'où viennent les données, comment elles ont été construites, quels ont pu être les biais qui ont présidé à leurs mesures.

Un autre exemple des modifications qui ont eu lieu dans le réseau est l'intégration de l'évaluation de la biodiversité forestière. En effet, c'est à partir de 1995 (Augusto et al., 2013, p. 19), soit trois ans après le développement du réseau, qu'ont été réalisés les premiers relevés floristiques sur les placettes d'observation. Cela correspond à la mise à l'agenda de la protection de la biodiversité comme enjeu environnemental aux niveaux international et national (Mauz et Granjou, 2010).

Ainsi, les frictions entre les différentes temporalités – celles de la recherche, celles de l'action politique, celle des infrastructures de recherche – peuvent venir entraver le bon fonctionnement de l'infrastructure. En 2006, l'Europe stoppe le financement de RENECOFOR et cela a des répercussions sur l'acquisition de données, « l'effort de mesure » baisse sensiblement pendant cette année, comme cela a pu être dit lors du colloque des vingt-cinq ans. Heureusement, pour le maintien de l'infrastructure, RENECOFOR a pu bénéficier d'autres sources de financement après 2006, et retrouver ainsi un effort de mesure constant à partir de 2007. La trajectoire politique et organisationnelle des infrastructures de recherche a ainsi des conséquences sur les données produites par ces dernières. Le changement de protocole opéré à l'IFN à la suite des désastreuses tempêtes de 1999 met en lumière ces enjeux et témoigne de l'importance de la constance de l'organisation des infrastructures pour garantir des données de qualité.

2. L'Inventaire Forestier National à l'épreuve des tempêtes

Un autre cas intéressant pour comprendre les effets de facteurs exogènes sur le développement et le maintien des infrastructures concerne le changement de méthodologie opérée par l'IFN à partir de 2005. En décembre 1999, deux tempêtes Lothar et Martin s'abattent sur la France, « laissant derrière elles des forêts méconnaissables, des forestiers meurtris, et une filière de la forêt et du bois fortement et durablement affectée » (Biro, Landmann et Bonhême, 2009, p.1). L'IFN est chargé d'évaluer les dégâts occasionnés par ces deux tempêtes à l'échelle nationale. En 1999, le protocole d'inventaire de l'IFN était similaire à celui décidé en 1958 à sa création, c'est-à-dire un relevé tous les dix ans dans chaque région forestière. Les relevés sont désynchronisés par département. Ainsi, jusqu'à cette date, l'IFN « n'avait jamais de photographie instantanée » de la ressource en bois, pour reprendre les propos de Brice. Voici comment il explique l'embarras dans lequel se trouvait l'IFN pour réaliser l'évaluation nationale des dégâts :

« Ces tempêtes de 1999 avaient un caractère tout à fait singulier car au lieu d'être locales comme beaucoup de tempêtes, 1982, 1990, c'est la première tempête d'ampleur nationale que la France ait connue. Elle a touché le territoire sur de très grands espaces : le Nord de la France, le Nord-est, l'Aquitaine, le Massif central (...) Or comment évaluer les dégâts ? Il faut disposer pour chaque zone du territoire touchée par une tempête d'une photographie avant, et d'une photographie après. Et donc le constat, ce n'est même pas une question d'incertitude comme vous le mentionniez plus haut, c'est même plutôt et simplement une question

d'impossibilité d'évaluer les dégâts avant un retour complet sur l'ensemble des départements touchés, c'est-à-dire dix ans. Et ça, évidemment, pour les pouvoirs publics, cela a été jugé inconcevable, inimaginable qu'il faille attendre dix ans pour avoir une évaluation des dégâts des tempêtes »

Face à l'impossibilité d'évaluer les dégâts des tempêtes de 1999 à cause de la désynchronisation des mesures, l'IFN change son protocole en 2005 pour déployer l'effort d'inventaire sur l'ensemble du territoire français de façon continue et non plus désynchronisée. Cette modification métrologique a eu pour conséquence de permettre à l'IFN de produire une photographie annuelle de l'état des forêts françaises. Selon Brice, quand la tempête Klaus a touché la France en 2009, il a fallu trois mois à l'IFN pour déterminer le nombre d'hectares de forêts détruits. Or, ce changement de protocole n'est pas sans conséquence sur la qualité et la précision des données fournies par l'IFN. Cela est dû au fait que si l'effort d'inventaire a augmenté, le financement de l'inventaire est resté constant. Cela cause un énorme problème de précision des mesures, comme me l'a expliqué Brice :

« Depuis 2005, on peut disposer d'une photo instantanée de la forêt. Par contre, on a bien divisé par dix l'intensité d'échantillonnage, c'est-à-dire que la précision, à ce moment-là, avait perdu non pas 1/10 mais en $1/\sqrt{10}$, car les écarts-types, c'est en racine du nombre de l'intensité d'échantillonnage.... Donc la suite de 1999, c'est la tempête Klaus de 2009, et là, la réforme avait été faite. L'inventaire a été mis à l'épreuve par un exemple concret. Et là, c'est prodigieux, en trois mois, on a eu la réponse : les dégâts de Klaus en Aquitaine font 38 millions de mètres-cubes. Par contre, ce que personne n'a noté, c'est la précision autour de ce chiffre. Et moi, je peux vous la dire, car je la connais : l'écart-type est de 17 millions de mètres-cubes. Or l'intervalle de confiance, c'est plus ou moins deux écarts-types. Conclusion : on pouvait affirmer avec un niveau de confiance de 95% que les dégâts de la tempête Klaus, c'est 38 millions de mètres-cubes, plus ou moins 34 millions de mètres-cubes. En fait, on était entre le zéro et le double de la moyenne ! Ça illustre bien ce qu'on a gagné avec une contrepartie au niveau de la précision... Et il y a en fait un implicite, c'est de dire qu'on doit *monitorer* les forêts françaises plus fréquemment à coût constant »

L'évaluation des dégâts forestiers à la suite de la tempête Klaus est hautement incertaine. A coût constant, ce qui est gagné quelque part (la spatialité) et perdu autre part (la précision). En s'appuyant ici sur la métaphore des systèmes chimiques à l'équilibre, on comprend alors que « rien ne se perd, rien ne se crée, mais tout se transforme » dans les infrastructures de recherche, surtout quand les coûts de financement restent constants.

Cette modification du protocole d'inventaire traduit un changement global opéré dans les recherches forestières : le passage de l'inventaire des forêts au *monitoring* de ces

dernières. La restructuration de l'IFN peut traduire également ce mouvement : elle fusionne en 2012 avec l'IGN, et se dote par la même occasion d'une équipe de recherche. Cela traduit l'inflexion des politiques scientifiques environnementales qui, depuis la fin des années 1980, ont mis à l'agenda des recherches forestières la surveillance des forêts et l'anticipation de leurs futurs.

C. De l'inventaire au *monitoring* : les dimensions politiques de la surveillance des forêts

1. Inventaire et Monitoring : deux approches différentes

Les inventaires forestiers nationaux sont créés en Europe et en Amérique du Nord dans la première moitié du XX^{ème} siècle. Ils ont pour objectif de produire des données objectives et neutres sur la répartition des forêts et les stocks de bois à l'échelle du territoire national. Avant la création de l'IFN, en France, il y a eu la *Statistique et Atlas des Forêts de France*, que l'on surnomme aussi *Inventaire Daubrée* (1912) en hommage à Lucien Daubrée, ancien directeur de l'ENEF qui a coordonné cette entreprise. Les inventaires s'inscrivent, comme je l'ai montré précédemment, dans une perspective de connaissance des ressources de l'Etat.

Comment différencier l'inventaire du *monitoring*, à savoir la surveillance continue des forêts ? L'inventaire étudie une variable dans l'espace (Meijers, 1986) : le stock de bois, la composition des forêts. Dans sa première version, l'Inventaire Forestier National procédait département par département tous les dix ans. Dans le cas du *monitoring*, ou de la surveillance continue, on étudie l'évolution d'une variable dans l'espace-temps. On mesure plusieurs fois la même variable à espace-temps différents pour pouvoir dégager des tendances d'évolutions :

« Bien que dans de nombreux cas les termes *inventaire* et *monitoring* soient (incorrectement) utilisés comme des synonymes et que tous deux puissent même faire appel à des méthodologies de terrain similaires, ils diffèrent, en principe, en ce sens qu'un inventaire est conçu pour fournir une estimation à un instant donné et n'implique aucune nouvelle prise de mesure future. [Quant au] *monitoring*, il se concentre explicitement sur les évolutions et compare généralement les mesures [réalisées] à différents endroits et à différents moments. Dans la mesure où

les inventaires s'intéressent de plus en plus à l'estimation des changements, cette distinction pourrait devenir obsolète » ¹¹⁹ (Ferretti et Fischer, 2013, p.8)

Les inventaires ne présupposent pas de mesure future, car ils ne se concentrent pas sur le changement. Ils visent à donner une information à un instant t – c'est une « photographie » comme disait toute à l'heure Laurent. Le *monitoring*, parce qu'il vise à suivre le changement, présuppose des mesures futures qui seront réalisées au même endroit que les mesures précédentes. Selon les auteurs, cette distinction tend à se résorber, car les inventaires ont changé leurs approches, comme j'ai pu le montrer dans les paragraphes précédents. Cela traduit un mouvement plus global opéré dans la connaissance et la gestion de la Nature, celui du passage de l'inventaire (géographique) au *monitoring* (temporel), comme cette orientation a pu être étudiée dans le cas des sciences du sol (Kon Kam King et Granjou, 2020). Le *monitoring* s'envisage également sur le long terme et se planifie – c'est pourquoi la rhétorique du patrimoine scientifique à préserver est si importante pour permettre au *monitoring* de perdurer.

Une autre distinction concerne l'objectif du *monitoring*. Voici comment les auteurs, Ferretti et Fischer, définissent les objectifs du *monitoring* :

« Les informations fournies par le *monitoring* forestier doivent pouvoir être exploitées dans le processus de prise de décision ainsi qu'aux niveaux de la gestion et de la politique. Il est essentiel que le *monitoring* serve des objectifs bien définis : [si] un soutien initial au *monitoring* peut sans doute être obtenu, il ne peut être maintenu sur le long terme que s'il est en mesure de fournir des résultats utiles, mesurables et pertinents pour la politique et la science » ¹²⁰ (Ferretti et Fischer, 2013 p.6)

Le *monitoring*, par le suivi temporel du fonctionnement des écosystèmes, a ainsi pour but d'éclairer les décisions politiques en matière d'environnement. Le *monitoring* doit être « pertinent pour la politique » – « *policy-relevant* ». Ainsi, le *monitoring* s'inscrit dans une

¹¹⁹“Although in many cases the terms inventorying and *monitoring* are (incorrectly) used as synonymous ... and the two may even use similar field methodologies, they—in principle—differ in that an inventory is conceived so as to provide an estimate at a given point in time, and does not imply any future remeasurement. *Monitoring* explicitly focuses on changes and usually compares measurements at different places and times. As inventories are becoming more concerned with estimates of change, this distinction may become obsolete.”(Ferretti and Fischer, 2013, p.8)

¹²⁰“Information provided by *monitoring* needs to be useful in the decision-making process, and at the management and political level. A clear connection between *monitoring* and well-defined endpoints is essential: initial support to *monitoring* can perhaps be obtained, but it can be maintained in the long term only if the *monitoring* is able to respond providing valuable and measurable policy- and science-relevant outputs.” (Ferretti et Fischer, 2013 p.6)

véritable logique d'anticipation où surveillance, simulation et décision politique sont intimement liées.

2. Les dimensions politiques de la surveillance des forêts

a. Données et modèles pour arbitrer les décisions forestières

Tous les acteurs de la recherche forestière mettent en avant l'importance des dispositifs d'observation et d'expérimentation pour le rôle important qu'ils jouent dans le processus de modélisation et de simulation. Les acteurs de la gestion forestière (ONF) et les pouvoirs publics sont conscients que les démarches de modélisation et de simulation, de projection et d'anticipation doivent s'appuyer sur des infrastructures capables de récolter et de produire des « données de qualité ». Dans son rapport d'activité pour la période 2010-2014 (Dhôte et al., 2015), le département RDI de l'ONF met l'accent sur la modélisation, la simulation et l'anticipation comme capables d'appuyer les arbitrages politiques nécessaires sur des choix eu égard à la mobilisation de la ressource forestière, comme celui entre bois-énergie et bois-matériau, ou entre production forestière et conservation de la biodiversité (Dhôte et al., 2015, p.8). Doit-on privilégier la fonction écologique de stockage du carbone des forêts ou privilégier la fonction économique de production de ressource en bois ? Doit-on privilégier la récolte de la ressource ou laisser des arbres non-coupés et du bois-mort pour garder un niveau minimal de biodiversité forestière ? Ces questions complexes font intervenir un ensemble important de paramètres écologiques, économiques, scientifiques, politiques et sociaux. Elles peuvent être arbitrées grâce à la modélisation et la simulation, comme par exemple dans le cadre du projet ANR FORESEE (caractérisation de la ressource forestière pour les bioénergies) dont l'objectif était de développer une méthodologie robuste d'estimation de biomasse forestière à l'échelle nationale pour permettre les arbitrages entre bois-énergie et bois-matériau.

Sur ce point, il faut tout de même noter que si la modélisation et la simulation peuvent venir en appui pour orienter les décisions des organismes gestionnaires – sur une forêt précise – ou les décisions des pouvoirs publics – sur une orientation plus globale de la politique forestière – il n'en reste pas moins que ces questions d'anticipation de la gestion des écosystèmes forestiers sont des questions politiques et liées à des choix de société. Victor a

travaillé pendant plus d'une dizaine d'années sur les questions de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers, voici comment il parle du débat qui existe entre bois-matériau et bois-énergie :

« Il y a beaucoup de partis-pris là-dessus, car il y a des collègues qui vont ... tu parlais de Dominique, tout à l'heure, lui, son avis c'est qu'il faut sortir plein de bois de la forêt, déstocker parce qu'effectivement on stocke tant de mètres-cube par an, depuis 30-40 ans en forêt, les stocks s'intensifient, et c'est dommage de perdre cette ressource. Il y a ce point de vue : qu'elle peut permettre de se substituer au pétrole. Voilà, par exemple... mais il y a aussi les collègues plus biodiversité qui vont préférer avoir des stocks super importants de bois en forêt car ça permet de maintenir un certain niveau de biodiversité. Donc derrière cette question du stockage du carbone, il y a un peu des positions, les positions des uns et des autres, souvent il y a quand même ... souvent les gens mettent le carbone devant, alors que le carbone, ils s'en foutent, c'est plutôt le truc qui est un peu derrière » (Victor, IRSTEA)

D'une part, il serait dommage pour certains acteurs de se passer d'une ressource comme le bois-énergie, notamment parce que la surface forestière française n'a aujourd'hui jamais été aussi grande, et que d'après les gens de l'IGN que j'ai pu interviewer, beaucoup de gisements ne sont pas exploités. D'autre part, ces forêts non-exploitées constituent un réservoir pour la biodiversité. Ce sont donc des questions qui mettent en jeu des choix de modèles et de politiques énergétiques. C'est pour résoudre ces enjeux complexes que le *monitoring* forestier – production de données et simulation de ces dernières – est « *policy-relevant* ». Par ailleurs, le développement du *monitoring* environnemental, en général, s'inscrit dans un contexte politique particulier, celui d'une volonté de rationaliser les décisions politiques en matière de gestion des ressources naturelles, tout en permettant l'adéquation entre logiques économiques et préservation de l'environnement. C'est ce qu'on peut appeler la politique implicite du *monitoring* environnemental qui a été conceptualisée dès la fin des années 1990.

b. La politique du *monitoring* environnemental : contrôler une 'Nature sous surveillance'

Le développement de l'écologie « cybernétique » se déploie dans une volonté de contrôle et de maîtrise de la Nature pour éviter sa destruction (chapitre 2). Les écologues sont alors vus comme des ingénieurs qui cherchent à minimiser les perturbations des systèmes écologiques, comme la pollution. C'est dans les années 1980 que se développent alors les infrastructures de recherche forestière qui visent à surveiller la santé des forêts et anticiper leurs futurs. Plus généralement, le *monitoring* environnemental est appréhendé comme un moyen d'améliorer

les décisions politiques environnementales. Ces dispositifs sont « techno-politiques » (Devictor et Bensaude-Vincent, 2016). C’est d’ailleurs l’une des dimensions fondamentales mises en avant par le rapport du *National Science and Technology Council* portant sur le *monitoring* environnemental (1997), qui cite en exergue une déclaration du Vice-président Al Gore, prononcé en septembre 1996 à l’occasion d’un *workshop* sur le *monitoring* environnemental :

« Le *monitoring* environnemental est le fondement [sur lequel reposent] les informations scientifiques nécessaires à la prise de décisions judicieuses et essentielles à la concrétisation du double objectif de maintien d’une croissance économique vigoureuse et de préservation de notre magnifique patrimoine naturel pour les générations à venir [...]. De plus, le *monitoring* environnemental doit être accessible au public pour l’informer et faciliter sa participation à notre démocratie. Nous avons besoin de connaissances acquises grâce à une meilleure surveillance de nos rivières, de nos forêts, de nos océans et de notre air pour prendre des décisions éclairées. Cette compréhension constitue l’un des piliers de notre passage vers le XXI^{ème} siècle »¹²¹ (*National Science and Technology Council*, 1997).

Le *monitoring* environnemental doit permettre de prendre « des décisions éclairées », mais aussi de concilier croissance économique et préservation du patrimoine naturel. Cette orientation politique – la préservation de l’environnement est compatible, et même indissociable, de la croissance économique – a été étudié dans certaines recherches, comme celle d’Esther Turnhout et de ses co-auteurs (2014) sur la gouvernance de la biodiversité via le concept de ‘mesurabilité’. Elles montrent que cette idée de ‘mesurabilité’ de la biodiversité s’appuie sur les principes mis en avant par le *New Public Management*, et plus particulièrement l’importance de la transparence et de la standardisation des informations pour l’évaluation de la gouvernance de la biodiversité. Dans une optique assez proche, la philosophe Bernadette Bensaude-Vincent et l’écologue Vincent Devictor, par l’intermédiaire du concept de ‘datafication’ de la Nature (2016) critiquent le fait que la mise en données de la biodiversité s’accompagne d’un processus d’abstraction et d’effacement des réalités écologiques situées. Ces ‘mises en données’ et ‘mises en calcul’ de la Nature sont des dispositifs techno-politiques qui s’inscrivent dans une volonté de contrôle, de surveillance et de gouvernement de la Nature, où la technologie occupe une place centrale. Le *monitoring*

¹²¹ « Environmental *monitoring* is the foundation for the scientific information necessary to make wise decisions key to meeting the twin goals of continued vigorous economic growth and preservation of our magnificent natural heritage for generations to come. [...] Environmental *monitoring* must also be available to the public to inform them and facilitate their participation in our democracy. The knowledge we gain from improved *monitoring* of our rivers, forests, oceans and air is the knowledge we need to make informed decisions. This understanding is one of the pillars of our bridge to the twenty-first century.” (NSTC, 1997)

environnemental rejoint, en partie, l'un des constats faits par la philosophe Virginie Maris d'une « absorption » de la Nature par la technique (Maris, 2018, p.121-143), et s'inscrit dans le régime des « promesses technoscientifiques » (Joly, 2015) où la technologie devient un « point de passage obligé » (Callon, 1986) à des problèmes sociaux, politiques ou environnementaux. Néanmoins, ces promesses, que l'on pourrait qualifier d'éco-technologiques, ne sont pas portées et partagées par tous les acteurs du milieu forestier. En effet, le sixième et dernier chapitre de ce manuscrit a pour objectif de détailler les différentes visions des futurs des forêts qui structurent ce milieu social et scientifique, et dont les promesses technoscientifiques ne constituent qu'une des trois visions. Lors de notre entretien, Brice, chercheur à l'IGN, s'interrogeait sur le fait que les recherches forestières – ce qu'il appelle plus généralement la « techno-sphère » – n'ont jamais eu autant de moyens financiers, humains ou technologiques, et que pourtant, il était toujours aussi difficile de comprendre l'évolution des forêts sur le long terme. Dans son étude sur la surveillance des récifs coralliens, la juriste et ethnologue Irus Braverman (2016) fait le constat amer de l'augmentation ininterrompue des technologies déployées pour surveiller, avec une précision croissante, l'évolution des coraux, sans pour autant que l'on soit en mesure d'éviter leur effondrement global. Elle rapporte, alors, les propos d'un écologue spécialiste de la question, qui propose une comparaison tout aussi brillante que glaçante. Accroître notre pouvoir de surveiller la destruction de la barrière de corail, c'est en quelque sorte comme « ranger les chaises [sur le ponton] du Titanic pour avoir une meilleure vue [de la catastrophe imminente] » (Braverman, 2016).

Conclusion

L'ensemble de ce chapitre s'est évertué à montrer les dimensions sociotechniques à l'œuvre dans la production des données forestières, à l'échelle microsociale des pratiques scientifiques, et à l'échelle macrosociale des infrastructures de recherche forestière. Cette enquête sociologique a mis en évidence plusieurs phénomènes dans le processus de production des données forestières.

Premièrement, on peut considérer que les ingénieurs et chercheurs forestiers sont des historiens, et qu'ils déploient une 'connaissance par traces' pour comprendre l'évolution des forêts sur le long terme, connaissance d'autant plus fondamentale qu'ils ont aujourd'hui pour tâche d'anticiper les futurs lointains, menacés et prometteurs, des forêts françaises. La production de données sur le long terme, et plus généralement, la production de données forestières est un travail coûteux en temps humains. Quand les données n'existent pas, ils déploient un certain nombre de stratégies qui visent à 'fabriquer' ces dernières. Loin de l'image du travail purement rationnel, la production de données et la construction des modèles doivent s'envisager sur le modèle du « bricolage » (Knorr-Cetina, 1979), métaphore centrale dans la sociologie des pratiques scientifiques.

Deuxièmement, les infrastructures de recherche forestière reposent sur des organisations sociales et humaines qui assurent leur fonctionnement et leur maintien. Il faut rendre, en quelque sorte, hommage aux « travailleurs invisibles » (Mauz et Granjou, 2011) – agents forestiers de terrain – qui récoltent les données, et garantissent la production continue de ces dernières. Pour faire face à l'entropie caractéristique du développement des infrastructures de recherche, les différents acteurs déploient des efforts constants pour assurer des financements, la constance des protocoles de mesures ou la valorisation de travaux scientifiques. Si je peux me permettre de nuancer les propos de la sociologue des sciences Susan L. Star (1999, p.379) : non, les infrastructures ne sont pas ennuyeuses à étudier. L'enquête réalisée sur le réseau RENECOFOR regorge d'anecdotes surprenantes, voire comiques. Même si la récolte de mesure fût un travail fatigant à effectuer, ce fût un beau moment de convivialité partagé avec Guillaume, à discuter de son métier, de sa vie, de ses hobbies, de son avenir, et de celui des forêts. Ainsi, je voulais remercier l'accueil chaleureux que m'ont réservé les 'hommes en vert', lors du colloque RENECOFOR et lors des mesures

effectuées pour le réseau. Il n'est pas toujours facile pour le sociologue de trouver sa place¹²² sur son terrain d'enquête, il est parfois confronté aux regards suspicieux des acteurs qui pensent être surveillés. Cela n'a jamais été le cas avec ceux qui ont choisi de dédier leur vie et leurs corps à la gestion des forêts, toujours prêts à partager cette passion qui les animent.

Troisièmement, le développement du *monitoring* environnemental s'inscrit dans une politique environnementale qui vise à surveiller la Nature pour anticiper ses futurs, et éviter son effondrement. Le *monitoring* environnemental s'appuie sur une promesse technoscientifique qui repose sur l'idée que l'augmentation croissante de la puissance de calcul des ordinateurs et le développement de nouvelles technologies d'acquisition de données constituent des « points de passage obligés » (Callon, 1986) pour gouverner au mieux les forêts, et anticiper leurs futurs pluriels. Cette perspective éco-technologique repose sur une vision particulière des futurs des forêts que le chapitre 6 aura pour tâche de décrire en détail (le 'futur-risqué' des forêts). On peut, alors, se souvenir de l'article d'Ashley Carse sur l'étymologie du terme « infrastructure » qui la considère comme témoignant, plus généralement, du déploiement d'une « raison calculatoire » qui vise à standardiser l'hétérogénéité de la réalité sociale et environnementale pour la rendre gouvernable. C'est, d'une certaine manière, ce que j'ai nommé, à plusieurs occasions dans ce chapitre, la politique implicite des infrastructures de recherche.

¹²² Je tiens aussi tout particulièrement à remercier Jean-Jacques qui m'a 'pris sous son aile' lors du colloque des 25 ans de RENECOFOR. Me voyant un peu isolé et ayant du mal à aller discuter avec les gens, il m'a fait rencontrer toutes les personnes qui dirigent et participent au réseau. Il ne m'aurait pas été possible d'écrire ces quelques pages sans sa gentillesse et sa bienveillance.

Chapitre 5 : Modéliser et simuler les forêts : les dimensions sociales des langages et artefacts informatiques

Introduction

L'outil informatique est au cœur des pratiques de modélisation des forêts, et d'anticipation de leurs futurs. Modélisations et simulations forestières reposent sur la production et la mobilisation de divers artefacts informatiques, plus ou moins stabilisés, qui circulent entre plusieurs chercheurs, différents laboratoires, et entre modélisateurs et gestionnaires. En première analyse, on peut prendre une acception large du terme 'artefact informatique' pour faire porter l'analyse à divers niveaux des pratiques scientifiques. Les artefacts informatiques regroupent les bases de données (*EcoPlant*), les plateformes de modélisation (CAPSIS), les logiciels, les fonctions d'un langage informatique (souvent réunies en librairie – « *package* » – comme pour le langage *R*), le langage informatique lui-même (*R*, *Java*, *C++*), voire même quelques lignes de code.

Les progrès et les avancées en informatique ont sensiblement modifié le travail des chercheurs. On peut penser au développement et à l'appropriation du courrier électronique (Millerand, 2003), aux plateformes-web qui permettent l'écriture collaborative, ou à l'utilisation croissante du langage *R* qui permet l'analyse statistique et la visualisation de grandes bases de données. La littérature en *STS* a pu utiliser le terme de « cyber-infrastructure » (Edwards et al., 2007, p.3) pour caractériser le rôle joué par les artefacts informatiques dans le stockage, l'archivage, le partage et l'analyse des données scientifiques. Ce chapitre prolonge les analyses du chapitre précédent dans la mesure où il étudie les rôles joués par ces artefacts informatiques dans les pratiques des chercheurs et ingénieurs forestiers. Après avoir porté le regard sur la production des données utiles à la quantification et la modélisation des forêts et de leurs futurs, il est question à présent d'appréhender comment ces données sont traitées pour produire des savoirs et des connaissances sur les forêts et leurs futurs possibles.

Ce chapitre s'intéresse aux manières dont modélisateurs et ingénieurs forestiers produisent des modèles. Il en existe une multitude, mais tous ont des éléments communs que ce soit la manière de traiter ou d'organiser les données, le langage informatique utilisé pour construire le simulateur, et parfois même des 'bouts de code' empruntés à un autre modèle. Dans ce chapitre, j'appréhende les rôles que jouent les artefacts informatiques dans le travail scientifique des modélisateurs forestiers. Alors qu'une conception naïve du langage informatique semble le considérer comme un langage strictement formel, logique et technique, l'enquête dévoile le caractère éminemment social de ce langage dans la mesure où il structure des communautés, détermine des 'profils' et repose sur un ensemble de normes et de conventions qui déterminent les actions possibles des développeurs, modélisateurs et utilisateurs au sein des laboratoires de recherche forestière. Dans cette perspective, ce chapitre se focalise sur les manières dont les artefacts informatiques tendent à stabiliser des communautés et des rôles sociaux dans l'organisation de la science au regard de leurs pratiques scientifiques.

Ce chapitre s'appuie sur l'étude de deux artefacts informatiques. D'une part, la plateforme de modélisation CAPSIS (Dufour-Kowalski et al., 2012) sert à héberger des modèles de croissance et des modèles sylvicoles. Elle en compte aujourd'hui plus de soixante-dix, et de nombreux modélisateurs que j'ai rencontrés hébergent leur modèle sur cette plateforme. D'autre part, depuis quelques années, le département Recherche-Développement-Innovation (RDI) de l'ONF utilise le langage informatique *R* pour formater et analyser ses données expérimentales, pour avoir un accès plus facile à certaines bases de données (comme *EcoPlant*), ou pour prévoir la productivité d'une forêt selon certains scénarios sylvicoles. Ces différentes fonctionnalités – ce sont des fonctions du langage *R* – sont sauvegardées dans un *package*, *OnfR*, qui est aujourd'hui utilisé dans les cinq pôles de la RDI de l'ONF, soit une quinzaine de personnes. Pour mener à bien l'analyse de ces deux artefacts informatiques, je m'appuie sur des entretiens semi-directifs réalisés avec les développeurs à l'origine de ces objets, et avec les modélisateurs et ingénieurs qui les utilisent. L'enquête accorde une place importante au récit des acteurs pour comprendre comment, « en situation » (Clarke et Fujimura, 1996, p. 20), ils les utilisent.

En prenant comme angle d'analyse les pratiques de modélisation et de simulation qui se développent autour et avec ces deux artefacts informatiques, ce chapitre propose également une discussion de deux concepts de la sociologie des sciences et des techniques utilisés

traditionnellement pour étudier le travail scientifique des chercheurs : le concept de 'laboratoire' et celui de 'boîte noire'. Il s'agit de prendre au sérieux les affirmations des modélisateurs forestiers qui envisagent la plateforme CAPSIS, et plus généralement, la simulation informatique comme un moyen de faire de « l'expérimentation virtuelle ». On peut alors se demander si CAPSIS et *OnfR* sont des « laboratoires virtuels » qui permettent de visualiser et d'étudier certaines trajectoires forestières futures. Le terme « boîte noire » (Latour, 1989, p. 212), quant à lui, a été largement utilisé pour caractériser comment les innovations scientifiques et technologiques cristallisent des intérêts d'acteurs divers, qui sont stabilisés dans l'objet scientifique ou technologique en question. « Ouvrir les boîtes noires » (Jordan et Lynch, 1996, p. 145) s'est alors érigé comme une maxime de la sociologie des sciences et des techniques pour dévoiler les dimensions sociales, politiques et économiques des faits et artefacts scientifiques. L'étude sociale des deux artefacts informatiques, étudiés dans ce chapitre, montre au contraire que tout n'est pas complètement stabilisé, et que la boîte noire apparaîtrait plutôt « translucide » (Jordan et Lynch, 1996, p. 149) à bien des égards.

Le chapitre s'articule autour de deux moments. Dans un premier temps, je décris les deux artefacts informatiques mentionnés plus haut en détaillant leur développement et leur fonctionnement. Dans un second temps, je me focalise sur trois situations où les modélisateurs font face à leur modèle. Étudier les chercheurs forestiers 'en situation de modélisation' permet alors de rendre saillantes les dimensions sociales, processuelles et instables du travail scientifique en général, et plus particulièrement du développement et de l'utilisation des modèles forestiers.

I. CAPSIS et *OnfR* : des « laboratoires virtuels » ?

L'étude sociale de deux artefacts informatiques

L'enquête menée au sein des laboratoires de recherches forestières a mis en évidence de nombreux artefacts informatiques autour desquels se développent les pratiques de modélisation et de simulation : bases de données (*EcoPlant*), plateforme de modélisation (CAPSIS), modèles de croissance (*SAMSARA*, *Fagacées*), packages *R* (*OnfR*, *biomod2*). Pour comprendre comment les pratiques et collaborations scientifiques se développent par l'intermédiaire, et autour de ces artefacts, je propose l'analyse de deux types d'artefacts différents : la plateforme de modélisation CAPSIS, et le package du langage *R* : *OnfR*. Après avoir précisé dans quel contexte ils se développent et quel est leur fonctionnement, je décris leur organisation interne qui détermine les différents rôles joués par les acteurs qui gravitent autour de ces artefacts. A la fin de cette première partie, je propose quelques pistes de réflexion quant au statut de ces artefacts ; peut-on parler de « laboratoires virtuels » pour les décrire, comme certains acteurs ont pu l'affirmer ?

A. CAPSIS : une plateforme de modélisation pour mener des « expérimentations virtuelles »

La plateforme de modélisation CAPSIS (*Computer-Aided Projection of Strategies in Silviculture*) a été initiée en 1994 par Philippe Dreyfus, modélisateur à l'INRA Avignon, pour améliorer le transfert des modèles de croissance vers les gestionnaires de l'ONF. Dans cette optique, elle s'inscrit dans l'agenda sylvicole, comme l'indique la signification de son acronyme. Elle héberge aujourd'hui environ soixante-dix modèles dont certains développés par des chercheurs internationaux (portugais, canadiens ou belges). La plateforme CAPSIS est d'ailleurs utilisée par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs canadien pour établir des scénarios sylvicoles à l'échelle du pays. Avant de présenter plus précisément comment fonctionne CAPSIS, je retrace quelques étapes de son développement en l'inscrivant dans l'histoire plus longue du développement de la simulation informatique, grâce aux travaux de l'historien des sciences Franck Varenne.

1. *La construction de la plateforme CAPSIS*

a. Le développement de la « simulation informatique » à l'AMAP

Avant de retracer en détail la création et l'évolution de la plateforme CAPSIS, il convient de poser quelques jalons historiques et épistémologiques quant au développement de la « simulation informatique ». Les travaux de l'historien des sciences Franck Varenne (2004 ; 2007) ont porté sur le développement de la simulation informatique en botanique et en agronomie. Je m'appuie ici sur ses analyses.

Premièrement, il faut distinguer, épistémologiquement, la « simulation numérique » de la « simulation informatique ». La « simulation numérique » est un « traitement algorithmique pas à pas et approché d'un processus de computation qui possède au préalable une unité et une homogénéité mathématique de conception et de construction » (Varenne, 2007, p. 209). La « simulation numérique » représente des phénomènes qui sont homogènes d'un point de vue mathématique, c'est-à-dire que l'on pourrait réduire *in fine* à un ensemble d'équations différentielles. L'ordinateur peut alors calculer les résultats de cet ensemble d'équations qui peut être trop grand pour être réalisé 'à la main' par un humain. La puissance de calcul des ordinateurs permet alors de résoudre l'ensemble de ces équations plus rapidement. La « simulation numérique » porte donc sur un ensemble homogène, d'un point de vue mathématique, de phénomènes physiques. Cette pratique de simulation s'est développée dans le cadre du projet Manhattan (1942-1945) et la création de la bombe atomique, comme l'ont montré les analyses de l'historien des sciences Peter Galison (2011).

Deuxièmement, la « simulation informatique », quant à elle, repose sur ce que Franck Varenne appelle la « pluriformalisation » : « une intégration informatique de formalismes de diverses natures (logiques, mathématiques) et sous divers points de vue » (Varenne, 2007, p.18). La simulation informatique « rend informatiquement compatible ce qui ne l'est pas encore mathématiquement » (*Ibid.*). La simulation informatique permet alors d'associer différents types de phénomènes qui ne sont pas homogènes d'un point de vue mathématique : « le calculateur peut ainsi présider à la recombinaison pas à pas de sous-modèles conçus par les scientifiques séparément, et de façon découplée ou fragmentée » (Varenne, 2007, p. 79). Grâce à la simulation informatique, les modélisateurs peuvent, par exemple, coupler un modèle de croissance d'arbre, comme le modèle *Fagacées*, avec un modèle de traitement

sylvicole (éclaircies et coupes) ou un modèle d'absorption du carbone. Bien que ces différents modèles ne soient pas unifiés d'un point de vue mathématique, la simulation informatique, grâce notamment à la représentation graphique, permet d'associer ces deux types de formalismes différents. C'est l'un des points centraux de CAPSIS, et qui explique sans doute son succès : permettre l'emboîtement de modèles de différents niveaux, comme je le montre dans la suite du chapitre.

Ce type particulier de simulation – la simulation informatique – s'inscrit dans une histoire institutionnelle que raconte Franck Varenne (2004 ; 2007). C'est à l'UMR AMAP (botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations), située à Montpellier et à quelques pas du CEFÉ, que sont développés les premiers modèles d'architecture des plantes, par l'agronome Philippe De Reffye. Ces derniers sont à la base du développement de la « simulation informatique », au début des années 1980. L'UMR AMAP résulte d'un rapprochement institutionnel opéré entre l'INRA d'une part, et le CIRAD d'autre part. Les modèles d'architecture des plantes reposent sur un postulat simple : on peut décomposer la plante en éléments simples, des méristèmes*, qui se forment autour d'un axe, la tige. A partir de ces éléments simples, on peut ensuite reconstruire l'architecture de la plante en intégrant les probabilités de croissance des méristèmes le long de la tige, et en s'appuyant sur des données d'entrée qui proviennent des placettes expérimentales où on fait pousser différents caféiers. C'est l'une des caractéristiques fondamentales de ces simulations : on peut calibrer divers modèles de croissance avec les données expérimentales, et ensuite utiliser ces modèles pour simuler le développement optimal de certaines essences d'arbres.

Pour F. Varenne, c'est l'une des premières fois que l'on utilise l'informatique graphique, la synthèse d'images virtuelles, dans la modélisation des plantes et des arbres. Les modèles de Philippe de Reffye, celui du caféier par exemple, font donc 'pousser virtuellement' l'arbre, sa croissance n'étant jamais toujours la même, car les méristèmes ont des probabilités d'apparition non fixes. La simulation de l'architecture des arbres est un type de « simulation informatique » (Varenne, 2004, p. 208), c'est-à-dire une « simulation sur ordinateur qui recourt à toutes les ressources de programmation informatique, notamment en langage évolué et en programmation orientée objets, pour traiter simultanément de caractéristiques hétérogènes dans le type, dans le temps, et dans l'espace ». En effet, P. De Reffye ne part pas des équations de croissance du caféier. Il développe et paramétrise son modèle à partir de nombreuses données expérimentales récoltées dans les *arboretums* où poussent les caféiers.

C'est à partir de ces différentes données qu'il peut ensuite simuler quelle est la croissance optimale du caféier.

Pour F. Varenne, la création de l'UMR AMAP, le recrutement de F. De Reffye, et le développement des premiers modèles de croissances, comme ceux de François Houillier¹²³ ou de Jean-Marc Ottorini¹²⁴, constituent un rapprochement de trois disciplines qui étaient jusqu'alors éloignées : la modélisation de l'architecture des plantes (qui résulte des développements de l'écologie et de la botanique dites tropicales¹²⁵), l'informatique graphique et la modélisation forestière. Le rapprochement avec la modélisation forestière est permis grâce aux modèles d'architecture des arbres, et grâce à ce que F. Varenne nomme la « sursimulation » : les modèles architecturaux des arbres vont constituer la base, une « maquette », sur laquelle on peut ajouter un autre modèle qui simule un autre phénomène que la croissance des arbres.

Franck Varenne prend l'exemple d'un modèle développé par Jean Dauzat¹²⁶ (Varenne, 2007, p. 145-147). Il souhaite modéliser comment les palmiers interceptent la lumière afin d'évaluer le rendement d'une plantation de palmiers où les différents arbres ne font pas la même taille, et donc n'interceptent pas, chacun, la même quantité de lumière. Jean Dauzat utilise d'abord un modèle d'architecture du palmier (semblable à ceux développés par De Reffye) sur lequel il applique un « modèle de lancer de rayons » (*Ibid.*) qui modélise la « réflectance du couvert » (*Ibid.*), c'est-à-dire la quantité de lumière qui est emmagasinée par le couvert, et celle qui est renvoyée. Le modèle d'architecture du palmier (premier niveau) constitue alors une « maquette expérimentale » sur laquelle on peut visualiser les effets du modèle de second niveau (modèle de réflectance de la lumière). C'est cette imbrication de modèles qui est nommée le « simulation informatique », et qui est au cœur de la plateforme de modélisation CAPSIS.

¹²³ Ecologue et modélisateur forestier. Il est directeur de l'UMR (CIRAD, CNRS, INRA, IRD, Université de Montpellier) : « Botanique et bioinformatique de l'architecture des plantes », de 1998 à 2002.

¹²⁴ Ecologue forestier. Il développe l'un des premiers modèles forestiers *SimCop*, simulateur de croissance de Douglas.

¹²⁵ Ce n'est pas un hasard si les écologues et botanistes portent un vif intérêt à l'architecture des plantes tropicales, car ces écosystèmes comportent une faune très diversifiée. Les travaux du botaniste Francis Hallé sur les différentes formes des plantes ont eu une influence importante sur les premiers modèles d'architecture des arbres, notamment ceux de Philippe De Reffye.

¹²⁶ Chercheur à l'UMR AMAP.

Ce détour historique est important pour deux raisons. Premièrement, la « sursimulation » ou « simulation informatique » permet de développer des modèles différents et hétérogènes, et de les associer dans une simulation unique. C'est le principe au cœur de CAPSIS. Sur un modèle de croissance d'arbre, on peut ajouter un modèle de deuxième niveau, comme par exemple un modèle qui simule des interventions sylvicoles (éclaircies et coupe) ou un modèle qui simule la réponse des forêts à des vents de différentes intensités.

Deuxièmement, l'histoire proposée par Franck Varenne montre que ce sont pour des raisons pratiques et économiques (agronomie puis foresterie) que se sont développées les pratiques de simulation informatique, notamment pour optimiser le rendement des caféiers. C'est cette orientation pratique qui peut expliquer également la volonté de ne pas avoir un formalisme mathématique trop rigide dans ces modèles. En effet, en tant qu'historien des sciences et épistémologue, Franck Varenne se concentre sur les différents statuts épistémologiques de ces différents formalismes : modèle mathématique, simulation numérique, simulation informatique, etc. Il retrace alors les débats épistémologiques qui ont eu lieu pour savoir quel statut théorique accorder à la simulation informatique. Mon angle est quelque peu différent, et déplace la focalisation. En effet, il n'est pas ici question de discuter du statut épistémologique de la simulation informatique. Au contraire, il s'agit de la reconnaître comme « pratique scientifique », c'est-à-dire en tant qu'elle renvoie à une réalité sociale. Il ne s'agit pas de décider si les modélisateurs ont le droit – épistémologiquement parlant – d'utiliser la simulation informatique pour faire des « expérimentation virtuelle », mais de constater dans quelle mesure, comment, et dans quelles « situations » ils le font, et d'appréhender leurs pratiques dans ce sens. Sur ce point, on peut se souvenir de la citation de Thomas et Thomas (1928) reprises dans une note de bas de page du chapitre introductif de la *Matérialité des sciences*, ouvrage dirigé par les sociologues de la santé Adèle Clarke et Joan Fujimura (Clarke et Fujimura, 1996, p. 20, note 6) : « Si les gens définissent des situations comme réelles, elles sont réelles dans leurs conséquences ».

b. Le développement de la plateforme CAPSIS

La plateforme de modélisation CAPSIS a été initiée en 1994 sous l'impulsion de Philippe Dreyfus, modélisateur en croissance des arbres à l'INRA Avignon. Comme a pu me le raconter Damien, l'ingénieur informaticien actuellement en charge de la plateforme, CAPSIS

a été lancée pour améliorer le transfert des modèles de croissance entre les modélisateurs eux-mêmes, puis vers les organismes gestionnaires, en première ligne l'ONF. Constatant que les ingénieurs forestiers développaient des modèles chacun de leur côté, Philippe Dreyfus a eu l'idée de « créer un truc réutilisable dans lequel on pourrait mettre de nouveaux modèles », selon les dires de Damien. L'idée originale était de proposer une plateforme où les modélisateurs pourraient héberger leurs modèles de croissance, et les aider dans cette tâche qui nécessite la traduction du modèle en simulateur de croissance.

Si les débuts de la plateforme sont balbutiants, un tournant est opéré lorsque Damien est recruté pour développer et gérer la plateforme en 1999. Damien intègre alors l'Unité Mixte de Recherche (UMR) AMAP. Son premier travail a été d'aller rencontrer physiquement différents modélisateurs, en leur demandant ce qui les aiderait à améliorer leurs travaux. L'idée était de développer un outil simple d'utilisation capable de s'adapter à leurs besoins. C'est dans ce cadre qu'il a rencontré Charles. Les deux hommes se connaissent bien maintenant, et Charles contacte souvent Damien quand il a un problème technique, comme il a pu me le dire : « Bon, maintenant, si tu veux, je me repose pas mal sur Damien. Donc quand je développe des codes un peu compliqués, je vais passer deux ou trois jours avec Damien, et on développe le code ensemble ». Damien aide Charles à développer et écrire son code quand ce dernier est compliqué. Les codes des simulateurs sont de plus en plus compliqués et longs à mesure que le modèle intègre de nouveaux sous-modèles. Et le modèle de Charles n'a eu cesse d'intégrer une cascade de sous-modèles, comme le développement des dendro-micro-habitats, ou la compétition entre différentes essences. Pour Charles, CAPSIS a constitué un « virage technique » dans ses pratiques de modélisation car elle met à disposition des ingénieurs forestiers, peu à l'aise avec la programmation informatique, des outils faciles d'utilisation :

« C'est maintenant une plateforme qui commence à être relativement internationale et dans laquelle Damien, qui est informaticien, fait le cœur. Il prépare beaucoup d'outils qui sont utiles pour les utilisateurs, et les modélisateurs, comme moi, vont développer des modules sur cette plateforme mais en bénéficiant d'outils qui ont été prémâchés par Damien. Donc là, il y a eu un peu un premier virage technique qui a eu lieu avec la possibilité de développer des codes faciles d'utilisation, un programme avec une interface utilisateur facile. Donc c'est un aspect qui est important, à la fois parce que nous à IRSTEA, on veut travailler avec des gestionnaires forestiers, donc là, ça rend ces modèles utilisables. Et puis, pour le chercheur, c'est facile d'utilisation. C'est un peu piloté par un informaticien professionnel, donc il nous a permis d'avoir des outils très performants à ce niveau-là, qui sont toujours en évolution » (Charles, IRSTEA)

CAPSIS a donc été conçue pour faciliter le travail des modélisateurs. La plateforme regroupe des outils de visualisation graphique, des outils de calcul qui permettent aux modélisateurs de réaliser des simulations sans avoir à réécrire ou recoder l'ensemble des fonctions. La plateforme a été également initiée pour améliorer le transfert des modèles vers la gestion. Dans cette perspective, son ergonomie est primordiale dans la mesure où elle est censée faciliter la prise en main par des utilisateurs non-programmeurs. Ainsi, l'interface graphique de CAPSIS joue un rôle important dans son utilisation.

2. Réaliser des « expérimentations virtuelles » : le fonctionnement de CAPSIS

Le terme plateforme renvoie à une infrastructure informatique, ou cyber-infrastructure (Edwards et al., 2007 ; Karasti et al., 2016) où peuvent être stockées des données – ici ce sont des modèles. La plateforme de modélisation CAPSIS est hébergée physiquement sur les serveurs de l'UMR AMAP. Pour avoir accès à la plateforme, il est possible de la lancer *via* un logiciel (encadré 9) qui comporte une interface graphique, *via* l'invité de commande (comme Mathieu, voire l'introduction de la partie II), ou *via* un *install* qui est un logiciel distribué aux membres de la RDI de l'ONF mais qui ne permet pas d'avoir accès au code source. Pour comprendre comment la plateforme CAPSIS facilite le travail des modélisateurs et des ingénieurs forestiers, il est opportun d'analyser précisément l'interface graphique de cette dernière. Je décris dans un premier temps l'interface graphique de CAPSIS, puis j'explique comment elle permet de réaliser des « expérimentations virtuelles ».

Encadré 9 : Algorithmes, logiciels et interface graphique

Un logiciel est un programme qui exécute certaines fonctions automatisées. Le code source décrit son principe de fonctionnement. Le logiciel peut s'exécuter *via* une interface graphique – c'est le cas des logiciels les plus courants de nos ordinateurs. C'est par l'interface graphique que l'on peut commander des tâches au logiciel, mais cela n'est pas obligatoire, on pourrait très bien commander des tâches au logiciel en l'interrogeant *via* l'invité de commande, et en écrivant dans le langage informatique dans lequel il a été développé. Sur son blog, David Monniaux, directeur de recherche en informatique au CNRS à l'Université Grenoble Alpes, utilise une métaphore très parlante pour distinguer algorithme et logiciel : « l'algorithme, c'est un thème musical, le logiciel, c'est l'interprétation complète d'un morceau comportant plusieurs thèmes orchestrés » (Monniaux, 2018). Un logiciel est construit à partir d'un très grand nombre d'algorithmes, comme un morceau de musique est composé d'un très grand nombre de thèmes musicaux, arrangés d'une certaine manière. Comme l'explique D. Monniaux, dans un logiciel, il n'y a pas seulement l'algorithme de fonctionnement – celui qui a été écrit pour réaliser la fonction ou l'opération que l'on souhaite – mais aussi une multitude d'autres algorithmes comme ceux nécessaires à la construction de l'interface graphique, les algorithmes de traitement des bugs ou d'affichage des messages d'erreur.

a. L'interface graphique : favoriser l'appropriation par des non-modélisateurs

L'interface graphique est pensée pour faciliter l'utilisation du logiciel. Au lieu d'avoir à connaître les instructions dans un langage particulier, l'utilisateur, grâce à l'interface graphique, est dans un environnement familier, comme le montre la métaphore bureautique à la base des systèmes d'exploitation les plus utilisés : *Windows*, *Linux* ou *Mac OS* (Masure, 2014). Dans sa thèse en esthétique et en sciences de l'art, Anthony Masure décrit l'émergence de la métaphore bureautique, à partir des années 1970 au *Xerox Palo Alto Research Center*. Le *Xerox Star*, créé en 1981, est le premier ordinateur qui a une interface visuelle qui s'appuie sur la métaphore bureautique : le système de fenêtres et de fichiers, le bureau, la corbeille, la calculatrice, etc. Pour lui, cette interface bureautique témoigne d'un changement dans l'utilisation de l'ordinateur, et d'un passage de l'usage de ce dernier du secteur militaire au secteur administratif (Masure, 2014, p. 201). Ainsi, la forme des interfaces graphiques est tributaire des contextes sociaux et locaux de développement et d'utilisation des programmes et des logiciels. C'est pourquoi l'étude de leur esthétique est un élément important pour comprendre leur fonctionnement. L'image 10 reproduit l'interface graphique de CAPSIS.

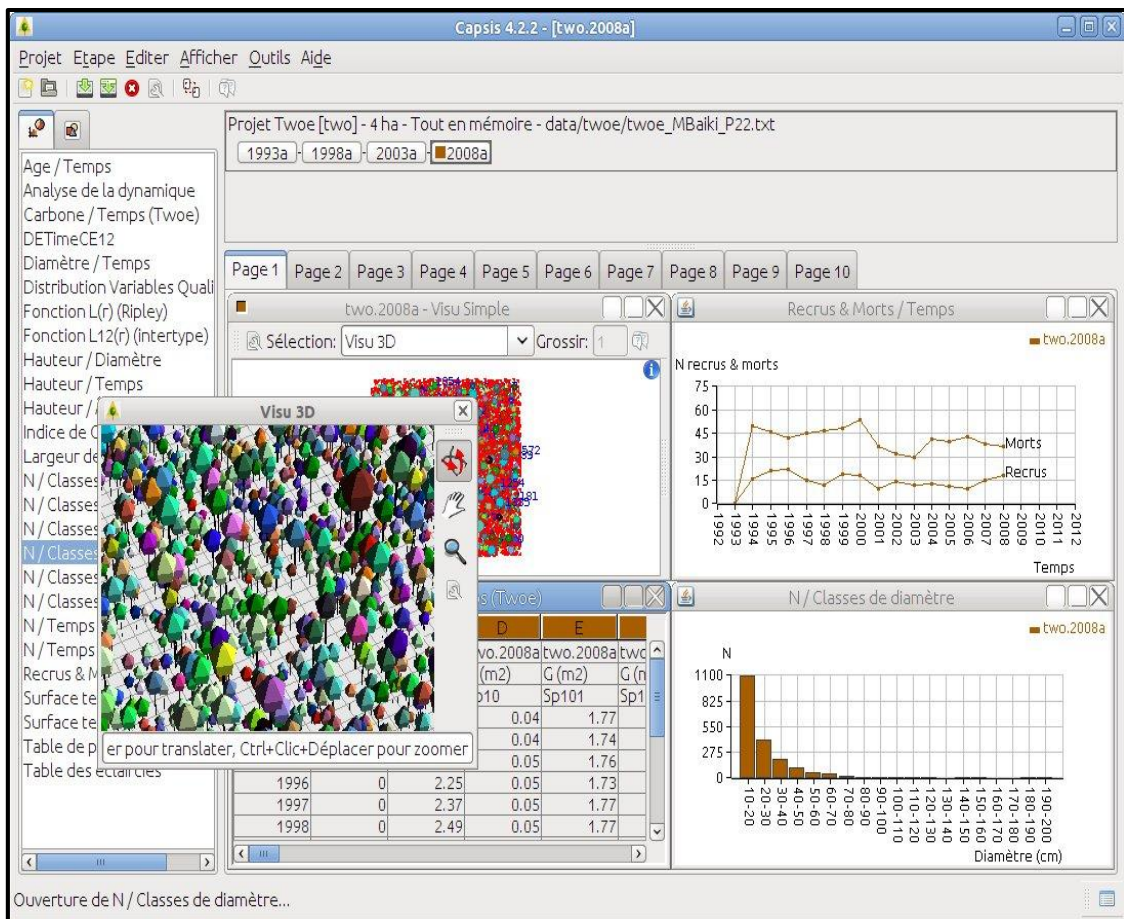


Image 10 : Capture d'écran de l'interface CAPSIS à partir du modèle Twoe de G. Vieilledent

L'intérêt de CAPSIS est de pouvoir transformer les équations de croissance et leurs résultats (objets mathématiques) en différents artefacts graphiques. On peut étudier plus précisément la capture d'écran pour comprendre ce que CAPSIS permet de faire. Quand l'utilisateur lance CAPSIS, il doit d'abord ouvrir un nouveau projet et choisir quel modèle il va utiliser. Ici, il s'agit du modèle de l'écologue Ghislain Vieilledent, *Twoe*, qui calcule à partir de fonctions statistiques la démographie d'une forêt en simulant pour chaque arbre sa croissance, sa mortalité, et le recrutement – c'est un modèle dit individu-centré. Le cadre supérieur indique la période de simulation – 1993 à 2008 – la surface de la parcelle forestière (4 hectares), ainsi que le fichier qui contient les données d'accroissement des arbres. Les calculs sont effectués à partir de ces données d'entrée. Le menu à gauche permet de sélectionner les fonctions de calcul que l'on souhaite appliquer sur les données. Les résultats de ces calculs sont transformés graphiquement et apparaissent dans les différents cadres. On peut voir à droite le nombre de « morts et de recrues », c'est-à-dire le nombre d'individus qui ont dépéri et le nombre de ceux qui ont colonisé la parcelle. Le cadre inférieur indique, pour l'année 2008, le nombre d'individus classés en fonction de leur diamètre. On peut voir que plus de la moitié

des espèces présentes ont un faible diamètre (entre 10 et 20 cm), la forêt comporte donc probablement beaucoup de jeunes individus. La fenêtre au premier plan donne une vision 3D de la forêt en 2008, on y distingue les différentes hauteurs et différents diamètres des arbres.

Si on reprend la métaphore de David Monniaux, le logiciel est « l'interprétation complète d'un morceau [musical] comportant plusieurs thèmes orchestrés », il faut avoir à l'esprit que, même si le morceau musical semble à l'oreille d'une grande simplicité, l'orchestre a dû s'exercer pendant de nombreuses heures pour réussir à jouer le morceau avec harmonie. L'interface du logiciel est souvent dite « *user-friendly* », c'est-à-dire à la fois simple d'utilisation, mais aussi d'un aspect graphique qui est censé ne pas rebuter l'utilisateur. L'interface par laquelle l'utilisateur passe n'est pas un produit dérivé du logiciel, elle est primordiale dans la mesure où elle facilite l'utilisation de ce dernier, mais également, et c'est l'un des points principaux, elle est le lieu où se joue l'expérience de l'utilisateur. C'est pourquoi, en suivant les leçons des *Software Studies*¹²⁷, il ne faut pas réduire le logiciel à un seul assemblage d'algorithmes. C'est une « forme symbolique » qui s'inscrit dans une culture d'utilisation et d'appropriation : « Le logiciel dans son ensemble ne se réduit pas au « code ». C'est une forme symbolique qui implique des pratiques culturelles de son utilisation et son appropriation »¹²⁸ (Cramer, 2008, p.173)

Cette précision fonde l'approche méthodologique de ce chapitre. C'est parce que le logiciel est une « forme symbolique » qu'il est opportun d'analyser comment les modélisateurs s'approprient cet outil, et comment ils racontent leur « expérience » d'utilisation du logiciel CAPSIS. C'est « en situations » de modélisation et d'utilisation de la plateforme CAPSIS que l'on peut saisir comment cette dernière modifie et cadre les pratiques des chercheurs et ingénieurs forestiers.

¹²⁷ Les *Software Studies* regroupent un ensemble de travaux en sciences humaines et sociales qui prennent pour objet les logiciels informatiques, les langages de programmation ou les algorithmes. Elles visent, notamment, à réinscrire ces artefacts informatiques dans leurs conditions sociales de production et d'utilisation pour comprendre leurs éléments sociaux, politiques ou économiques.

¹²⁸ "Software as a whole is not only "code" but a symbolic form involving cultural practices of its employment and appropriation" (Cramer, 2011, p.173).

b. Réaliser des « expérimentations virtuelles » : le raisonnement par abduction

L'un des succès de CAPSIS, chez les gestionnaires notamment, s'explique par son interface graphique qui facilite son utilisation par des acteurs qui connaissent les logiciels bureautiques de base (comme *Excel*), mais qui n'ont aucune connaissance en programmation. Il n'y a pas une seule ligne de code apparente dans l'image 1. Serge, ingénieur forestier à la RDI de l'ONF et rédacteur de guides de sylviculture, passe uniquement par la plateforme CAPSIS quand il utilise des modèles de croissance. CAPSIS lui permet de faire tourner différents modèles, même s'il utilise essentiellement le modèle *Fagacées* qui modélise la croissance du chêne et du hêtre. Serge a été en charge de la rédaction des guides de sylviculture pour la région Grand-Est : dans cette optique, il a travaillé sur le chêne continental. Mais son utilisation des simulateurs de croissance n'est pas circonscrite à un type précis de forêt. Au contraire, tout l'intérêt de CAPSIS est de visualiser et prévoir les évolutions des peuplements selon différents scénarios sylvicoles : « l'intérêt de ce travail est de voir en fonction de la sylviculture, quelle est l'évolution potentielle des peuplements que l'on gérerait selon l'itinéraire que l'on teste dans le modèle ».

Il faut insister sur le type de raisonnement que permet la simulation informatique : on regarde l'évolution selon des scénarios différents que l'on fait varier. En faisant varier les conditions initiales ou les traitements sylvicoles, on peut alors déterminer quelle stratégie sylvicole est la mieux adaptée pour une essence donnée dans un contexte biogéographique et climatique particulier. C'est ce type de raisonnement, proche de l'abduction¹²⁹ en logique, que l'on peut rapprocher de l'expérimentation virtuelle. Ce type de raisonnement est central dans les pratiques d'anticipation des futurs des forêts, dans la mesure où on raisonne sur le modèle du 'que se passerait-il si... ?'.

Cette manière d'utiliser CAPSIS est également mise en avant par les modélisateurs. C'est le sens des propos de Victor qui a travaillé sur le modèle *Fagacées* durant sa thèse. L'une de ses premières tâches a été de porter ce modèle sur la plateforme : « J'ai mis ce modèle dans CAPSIS, et derrière, on [a] fait de l'expérimentation virtuelle, c'est-à-dire qu'on [a] fait de la simulation avec tout un tas de types de sylvicultures différentes, et on [a] regardé. Ça permet de faire pousser les forêts plus vite que dans la réalité... donc c'est de l'expérimentation

¹²⁹ L'abduction est un type de raisonnement qui consiste à poser plusieurs hypothèses explicatives d'un phénomène, et ensuite à tester ces différentes hypothèses successivement pour voir laquelle convient le mieux.

virtuelle ». La simulation informatique permet de multiplier les hypothèses sylvicoles pour visualiser comment le peuplement virtuel va réagir. Et elle permet également de s'abstraire du temps long de l'expérimentation forestière ; si on souhaitait voir dans le cadre d'une expérience concrète et matérielle comment le peuplement forestier va réagir à ce type de sylviculture, il faudrait attendre au moins une cinquantaine d'année. La simulation informatique « crée des objets reconfigurés sur lesquels on peut travailler »¹³⁰ (Knorr-Cetina, 1999, p.29), ces objets deviennent alors scientifiquement manipulables. C'est l'une des fonctions épistémiques que réalise le « laboratoire », et qui peut faire penser que la simulation informatique est une forme de « laboratoire virtuel », j'y reviendrai plus précisément dans la suite de ce chapitre.

L'interface graphique de CAPSIS est fondamentale, car elle permet de visualiser les résultats de la modélisation. L'un des intérêts de CAPSIS est d'appréhender les dynamiques forestières selon certains scénarios sylvicoles, climatiques ou écologiques, grâce à la possibilité d'intégrer des modèles de second niveau, ou « sursimulation ». Voici comment Damien explique ce principe :

« Dans CAPSIS, on met des modèles qui font pousser des arbres. Sur ces modèles qui font pousser des arbres, qui font des forêts virtuelles, tu peux greffer d'autres modèles dessus, par exemple, des modèles de qualité des arbres qui calculent la densité interne ... Ou bien des modèles de risque : comment notre machin résiste au vent en fonction de l'élancement. Ou bien, en montagne, ça va être comment arrêter les chutes de blocs, en fonction de la structure du peuplement ou de la pente... Donc, tous ces trucs-là, ce sont des modèles de deuxième niveau, des modèles de risque ou des modèles de qualité, ou même des modèles économiques qui peuvent être greffés sur les modèles de dynamique et de croissance forestière CAPSIS dans le même simulateur. Donc au final, on peut faire de la simulation sylvicole. Voir si on gère une forêt d'une telle manière, d'après un modèle croissance, qu'est-ce que ça va donner à l'avenir ? En termes de volume, en termes de résistance au vent... Ce sont des modèles de deuxième niveau qui viennent se greffer sur les modèles de CAPSIS, on utilise le même environnement informatique, ce n'est pas plus cher, et tout est dedans »

Le modélisateur a également la possibilité de faire intervenir lui-même, au moment où il le souhaite, des « évènements sylvicoles » : essentiellement des coupes ou des éclaircies. Cela lui permet de voir comment le peuplement virtuel réagit à certaines opérations sylvicoles, et comment il va évoluer sous ces hypothèses. Ces différents tests peuvent alors être sauvegardés et exportés afin d'être traités statistiquement par d'autres logiciels ou d'autres

¹³⁰ "Creating reconfigured, workable objects" (Knorr-Cetina, 1999, p.29)

langages informatiques, comme *R* : « Et dès que c'est nécessaire, on exporte vers des fichiers pour reprendre tout ça dans d'autres utilitaires, à l'extérieur, pour faire de l'analyse plus poussée. On ne fait pas les analyses statistiques poussées dans CAPSIS, ce n'est pas le lieu. On peut les faire dans *R* ou un autre logiciel, peu importe » (Damien). CAPSIS est faite pour produire des données, des scénarios sylvicoles que l'on peut ensuite analyser dans un « autre lieu ». CAPSIS se rapproche bien de la fonction d'une 'paillasse virtuelle', on y produit des données 'expérimentales'.

CAPSIS constitue donc un outil de travail important pour les modélisateurs et ingénieurs forestiers de la RDI de l'ONF, et notamment ceux qui sont en charge des guides de sylvicultures ou de recommandations plus générales sur la politique forestière à mener. Le fait de disposer de plus d'une vingtaine de modèles de croissance opérationnels, d'avoir des modèles de deuxième niveau très divers (modélisation du vent, modélisation de la filière-bois, interception de la lumière, etc.) et de pouvoir associer ces différents modèles, comme le célèbre jeu de construction, en fait un outil central pour anticiper les évolutions des forêts françaises. C'est d'ailleurs le sens qui est donné aux modèles, comme le montre cette citation d'un article portant sur le modèle *Samsara2* :

« Les simulations présentées ici n'ont pas pour but d'aboutir à des préconisations mais plutôt de montrer comment la représentation concrète des résultats d'une stratégie sylvicole permet de réfléchir à ses avantages et ses limites, et permet d'identifier les leviers d'améliorations possibles » (Courbaud et al., 2016, p.12).

Après avoir retracé l'histoire du développement de la plateforme et son fonctionnement, je m'intéresse maintenant plus particulièrement à la place que les acteurs occupent dans cette infrastructure numérique, et comment cette dernière oriente leurs actions possibles.

3. CAPSIS : le modèle social de la plateforme

Les acteurs qui gravitent autour de la plateforme CAPSIS sont divers. Il y a Damien, l'ingénieur informatique en charge du développement de la plateforme, il assure sa maintenance et y ajoute de nouvelles fonctionnalités. Quand un modélisateur souhaite héberger son modèle sur CAPSIS, il rencontre d'abord Damien, et ils codent ensemble le modèle. CAPSIS est développé en *Java*, ce qui n'est pas le cas de tous les modèles. Il peut donc y avoir tout un travail de traduction d'un langage informatique à un autre.

On peut distinguer deux modélisateurs types : ceux qui sont à l'aise avec l'outil informatique et les langages de programmation. Ces derniers sollicitent peu Damien, comme Laurent, le doctorant de Charles. Laurent a travaillé pendant plusieurs années dans le domaine de l'aéronautique avant de se réorienter vers l'écologie forestière. Pour des raisons assez évidentes, on sait que la réduction de l'incertitude est primordiale dans la conception des modèles utilisés dans l'aéronautique, et donc Laurent a été formé à des techniques de modélisation statistique assez complexes – dans sa thèse, il mobilise l'approche dite « Modélisation ABC » ou par calcul Bayésien approché qui permet de « réintroduire de la stochasticité dans les données statistiques ». Non sans une pointe d'ironie, Laurent m'a soutenu ce discours : « Ouais, j'utilise CAPSIS, mais j'ai l'impression que c'est plus moi qui suis un soutien technique à CAPSIS que le contraire ! [rires] ». Charles, quant à lui, est moins à l'aise avec les langages de programmation. Comme je l'ai mentionné plus haut, il fait souvent appel à Damien quand il doit développer son code informatique. Les nombreux papiers où Damien se retrouve co-auteur témoignent de son implication dans la plateforme et de l'aide qu'il octroie aux modélisateurs. Cette mention indique qu'il a joué un rôle non négligeable dans le développement du simulateur :

« Alors tout le monde ne publie pas, mais il y en a qui publient, et on répertorie sur la page CAPSIS, les publications en rapport avec la plateforme. Il y a la nôtre, sur CAPSIS, en 2012.... Là Charles, il a coécrit une grosse étude sur *Samsara2*, où il m'a mis co-auteur. Donc il y a ces sorties académiques... après, moi les modèles, je ne les connais pas, je papillonne, je vais d'un projet à l'autre, je n'ai jamais tout en tête, mais ce n'est pas grave, c'est ça le truc » (Damien, AMAP)

L'une des distinctions que l'on peut donc opérer entre les différents acteurs, hormis leur discipline ou leurs objets scientifiques, concerne donc leur appétence et leurs aptitudes pour l'outil informatique. La connaissance de l'infrastructure est un pré-requis à l'appartenance à la communauté¹³¹ (Edwards, 2002, p. 189). Enfin, il y a les utilisateurs non-modélisateurs, ce sont par exemple les gens de la RDI de l'ONF en charge de la rédaction des guides de sylviculture, comme Serge. Ils n'ont pas construit de modèles, mais ils utilisent ceux de la plateforme pour prévoir la ressource en bois, pour déterminer la date et l'intensité des éclaircies, ou pour simuler l'introduction d'une nouvelle essence forestière.

¹³¹ “Knowledge of infrastructure is [...] a prerequisite to membership.” (Edwards, 2002, p.189)

A l'ONF, l'accès à la plateforme CAPSIS se fait *via* un *install* qui est régulièrement mis à jour. L'*install* CAPSIS permet de faire tourner différents modèles, mais pas tous les modèles. D'après Damien, la dernière version de l'*install* comporte une vingtaine de modèles contre soixante-dix hébergés sur la plateforme. C'est Christine Deleuze, responsable de la RDI de l'ONF, qui opère la sélection selon les besoins de la RDI. L'*install* ne donne pas accès à tous les modèles, ni accès au code source des modèles. Le code source est l'ensemble des algorithmes qui font fonctionner le modèle. Tous les modélisateurs qui hébergent leurs modèles sur CAPSIS ont quant à eux accès au code source de tous les autres modèles de la plateforme. Cela peut s'avérer très utile pour eux car quand ils ne savent pas comment coder une fonction, ils peuvent regarder dans le code source d'autres modèles pour avoir un élément de réponse. C'est l'une des utilisations de CAPSIS que fait Victor, modélisateur à l'IRSTEA :

« La plateforme CAPSIS est particulièrement intéressante, car c'est du code qui est partagé, donc quand j'ai besoin de faire un truc, je vais faire tourner un peu les modèles des copains, et quand il y a la partie qui m'intéresse, et c'est bien l'objectif de la communauté CAPSIS, quand je vois qu'il y a un truc ... alors pas pour le modèle mais pour son implémentation informatique... quand je vois une manière de faire qui m'intéresse, comme on a une hiérarchie, un codage avec des règles assez précises, je sais où trouver l'endroit où ça a été implémenté, et donc je vais dans le code, et je pompe le code du collègue, je le mets dans mon code à moi, je l'adapte pour que ça corresponde à ma situation. C'est la charte CAPSIS qui est bien celle-là. C'est du co-développement, on n'a pas besoin d'aller voir le collègue... alors on peut le faire quand même, et c'est d'ailleurs l'objet des réunions CAPSIS, de dire : « ah au fait, ton truc c'était super intéressant, je l'ai pris, et je l'ai mis dans le mien aussi ! ». Ce que les autres font me permet d'avancer plus vite. Et donc, il y a beaucoup de choses dans CAPSIS qui m'ont permis d'avancer de cette manière-là. Et qui nous affranchit d'avoir recours à un informaticien tant que c'est dans les limites de ce qu'on est capable de faire » (Victor, IRSTEA)

Victor évoque un point primordial : la charte de CAPSIS. La charte de CAPSIS mentionne ce qu'il est possible de faire, et ce qu'il n'est pas possible de faire. Elle définit les normes qui structurent la communauté CAPSIS. Tout modélisateur qui souhaite héberger son modèle dans CAPSIS doit d'abord accepter la charte. La charte définit également des 'profils' d'acteurs différents : développeur, modélisateur et utilisateur qui n'ont pas accès aux mêmes données de la plateforme, comme le code source des modèles. J'insiste sur le terme 'profil' qu'il faut distinguer de l'acteur. Par acteur, je me réfère aux personnes qui gravitent autour de CAPSIS. Ils se définissent par une discipline et un objet scientifique, par un rôle dans la connaissance des forêts (gestionnaire ou modélisateur) et par une appétence et une aptitude par rapport à l'outil informatique. Le 'profil' ne renvoie pas à une personne physique. Le profil ou 'profil-utilisateur' est « un ensemble de données qui influence le comportement d'un

dispositif informatique en fonction de l'utilisateur »¹³². Le profil est donc entièrement défini par l'artefact informatique. Dans le cas de CAPSIS, la charte distingue trois profils différents : développeur, modélisateur et utilisateur.

Dans la plupart des artefacts informatiques, les profils se construisent d'après la licence choisie. La licence détermine l'utilisation d'un artefact informatique ou numérique. Peut-on accéder à son code source ? A-t-on le droit de reprendre des lignes du code source pour un autre logiciel ou un autre programme ? Peut-on modifier son code source ? Toutes ces questions ont leur réponse dans le choix de la licence. Définir la licence de l'artefact informatique est donc primordial, et c'est elle qui règle les relations sociales qui se jouent dans et autour de l'artefact informatique.

L'organisation de la plateforme CAPSIS repose sur une distribution hiérarchique de rôles sociaux. Il existe trois profils d'utilisateurs différents : le développeur, les modélisateurs et les utilisateurs finaux. Chaque profil a des droits d'accès différents à la plateforme. Le développeur et les modélisateurs ont accès au cœur de la plateforme et à l'ensemble des modèles hébergés sur la plateforme. Ils ont accès aux codes sources des simulateurs de croissance. Les utilisateurs finaux, quant à eux, n'ont accès qu'à l'*install* CAPSIS qui permet de faire tourner les simulateurs de croissance, mais à partir duquel il n'est pas possible de consulter l'architecture et le code source des simulateurs. Ainsi, les profils d'utilisateurs traduisent une distribution particulière du travail scientifique. Chaque nouvel utilisateur doit signer la charte CAPSIS qui rappelle notamment cette distribution des rôles mais qui précise également des engagements politiques qui fondent la « philosophie » de la plateforme : le cœur de CAPSIS, ce qu'on appelle en informatique le *Kernel*, c'est-à-dire le noyau du logiciel, est sous licence libre (*LGPL Licence* ou *GNU*). Les modèles et les simulateurs, quant à eux, sont la propriété des modélisateurs et de leur centre de recherche, c'est à eux que revient la décision de diffuser librement ou non leur travail. A plusieurs reprises, Damien a insisté sur le fait que le travail est mené en « co-développement », pas question pour lui de construire le simulateur tout seul. Il le fait avec le modélisateur, et il assure par la suite un suivi régulier avec ce dernier qui peut le contacter pour tout problème technique.

¹³²https://fr.wikipedia.org/wiki/Profil_utilisateur

La partition des rôles est, ainsi, clairement établie, et lors de notre entretien, Damien a insisté plusieurs fois sur le rôle qui était le sien, rôle dicté par le mandat de recherche qui définit son poste : « Oui, voilà, je suis en appui à la modélisation, c'est très important ! C'est vraiment un appui ! C'est dans le mandat de recherche ». Charles a été l'un des premiers modélisateurs à travailler avec Damien sur CAPSIS, il a d'ailleurs une belle image pour illustrer leurs relations de travail : « Dès que ça devient trop technique, maintenant je le fais en collaboration avec Damien, je ne le fais plus tout seul. Et donc, moi, j'arrive avec mes équations, et ça, Damien ne serait pas du tout à même de les faire, car ce n'est pas un spécialiste des dynamiques de la forêt, mais lui, par contre, il me les met en musique ». Si on prolonge la métaphore, d'une certaine manière, Charles est le compositeur, c'est lui qui écrit la partition – les équations – tandis que Damien serait le chef d'orchestre, et le simulateur – l'orchestre – joue le morceau. La métaphore utilisée met sur le même plan le modélisateur, l'informaticien, les équations mathématiques et écologiques, et le simulateur de croissance.

Les artefacts informatiques circulent donc dans différents univers sociaux qui déterminent les normes et les conventions qui cadrent l'écriture, l'exécution, la circulation et l'appropriation du code informatique : « Le code [informatique] en tant que matériau ne peut être dissocié des normes, conventions et structures d'autorité. Ces normes opèrent à différentes échelles qui vont de la réglementation nationale, des conditions de travail de l'industrie du logiciel et des sous-cultures d'Unix¹³³ et de Perl¹³⁴ aux conventions et usages établis des interfaces utilisateur des ordinateurs »¹³⁵ (Mackenzie, 2006, p.41-42).

Il y a une organisation interne à la plateforme CAPSIS qui définit des actions possible, des règles et des conventions. C'est pourquoi le terme de « plateforme » me semble adéquat pour décrire CAPSIS, son organisation et son fonctionnement. Le chercheur en communication et en humanités numériques Tarleton Gillespie (2010) s'est intéressé au terme « plateforme » et ses différentes significations. Il retrace notamment les évolutions du terme en langue anglaise, et montre que ce terme ne renvoie pas à une organisation neutre, mais à une organisation hiérarchisée en architecture. Dans son utilisation dans le contexte politique, ce terme renvoyait à la scène sur laquelle les hommes politiques tenaient leurs discours. Il note

¹³³ Famille de systèmes d'exploitation

¹³⁴ Langage de programmation

¹³⁵ "Code as a material cannot be disentangled from norms, conventions and structures of authority. These norms work at different scales, ranging from state regulation, software industry work conditions and subcultures of Unix and Perl to the conventions and embodied habits of PC-Users interfaces" (Mackenzie, 2006, p. 41-42)

d’ailleurs l’utilisation de l’expression « La plateforme de Cambridge » – « *The Cambridge Platform* » (Gillepsie, 2010, p.350) qui renvoie au projet politique de gouvernance de l’Eglise porté par les ministres puritains de la Nouvelle-Angleterre coloniale en 1648. A partir de cette généalogie du terme « plateforme », il montre la distance entre le discours des promoteurs de plateforme, comme *Youtube*, qui se présentent comme de simples intermédiaires, et la réalité des effets organisationnels et structurants de ces plateformes qui hébergent les contenus multimédias. Il ne serait pas opportun de comparer CAPSIS aux plateformes en ligne comme, *Youtube* et *Spotify*, qui structurent la production, la circulation et la consommation des contenus culturels en ligne, et orientent les actions des utilisateurs par les recommandations basées sur les algorithmes¹³⁶. CAPSIS est une plateforme au sens où elle a une structure interne hiérarchisée qui détermine les rôles et les actions des différents ‘profils’ d’utilisateurs, mais elle ne s’inscrit pas dans la logique économique et standardisatrice des plateformes de consommation de produits culturels.

B. Le package *OnfR* : infrastructure informatique du département RDI de l’ONF

Le package *OnfR* est un artefact informatique utilisé par le département RDI de l’ONF. Je vais expliquer plus en détail à quoi il sert, mais d’abord, il convient de donner quelques précisions concernant le langage informatique *R* qui est de plus en plus utilisé aujourd’hui dans la recherche scientifique – *R* est le 7^{ème} langage de programmation le plus utilisé en 2018¹³⁷, et sa place serait sans doute supérieure si le classement portait sur les langages de programmation utilisés dans la recherche scientifique, et plus particulièrement pour l’analyse de données statistiques.

¹³⁶ Dans une conférence tenue dans le cadre des journées d’étude “Governing by prediction ? Models, data, and algorithms in and for governance” (2017), le sociologue du numérique Dominique Cardon montre comment ces plateformes s’appuient sur les historiques d’écoute ou de visionnage des utilisateurs, déterminent des *profils* de consommateurs, et orientent ainsi les suggestions d’écoute. Ces suggestions reposent alors sur le principe qu’on aimera ce qu’on aime déjà, et entraînant ainsi une consommation standardisée des produits culturels, où la surprise de la découverte, hors des sentiers battus, n’est plus possible. Cette conclusion est, néanmoins, mon opinion personnelle sur le sujet, et non pas celle de Dominique Cardon.

¹³⁷ <https://spectrum.ieee.org/at-work/innovation/the-2018-top-programming-languages>

1. Le langage informatique *R* et les packages

Pour construire un simulateur de croissance, il faut implémenter les équations mathématiques de croissance dans un langage informatique. Cette traduction s'effectue du langage mathématique au langage informatique. Il existe de nombreux langages informatiques, on peut citer par exemple *C++* qui est le langage à la base de l'interface *Windows*. Lors de mon enquête, les modélisateurs qui ont construit des simulateurs de croissance ont utilisé essentiellement trois langages : le *Turbo-Pascal*, *Java* et *R*. Le *Turbo-Pascal* est le plus vieux des trois, il a été créé dans les années 1980. Ce langage était souvent utilisé dans l'enseignement pour apprendre la programmation aux étudiants, il a été remplacé, par exemple, par *Python*. Le langage *Java* apparaît quant à lui dans les années 1990, au moment de la création puis de la popularisation d'internet. *Java* s'est alors constitué comme un langage adéquat pour le développement Web.

Le langage *R* a été mis au point par deux statisticiens de l'Université d'Auckland¹³⁸. Ils cherchaient à développer un langage capable de traiter efficacement de grandes bases de données statistiques. Pour faciliter son utilisation, les développeurs ont décidé d'en faire un langage interprété, c'est-à-dire qu'il interprète directement le code pour exprimer les données de sorties sans passer par un compilateur qui oblige le programmeur à rédiger l'intégralité du code avant de pouvoir voir le résultat. L'interface utilisateur – la manière dont le programmeur commande le langage – est une interface commande, à la manière de l'invité de commande *Windows*. Le langage a été mis au point en 1993, et sa promotion s'est d'abord faite dans des revues spécialisées d'informatique ou de statistique. La licence de *R* est libre, *GNU GPL*, c'est-à-dire que le code source est disponible et qu'il peut être réutilisé et modifié par les utilisateurs sans autorisation préalable.

Aujourd'hui, le langage *R* est un langage très utilisé dans le travail scientifique : en statistiques, en *data-science*, en bio-statistiques, en écologie, en sciences forestières. Cela est dû au fait que *R* réussit à analyser efficacement de très grandes bases de données. *R* traite et organise les données sur la base du calcul matriciel, permettant d'organiser facilement les bases de données en valeur et variable, et de réaliser des opérations logiques sur ces dernières. Ce bref historique du langage *R* montre qu'il a été développé par des statisticiens pour des

¹³⁸<https://cran.r-project.org/doc/html/interface98-paper/paper.html>

statisticiens. On comprend alors pourquoi il est très utilisé aujourd'hui en modélisation et en écologie forestière, et cela est lié à la multiplication des données informatisées dont j'ai déjà montré l'importance dans le chapitre précédent.

OnfR est une librairie ou « *package* » (encadré 10) – un ensemble de fonctions déjà écrites et codées – du langage informatique *R* qui a été développé par deux ingénieurs de l'ONF, et qui est utilisé aujourd'hui par l'ensemble des départements RDI de l'ONF. Comme le montre l'encadré 10, les *packages* comportent de nombreuses informations sur les développeurs, les fonctions qu'il contient, la version de *R* compatible avec le *package*, etc. Ces informations sont primordiales pour faciliter l'installation et l'utilisation du *package*. Elles confèrent également une certaine traçabilité dans la mesure où on peut identifier qui a développé le *package*, et qui est en charge de sa maintenance.

Encadré 10 : Les packages R : l'exemple de *biomod2*

Un *package* est un ensemble de fonctions qui ont été codées et développées par des développeurs qui les mettent à la disposition de l'ensemble de la communauté des utilisateurs de R. Pour installer un *package*, l'opération est très simple. Il suffit d'entrer dans la commande la fonction « *install.package*(« *nom du package* ») » pour que R récupère le *package* et l'installe sur l'ordinateur. Avec l'opérateur « ? » suivi du nom du package (ex : « *?biomod2* »), on peut avoir des informations sur ce que contient ce package. On peut aussi se rendre sur la page du site CRAN (Comprehensive R Archive Network : <https://cran.r-project.org/>) qui répertorie l'ensemble des *packages* développés et partagés. En dessous, je reproduis quelques lignes de la page CRAN du package *biomod2*, package développé par l'écologue et statisticien Wilfried Thuiller pour construire des modèles d'aires de répartition d'espèces, dont on a vu exemple avec le projet CARBOFOR.

“*biomod2*: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling”

Functions for species distribution modeling, calibration and evaluation, ensemble of models.

Version: 3.3-7

Depends: R (≥ 3.2.1), stats, utils, [sp](#), [raster](#), parallel, [reshape](#), [ggplot2](#)

Imports: [abind](#), [rasterVis](#), [pROC](#), [nnet](#), [gbm](#), [mda](#), [randomForest](#), [rpart](#), [MASS](#),
methods, [PresenceAbsence](#), [dismo](#), [maxent](#), [earth](#)

Suggests: [ade4](#), [foreign](#), [Hmisc](#), [mgcv](#), [gam](#), [testthat](#), [ecospat](#), [caret](#)

Published: 2016-03-01

Author: Wilfried Thuiller [aut, cre], Damien Georges [aut, cre], Robin Engler [aut], Frank Breiner [aut]

Maintainer: Damien Georges <damien.georges2@gmail.com>

Contact: WilfriedThuiller<wilfried.thuiller@ujf-grenoble.fr>, Damien Georges <damien.georges2@gmail.com>

BugReports: <https://r-forge.r-project.org/R/?group_id=302>

License: [GPL-2](#)

NeedsCompilation: no

Materials: [NEWS](#)

CRAN checks: [biomod2 results](#)

La page CRAN réunit un ensemble d'informations utiles comme la version du *package*, les auteurs, la date de publication, le type de licence, le lien pour télécharger le package ou l'adresse à contacter si on constate un bug dans le *package*. Il est également possible de télécharger les anciennes versions ou le manuel d'utilisation. Tous les manuels d'utilisation des packages R sont écrits de la même manière. Sur la première page, on donne les informations essentielles du package. Ensuite toutes les fonctions contenues dans le *package* sont décrites. On précise leur but, leur syntaxe, leur auteur et un exemple. Toutes ces métadonnées participent au succès du langage R dans la mesure où elles permettent une meilleure appropriation par les utilisateurs. Deux types d'acteurs différents sont mentionnés dans la description du package. Les auteurs du package (*authors*) et le « responsable de la maintenance » (*maintainer*) à contacter s'il y a un problème avec le package.

2. Le package *OnfR* : organiser et structurer le travail de la RDI

Martin et Richard sont tous deux utilisateurs de *R*. Richard a intégré l'ONF, il y a six ans et il s'y occupe, notamment, des formations en statistique. Avant d'entrer à l'ONF, il a « multiplié les contrats en analyse de données ». Martin a utilisé *R* dès sa thèse pour coder des fonctions, puis il a développé des *packages* quand il a travaillé à l'IFN. Quand il est entré à l'ONF, il a continué à travailler sur les questions d'analyse de ressources, et il a « commencé par développer des outils pour [lui], et petit à petit les [a] partagés. Cela a pris assez rapidement la forme d'un *package* qui est [devenu] *OnfR* ». Petit à petit, le *package* s'est enrichi de diverses fonctions. Aujourd'hui il est l'un des outils principaux de travail du département RDI de l'ONF. Voici comment Martin explique le fonctionnement du *package OnfR* :

« Faut bien comprendre que là, on est dans un outil qui a été développé au sein d'un réseau qui s'appelle Recherche-Développement, et ce n'est pas pour rien... le but est à la fois de conduire des expérimentations statistiques sur des questions...il y a tout un tas de corpus de fonctions qui sont dans le *package* qui sont vraiment spécifiques et dédiées aux essais RD de l'ONF, dans le traitement des données, des normes sylvicoles, ce qui encadre les plans d'échantillonnages. Et tout cela sert à faire du développement de nouveaux modèles qui servent à proposer de nouveaux guides de sylviculture...ça va du lien entre chercheurs jusqu'aux outils »

Le *package* « va du lien entre chercheurs jusqu'aux outils », car il se constitue comme base de travail commune pour le département RDI et rassemble également des fonctions utiles aux chercheurs. Le *package OnfR* est composé de fonctions qui permettent d'analyser, notamment les données récoltées lors des expérimentations sylvicoles menées par le département RDI de l'ONF. Il peut s'agir d'expérimentations d'éclaircies, de mélanges d'essences, de conduites de peuplement à faible densité. A partir de ces expériences menées sur les placettes expérimentales du département RDI, comme à Fontainebleau, des données sont récoltées : type de peuplement, âge des arbres, hauteur, diamètre, surface terrières, etc... Toutes ces données étaient, à la base, recueillies dans un document *Excel*, la plupart du temps sauvegardé sur l'ordinateur de la personne chargée d'effectuer les mesures. Bien que les *packages R* soient libres, et donc sont censés s'adresser à toute la communauté des développeurs, il faut bien comprendre que le *package OnfR* est surtout un outil de travail du département RDI de l'ONF, comme le précise bien Martin :

« Le package *OnfR* dispose de tout un tas d'outils qui en dehors de l'ONF, et plus particulièrement de la RDI de l'ONF, n'ont pratiquement aucun intérêt. Je veux dire, c'est par exemple l'écriture des essais ONF, ça n'intéresse que les gens de la RDI de l'ONF, et pourtant cela est fondamental pour une cinquantaine de personnes qui mesurent les essais, qui font remonter les mesures, qui doivent homogénéiser tout cela. Donc les fonctions que l'on peut développer peuvent avoir énormément de raisons et de buts différents. Donc il n'y a pas une raison pour laquelle on va choisir une fonction, ça dépend quel outil on veut développer. Typiquement, si on prend les essais de la RDI de l'ONF, le besoin derrière, c'était de se dire que chacun faisait son fichier *Excel* dans son coin, et dès qu'on voulait commencer à travailler avec différents essais de différentes personnes à différents endroits, il n'y avait pas de fichier père, et on avait besoin de reprendre toute la structure globale de tous les essais, en faire une structure commune pour qu'on puisse tout attaquer de manière générique. Donc on a mis à la fois les outils pour regrouper les fichiers, et les outils pour aller attaquer après ces fichiers regroupés, et les charger de manière automatique. Ça, c'est un exemple, mais c'est fondamental, car ça a vraiment amélioré la qualité du travail et du stockage de l'information de la RDI » (Martin, IGN)

Le problème de la récolte des données expérimentales de la RDI est que chacun effectue son travail de son côté, sans que les fichiers où les données apparaissent ne soient homogènes. J'ai déjà insisté sur l'importance de l'homogénéisation des données dans la construction des modèles. Il faut un long et patient travail d'harmonisation car les données proviennent de sources très différentes : données IFN, données de gestion, données expérimentales, etc. Pour que le modèle puisse tourner avec ces données, il faut donc les formater et les harmoniser. On comprend pourquoi il était important de trouver un moyen d'automatiser la mise en forme des données, ainsi qu'un endroit pour les stocker, c'est l'une des utilités du package *OnfR*. Cela réduit les 'frottements causés par les données'. De plus, *OnfR* facilite le travail à distance entre différentes équipes. C'est bien encore, l'une des caractéristiques des infrastructures telles qu'elles ont été pensées par S. L. Star et K. Ruhleder (1996)

Richard m'a parlé également de « sécurisation des données », car « dans Excel, si la personne s'en va, on finit par perdre les données », et on connaît l'importance de l'archivage des données sur la durée pour pouvoir construire des modèles robustes intégrant des données de long terme. Le package *OnfR* dépasse alors la simple « boîte à outil » et apparaît plutôt comme une véritable infrastructure du département RDI de l'ONF. Il règle le partage et la communication des données, et donne aux membres de la RDI des fonctions types pour calculer, par exemple, les tarifs de cubage*¹³⁹. Les deux auteurs ont même mis un accès via *R* à tous les *pdf* rédigés par le département RDI. Le package *OnfR* est une sorte

¹³⁹ Les tarifs de cubage présentent les volumes de bois escomptés selon l'essence et l'âge de cette dernière. Ils se présentent sous la forme de tableaux chiffrés, semblables aux tables de production.

d'environnement de travail pour les chercheurs de la RDI. Il structure les activités des membres de la RDI dans la mesure où l'échange des données et leur harmonisation passent, aujourd'hui, nécessairement par lui.

3. *OnfR : structurer une communauté d'utilisateurs*

On entrevoit déjà quelques différences entre la structuration et le développement de CAPSIS et du *package OnfR* qui était une initiative personnelle et dont le développement s'est fait de manière incrémentale. Si *OnfR* a pour objectif de faciliter le travail des ingénieurs de la RDI (formatage et archivage des données, accès à différentes fonctions statistiques dans le même environnement de travail), l'objectif des deux développeurs était également de pouvoir structurer une communauté d'utilisateurs autour d'un outil commun. C'est d'ailleurs le sens des propos que Martin m'a tenus lorsqu'il raconte comment il a présenté le *package* aux différents membres de la RDI de l'ONF :

« On a fait des formations spécifiques, notamment pour l'utilisation de ce *package*, car à un moment donné, il faut expliquer aux gens ce qu'il y a dedans et comment ça marche. Donc on se retrouve à faire ce genre de choses : de la formation, de la communication autour de cet outil. On discute des évolutions, et on essaie de dresser des perspectives communes pour tout un groupe d'utilisateurs pour savoir dans quelles directions ça va évoluer » (Martin, IGN)

Le point important ici est la volonté, chez Martin, de « dresser des perspectives communes pour tout un groupe d'utilisateurs ». Le *package OnfR* vise aussi à fédérer une communauté d'utilisateurs autour de lui afin d'organiser le travail en commun. Il faciliterait alors la collaboration. Ces moments de discussion autour du *package OnfR* sont importants pour deux raisons. Premièrement, ils permettent aux différents acteurs de se coordonner sur des projets ou des activités en commun. Deuxièmement, ces moments sont primordiaux dans le développement et la publicisation d'un nouveau « standard » qu'on souhaite faire adopter par d'autres utilisateurs.

Sur ce point précis, on peut convoquer les analyses de Florence Millerand et de ses co-auteurs (2013) qui se sont intéressés au développement d'une base de données en écologie. Afin de standardiser la manière dont on récolte les données (les informations récoltées mais aussi le format des données), le *National Center for Ecological Analysis and Synthesis*

(NCEAS) a lancé un format informatique, *Ecological Metadata Language* (EML) qui vise à standardiser le recueil et l'archivage des données écologiques. Les auteurs montrent que l'introduction de ce métalangage est d'abord racontée comme un succès. Les développeurs et utilisateurs insistent sur la manière dont les données sont mieux récoltées et homogénéisées. Puis, un autre récit apparaît et montre que tout n'est pas encore acquis, et qu'il y a encore des problèmes locaux dans l'utilisation de ce nouveau langage.

L'intérêt de cet article est de montrer que les processus de standardisation, que la manière dont on adopte un standard, doit s'accompagner d'un récit qui explique non pas le fonctionnement du métalangage, mais la manière dont ce métalangage peut être utilisé. Il doit porter un récit sur les promesses qu'il peut apporter. Les récits autour des artefacts informatiques ont également une place capitale dans la mesure où ils visent également à fédérer une communauté d'utilisateurs en présentant, souvent, l'artefact comme un outil révolutionnaire qui va rendre le travail des modélisateurs plus facile – c'est le récit de la promesse technologique. Ces récits circulent la plupart du temps dans les réunions, les colloques scientifiques, et les formations, comme cela a été le cas pour le développement du package *OnfR*, ou de la plateforme CAPSIS.

Les auteurs mettent en avant la distinction opérée par le sociologue américain C. Wright Mills entre « *trouble* » (souci) et « *issue* » (problème). Le souci a une dimension individuelle et personnelle tandis que le problème a une dimension sociale et collective. L'article se réfère à un exemple développé par Mills : le fait d'être sans emploi est un souci individuel, tandis que le chômage est un problème collectif. Pour passer du souci d'être sans emploi au problème collectif du chômage, il faut qu'un récit émerge pour lier la condition individuelle avec la dimension collective. Si je suis un jeune diplômé sans emploi, ma condition devient un problème à condition qu'émerge un récit sur la précarité des jeunes diplômés qui s'insèrent difficilement au marché du travail. Eu égard au développement du métalangage des données écologiques, les auteurs insistent sur le passage d'un récit qui présente le métalangage comme un succès et comme une opportunité d'homogénéiser les données et d'améliorer les collaborations à un récit d'un « succès qui doit arriver » qui intègre alors tous les soucis locaux qu'ont pu rencontrer les acteurs, comme le fait que le format ne colle pas aux données que je récupère, ou que le modèle ne reconnaisse pas l'extension informatique du nouveau fichier de données.

Par ce détour théorique, on comprend alors l'importance des récits mobilisateurs pour qu'un standard ou une technologie soit adopté. Il y a un travail d'explication et de promotion nécessaire pour que le standard soit adopté par une communauté d'utilisateurs. Avant de gagner du temps grâce à l'utilisation de ce standard, il faut nécessairement en perdre un peu pour en faire la promotion et réussir à fédérer une communauté d'utilisateurs autour de ce dernier. C'est bien le sens que Martin confère à l'expression « dresser des perspectives communes ». Ces moments d'échange, formels ou informels, sont importants pour la structuration et le développement de ces artefacts informatiques. Les utilisateurs de CAPSIS se rencontrent tous les ans pour présenter leurs travaux : ce sont des moments d'échange mais aussi des moments propices au développement de nouvelles collaborations.

C. CAPSIS et *OnfR* : des « laboratoires virtuels » ?

Le tableau 2 résume les différentes caractéristiques des deux artefacts informatiques.

	CAPSIS	<i>OnfR</i>
Points communs		
<ul style="list-style-type: none"> - Objectifs : structurer une communauté d'utilisateurs - Artefacts qui facilitent le travail : ce sont des 'standards' qui visent à réduire les 'frottements causés par les données'. - Artefacts qui visent à faciliter le transfert des résultats de la recherche vers la gestion. 		
Différences		
Type d'artefact	Plateforme de modélisation	Infrastructure
Rôles sociaux des utilisateurs de la plateforme	Il y a une hiérarchisation des rôles qui est assurée par la charte d'utilisation.	Tout utilisateur a la possibilité de modifier le <i>package</i> . C'est une structure décentralisée.
Logique de développement de l'artefact informatique	1/ Développé dans le cadre d'un projet de recherche et piloté par un laboratoire. C'est une commande. 2/ Un ingénieur est officiellement responsable du développement et de la maintenance de la plateforme.	1/ C'est une initiative personnelle de François. 2/ François et Martin ont fait la promotion du <i>package</i> auprès des différents membres de la RDI, par un discours portant sur la promesse d'amélioration du travail de la RDI.
Communauté d'utilisateurs	Plus de 70 utilisateurs, en France et à l'international	Utilisation à l'intérieur de la RDI de l'ONF / assez confidentiel

Tableau 2: Points communs et différences de CAPSIS et *OnfR*

Cette présentation de CAPSIS et d'*OnfR* m'amène à proposer, en conclusion de cette première partie, une discussion d'un concept central en histoire et en sociologie des sciences : celui de « laboratoire ». Le laboratoire a pu être interprété comme un lieu de production du savoir scientifique, lieu matériel et situé dans une histoire spécifique. Les auteurs en sociologie des sciences qui représentent ce qu'on a pu appeler le « tournant pratique » (Schatzki, Knorr-Cetina and Von Savigny, 2001) déplacent l'angle d'analyse en s'intéressant aux fonctions épistémiques et sociales remplies par le laboratoire. Le laboratoire n'est plus un lieu circonscrit spatialement et matériellement, mais un « processus » (Knorr-Cetina, 1999, p.45) par lequel un objet devient scientifiquement manipulable. Cette conception du laboratoire comme « unité relationnelle » a également été mobilisée par la chercheuse en *Science Studies*, Martina Merz, qui montre que la simulation en physique peut être interprétée de cette manière (Merz, 2006). C'est une conception « relationnelle » du laboratoire qui est défendue par Karin Knorr-Cetina :

« Les laboratoires [sont] des unités relationnelles qui gagnent en puissance en instituant des différences avec leur environnement : différences entre les ordres reconfigurés créés en laboratoires et les conventions et arrangements de la vie quotidienne, mais bien sûr aussi les différences entre les configurations contemporaines des laboratoires et celles qui existent ou ont existé en d'autres temps et en d'autres lieux »¹⁴⁰ (Knorr-Cetina, 1999, p. 44-45)

Cette notion de reconfiguration de l'ordre sociotechnique, permise par et au sein du laboratoire, est en accord avec la manière dont Franck Varenne définit la simulation informatique: « La simulation permet de s'affranchir des contraintes techniques inhérentes à la mise en forme des êtres vivants complexes dans la réalité: la longue durée, le passage du temps » (Varenne, 2007, p.138). L'objet ainsi reconfiguré devient manipulable. Et cela est d'autant plus important pour les ingénieurs et chercheurs forestiers dont l'objet d'étude, les forêts, se déploie dans temporalité longue. C'est parce que le laboratoire est compris comme une « unité relationnelle » dans une perspective méthodologique où on s'intéresse aux pratiques scientifiques qu'on peut prétendre que la simulation informatique est un « laboratoire virtuel ». C'est d'ailleurs le sens des propos du sociologue des sciences Dominique Vinck qui explicite l'intérêt des études sociales des sciences, pour une approche du laboratoire comme lieu social des pratiques scientifiques :

« Cet intérêt pour le laboratoire s'explique par le déplacement de l'attention des aspects institutionnels vers le travail scientifique, ses contenus et ses processus. Il conduit aussi à s'écarter d'une analyse qui indexe les phénomènes sur des facteurs sociaux, cognitifs, techniques et naturels, parce que ces dimensions sont associées en situation » (Vinck, 2007, p. 235).

L'analyse sépare des éléments et des dimensions qui sont « en situation » inséparables. C'est cette proposition méthodologique que j'adopte dans la suite de ce chapitre: faire porter l'analyse sur « la modélisation et la simulation en situations ».

¹⁴⁰ “Laboratories [are] *relational* units that gain power by instituting *differences* with their environment: differences between the reconfigured orders created in the laboratory and the conventions and arrangements found in everyday life, but of course also differences between contemporary laboratory setups and those found at other times and places.” (Knorr-Cetina, 1999, p. 44-45)

II. Etudier la modélisation et la simulation « en situations » : ouvrir les « boîtes grises » des chercheurs forestiers

Pour comprendre plus précisément comment les pratiques des modélisateurs forestiers mobilisent les outils informatiques, il semble méthodologiquement opportun d'analyser comment, « en situations », ils travaillent avec ces derniers. On peut envisager trois situations différentes :

A/ Le choix du langage informatique dans lequel on souhaite coder le modèle, et les difficultés de traduction d'un langage à un autre.

B/ Les collaborations qui s'opèrent autour d'un modèle ou d'un *package*. Comment les modélisateurs réussissent-ils à articuler leurs actions pour travailler, souvent à distance, sur le même objet ?

C/ L'interprétation des résultats du modèle : comment être sûr que la sortie du modèle est cohérente avec l'objectif de connaissance fixé ? Comment distinguer le 'bug' de la 'variable' ?

A. Choisir son langage : raisons pratiques et habitudes de programmation

Le choix du langage de programmation est important car tous les langages ne permettent pas de réaliser aussi facilement les mêmes opérations, et leur grammaire varie d'un langage à l'autre. On distingue les langages compilés et les langages interprétés. Dans les langages compilés, le code source est assemblé par un autre logiciel qui traduit le code écrit en instructions élémentaires compréhensibles par un processeur. Cette opération implique qu'il faille écrire l'ensemble du code informatique avant de pouvoir produire les données de sortie. C'est le cas du langage C++. Dans les langages interprétés, les instructions sont données les unes à la suite des autres. Ainsi, il n'est pas obligatoire d'écrire l'ensemble du code pour avoir

les données de sortie, et pratiquement, on peut vérifier que le code est écrit correctement et fonctionne à chaque ligne. Les langages interprétés sont par exemple *Python* ou *R*. La plupart des modélisateurs que j'ai rencontrés utilise des langages interprétés ou des langages stricts, car ils sont plus faciles à manier dans la mesure où on peut toujours savoir ce que la ligne de code va faire comme opération. Dans la mesure où les modélisateurs forestiers n'ont pas tous des connaissances approfondies en informatique – et ce n'est pas leur métier comme certains me l'ont souvent rappelé – ils se tournent plutôt vers des langages qui ne sont pas compilés. C'est ce qui explique le choix de Damien de développer la plateforme CAPSIS en langage *Java*. Voici comment il explicite son choix :

« Le grand concurrent de Java, c'était le C++, une évolution du langage C, orienté objet, qui a pris un langage qui n'était pas strict, et ils en ont fait un truc pas strict et compliqué. Avec C++, on peut faire des choses très bien, mais il faut plus de compétences. Et tu risques de faire des choses qui vont planter, plus difficile au début, et tu fais moins vite des choses plus robustes. Ça gênera pas des techniciens, des informaticiens, mais si tu prétends faire développer des gens qui ne sont pas informaticiens... du coup, tu vois par exemple, Charles qui n'a pas trop la fibre informatique, et c'est bien normal, il a la tête ailleurs, il a la tête à ses questions centrales : comment poussent les arbres ? .. Eh, bien, lui, il arrive quand même à bricoler des scripts en *Java*, à créer des sorties à partir des scripts que je lui fais. En C++, il aurait cinquante problèmes à la minute. Alors que là, il a des infos du genre : à telle ligne, vous avez un souci, là où C++ aurait bloqué l'application... Donc c'est un truc clef, bonnes propriétés annexes, par exemple, multiplateforme. Je suis tout seul et je développe une application qui marche sur Windows, Linux, et Mac Os. Et ça, c'est un point très important, car je leur dis qu'ils peuvent continuer à utiliser leur système d'exploitation, ils ne sont pas obligés d'installer je-ne-sais-pas-quoi en *double boot* ... donc voilà, un langage strict et accessible à des non-informaticiens, et justement accessible parce que strict » (Damien, AMAP)

Le langage strict signale à son utilisateur toute erreur commise dans les lignes de code, comme une fonction mal écrite ou une boucle non fermée. Si Damien reconnaît que le langage C++ est sans doute plus puissant que *Java* et qu'il permet de faire plus de choses, ce n'était pas ce qui importait le plus pour le développement de CAPSIS. L'important était que le langage de programmation soit accessible à des « non-informaticiens ».

Le choix du langage informatique est donc primordial car certains langages permettent de faire certaines choses que d'autres ne font pas, ou plus difficilement. Laurent utilise *R*, car c'est un logiciel très performant pour l'analyse statistique. Le sujet de thèse de Laurent concernait l'extension du modèle *Samsara* sur un nouveau contexte forestier, et plus seulement sur les forêts alpines. Pour réaliser cette opération, il a dû créer un gradient

environnemental c'est-à-dire mettre en relation des conditions climatiques et des types de peuplements forestiers. Ce travail nécessite de traiter un très grand nombre de données d'inventaire et de données de gestion pour trouver des correspondances entre les types de peuplements et les conditions climatiques. Le gradient établit une liaison stable entre peuplement et condition climatique qui permet ensuite de faire tourner le modèle *Samsara* sous différentes conditions climatiques. Ainsi, son choix s'est porté tout naturellement sur le langage *R*, langage qu'il a appris en Master « Biodiversité et Environnement » à Grenoble. Il utilise essentiellement *R*, car il lui permet de faire « plein d'autres choses » – il peut d'ailleurs lancer le modèle *Samsara* via *R* car il existe des « passerelles » (Edwards et al. 2007) entre *R* et *Java*. On choisit donc son langage comme on choisit un outil, selon la tâche que l'on souhaite réaliser. Néanmoins, la plupart des modélisateurs commencent souvent à développer leurs modèles dans le langage qu'ils ont appris durant leurs études. Apprendre un nouveau langage, c'est souvent apprendre une nouvelle syntaxe et une nouvelle grammaire, même si certains langages se ressemblent eu égard à leur logique interne, c'est-à-dire la manière dont ils manipulent des objets, comme *R* et *Python*.

Charlotte a programmé son modèle en *Delphi*. Pour pouvoir l'héberger sur la plateforme CAPSIS, il est nécessaire de traduire le modèle en *Java*. Pour réaliser cette opération, Charlotte et Damien vont réaliser plusieurs sessions de travail, comme me l'a dit Damien : « on y est depuis le mois de janvier. Donc comme elle est juste à côté, elle revient tout le temps et on se fait des sessions. Et là depuis le mois de juin en fait, on fait la finition du modèle qui depuis septembre fonctionne de manière impeccable ». Il aura donc fallu huit mois pour que le modèle de Charlotte soit traduit en *Java*, et opérationnel via CAPSIS. Cette opération de traduction d'un langage informatique à l'autre peut donc se révéler être chronophage.

Ainsi, la multiplicité des langages de programmation disponibles peut constituer un frein aux collaborations scientifiques, ils peuvent causer des 'frottements' dans le bon fonctionnement des infrastructures de recherche. L'encadré 11 reproduit l'extrait d'entretien où j'interroge Charlotte sur la multiplicité des langages informatiques qui existent dans les pratiques de modélisation des ingénieurs et chercheurs forestiers.

Encadré 11 : La multiplicité des langages informatiques : « c’est comme si, un jour, je parle français, et le lendemain, je dois apprendre le chinois » (extrait d’entretien avec Charlotte)

« Alors, oui, c’est un peu un problème d’avoir autant de langages. Alors CAPSIS est en *Java*. Donc ça veut dire que j’ai dû me former à *Java*, alors que je ne connaissais pas trop ce langage, mais il y a un ingénieur informaticien qui s’occupe de CAPSIS avec qui, d’ailleurs, je code la nouvelle version du modèle sur CAPSIS, et qui pourra m’aider dans les développements futurs, parce que c’est un modèle qui va continuer à avancer. C’est comme si un jour je parle français, et le lendemain, je dois apprendre le chinois quoi ! Oui, c’est un problème, et on ne pourra jamais le résoudre. En fait, j’ai fait un logiciel aussi en *Delphi* qui est un peu une plateforme de modélisation mais dédiée à la phénologie qu’on a décidé de porter sur les plateformes de modélisation de l’INRA, il y en a trois. Il y en a une qui est en *C++*, il y en a une qui est en *Python* et la troisième, c’est CAPSIS qui est en *Java*. Enfin, voilà, c’est pour dire que ces problèmes de langage en modélisation, c’est quand même un frein. C’est un frein parce qu’honnêtement le logiciel en question, on en a fait une traduction en *C++*, donc elle est actuellement sur l’une des trois plateformes, la plateforme RECORD, elle doit aller sur les deux autres, et là on a une réunion jeudi pour essayer de voir comment on va faire. Est-ce qu’on passe par des aspects techniques qui vont nous permettre d’avoir une seule version ? Ou est-ce qu’on recode tout ? Et puis après il y a le problème de la traçabilité, parce que l’outil dont je parle va continuer à évoluer, donc c’est quoi la version de référence ? Il faut répercuter ensuite tous les changements sur les différentes plateformes, c’est compliqué hein ! Donc oui c’est compliqué, c’est sûr...
[rires]... ces histoires de langages.... »

CAPSIS n’est pas la seule plateforme de modélisation de l’INRA. On peut citer *Record*, plateforme qui sert à modéliser les agro-écosystèmes qui est programmée en *C++* ou la plateforme *OpenFluid* qui permet de simuler les échanges de flux de matière dans un paysage. Plusieurs problèmes apparaissent quand il s’agit de traduire un modèle d’un langage à un autre, comme le montre l’encadré 11. Pour que le modèle de Charlotte puisse être hébergé sur différentes plateformes de modélisation qui ne sont pas développées dans le même langage, il faut les traduire dans le langage de la plateforme. Il y a également des problèmes liés à la traçabilité du modèle. Quelle sera la version de référence du modèle si on le traduit dans un autre langage pour le porter sur une autre plateforme, mais qu’entre-temps, le modèle initial a subi d’autres modifications ? Tous ces problèmes techniques nécessitent des coordinations entre les différents acteurs, car, comme on l’a vu précédemment, dans les « cyber-infrastructures », tout problème a une solution sociale et technique. Ici, le problème doit être résolu lors d’une réunion entre les différents acteurs qui développent les plateformes et ceux qui codent les modèles.

Ainsi, traduire un modèle d'un langage à un autre langage est une opération chronophage, car les syntaxes des langages ne sont pas les mêmes, que ce soit les opérateurs ou la structure du langage (comment les lignes de codes s'enchaînent et selon quelle logique). La traduction d'un langage est un phénomène qui produit nécessairement des « frictions computationnelles » – « *computational friction* » – pour reprendre le terme employé par P. Edwards (2010) :

« Les systèmes d'information transforment les données (entre autres) en informations et en connaissances. La friction computationnelle s'oppose à cette transformation. Elle exprime la résistance qui doit toujours être surmontée, la lutte sociotechnique avec les chiffres qui précède toujours la récompense. La friction computationnelle réduit la quantité d'informations et de connaissances que l'on peut extraire d'une donnée déterminée. Ingénieurs, mathématiciens, informaticiens, etc., passent beaucoup de temps à chercher des moyens pour la réduire »¹⁴¹ (Edwards, 2010, p.84)

Tout comme les « frictions de données » consomment du temps humain, chercheurs et ingénieurs forestiers dépensent de l'énergie à réduire les « frictions computationnelles », liées, par exemple, à la traduction du modèle d'un langage à un autre. Ce n'est qu'après cette étape nécessaire que « vient la récompense » : le simulateur fonctionne.

Aussi, pour améliorer les collaborations scientifiques, permettre une prise et une compréhension d'un autre utilisateur sur le modèle est important. D'ailleurs, c'est pourquoi Martin et Richard ont choisi de développer un package *R*. La transparence du langage *R* explique également le succès de son utilisation dans le RDI de l'ONF. L'opérateur « ? » permet d'avoir directement des informations sur les fonctions : ce qu'elles permettent de faire, et quelles sont leurs règles d'écriture (quelles classes d'objet ? quelles syntaxe ? un exemple, etc.). C'est l'une des raisons de l'utilisation du package *R* à l'ONF :

« Et le fait aussi que les fonctions soient transparentes, c'est-à-dire si vous tapez la fonction, vous avez le code qui vous apparaît, de sorte que vous savez ce que vous faites, ce n'est pas une boîte noire comme en *C++* par exemple ... » (Richard, ONF)

Le langage *R* n'est pas une « boîte noire » car les fonctions sont transparentes. En effet, il faut se départir d'une interprétation classique qui considère les modèles ou les artefacts

¹⁴¹ “Information systems transform data (among other things) into information and knowledge. Computational friction opposes this transformation ; it expresses the resistance that must always be overcome, the sociotechnical struggle with numbers that always precedes reward. Computational friction reduces the amount of information and knowledge that can be extracted from a given input; engineers, mathematicians, computer scientists, and others spend a great deal of time seeking ways to reduce it.”(Edwards, 2010, p.84)

informatiques comme des « boîtes noires ». Au contraire, l'enquête sociale sur ces artefacts montre plutôt que certains acteurs privilégient des langages transparents où certaines fonctions ne sont pas encore totalement stabilisées. On le verra dans la suite de ce chapitre, pour faciliter le travail en collaboration, certains modélisateurs ne stabilisent pas à dessein certaines procédures pour permettre aux autres utilisateurs de comprendre, d'appréhender et de modifier l'artefact en question. C'est l'enjeu des paragraphes suivants qui montrent que ces artefacts informatiques sont plutôt des 'boîtes grises'.

B. Les métadonnées : rendre visible le « travail inachevé »

L'encadré 11 met en avant un élément important dans le développement et l'amélioration des modèles : la question de la traçabilité des versions. Pour rendre les modèles plus facilement appropriables par d'autres utilisateurs, il existe différentes informations¹⁴² – que l'on peut appeler 'métadonnées' – qui facilitent la compréhension et l'utilisation de ces derniers. Les métadonnées occupent une place fondamentale dans la possibilité de réappropriation des modèles, des données (Goëta, 2018), et plus généralement de tout travail scientifique (Edwards et al., 2011).

1. L'importance de la traçabilité : l'archivage des versions

Les logiciels, comme les modèles, sont en constante évolution. On corrige les bugs, on implémente de nouvelles fonctions. Ces évolutions se matérialisent dans la version du modèle, ou du logiciel, qui a la forme suivante : « Nom du logiciel 2.4.4 ». L'écriture décimale permet de rendre visible l'amplitude des modifications apportées. Le passage de la version 1.0 à la version 2.0 signifie un changement important dans l'architecture du logiciel, dans ses nouvelles fonctionnalités, tandis qu'un passage d'une version 2.0 à 2.1 indique des modifications légères comme la correction de quelques bugs. On peut prendre comme exemple les différentes versions de CAPSIS explicitées sur le site-web de la plateforme¹⁴³ :

« La version originelle, CAPSIS 2.4, exploitait des modèles de croissance de type « arbre indépendant des distances » (MAID), ou de type « peuplement », ou mixte « arbre / peuplement », pour peuplements réguliers

¹⁴² On le verra dans la suite du chapitre : les métadonnées ne sont pas de simples informations stabilisées, mais bien des processus

¹⁴³<http://capsis.cirad.fr/capsis/presentation>

mono-spécifiques. Chaque modèle était établi pour une essence donnée par des équipes de recherche de divers organismes. Un prototype a ensuite été construit pour les modèles individuels, Capsis 3.0.

Depuis 1999, la nouvelle version est nommée Capsis 4, elle peut traiter les modèles de croissance de type « Arbre Indépendant des Distances » (MAID) et « Arbre Dépendant des Distances » (MADD), avec ou sans spatialisation. Elle remplace les versions précédentes de Capsis. Certains modèles ont fait l'objet de migrations depuis les anciennes versions vers Capsis4. » (CAPSIS)

Le paragraphe détaille trois versions successives de CAPSIS : la version 2.4, la version 3.0 et la version 4. Les changements dans les unités témoignent de modifications majeures apportées dans la plateforme. La version 2.4 permet de simuler la croissance d'arbres « indépendants des distances » et dans des peuplements réguliers mono-spécifiques. La version 3.0 permet d'intégrer des modèles individuels, ou individus-centrés, comme le modèle *Samsara* : on simule le développement de chaque arbre. Enfin la dernière version, la 4.0, permet la spatialisation des arbres, on peut donc simuler les interactions des arbres entre eux, mais simuler les évolutions d'une forêt particulière, grâce à l'intégration des données SIG (Systèmes d'Informations Géographiques).

En recherches forestières, ce sont les modèles de prévention des risques (interception de chute de bloc ou des avalanches) qui accordent le plus d'importance à l'archivage des différentes versions pour des enjeux de responsabilité des chercheurs appelés à remplir des missions d'expertise auprès des pouvoirs publics ou d'entreprises de construction. En effet, avant de construire un bâtiment sur une zone où il pourrait y avoir des risques d'éboulement, le maître d'ouvrage peut utiliser un modèle d'interception de chute de bloc pour voir si la forêt de protection en amont joue bien son rôle, et protège le futur bâtiment. Or les connaissances évoluent, les puissances de calcul augmentent, et les modèles s'affinent. L'expertise menée avec le modèle il y a des années peut s'avérer aujourd'hui défailante. Dans cette perspective, comme me l'a dit Baptiste, modélisateur à IRSTEA sur l'interception des chutes de blocs par les forêts de protection, il est obligatoire d'archiver toutes les versions précédentes du modèle, et essayer de se « replacer dans les connaissances de l'époque » pour comprendre ce qui a été défailant, et qui en est le responsable : est-ce que le maître d'ouvrage a construit un bâtiment dans une zone où il savait que le risque était trop grand ? Est-ce que l'état passé de nos connaissances nous empêchait d'apprécier rigoureusement les risques de construire dans cette zone ? L'archivage des versions est primordial dans le domaine des risques naturels, comme le dit Baptiste : « si dans trois ans, il y a un contentieux dans l'expertise, il faut qu'on soit capable d'utiliser les mêmes données qu'à l'époque, utiliser le même modèle, se remettre dans les situations de connaissances de l'époque ». L'archivage et

la traçabilité des différentes versions des modèles peuvent avoir ainsi des objectifs scientifiques, ou juridiques. Néanmoins, même dans ce cas, on voit que la traçabilité et la mise en visibilité de l'historique de développement est régie par la distribution des rôles sociaux opérée par l'artefact informatique. Seuls les chercheurs ont accès à ces informations, les gestionnaires ayant entre leurs mains la version finale.

La version du logiciel ou du modèle donne un nom à celui-là, et matérialise son stade de développement. Ce n'est pas la seule métadonnée existante qui donne des informations sur le contexte de développement et l'utilisation du modèle, du logiciel ou du *package*. Si on reprend l'encadré 11 qui retranscrit la page *CRAN* du package *biomod2*, on voit l'ensemble des métadonnées nécessaires pour caractériser cette librairie : la version, les auteurs, la date de création, la documentation, les fonctions, les liens pour le télécharger. Toutes ces informations permettent à la fois d'identifier le contexte de production du *package*, mais aussi d'aider l'utilisateur à s'en servir, et lui permettre de signaler de possibles bugs à ses développeurs. Il faut donc insister sur le fait que la mise en visibilité des étapes de développement de l'artefact et des fonctions qu'il contient est tributaire de la licence qui est inscrite dans l'artefact. Une autre pratique informatique permet d'améliorer les collaborations scientifiques, et donc de réduire les « frictions computationnelles », c'est le cas des *commit*, actes d'écriture qui se situent à l'intérieur du code source, sans pour autant que ce soient des lignes exécutables.

2. Les 'commit' comme acte d'écriture : rendre visible l'inachevé du travail scientifique

Avant de détailler plus précisément l'importance des métadonnées et des *commit* dans le développement du code informatique, j'aimerais dire quelques mots sur la manière dont j'ai découvert le package *OnfR*, et comment j'ai pu contacter leurs auteurs. Le package *OnfR* est mentionné par le Rapport d'Activité de l'ONF pour la période 2010-2014 (Dhôte et al., 2014). En cherchant plus d'informations sur ce package, je suis tombé sur le compte *Github* de l'un des développeurs. *Github* est une plateforme d'hébergement web pour le logiciel de « *control version* » *Git*. Un logiciel de *control-version* permet d'indiquer toutes les modifications effectuées sur un fichier informatique par un développeur grâce à un système qui archive les

différentes versions et précise les modifications apportées. Imaginons que cinq chercheurs coécrivent un article de recherche. Or, ils peuvent difficilement se rencontrer physiquement, car ils habitent chacun dans un pays différent. Si les cinq chercheurs travaillent en même temps sur le même fichier, comment s'assurer que les modifications qu'opèrent le chercheur 1 dans le document seront bien prises en compte par le chercheur 2 ? Comment s'assurer que le chercheur 3 a bien accès à la dernière version du document ? C'est pour empêcher ces conflits entre des versions concurrentes que le logiciel *Git* a été inventé. Il permet au chercheur 1, après avoir fait ses modifications, de transmettre la nouvelle version du document. Grâce au logiciel *Git*, le chercheur 2 peut s'assurer que le document qu'il a téléchargé, est bien la dernière version du document. *Git* identifie les conflits de version qui peuvent exister quand deux chercheurs modifient en même temps le document. Il indique alors que les versions ne sont pas concordantes, et les chercheurs peuvent résoudre le conflit grâce à une transaction de résolutions de conflits. La plupart du temps, quand les *packages*, *plugins* ou logiciels, sont libres, les développeurs mettent en accès libre sur leur compte *Github* l'intégralité du code source, ainsi que l'ensemble des modifications apportées. C'est ce que j'ai trouvé concernant le package *OnfR*. Je suis tombé sur la page *Github* de l'un des deux développeurs, et j'ai pu avoir accès à l'ensemble des modifications opérées dans le *package*, et à ce qui a changé dans les différentes versions.

Mon idée a été de contacter les deux développeurs pour un entretien. Je voulais connaître le contexte de production du package *OnfR*, mais aussi comparer leurs discours avec les évolutions matérialisées dans l'historique des modifications disponibles sur *Github*. Je pense que l'étude sociale des artefacts informatiques a, grâce à ces métadonnées, un matériau d'analyse précieux pour comprendre comment sont développés ces artefacts, pourquoi ils le sont, et dans quelles communautés de recherche ils s'inscrivent et circulent – dans l'idée qu'il convient de ne pas s'intéresser uniquement à ce qui se joue dans le langage et dans le code, mais aussi à conférer une place à tout ce qui se joue autour. Je vais prendre successivement des exemples du développement du package *OnfR* pour décrire la manière dont ces métadonnées nous donnent une prise sur ces artefacts.

Encadré 12 : un exemple de message de *commit* (extrait du package *OnfR*)

2015-01-13 Martin X<martin.x@onf.fr>

* Ajout des projections guyanaises (RGFG95, WGS84 zones 21N et 22 N)

* Version 0.6-4

L'encadré 12 présente l'une des modifications opérées par le développeur. Il y a toujours les mêmes informations : la date de modification, le nom de l'auteur, et l'adresse-mail pour le contacter. Ces informations, métadonnées, confèrent au code informatique une traçabilité, et donc concourt à sa stabilité.

Dans un article sur la pratique du *commit* dans le développement d'un logiciel, Stéphane Couture (2012), chercheur en humanités numériques, s'intéresse à la manière dont le code informatique se développe de manière collaborative. Pour lui, les actes d'écriture comme « la signature ou l'étiquetage », « confèrent au code source la stabilité nécessaire à sa force régulatrice » (Couture, 2012, p. 25). L'intérêt des *packages*, ou des *plugins*, réside dans le fait qu'ils circulent accompagnés de métadonnées qui donnent une prise aux développeurs et modélisateurs afin qu'ils puissent s'en saisir, les modifier et les comprendre. Dans cette perspective, il faut se départir de l'image latourienne de la « boîte noire » comprise comme artefact sociotechnique qui cristallise les arrangements scientifiques et confère à l'artefact sa stabilité qui lui permet de s'inscrire dans le monde social – j'y reviendrai dans la conclusion de ce chapitre.

Le signe « * » (encadré 12) indique un commentaire. Martin explique qu'il a ajouté les « projections guyanaises », et qu'elles ont ensuite été implémentées dans une nouvelle version du *package*, la version 0.6-4. Le code RGFG95 renvoie au Système d'Informations Géographiques (SIG) qui modélise la géographie d'une partie de la Guyane. Ce SIG permet ensuite de spatialiser les données récoltées par l'ONF Guyane. Quand ils effectuent des mesures sur les forêts guyanaises, l'infrastructure SIG permet aux agents de l'ONF d'indiquer le lieu où ont été réalisées les mesures. Le SIG permet de localiser précisément où les données ont été récoltées, et on peut ensuite les intégrer dans un modèle de croissance, un modèle d'aires de répartition ou un modèle d'évaluation de la ressource forestières, tous ces modèles sont alors spatialement explicites. Le SIG revient à géolocaliser les données récoltées, et les

modèles. Ici le commentaire « Ajout des projections guyanaises » ne signifie rien de plus que ce qui a été ajouté dans le *package*, en ce sens, il prend le statut de métadonnées. L'encadré 13 comporte d'autres informations utiles pour la communauté d'utilisateurs.

Encadré 13 : Les *commits* structurent les relations sociales des collectifs (extrait du package *OnfR*)

2013-02-21 Martin X <martin.x@onf.fr>

* Ajout d'une liste 'dico_rd' contenant les deux data.frame extraits des deux feuilles du fichier Excel 'dico_var_rd.xls'

L'extraction est facile, la mise à jour le sera donc.

* Le fichier onfR-package a été modifié "accordingly" pour inclure la doc de 'dico_rd'

* + modif mineure de read.onf.R

* Il est temps de prendre quelques vacances...

Quelles modifications ont été apportées le 21 février 2013 ? La première ligne indique l'ajout d'un *data-frame*, c'est-à-dire une structure de données qui permet l'homogénéisation des données récoltées par les agents de l'ONF. Le développeur ajoute « l'extraction est facile, la mise à jour le sera donc ». Ce second discours a un autre statut que la première ligne. Il ne s'agit pas seulement de mentionner la modification qui a été réalisée, mais également de qualifier son statut. La mise à jour est facile à effectuer. Si l'utilisateur (ici les membres de la RDI de l'ONF) rencontre des difficultés à mettre à jour le *package*, cela n'est pas normal, il devrait ainsi contacter Martin. Cette précision déborde du langage informatique purement technique, il précise les conditions d'utilisation, et indique la norme d'utilisation : il devrait être simple de l'installer. De la même manière, la dernière phrase « Il est temps de prendre quelques vacances ... » déborde aussi du langage purement technique. Par cette phrase, le développeur indique à la fois tout le travail qui a été effectué – après tout cela, les vacances sont sans doute bien méritées. Il pourrait aussi indiquer des informations concernant sa place dans le collectif, dans les jours à venir : le développeur prend quelques vacances, il ne serait pas disponible pour aider les utilisateurs s'il y a un souci avec le *package*. Cette métadonnée ne peut se comprendre que si on fait référence à la communauté d'utilisateurs dans laquelle il prend forme. C'est en ce sens que l'on peut dire que le statut des *packages* ou des *plugins* ne peut être défini comme une « boîte noire ». C'est d'ailleurs les propos que m'a tenu Martin, l'un des développeurs du package :

« Donc, c'est au-delà de juste mettre à disposition un outil, ce n'est pas une boîte noire, comme il y a un langage qu'on puisse partager, on développe ces outils et on fait des formations pour expliquer comment ça marche en fonction du langage » (Martin, déjà cité plus haut)

Ainsi, l'enquête sociologique sur les artefacts informatiques comme CAPSIS et *OnfR* met en visibilité un processus de stabilisation qui est différent du processus de traduction et d'incorporation convoqué par le concept de "boîte noire". La « boîte noire » acquiert sa stabilité par un processus d'invisibilisation des collaborations, des traductions et des arrangements sociotechniques. Ici, les métadonnées participent à un processus de mise en visibilité des collaborations, des acteurs et des évolutions de l'artefact. La transparence permet l'appropriation de l'outil par la communauté, et la fédère autour de ce dernier. La stabilisation de l'artefact, des rôles sociaux et des relations de travail s'effectue par la mise en visibilité des échanges et des discours des membres de la communauté.

Les métadonnées ont un rôle important dans la mesure où elles renseignent sur l'état du travail scientifique, indiquent que modèles et artefacts informatiques ne sont pas des « boîtes noires » où tout est stabilisé. En fait, il faudrait plutôt interpréter les métadonnées non pas comme des 'données' – comme des résultats stabilisés – mais plutôt comme des « processus ». C'est le sens qui est donné par P. N. Edwards et ses co-auteurs (Edwards et al., 2011) : les métadonnées sont une « forme de communication scientifique » : « [considérer] les métadonnées comme un processus implique de [prendre en compte] le rôle capital des pratiques *ad hoc*, des informations incomplètes et des agendas inachevés dans le travail scientifique quotidien »¹⁴⁴ (Edwards, et al., 2011, p.685). Les métadonnées matérialisent l'inachevé du travail scientifique. Elles ne sont pas de simples informations, mais bien « une forme particulière de communication scientifique » qui permet aux scientifiques de collaborer et de coordonner leurs actions dans une perspective de co-développement. Les métadonnées peuvent alors être interprétées comme des collaborations scientifiques indirectes.

¹⁴⁴ “Metadata-as-process suggests the very large role of ad hoc practices, incomplete information, and unfinished agendas in everyday scientific work.” (Edwards et al., 2011, p. 685).

C. ‘Bug’ ou ‘variable’ ? Le modélisateur face au résultat de son modèle

Les modèles et les simulateurs forestiers jouent un rôle prépondérant dans l’anticipation des futurs des forêts, car les écosystèmes forestiers ont des temporalités longues d’évolution, et parce que l’anticipation des futurs des forêts est une pratique qui fait face à un avenir incertain et pluriel. On peut alors se demander ce qui fait que les ingénieurs et chercheurs forestiers ont confiance dans le résultat de leur modèle, sachant qu’ « un modèle sort toujours un résultat », comme me l’ont dit plusieurs modélisateurs. Une nouvelle fois, je pense que l’étude de la « modélisation et la simulation en situations » peut donner des pistes de réponses à ces questions qui sont fondamentales, car les politiques d’anticipation forestières ont besoin de résultats fiables pour agir dès maintenant afin d’adapter les forêts aux changements climatiques à venir. L’interprétation experte du résultat du modèle peut, alors, constituer un frein à l’utilisation de ces derniers par la gestion forestière.

Comment être sûr que les résultats du modèle ne soient pas aberrants ? Qu’est-ce qui permet de dire à un modélisateur que son modèle est fiable ? Ces questions renvoient à d’autres types et sources de connaissances sur les trajectoires forestières, qui vont être confrontées et combinées aux résultats des modèles. Pour discuter de ce point, j’aimerais ouvrir mon propos avec un extrait de l’entretien que j’ai mené avec Victor, modélisateur à IRSTEA qui travaille sur la productivité des forêts mélangées (encadré 14).

Encadré 14 : Est-ce que les arbres poussent *ad vitam ad aeternam* ? (extrait d'entretien avec Victor)

« Il y a des courbes de croissance pour le chêne qui sont des courbes à asymptote oblique. Ce sont les courbes de Duplat notamment. Tu as la courbe de hauteur dominante du peuplement, elle a une forme sinusoïdale au début, et puis souvent les courbes de croissance en hauteur qui ont une forme sinusoïdale, elles ont une asymptote horizontale. Et celle-là, elle a une asymptote oblique. En fait, ce sont des données qui sont issues de mesures rétrospectives, d'analyse de tiges. Donc, tu connais l'analyse de tige ? Ce sont des arbres qui sont vieux aujourd'hui, et donc on a retracé la croissance en hauteur par analyse de tige. Sauf que la question que l'on se pose, c'est pourquoi une asymptote oblique ? Peut-être que tu as normalement une asymptote horizontale pour cette espèce, mais comme tu as eu des changements de productivité, tu t'es décalé au fur et à mesure. Et dans le temps, ça fait une asymptote oblique ! L'asymptote oblique signifie que le peuplement va pousser en hauteur tout le temps, il ne s'arrête pas de pousser en hauteur, il n'y a pas de hauteur limite pour l'arbre ! C'est difficile à imaginer ! Alors ... est-ce que biologiquement, c'est réaliste ? Parce que qu'est-ce qui empêcherait cela ? si la colonne d'eau, il faut la faire monter, donc tu as de plus en plus de pression pour que l'eau monte de plus en plus haut. Mais intrinsèquement, si la plante arrive à attirer son eau, pourquoi elle s'arrêterait de pousser ? Et la question est de savoir : est-ce que l'arbre ne tombe pas avant à cause de propriétés mécaniques ? Il est trop lourd, il va se casser la gueule. Plus on monte, plus l'effet du vent va être important. Donc est-ce que si on n'observe pas de la croissance oblique, c'est parce que les arbres tombent avant à cause d'aléas ? Ou parce qu'ils ne peuvent pas pousser *ad vitam* ? Ou est-ce qu'en fait, ils poussent *ad vitam*, et on les récolte avant ? Ce sont des questions qui sont C'est rigolo quoi ! »

Qu'est-ce qui empêcherait que les arbres poussent *ad vitam ad aeternam* ? Il faut prendre au sérieux cette question qui ferait sûrement hurler n'importe quel écologue. Les courbes de croissance du chêne de Duplat, ou tables de production, ont une asymptote oblique, ce qui signifie mathématiquement que la croissance en hauteur du chêne tend vers l'infini. Peut-on alors en déduire la signification biologique selon laquelle le chêne peut croître infiniment ? Comment comprendre ce résultat contre-intuitif ? Le modélisateur propose une alternative. Soit le chêne pousse biologiquement à l'infini, mais sa croissance peut être limitée par des facteurs mécaniques comme la pesanteur ou la force du vent, ou des facteurs sylvicoles, on a coupé l'arbre pour le récolter. C'est pourquoi on n'aurait jamais vu un chêne qui ne s'arrête pas de pousser. Soit c'est la courbe asymptotique oblique qui est fautive, car le modèle a été construit à partir de données d'inventaire qui couvrent un large spectre temporel, environ une centaine d'années, et que pendant cette période, la productivité de l'essence n'a pas été constante. Des facteurs climatiques ou biogéographiques, comme l'augmentation des températures ou l'acidification des sols ont pu modifier le potentiel productif des stations, qui n'est donc pas constant mais qui a été traité comme tel dans la

méthode d'analyse de tige. Le fait que Victor pose clairement l'alternative et explore les différentes explications possibles témoigne de l'importance de ce raisonnement dans le travail de modélisation. Si je veux savoir si mon modèle « colle à la réalité biologique » de mon objet, ce n'est pas seulement par l'entremise d'une expérience cruciale, ou d'une confrontation de mon modèle avec le terrain, mais c'est une articulation entre les différents éléments du problème, et entre les différentes sources de connaissance sur les forêts, incluant des formes de connaissance expérientielle et de 'bon sens', qu'il faut prendre en compte. Que peut-on retenir de ce premier exemple de situation où le modélisateur est dans l'embarras face au résultat graphique proposé par son modèle ?

Premièrement, on voit l'importance que prend l'interprétation de la courbe dans la détermination de la qualité du modèle et des résultats qu'il produit. « Si un modèle sort toujours un résultat », ce dernier peut être significatif ou absurde. Comment décider ? C'est le modélisateur lui-même qui en dernière analyse juge si sa courbe est en adéquation avec la réalité biologique et physiologique de l'espèce étudié. On rejoint alors les analyses de Lorraine Daston et de Peter Galison (2007) quand ils ont montré l'importance du « jugement exercé » dans la construction de l'objectivité scientifique. L'imagerie scientifique produite par des outillages technologiques, ici l'ordinateur, s'inscrit dans ce régime d'objectivité où en dernière analyse, c'est l'œil expert, entraîné et habitué du scientifique qui juge de la qualité du résultat. L'habitude et l'expérience jouent également quand il s'agit de déterminer un 'bug' ou une 'variable'. Dans ce sens, les termes 'variable', 'bruit' et 'bug' n'ont pas une signification générale, mais une signification locale. C'est en vertu d'un problème particulier, d'un système d'étude précis, que le modélisateur décide ce qui est une 'variable', et ce qui est un 'bug' dans les résultats du modèle. Dans cette optique, les résultats qui sont produits par le modèle doivent toujours être interprétés par l'œil expert du modélisateur. Les résultats ne valent que pour un œil expert qui les regardent et qui les interprètent. Comme il est impossible de savoir si c'est ma main gauche qui touche ma main droite, ou le contraire (exemple que le philosophe Maurice Merleau-Ponty¹⁴⁵ convoque pour expliquer l'entrelacement de l'œil qui perçoit et de l'objet perçu), de la même manière, les résultats et courbes de sortie du modèle ne valent que si elles sont interprétées et expliquées par le modélisateur.

¹⁴⁵ Si je cite le phénoménologue français, c'est parce que Karin Knorr-Cetina fait explicitement référence à son concept d' « être-au-monde » pour décrire les reconfigurations que subissent, dans un même mouvement, le sujet connaissant et l'objet connu dans le processus reconfigurateur que constitue le laboratoire, conçu comme « unité relationnelle » (Knorr-Cetina, 1999, p.29-31).

C'est cette « utilisation experte » du modèle qui fait aussi que les modèles de croissance n'ont que très peu percolé vers les forestiers de terrain. Serge, qui est en charge de la rédaction des guides de sylviculture, et Charles, modélisateur à IRSTEA, ont tous deux souligné les dangers pour la gestion des forêts que pourraient représenter l'utilisation des modèles de croissance par les forestiers de terrain. Le simulateur de croissance est un logiciel type « presse-bouton », c'est-à-dire qu'il suffit de rentrer des paramètres initiaux pour que le modèle donne en sorties des résultats. Cette facilité d'utilisation tranche avec la difficulté de l'interprétation des résultats pour savoir à quoi ils correspondent. C'est ce qui explique pourquoi Bastien a refusé d'héberger ces modèles dans CAPSIS : « Non, on n'a jamais fait ça. On n'a pas envie de le faire, parce qu'on n'a pas envie que le gestionnaire prenne ces modèles pour argent comptant, c'est toujours pareil ! ». Dans cette perspective, il semblerait que les modèles et simulateurs forestiers n'améliorent pas forcément l'appropriation des méthodologies de la recherche par les gestionnaires forestières, car en dernière analyse, c'est bien le regard « exercé » et expérimenté du modélisateur qui peut statuer sur la pertinence du résultat des modèles.

Deuxièmement, l'importance des facultés interprétatives du modélisateur se situe tant au niveau de la construction du modèle que de l'interprétation des résultats. C'est lui qui décide, en dernière analyse, ce qui est un 'bug' ou une 'variable'. C'est « en situation » et en vertu de la question et des objectifs que les modélisateurs se posent qu'ils peuvent discriminer la 'variable' du 'bug'. Le résultat du modèle peut être contre-intuitif, car il y a eu un 'bug' ou parce qu'il met en évidence un résultat auquel on ne s'attendait pas, mais qui a une signification biologique ou écologique. L'encadré 15 reproduit l'entretien mené avec Léo, modélisateur au Muséum National d'Histoire Naturel (MNHN). Léo n'est pas modélisateur forestier, mais ses propos pourraient être ceux d'un modélisateur forestier. Léo est ornithologue mais il utilise ses compétences de modélisation pour modéliser le comportement de tout un tas d'espèces animales essentiellement, mais il a parfois aussi modélisé le comportement de plantes.

Encadré 15 : Distinguer le ‘bug’ de la ‘variable’ (extrait d’entretien avec Léo)

Léo : le modèle le plus théorique que j’ai fait, j’ai simulé des interactions entre espèces au sein d’une communauté ... ah je me souviens plus comment il fonctionnait ... mais c’était un modèle où les espèces se partageaient un gâteau en ressources, elles sont en compétition ... euh et donc il y avait un effet densité dépendance dans cette compétition, où plus une espèce était dominante, plus elle avait une probabilité forte de dominer les autres et de s’accaparer le gâteau, bah c’est des mécanismes en termes d’algorithmes qui sont pas simples à modéliser, il faut bien faire les boucles de vérification, que le résultat de ce qu’on modélise, c’est ce qu’on avait en tête. Car si ce n’est pas ça, ça peut être dû à des choses intéressantes auxquelles on n’avait pas pensé qui sont des résultats qui naissent de notre modèle, mais ça peut être aussi un artefact qui nous intéresse pas du tout !

Antoine : Comment vous arrivez à faire la part des choses entre quelque chose d’intéressant et quelque chose qui est créé ?

Léo : Eh bien, cela, c’est très compliqué. En fait, le problème est qu’on ne peut vérifier que ce qu’on pense à vérifier. Et du coup, en gros ce qu’on cherche, c’est ce qu’on va appeler les bugs. Il y a des bugs très simples à trouver, quand le modèle s’arrête, et que ça plante, il suffit de trouver où ça plante, et c’est bon c’est fini. Et puis, il y a les bugs sournois qui n’empêchent pas que ça tourne, et ceux-là, on ne va pouvoir les détecter qu’à la lumière des résultats qui sont produits. Or... on ne regarde les résultats qui sont produits que par des points de vue. Si je simule une communauté, on peut imaginer que je regarde à la fin le nombre d’espèces présentes dans ma communauté, et donc j’ai des hypothèses sur le nombre d’espèces que je dois obtenir. Si je dis que je ne fais aucune variabilité stochastique, je fais quelque chose de très simple, je suis cette ligne, et là j’en ai mis 5 au début, il y a aucune raison que j’en perde, je vais en avoir 5 à la fin. Et si je ne regarde pas les abondances de chaque espèce par exemple, je peux avoir quelque chose de très bizarre sur les abondances qui ne modifie pas cet indicateur de bon fonctionnement sur lequel j’ai décidé ...pas de valider l’ensemble de mon travail mais au moins de me dire que pour l’instant, ce n’est pas bizarre, eh bien je passe à côté d’un bug. Et si je continue ce bug, il peut être ... il peut être pas du tout grave, il y a des bugs, il en reste, c’est inévitable, il y en a qui sont pas graves car ils ne changent pas le résultat. Il y en a qui peuvent changer gravement le résultat et à la fin, on va se dire : il est bizarre ce résultat. Et du coup, on est dépendant du fait ... est-ce que ça change notre attente théorique ? Si ça change notre attente théorique, ça peut être deux choses : un résultat intéressant ou un bug ! Et du coup, là on remonte. »

Si les résultats du modèle ne sont pas en accord avec ce qui était attendu par le modélisateur, cela peut être dû à un « bug », ou un « artefact », ou à un résultat, non prévu, qui émerge du modèle. Comment décider de l’alternative ? Pour Léo, « c’est très compliqué ». Il ajoute qu’il existe deux types de bugs : le « bug très simple », c’est quand le modèle plante. Le « bug sournois » est plus difficile à repérer, car il n’empêche pas le modèle de tourner. Une nouvelle

fois, c'est le regard expert, ou le « jugement exercé » (Daston & Galison, 2007) du modélisateur qui décide en dernière analyse si le modèle a produit un résultat significatif ou un artefact. Il faut mettre l'accent sur la remarque finale de Léo : « et du coup, là, on remonte ». C'est le principe de l'inversion de l'infrastructure. Pour savoir si le modèle produit un résultat pertinent ou un artefact, le modélisateur 'remonte' l'infrastructure, c'est-à-dire ré-ouvre son architecture de raisonnement. Le bug peut venir des données produites et récoltées parce qu'elles sont toujours partielles. Le bug peut venir de l'écriture des algorithmes. C'est pourquoi P. Edwards affirme que les modélisateurs en science du climat sont finalement des historiens. Et c'est aussi pourquoi les métadonnées ont une place si importante dans le développement et l'utilisation des modèles, elles facilitent l'inversion infrastructurelle que les modélisateurs font lorsqu'ils cherchent à savoir où est le 'bug', où est l'erreur qui fait 'boguer' leur modèle. Les métadonnées accordent une traçabilité, facilitent le co-développement et ainsi le travail des modélisateurs. Les artefacts informatiques que j'ai étudiés dans ce chapitre ne prennent pas la forme de « boîte noire », au contraire, il faut plutôt leur conférer le statut de « boîte translucide » (Jordan et Lynch, 1996, p. 149).

Enfin, si le « jugement exercé » et expérimenté du modélisateur est ce qui le fait décider de la confiance que l'on peut accorder au résultat de son modèle, alors on peut interpréter ce choix comme une trace de son engagement épistémique. Le chapitre suivant interroge cette dimension.

Conclusion

Modèles et artefacts informatiques ont souvent été envisagés comme des « boîtes noires » où on ne se préoccupe que des données d'entrée, et des sorties du modèle. Or l'étude sociale des artefacts informatiques menée dans ce chapitre dévoilent les nombreuses traces du « travail inachevé » (Edwards et al., 2011), qui donnent des informations importantes pour la réutilisation des modèles par d'autres collectifs de chercheurs. Ces traces sont intéressantes pour le sociologue des sciences pour comprendre les conditions de production et de d'utilisation de ces artefacts, mais elles sont surtout primordiales pour les utilisateurs dans la mesure où elles donnent une prise sur l'outil, permettent son appropriation, sa modification, et confèrent alors un accès à la communauté d'utilisateurs qui s'agrègent autour de cet artefact. C'est en exhibant la manière dont il se construit, ses étapes, ses erreurs, et ses revirements que le langage informatique touche une communauté d'utilisateurs de plus en plus large. Le succès d'utilisation des artefacts que j'ai étudiés réside bien dans la mise en visibilité d'un langage en éternelle construction, soumis constamment à l'amélioration et à la révision. Il témoigne des tâches constamment inachevées qui rythment le quotidien des pratiques scientifiques.

Bruno Latour proposait de définir les artefacts scientifiques comme des « boîtes noires ». La circulation d'un laboratoire à un autre est permise grâce à cette stabilité des « boîtes noires » : « Chaque fois qu'un objet devient indiscutable, il se répand dans les autres laboratoires aussi rapidement que possible. Et la seule façon dont un objet peut retourner vers d'autres laboratoires, ou dont un domaine scientifique peut être utilisé dans d'autres domaines, consiste en leur transformation en un automate, une machine, un élément d'équipement de laboratoire, une nouvelle boîte noire » (Latour, 1989, p.214). Lynch et Jordan (1996) propose quant à eux le terme de « boîte translucide » pour rendre compte plus précisément des différentes dimensions routinières du travail scientifique. Certaines techniques sont des « boîtes noires » pour certains acteurs – par exemple, dans l'article de Lynch et Jordan lorsque les chercheurs préparent les plasmides comme cela est écrit dans les protocoles – mais pour d'autres acteurs, ces techniques sont en débat. Ainsi, l'obscurité de la 'boîte' diffère selon les acteurs et les collectifs qui usent des modèles. C'est l'intérêt du terme « translucide » : la lumière passe à travers un matériau translucide mais sans pour autant qu'il soit transparent ; il reste parfois de l'obscurité. Les modèles ne sont pas des « boîtes noires »,

en tout cas pour les modélisateurs et pour les ingénieurs qui les utilisent. Il existe de nombreuses traces qui leur permettent de s'approprier le modèle et de comprendre son fonctionnement. Les résultats des modèles, quand ils sont communiqués sans indication sur leur construction, peuvent quant à eux être interprétés comme des « boîtes noires ». Doit-on communiquer les résultats des modèles même si ces derniers sont incertains ? Doit-on continuer à prévoir les futurs des forêts malgré les nombreuses incertitudes qui existent dans la construction des modèles, et dans l'utilisation des scénarios climatiques futurs ? Ces différentes dimensions témoignent, de ce que j'appelle dans le chapitre suivant, d'un '*ethos* de l'anticipation' qui n'est pas le même pour les différents acteurs qui anticipent les futurs des forêts. Cet '*ethos* de l'anticipation' s'appuie sur l'étude des différents 'profils' des chercheurs et ingénieurs forestiers, et des visions qu'ils se font des futurs des forêts, et répond ainsi à l'une des questions qui est apparue dans les paragraphes précédents : peut-on et doit-on anticiper les futurs des forêts ?

Chapitre 6 : Trois visions des futurs climatiques des forêts : les ‘engagements épistémiques’ des chercheurs et ingénieurs forestiers

Introduction

Dans la première partie de ce manuscrit, j’ai montré comment les futurs des forêts se sont pluralisés sous l’effet de dynamiques scientifiques, institutionnelles, politiques et sociales. Les préoccupations scientifiques, sociales et politiques pour les futurs des forêts n’émergent pas avec l’irruption du changement climatique, mais sa mise à l’agenda a contribué à placer au cœur des recherches forestières l’anticipation des effets du changement global sur les écosystèmes forestiers (chapitre 3). Aujourd’hui, les futurs des forêts s’articulent autour de deux images antagoniques : celle des forêts menacées par les changements climatiques (augmentation des sécheresses, des températures ou de pathogènes comme les insectes ou les champignons) et celle des forêts porteuses de d’espoir pour réduire les émissions de gaz à effets de serre (‘puits de carbone’, bioénergie, et plus généralement ce qu’on appelle la bioéconomie) ou rendre les villes plus vivables (végétalisation, ‘corridor écologique’ – trames vertes). Ces images ont une certaine résonance médiatique, comme j’ai pu le montrer dans l’introduction générale de ce manuscrit, et le discours, « planter des arbres pour sauver la planète »¹⁴⁶, a très bien été intégré par les agences de communication des grandes entreprises¹⁴⁷. Qu’en est-il pour les recherches forestières ? L’anticipation des effets du changement climatique sur les forêts n’engendre pas un discours unanime et partagé par l’ensemble des acteurs. En vertu de leurs trajectoires scientifiques et sociales, de leurs interactions avec la gestion forestière, et de leurs visions de la ‘science qui compte’ – bref, de ce que je nomme par la suite « l’engagement épistémique » – chercheurs et ingénieurs forestiers adhèrent à une des trois grandes visions des futurs des forêts : le ‘futur-risqué’, le ‘futur-disruptif’ et le ‘futur-passé’. Ces trois visions articulent différents éléments comme une certaine conception de la temporalité du futur et de l’action, une vision de la forêt, des

¹⁴⁶ Voir par exemple le numéro de novembre de 2019 de *Science & Vie* : « Les arbres. Ils peuvent nous sauver. »

¹⁴⁷ On peut citer, par exemple, l’initiative *ReforestAction* qui donne la possibilité aux particuliers et aux entreprises de financer des projets de reforestation. Certaines entreprises n’hésitent pas à communiquer sur leur participation à cette initiative, dans le cadre de différents *spots* publicitaires.

considérations sur la pertinence des savoirs et technologies à développer, et un *ethos*¹⁴⁸ de l'anticipation.

Les 'profils' d'ingénieurs et de chercheurs forestiers et les visions des futurs des forêts qui sont présentés dans ce chapitre reposent sur l'idée de pertinence du savoir scientifique, c'est la 'science qui compte' telle que je l'ai décrite dans le chapitre 3 de ce manuscrit. Profils et visions des futurs s'appuient également sur la notion d' « engagement épistémique » (Granjou et Arpin, 2015 ; Granjou, 2016, p.140). Ce concept tire son origine de la notion de « communauté épistémique » telle qu'elle a pu être envisagée par le politologue Peter M. Haas (1989 ; 1992), s'inspirant alors des travaux du médecin et 'sociologue des sciences'¹⁴⁹ Ludwig Fleck (1936). Dans ses analyses sur la coordination internationale autour de la régulation de la pollution en mer Méditerranée, Peter M. Haas (1989) montre que si les différents Etats coopèrent autour de certaines mesures de régulation de la pollution, c'est grâce au rôle joué par des « communautés épistémiques » qui rassemblent des acteurs divers (chercheurs, politiques, administratifs ou associations) partageant alors une vision commune du problème et des solutions à y apporter. Dans son article de 1992, le politologue définit plus précisément la notion de « communauté épistémique » dont un point précis a retenu mon attention : « d'après notre définition, les membres d'une communauté épistémique sont liés par leur croyance ou leur foi commune en la vérité et en la plausibilité de formes particulières de connaissances ou de vérités spécifiques »¹⁵⁰ (Haas, 1992, p.3, note 4). Par la suite, il propose quatre critères qui définissent plus précisément ces communautés (*Ibid.*, p.3) :

- Elles partagent des croyances et des principes normatifs communs qui orientent leurs actions.
- Elles partagent des « croyances causales » sur la réalité du phénomène à réguler, et les moyens à entreprendre pour le faire.
- Elles partagent des principes de validité qui fondent leurs expertises, et font qu'ils se comprennent et accordent de l'importance à leurs travaux communs.

¹⁴⁸ Par *ethos* (ou *persona* en latin), je renvoie non pas seulement à une « éthique » (des principes que l'on partage) mais aussi des manières de faire et d'être. C'est le terme utilisé notamment par Aristote dans son étude de la rhétorique. Ce concept me permet alors de lier les discours des acteurs sur la "science qui compte" et leurs pratiques de recherche, comme le type de modèles qu'ils développent, les projets auxquels ils participent, mais aussi et surtout, ceux qu'ils refusent de développer, ou auxquels ils refusent de participer.

¹⁴⁹ Rétrospectivement, Ludwig Fleck est considéré comme le premier à proposer une conception sociologique de la science à partir de son concept de « collectifs de pensée » (Fleck, 1935)

¹⁵⁰ "By our definition, what bonds members of epistemic community is their shared belief or faith in the verity and the plausibility of particular forms of knowledge or specific truths." (Haas, 1992, p.3, note 4).

- Elles partagent, enfin, une « entreprise politique », c'est-à-dire un ensemble de pratiques qui visent à résoudre le problème en question.

L'angle de Peter M. Haas est le suivant : il s'agit de conférer à ces « communautés épistémiques » une place centrale dans la manière dont les pays du pourtour méditerranéen se coordonnent pour prendre en charge un problème politique et géopolitique qui les concerne. Ainsi, la notion de « communauté épistémique » permet d'étudier comment ces collectifs partagent des croyances sur les causes d'un phénomène, et les solutions à apporter pour y remédier. C'est cette idée générale que je reprends à mon compte pour l'appliquer à cette question : comment les forêts vont réagir au changement climatique ? Néanmoins, j'envisage cette interrogation à une échelle plus fine que celle proposée par Peter M. Haas : celle des « engagements épistémiques » des chercheurs et ingénieurs forestiers.

Ce parti-pris méthodologique s'inspire et prolonge ainsi les analyses de Céline Granjou et Isabelle Arpin (2015) sur les « engagements épistémiques » des scientifiques qui travaillent sur la biodiversité. Les autrices mettent en avant un point crucial dans la compréhension des engagements épistémiques, à savoir le fait qu'ils se matérialisent dans les pratiques quotidiennes des chercheurs. Ce ne sont pas de simples discours sur la science :

« On trouve ici un élément-clef : la notion d'engagement épistémique ne décrit pas des opinions politiques ou éthiques sur la science ou le rôle des scientifiques. Au lieu de cela, elle décrit le travail de recherche comme un engagement éthique et politique à produire un certain type de connaissances [...]. Contrairement à Merton qui affirme que les scientifiques partagent un engagement universel envers un certain type d'éthique, nous soutenons que les divers engagements épistémiques des chercheurs sont façonnés ou stabilisés (ou abandonnés) progressivement, en contexte, à mesure qu'ils affinent leurs agendas de recherche »¹⁵¹ (Granjou et Arpin, 2015)

C'est en observant les scientifiques et en discutant de leurs pratiques de recherche que le sociologue peut repérer les traces de leurs engagements épistémiques, qui matérialisent une vision de la 'science qui compte', une certaine vision des effets des changements climatiques sur les forêts, et un ensemble de solutions pour que les écosystèmes forestiers se maintiennent

¹⁵¹ "A key point here is that the notion of epistemic commitments does not describe political or ethical views about science and the role of scientists: instead, it describes research work as an ethical and political commitment to the production of a certain type of knowledge... Against Merton's argument that scientists share a universal commitment to a certain type of ethics, we argue that the researchers' various epistemic commitments are progressively shaped or stabilized (or abandoned) in context, as they refine their research agendas." (Granjou and Arpin, 2015)

et perdurent face à ce futur climatique menaçant. Le chapitre a ainsi pour tâche de décrire la diversité des « engagements épistémiques » partagés par les acteurs, engagements qui peuvent s'expliquer par des éléments qui se situent à différents niveaux d'analyse : leurs trajectoires scientifiques et leur statut dans la recherche (chercheur, enseignant-chercheur ou ingénieur de recherche), les structurations institutionnelles des laboratoires et des établissements publics de recherche dans lesquels ils travaillent ou encore les agendas scientifiques de leurs institutions. La notion d'engagement épistémique s'inscrit dans une compréhension sociologique de l'activité scientifique et de son intrication dans un contexte socio-économique, politique et institutionnel. Les propos épistémologiques des acteurs, et plus généralement leurs discours de scientificité et de validité portant sur les modèles et les projections, matérialisent leurs engagements pour un certain type de 'science qui compte' à leurs yeux.

Ces différents éléments d'explicitation des engagements des acteurs s'appuient sur une compréhension processuelle de la notion d'engagement qui peut être définie comme « une trajectoire faite d'une pluralité de micro-choix et d'investissements hétérogènes en coévolution dans le temps. » (Granjou, 2016, p. 140). Cette interprétation du concept d'engagement a d'abord été proposée par Olivier Filieule dans son étude portant sur les engagements militants et politiques (2001), puis a été reprise et adaptée, dans le domaine de la sociologie des sciences, pour décrire les engagements des scientifiques en faveur d'une approche et d'une compréhension de la biodiversité plutôt qu'une autre (Granjou et Arpin, 2015 ; Granjou, 2016) ainsi qu'en faveur de différentes promesses technoscientifiques (Granjou, Louvel et Arpin, 2015).

Dans un premier temps, je m'intéresse aux propos des acteurs qui concernent la construction et l'utilisation de leurs modèles, les projets de recherche qu'ils développent et les collaborations qu'ils tiennent. Bref, j'analyse tout ce qui constitue, pour eux, 'la science qui compte', et qui est, de fait, la science qu'ils font. Qu'est-ce qu'un bon modèle ? La modélisation est-elle un outil pour appréhender des questions écologiques ? Ou le modèle est-il un objet d'étude en soi ? Ces différentes questions appellent des réponses épistémologiques, des discours de scientificité et de validité. Je montre que les réponses proposées par les acteurs témoignent de leur vision de la 'science qui compte'. A partir de ces différents éléments, je forge deux profils « idéaux-typiques » : le 'modélisateur forestier' et l' 'écologue forestier'. Ces deux idéaux-types ne renvoient pas à des individus existants, mais définissent

des trajectoires ‘idéales’ qui mettent en jeu des éléments divers qui concourent à construire les « engagements épistémiques » des acteurs en question : la formation académique, l’institution de rattachement, l’agenda de recherche dans lequel les acteurs et leurs institutions s’inscrivent, les relations et collaborations qu’ils entretiennent avec la gestion forestière.

Dans un second temps, le chapitre prend pour objet les anticipations des effets du changement climatique sur les forêts françaises. Quelle validité scientifique convient-il d’accorder à ces projections ? Comment améliorer nos capacités prédictives, projectives ou anticipatives afin d’anticiper au mieux les changements en cours et à venir ? Où se situent les ‘fronts de science’ pour améliorer nos anticipations ? Pour comprendre les engagements des acteurs liés à l’anticipation des futurs climatiques des forêts françaises, je construis trois visions du futur : le ‘futur-risqué’, le ‘futur-disruptif’ et le ‘futur-passé’.

Ces deux niveaux d’analyse – les profils de chercheurs et les visions des futurs – se rejoignent sur la question de la pertinence du savoir scientifique. D’un point de vue individuel, comme on le verra par la suite, s’il y a des sortes d’ « affinités électives » entre les différents profils et les différentes visions. Néanmoins, les acteurs peuvent parfois s’inscrire successivement dans une vision ou une autre, selon les projets ou les moments de leur carrière.

I. Deux profils idéaux-typiques : le modélisateur forestier et l'écologue forestier

Si l'entretien semi-directif consiste à laisser une grande part de liberté à l'enquêté afin de pouvoir saisir sa pensée en mouvement, le guide d'entretien est tout de même nécessaire afin de cadrer ce flot de paroles. Mon guide d'entretien a gardé la même structure générale au fil des différentes vagues de l'enquête, même si les questions sont progressivement devenues plus précises. Chaque entretien débute sur le parcours professionnel ou académique de l'enquêté. Une des questions invariantes fut la suivante : « comment te définirais-tu ? ». Les enquêtés ont apporté différentes réponses à cette question, mobilisant les expressions d'« écologue forestier », « écologue modélisateur », ou « modélisateur ». En prenant au sérieux la manière dont les acteurs se définissent eux-mêmes, j'ai construit des profils-type permettant de décrire la communauté des ingénieurs et chercheurs forestières.

Les différents profils recourent, en partie, les distinctions entre les instituts de recherche et les agendas entrevus précédemment. Les modélisateurs de l'agenda sylvicole accordent une grande importance à la modélisation tandis que ceux de l'agenda écologique ont plutôt tendance à mettre en avant les connaissances écologiques fondamentales, et à modéliser pour comprendre et déterminer les processus à l'œuvre dans les écosystèmes forestiers. Cette distinction recoupe, en partie, celle épistémologique proposée par certains auteurs qui se sont intéressés à la prédiction en écologie (Maris et al., 2018) : la prédiction théorique pour améliorer nos connaissances du système environnemental étudié, et l'anticipation du futur pour orienter les décisions politiques en matière d'environnement. Néanmoins, à la différence de ces auteurs qui proposent une compréhension épistémologique de la prédiction en écologie, je déplace la focalisation vers une compréhension sociologique des pratiques d'anticipation des futurs des forêts. Je distingue deux 'profils types' : le modélisateur forestier et l'écologue (ou écophysiologue) forestier.

A. Le ‘modélisateur forestier’ : faire confiance aux chiffres

1. La construction processuelle de l'identité des chercheurs

Le premier profil idéal-typique concerne plutôt les modélisateurs rencontrés à IRSTEA et au département RDI de l'ONF. La plupart du temps, ces acteurs ont suivi un cursus dans une école forestière, comme l'ENGREF, l'Ecole des Barres, voir dans une école d'agronomie. Durant ce cursus, ils ont été formés à la science forestière et aux recherches forestières, au sens large, et pas seulement à l'écologie forestière. Dans cette perspective, ils développent des modèles utiles à la gestion, que ce soit des modèles de croissance, des modèles d'interventions sylvicoles, ou des modèles de risques (chute de blocs). Ces ingénieurs forestiers visent à produire des connaissances opérationnelles. Ainsi, la production de connaissances écologiques n'est pas nécessairement l'objectif final du modèle. Au contraire, l'écologie est un « outil » parmi d'autres savoirs disponibles. C'est l'avis défendu par Dominique, ingénieur forestier qui a été en poste à l'INRA et en détachement institutionnel pendant plusieurs années à la direction de la recherche à l'ONF : « Moi, je ne m'intéresse pas à l'écologie en tant que science. Je m'intéresse à la forêt comme socio-écosystème, c'est ça mon point de vue. Par conséquent, je ne peux pas faire l'impasse sur l'écologie comme une des sciences analytiques et théorique pour étudier les forêts. Mais l'écologie est un outil parmi d'autres. ».

La plupart de ces chercheurs se présentent comme « modélisateurs » ou « ingénieurs forestiers », mais pas comme « écologues forestiers », comme François, enseignant-chercheur à AgroParisTech : « Je me définirai plutôt comme modélisateur. Ecologue ? Définitivement pas ! ». Victor a quant à lui d'abord fait l'Ecole des Mines et s'est « tourné vers l'environnement ». Il a fait un DEA à Nancy, puis une thèse sous la direction de Dominique : « Je ne connaissais pas la forêt à ce moment-là, j'avais plutôt une approche mathématique, donc c'est *via* cette approche que je me suis mis à travailler sur la forêt ». C'est *via* la modélisation que Victor a commencé à travailler sur les forêts, un peu comme Laurent qui a d'abord fait une école d'aéronautique pour reprendre ensuite un Master nommé « Biodiversité et Gestion Forestière ». Plus loin dans l'entretien, Victor se définit alors comme modélisateur : « Alors, si je devais présenter mes disciplines, je dirai Sciences forestières et modélisation de la dynamique forestière ». L'encadré 16 retranscrit l'ensemble de sa réponse à ma question sur

son identité. J'ai choisi de faire figurer ici l'intégralité de sa réponse, car elle renvoie à un point central que je souhaite mettre en lumière, à savoir que, si la manière dont les acteurs scientifiques se définissent est influencée en partie par leur formation académique, cette formation ne prédétermine pas unilatéralement cette identité qui peut évoluer au cours de la trajectoire de l'individu. Ici, Victor considère qu'il fait tout de même de l'écologie, car ses questionnements de recherche recourent des questions de cette discipline.

Encadré 16 : Qu'est-ce qu'être écologue ? (extrait d'entretien avec Victor)

« Nan, je ne suis pas écologue, je n'ai pas le *background*. Je l'apprends sur le tas, car je n'ai pas cette formation-là. Quand j'ai commencé ma thèse, c'était un peu compliqué, car je ne différenciais pas un chêne d'un hêtre. Donc je ne suis pas écologue, je n'ai pas ces connaissances. Je ne suis pas réellement écologue de formation, donc je ne me présente pas comme écologue. Après, qu'est-ce que ça veut dire être écologue ? Est-ce que c'est celui qui connaît les plantes et leur fonctionnement ? Qui connaît les insectes ? La biologie ? Ça, je n'y connais pas grand-chose. Je commence à faire partie de la communauté des écologues dans le sens où avec mes modèles, j'arrive maintenant à identifier l'autécologie* des espèces, par exemple. Savoir que sur tel type de pH, j'ai telle espèce. Voilà, les modèles avec une approche statistique permettent de répondre à des questions d'écologie des espèces... voilà. Je sais que je peux identifier dans mes travaux que le chêne va être sensible aux sécheresses printanières, alors que le pin va plutôt être sensibles aux sécheresses estivales. Donc, c'est en ce sens que je touche l'écologie, que je deviens écologue... mais avec très peu de connaissances biologiques sur le fonctionnement des espèces, la photosynthèse, par exemple, j'y connais rien ! »

Victor ne se considère *a priori* pas comme un écologue à cause de son parcours académique. Néanmoins, grâce à ses travaux de modélisation statistique – Victor développe des modèles corrélatifs – il produit des connaissances sur l'écologie des espèces forestières. Il peut identifier corrélativement que le chêne est plus sensible aux sécheresses printanières sans avoir les connaissances écophysiologiques qui pourraient expliquer ce phénomène, par exemple les règles d'allocation du carbone ou le comportement du chêne en état de stress hydrique. Ces propos traduisent trois éléments importants.

Premièrement, la construction de l'identité scientifique et disciplinaire des chercheurs est un processus, elle évolue et se négocie en vertu de leur trajectoire scientifique, de leurs pratiques de recherche et des relations qu'ils entretiennent avec d'autres acteurs (chercheurs ou gestionnaires). L'identité des chercheurs se construit, de manière processuelle, en

interaction avec d'autres acteurs, et en « situation ». Cette vision de l'identité recoupe les grandes orientations théoriques de la sociologie interactionniste.

Deuxièmement, Victor a confiance dans la validité des modèles corrélatifs qui lui permettent de produire des connaissances sur l'autécologie* et l'écologie des espèces. Cette confiance ne va pas de soi, comme le montrent les acteurs relevant du second profil identifié, celui d'écologue forestier.

Troisièmement, Victor préfère passer du temps à modéliser pour « trouver le *pattern* qui va faire que son modèle soit générique », plutôt que de passer du temps à faire de la bibliographie : « J'ai des collègues qui sont très intéressés par l'évolution des théories. C'est vraiment des choses qui les bottent, c'est rigolo, car ce sont des conceptions un peu différentes. Moi, ce n'est pas ça qui m'amuse, en fait... ». Ce qui l'amuse, c'est « de mettre les mains dans les données et essayer d'identifier les modèles génériques et élégants ». Cette appétence pour la recherche du modèle élégant et générique peut s'expliquer par la trajectoire scientifique de Victor, et le fait qu'il a commencé à s'intéresser aux forêts par la modélisation, et non l'inverse. Victor invoque d'ailleurs son « *background* d'ingénieur » pour expliquer le fait qu'il soit plutôt porté vers la modélisation et la construction de projets scientifiques, plutôt que les aspects théoriques et bibliographiques.

2. *La légitimité du chiffre : le modèle comme outil central pour orienter la gestion forestière*

Ainsi le profil-type 'modélisateur forestier' accorde une grande importance au développement des modèles et à leurs améliorations pour qu'ils soient les plus génériques possible, qu'ils puissent par exemple être utilisés pour des essences forestières différentes. Cette importance conférée à la 'cuisine' de la fabrication du modèle se retrouve également dans les propos de François, qui entretient presque une aversion pour l'écologie, en tout cas pour l'écologie qualitative :

« Ce que j'aime bien dans la modélisation et les statistiques, c'est que quand ça donne un chiffre, on peut difficilement argumenter. Si on donne 2, ce n'est pas 1 ou -5, mais 2 ! Quand j'étais en maîtrise, j'étais en modélisation sylviculture, et les discussions en sylviculture m'ont vite gavé, car ça devenait des discussions du

type « Je pense que... ». Et personne n'arrivait avec des faits ou des preuves scientifiques. En statistiques, on a un cadre mathématique, et ce cadre me convient très bien. En écologie, parfois, c'est trop conceptuel... alors, la modélisation aussi, c'est conceptuel, mais en écologie, parfois les concepts, ça me [rires] ... Quand je ne peux pas mettre de chiffres dessus, je trouve que c'est difficile à comprendre ! Mais bon, ça c'est mon opinion.... » (François, INRA et AgroParisTech)

La modélisation et les statistiques donnent un caractère 'non controversable' qui fait défaut aux discussions sur les théories écologiques. Le chiffre qui sort du modèle peut venir mettre un terme à des discussions théoriques qui, selon François, pourraient être interminables si elles ne sont pas quantifiées précisément. Ainsi, pour le 'modélisateur forestier', les résultats chiffrés des modèles permettent de construire efficacement l'objectivité scientifique entre plusieurs chercheurs. De plus, comme les 'modélisateurs forestiers' cherchent également à produire des connaissances opérationnelles qui peuvent aider la gestion, les sorties chiffrées des modèles sont importantes parce qu'elles viennent appuyer des normes sylvicoles qui sont destinées aux gestionnaires forestiers. Cette confiance accordée aux chiffres et cette volonté de construire des connaissances utiles à la gestion forestière fondent une fonction du modèle qui est appréhendé comme « juge de paix ». C'est le sens des propos de Dominique :

« C'est important d'avoir des modèles avec des capacités prédictives pour servir un peu de juge de paix pour évacuer les mauvais procès, ou les discussions oiseuses qu'il peut y avoir souvent chez les forestiers. Moi, je me rappelle d'un débat qui avait eu lieu. Les gens considéraient que les éclaircies n'avaient pas d'incidence sur la croissance des arbres dominants, ils s'étaient appuyés sur certains résultats d'observation. Mais précisément, comme les observations n'avaient pas le pouvoir d'écarter l'hypothèse contraire, ils avaient fini par croire ce truc-là. En regardant les choses d'une manière plus rigoureuse, avec des modèles, des essais plus concluants qui ouvrent le champ des possibles, on s'est rendu compte que cette hypothèse était fautive. Et donc quand même, les modèles avec un certain pouvoir prédictif sont quand même utiles pour assurer cette fonction de juge de paix » (Dominique, INRA et ONF)

Parce qu'ils apportent des résultats chiffrés, les modèles peuvent permettre de trancher des débats forestiers quand différentes options sylvicoles sont en jeu. Les modèles ne permettent pas seulement de tester des hypothèses – « expérimentation virtuelle » – ils peuvent également décider quelle hypothèse sylvicole est la plus pertinente.

Enfin, le dernier point qui caractérise le profil des 'modélisateurs forestiers' concerne leur vision de la forêt. Leurs parcours et leurs interactions avec la gestion forestière construisent une vision de la forêt comme « socio-écosystème » où les logiques à l'œuvre ne sont pas

seulement écologiques ou écophysiologicals, mais également sociales et économiques. Ils vont modéliser les interventions sylvicoles ou les services écosystémiques rendus par les forêts. Clément, qui a travaillé à la RDI de l'ONF avant de revenir à IRSTEA, a même travaillé sur les représentations sociales du bois mort, qui est important pour la régénération des sols forestiers mais qu'on enlevait traditionnellement après les interventions sylvicoles pour que le chantier soit propre. La forêt est un écosystème géré qui doit concilier des fonctions de production, de protection, et des fonctions écologiques et sociales. Les modèles développés par les 'modélisateurs forestiers' ont pour objectif d'orienter et d'améliorer la gestion des forêts. Dans cette perspective, la forêt est considérée comme un milieu social et politique qui est structuré juridiquement (les forêts publiques et les forêts privées) et socio-économiquement (la gestion par l'ONF, la gestion privée). C'est *in fine* le sens des propos de Dominique quand il explique comment le changement climatique doit nous obliger à repenser totalement l'organisation politique de la gestion forestière en France. Il affirme que l'adaptation au changement climatique ne peut se faire que grâce à une restructuration de la propriété et de la gestion forestière, notamment pour piloter efficacement l'adaptation au changement climatique des forêts privées et publiques. Dans la seconde partie de ce chapitre, j'analyse plus en détail cette affirmation qui s'inscrit dans la vision du 'futur-risqué' des forêts.

B. 'L'écologue forestier' : comprendre le fonctionnement des écosystèmes

1. Mobiliser une multitude d'outils théoriques et expérimentaux pour étudier les lois écologiques

Les acteurs que je regroupe dans ce second profil idéal-typique ont été, pour la plupart, rencontré au CEFÉ, ce sont des chercheurs en poste au CNRS. Certains écologues rencontrés à l'INRA peuvent également être regroupés sous cette étiquette. Leurs disciplines de recherche sont l'écologie fonctionnelle (CEFÉ), l'écophysiologicals ou l'écologie holiste, mobilisant ainsi le concept de « niche écologique » leur permettant de comprendre la répartition des essences forestières à l'échelle de la planète. Pour ces différents acteurs, l'objectif des modèles est de produire des connaissances sur l'écologie de ces essences. Dans

cette perspective, c'est bien la modélisation qui est un outil au service de la production de connaissances théoriques. Cette primauté accordée à la connaissance sur la modélisation (et *in fine* sur l'anticipation) se retrouve notamment chez les écologues fonctionnels. Jacques, directeur de recherche au CEFÉ, souhaite comprendre les mécanismes à l'œuvre dans la croissance et la mortalité des forêts : « Compter des kilos de flotte, de carbone, c'est ça ma définition de l'écologie fonctionnelle ». Jacques n'a pas seulement travaillé sur les forêts, il s'est aussi intéressé aux pâturages et a également mené des études sur le quinoa, car « au final, [son] intérêt porte sur les processus d'acquisition et de décomposition [de la matière organique], et ces processus sont partout les mêmes » Ce sont ses intérêts de recherche pour les processus fondamentaux à l'œuvre dans les écosystèmes qui font dire à Bastien (encadré 17) que la modélisation est un outil parmi tant d'autres, qu'il liste dans l'extrait d'entretien ci-dessous.

Encadré 17 : La modélisation est un outil, parmi d'autres, pour comprendre le fonctionnement des espèces (extrait d'entretien avec Bastien).

« Je ne suis pas modélisateur parce que pour moi la modélisation n'est qu'un outil pour faire de l'écologie, parmi une multitude d'autres outils. Moi je ne pisse pas du code à longueur de journées. Je sais le faire, ce n'est pas le problème, mais ce n'est pas ce qui m'intéresse le plus. Passer ma vie devant un ordinateur à faire des modèles et colorier des cartes ... C'est intéressant parce que ça te permet de te poser d'autres questions. Et donc du coup, moi, je me définis plus comme un écologue parce que je sais manipuler différents outils qui me permettent de faire de l'écologie. La modélisation, c'est un outil, la dendrochronologie, c'est un autre outil, savoir faire des relevés floristiques, c'est aussi un autre outil, savoir faire des inventaires de peuplements, pareil... faire de la pédologie, c'est aussi un autre outil, t'es obligé de connaître la pédologie. Savoir faire de l'écophysiologie, c'est aussi un autre outil... bon ce n'est pas là-dedans où je suis le meilleur, savoir faire de la photosynthèse, bref Savoir mesurer du climat, jouer avec des données futures, c'est aussi des choses importantes à faire... donc voilà, pour moi, l'écologie c'est ça, c'est savoir utiliser plusieurs outils pour comprendre le fonctionnement des espèces »

« Savoir utiliser plusieurs outils pour comprendre le fonctionnement des espèces », c'est la définition de l'écologie selon Bastien. C'est la compréhension du fonctionnement du système qui importe le plus. Ainsi, les écologues (ou écophysiologues) forestiers vont plutôt avoir tendance à développer des modèles basés sur les processus, car leur objectif est de comprendre comment ces processus fonctionnent, de trouver les équations qui permettent de les écrire et les comprendre. Mais les écologues forestiers peuvent également développer des

modèles corrélatifs, ou statistiques, dans la mesure où ils peuvent être associés à d'autres outils comme l'observation et l'expérimentation, et à d'autres sciences comme l'écophysiologie, la biologie ou la génétique. C'est le sens des propos de Bastien qui a participé au développement des modèles d'aires de répartition qui ont été construits à partir du concept de « niche écologique », dans le cadre du projet CARBOFOR.

2. Modéliser n'est pas une fin en soi. Le modèle devrait orienter l'expérimentation pour faire progresser les connaissances

Ainsi, modéliser n'est pas une fin en soi, pour l'écologie forestier. Et c'est en ce sens que l'on peut comprendre les propos de Maxime, écologue au CEFÉ qui a travaillé sur les risques de feux de forêts, et qui regrette que les modèles soient devenus, en quelque sorte, des objets d'étude en eux-mêmes :

« La communauté de modèles est devenue une nouvelle discipline d'étude, c'est-à-dire qu'on a fait tellement de modèles qui sont similaires mais pas trop, qu'il y a des *workshops* ou des projets entiers qui cherchent à comparer les modèles. Alors il n'y a plus de terrain, On prend un groupe de 10 personnes, chacun a son modèle, ils prennent tous les mêmes *inputs*, on fait tourner les modèles, et on compare les sorties. Donc on fait de l'analyse de fonctionnement de modèles, car même si on a tous les caractéristiques du modèle, on ne sait pas toujours comment ça marche, donc on étudie. Le modèle est devenu un objet d'étude, comme une plante ! »
(Maxime, CEFÉ)

Maxime regrette que la modélisation ait pris le pas sur le terrain : « Le modèle est devenu un objet d'étude, comme une plante ». De la même manière, Jacques pense que la modélisation devrait aider à améliorer l'expérimentation pour approfondir les connaissances fondamentales sur l'écologie et le fonctionnement des espèces :

« Utiliser le modèle pour faire des hypothèses, tester si elles sont réalistes ou non, faire des manipulations pour voir comment ça réagit. Utiliser la modélisation pour planifier l'expérimentation, pour comprendre quelles sont les lacunes de la connaissance, et éventuellement pour monter des expériences, pour enrichir les modèles, c'est là, à mon avis, le point le plus intéressant... mais le plus difficile à faire comprendre, le plus difficile c'est de trouver les interlocuteurs qui veulent jouer le jeu » (Jacques, CEFÉ)

Maxime comme Jacques sont, tous deux, très critiques envers la modélisation statistique et corrélative qui agrège un très grand nombre de données. Pour eux, si « un modèle te sort

toujours un résultat », ce n'est pas pour autant que ce résultat a une valeur scientifique. Pour eux, la vraie valeur à accorder au modèle c'est sa capacité à faire progresser les connaissances. Ils partagent également une vision assez négative de ce type de modélisation : comme un modèle sort toujours un résultat, cela permettrait à ces modélisateurs de beaucoup publier, et ainsi de gravir plus facilement les échelons académiques. C'est le sens des propos que m'a tenu Maxime : « Après je peux comprendre qu'un jeune chercheur qui veut un poste au CNRS ait moins d'éthique que moi, et publie à tout va ses modèles. Moi, j'ai l'impression que certains modèles, on peut leur faire dire ce qu'on veut... Voilà, ça, c'est mon angoisse, et c'est pourquoi je baisse progressivement mon activité de modélisation. ». Après s'être rendu compte que son modèle pouvait fonctionner dans n'importe quelle situation, Maxime a décidé de moins modéliser. Cette attitude de renoncement face à la prévision du futur des écosystèmes se retrouve chez plusieurs acteurs – j'y reviens plus précisément dans la deuxième partie de ce chapitre.

Enfin, les 'écologues forestiers' entretiennent des liens moins importants avec la gestion forestière que les modélisateurs forestiers, et ceci à plusieurs titres. Premièrement, leurs modèles, basés sur les processus, ne sont pas des modèles conçus pour orienter la gestion. Ce sont la plupart du temps des modèles « gourmands en données » et qui ont des temps de calcul assez élevés. Ce ne sont pas les modèles sylvicoles « presse-bouton », comme ceux qui permettent à Serge, par exemple, de rédiger les guides de sylviculture. D'ailleurs, Serge connaît les modèles basés sur les processus, mais il n'en utilise aucun. Les modèles fonctionnels sont plus complexes car ils agrègent des cascades de « sous-modèles », ils sont donc moins opérationnels pour la gestion forestière. Lionel, écophysiologue au CEFÉ et expérimentateur, m'indique que les liens que son équipe entretient avec l'ONF ou les gestionnaires forestiers sont assez faibles, car ils ne partagent pas la même culture :

« Les interactions avec les gestionnaires restent assez difficiles, parce qu'il y a quand même un problème de culture. Nous, on voit la forêt comme un écosystème, du point de vue d'un écologue, et eux, ils voient la forêt comme un moyen de production, quelque chose de cultivé. Dans l'esprit des forestiers, la forêt est quelque chose que l'on cultive, ce n'est pas un écosystème naturel. Ils sont vraiment dans une démarche : amélioration, plantation, choix d'essence... Et assez peu sur la manière dont on utilise ce que l'on a, et on gère au mieux les ressources disponibles. Et nous, on travaille sur le chêne vert, et d'un point de vue commercial, ça ne vaut pas grand-chose. Donc dès qu'on parle avec des gestionnaires, on est confronté à la question : « qu'est-ce qu'il faut planter à la place ? » Et nous, on n'est pas du tout là-dessus » (Lionel, CEFÉ)

Lionel est conscient que les interactions avec la gestion forestière sont difficiles à entretenir car ils souscrivent à des visions différentes des forêts. Si les ‘modélisateurs forestiers’ conçoivent la forêt comme socio-écosystème, les ‘écologues forestiers’, eux, la pensent plutôt comme un écosystème soumis à des processus fonctionnels et écophysiologiques. On peut néanmoins nuancer ces distinctions idéales-typiques sur deux points. Premièrement, certains ‘écologues forestiers’ aimeraient avoir davantage d’interactions avec la gestion forestière, mais sont conscients des difficultés. Mathieu travaille aujourd’hui en collaboration avec le département RDI de l’ONF car ses recherches portent sur les liens entre diversité et stabilité des peuplements. Est-ce qu’un peuplement mélangé est plus stable et plus résilient qu’un peuplement mono-spécifique ? Cette question, importante pour la gestion, est envisagée d’un point de vue fonctionnel chez Mathieu, tandis que Victor travaille également sur la question mais en mobilisant des approches statistiques et corrélatives.

C. Tableau récapitulatif des deux ‘profils’ des chercheurs et ingénieurs forestiers.

Le tableau 3 récapitule les différentes dimensions qui structurent ces deux « idéaux-types ».

	‘Modélisateur Forestier’	‘Ecologue Forestier’
Parcours académique	<ul style="list-style-type: none"> • Ecoles forestières (AgroParisTech, Ecole des Barres) • Ecoles d’ingénieur généralistes (Les Mines, Polytechnique, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Formation forestière puis diplômes de second et de troisième cycle dans des disciplines plus « fondamentales » (écologie, biologie, etc.) • Parcours académique à la faculté
Interaction avec la gestion	<ul style="list-style-type: none"> • Fortes interactions avec la gestion (ONF, CRPF, ...). Parfois des profils naviguant entre la recherche (INRA, IRSTEA) et la RDI de l’ONF. • Volonté d’avoir des connaissances opérationnelles et mobilisables par la gestion 	<ul style="list-style-type: none"> • Faibles interactions avec la gestion, car ils ne partagent pas de « culture commune ». Les discussions sont parfois difficiles.
Place des connaissances théoriques (écologie, écophysiologie)	<ul style="list-style-type: none"> • Ces connaissances sont secondaires. Elles sont un outil parmi d’autres outils disponibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ces connaissances sont premières et fondamentales. C’est le ‘front de science’.
Statut conféré au modèle	<ul style="list-style-type: none"> • C’est un objet d’étude en lui-même. • Il sert à orienter la gestion forestière, et peut avoir une fonction de « juge de paix ». • Développer des modèles génériques et robustes constitue un des ‘fronts de science’ 	<ul style="list-style-type: none"> • Le modèle est un outil parmi tant d’autres. • Il ne faut pas le prendre pour argent-comptant, mais le faire dialoguer avec d’autres approches comme l’expérimentation.
Vision de la forêt	<ul style="list-style-type: none"> • Socio-écosystème qu’il faut gérer le plus efficacement – écologiquement et économiquement – possible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecosystème soumis à des processus fondamentaux écologiques et écophysiologiques qu’il faut décrire et comprendre

Tableau 3 : deux profils idéaux-typiques : le ‘modélisateur forestier’ et l’ ‘écologue forestier’

Il faut avoir à l’esprit que ces ‘profils’ sont plus nuancés dans la réalité, et que les chercheurs et ingénieurs rencontrés ne recourent ces profils que partiellement. Comme je le montre dans la suite de ce chapitre, ces deux profils entretiennent, ce qu’on pourrait appeler, des « affinités électives » avec les différentes visions des futurs des forêts. Tandis que les ‘modélisateurs forestiers’ peuvent partager la vision, portée par les grandes institutions forestières comme l’Académie de l’Agriculture ou l’ONF, du ‘futur-risqué’, les ‘écologues forestiers’ sont tous très critiques envers cette vision. La vision du ‘futur-disruptif’ est plutôt celle des ‘écologues forestiers’, tandis que la vision du ‘futur-passé’ remporte plutôt l’adhésion des ‘modélisateurs forestiers’ qui visent à anticiper les évolutions sur le long terme des forêts françaises. De plus, chaque acteur n’adhère pas à une vision définitivement. Ils peuvent passer d’une vision à l’autre au gré des projets et des collaborations, tandis que

d'autres acteurs n'adhèrent que partiellement à certaines visions. Parfois, ils 'jouent le jeu' d'adhérer à la vision institutionnelle, notamment pour financer leurs travaux.

II. Trois visions des futurs des forêts : ‘fronts de science’, promesses technoscientifiques et ‘ethos de l’anticipation’

Le futur n’est pas la simple continuation du présent. Il est mis à jour et actualisé dans le présent. Il faut se départir d’une vision linéaire passé-présent-futur comme l’ont montré les *Futures Studies*¹⁵². Cette idée fonde l’orientation théorique et méthodologique de ce chapitre. L’enquête restitue trois visions des futurs des forêts qui structurent, aujourd’hui, les recherches forestières françaises. Cette orientation repose, notamment, sur les analyses du géographe Ben Anderson (2010) qui a proposé un vocabulaire et une grammaire conceptuels pour analyser les diverses manières d’appréhender un « futur ouvert » (Anderson, 2010). Pour ce faire, il accorde un rôle prépondérant à ce qu’il nomme les « déclarations sur le futur » – « *statement about the future* ». Pour le géographe, ce sont ces déclarations (comment le futur est-il vu et compris ?) qui déterminent les actions anticipatives mises en œuvre pour avoir une prise sur ce futur ouvert. Ce sont ces « déclarations » que je prends comme objet d’analyse pour forger les trois visions idéales-typiques des futurs des forêts. Ces déclarations s’appuient sur deux éléments : les liens que le futur entretient avec le passé et le présent, et les manières dont ces liens déterminent les actions anticipatives :

« Chacun de ces différents types d’actions s’accompagne d’une série de déclarations sur la façon dont le « futur » est lié au passé et au présent. Bien sûr, il reste encore beaucoup à dire sur les différentes manières dont le « futur » est conçu. Dans cet article, je souhaite seulement souligner que les déclarations [sur le « futur »] le problématisent d’une certaine manière et conditionnent ainsi la façon dont il peut être anticipé et les actions qu’il peut susciter »¹⁵³ (Anderson, 2010, p.780)

Ben Anderson ne propose pas qu’un simple vocabulaire. Ces propos sont centraux dans l’économie de ce chapitre, car ils permettent de mettre en lien les « engagements

¹⁵² Cette idée d’un enchaînement des temporalités n’est pas nouvelle. Déjà Saint-Augustin, dans ses *Confessions*, proposait de remplacer les termes passé, présent, futur, par le passé-présent (le souvenir ou la mémoire), le présent-présent (l’actualité) et le futur-présent (l’anticipation ou le projet). Cette idée a été, notamment, reprise par Paul Ricœur dans ses ouvrages *Temps et Récit*.

¹⁵³ “Each of these different types of action is accompanied by a series of statements about how ‘the future’ relates to the past and the present. Of course, much more needs to be said about the differences in how ‘the future’ is figured. For the purpose of this paper, all I want to stress is that statements problematize ‘the future’ in particular ways, conditioning how it may be anticipated and acted on.” (Anderson, 2010, p.780)

épistémiques » des acteurs, leur vision de la ‘science qui compte’ et les visions des futurs des forêts. En effet, dans la mesure où les « déclarations sur le futur » conditionnent la manière dont il est anticipé – un projet de connaissance – et la façon dont on le fait advenir – une solution pour résoudre le problème – on retrouve alors ce qui fonde la notion d’ « engagement épistémique » : une manière de connaître un problème, et une solution à mettre en œuvre pour y remédier. Chaque vision du futur des forêts articule donc une manière d’anticiper les effets du changement climatique sur les dynamiques et les évolutions des forêts, ainsi qu’un ensemble d’actions à déployer pour faire advenir ces futurs souhaitables, ou pour éviter ces futurs menaçants. Ainsi, les trois visions des futurs des forêts articulent les quatre éléments suivants :

1/ Une vision de la temporalité du futur qui engendre un rapport particulier à l’action : ce sont les « déclarations sur le futur » telles qu’elles ont été présentées par Ben Anderson.

2/ Une vision de la forêt à connaître, et de la forêt ‘idéale’ à façonner¹⁵⁴ pour s’adapter au changement climatique. Cette vision articule un projet de connaissance, et un projet d’action.

3/ Une vision de la ‘science qui compte’ qui s’appuie également sur un discours portant sur les promesses technoscientifiques – les technologies qu’il faut développer – pour améliorer la connaissance et l’anticipation des futurs des forêts. Cette vision découle de la vision précédente qui détermine un projet de connaissance des futurs des forêts.

4/ Un *ethos* de l’anticipation qui s’appuie également sur un discours qui porte sur la pertinence sociale des pratiques des chercheurs. En effet, chercheurs et ingénieurs forestiers sont tous conscients du caractère performatif de leurs modèles, et notamment des modèles anticipatifs ou prédictifs. Ainsi, il y a une vraie réflexion chez eux pour savoir s’il faut communiquer ou non les modèles et leurs résultats. Face à cela, il y a des attitudes différentes. C’est pour cela que la « vision de la société » est liée, ici, à l’attitude du chercheur, ses pratiques et sa déontologie : son *ethos*. Ce terme renvoie alors aux manières de faire de la

¹⁵⁴ Les forêts sont des écosystèmes qui ont presque toujours été façonnés par l’homme. Ainsi, dans l’optique de s’adapter au changement climatique, voire de « sauver la planète grâce aux arbres » dans les discours les plus caricaturaux, les différentes visions du futur articulent divers projets de gestion, de contrôle et de maîtrise des forêts.

science, comme création d'un savoir objectif, mais aussi comme métier, pratique culturelle ou pratique technique.

Les trois visions des futurs des forêts sont les suivantes :

[A] Le 'futur-risqué' : surveiller, anticiper et agir pour minimiser les risques futurs qui menacent les forêts. Ces risques sont aussi compris comme des opportunités économiques et technologiques pour façonner des 'Forêts-Infrastructures' conçues comme des armes efficaces de lutte contre le changement climatique. Ce futur s'appuie sur un *ethos* de la confiance envers les modèles, l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs, et le développement de nouvelles technologies d'acquisition (*LIDAR*) et de traitement (*Big Data*) des données.

[B] Dans le 'futur disruptif'¹⁵⁵ des changements globaux, améliorer nos connaissances fondamentales des écosystèmes forestiers est l'enjeu central pour comprendre et anticiper les effets du changement climatique sur les forêts. Il est alors nécessaire de concentrer les efforts des recherches forestières sur la découverte des lois qui régissent le comportement des écosystèmes en conditions limites, et d'associer ainsi expérimentation et modélisation. Dans cette optique, le développement des nouvelles technologies ne font pas partie du 'front de science' des recherches forestières. Ce futur s'appuie sur un *ethos* du renoncement à l'anticipation : il y a trop d'incertitudes actuellement sur les comportements futurs des forêts pour agir dès maintenant sur la base des prédictions des modèles.

[C] Dans le 'futur-passé'¹⁵⁶, les acteurs envisagent les forêts comme des milieux socio-écologiques et historicisés. Pour anticiper les futurs des forêts, il est, d'abord, nécessaire de comprendre précisément leurs dynamiques passées, d'avoir des données sur le long terme (une voire deux révolutions forestières) pour prévoir leurs évolutions futures. Ainsi, ils

¹⁵⁵ Je me dois de préciser le sens du terme « disruptif ». Ici, le terme « disruptif » renvoie à tout phénomène non-linéaire qui vient bouleverser le comportement du système d'une manière imprédictible et qu'il est difficile d'anticiper. Le terme « disruptif » renvoie alors au caractère irréversible de la catastrophe. Ce terme est utilisé, ici, uniquement dans ce sens. On associe aujourd'hui beaucoup le terme « disruption » avec ce qu'on appelle les technologies ou les « innovations de rupture », comme le *Big Data* ou l'intelligence artificielle. Ce terme, parfois « *marketing* » met en avant une vision positive des promesses des nouvelles technologies. Les acteurs qui adhèrent à cette deuxième vision du futur ne partagent pas cet avis, ils sont au contraire très critiques envers ces promesses. Le terme « catastrophiste » aurait pu être choisi, mais il est connoté par une certaine dimension émotionnelle que l'on peut retrouver aujourd'hui dans ce qu'on appelle la « collapsologie » et qui n'est, également, pas appropriée pour définir cette deuxième vision du futur.

¹⁵⁶ J'emprunte ici l'expression à l'historien allemand Reinhart Koselleck (1979).

mettent l'accent sur le développement d'approches interdisciplinaires pour appréhender au mieux les dimensions historiques des dynamiques forestières. Ce futur s'appuie sur un *ethos* de la responsabilité : même si les incertitudes sont nombreuses, le chercheur forestier doit tout de même essayer d'anticiper au mieux ces tendances lointaines et futures, au risque de laisser cette parole et cette expertise à d'autres acteurs.

A. Le 'futur-risqué' des forêts : surveiller, anticiper et piloter les Forêts-Infrastructures

Chaque vision comporte une certaine épaisseur historique. Si la surveillance sanitaire des forêts existe depuis les années 1940 – c'est à ce moment que paraissent les premiers articles sur la surveillance d'insectes nuisibles aux forêts comme la chenille processionnaire du pin – c'est dans le contexte des pluies acides que se déploie cette vision de la forêt comme un écosystème qu'il faut surveiller. C'est à cette époque que se constituent les infrastructures de surveillance des forêts (notamment le DSF), ainsi que le développement de la génétique forestière, autour des travaux, par exemple, du généticien forestier Antoine Kremer. Ces travaux visent aujourd'hui à anticiper quels patrimoines génétiques des essences forestières seront les mieux adapter aux changements climatiques.

Cette vision du futur est structurée autour de l'idée qu'il existe une pluralité de risques qui pèsent sur le présent et les futurs des forêts françaises. Ces risques sont censés augmenter avec le changement climatique : sécheresses et augmentation des températures qui fragilisent les peuplements ; augmentation des dégâts liés aux accidents climatiques (tempêtes, vents violents, coulées de boue, etc.) et aux incendies de forêts à cause notamment d'une fragilité accrue des peuplements ; des conditions climatiques favorables à l'émergence et l'expansion de pathogènes forestiers (insectes ou champignons) ; essences qui ne sont plus adaptées aux bouleversements climatiques, etc. Dans cette vision du futur, la notion de risque est centrale, c'est par elle que sont appréhendés les futurs des forêts. Il y a de nombreux risques qui menacent les futurs des forêts, il s'agit donc de les identifier pour les minimiser. Pour ce faire, les acteurs s'appuient sur des assemblages sociotechniques qui visent à surveiller l'état des forêts françaises : modélisation et simulation accompagnées du développement de grandes bases de données, les réseaux de surveillance des forêts (DSF, RENECOFOR), les « cellules de crise » sur certains problèmes, comme cela a été le cas avec la processionnaire du pin dans

la région Nord-est. Les promesses des nouvelles technologies d'acquisition et de traitement de données (télédétection, modélisation) occupent ici une place centrale pour minimiser les risques.

Mais les risques sont également vus comme une opportunité pour l'action, et pour la réforme politique et économique des forêts. En effet, les forêts ne sont pas seulement menacées par le changement climatique, elles constituent aussi un moyen de l'atténuer (bois-énergie, stockage du carbone) ou de s'y adapter (la migration assistée d'essences comme le projet GIONO). Dans cette perspective, la 'Forêt-Infrastructure' qui stocke le carbone, ou qui produit de l'énergie (les usines à biomasse), est vue comme un actant central dans la lutte contre le changement climatique. Les risques sont donc à envisager comme des menaces et des dangers qu'il faut s'efforcer de réduire, mais également comme des opportunités pour développer de nouvelles technologies ou pour réformer la structuration politique et juridique des forêts françaises. En ce sens, le futur des forêts de cette première vision est également un futur politique.

Enfin, dans cette première vision, on décèle l'importance conférée à la production d'une information claire et précise sur l'état, le fonctionnement et les évolutions des forêts françaises pour orienter la gestion forestière vers une « foresterie de précision », comme le mentionne le *Plan Recherche & Innovation 2025 pour la filière forêt-bois* (Vedele, 2016 p.35). L'amélioration de la précision de l'information forestière concourt à rendre plus légitime et plus efficace les décisions politiques. On rejoint alors les analyses de la 'mesurabilité' (Turnhout, Neves et De Lijster, 2014) ou celles de la 'datafication' (Bensaude-Vincent et Devictor, 2016) comme « dispositifs techno-politiques » des forêts.

1. Le changement climatique : risques et opportunités pour les forêts françaises

Cette première vision des futurs des forêts repose sur une notion centrale : celle de risque. On retrouve cette vision dans les groupements et instances scientifiques et gestionnaires des forêts françaises. On peut citer, par exemple, le GIP ECOFOR, l'ONF, et plus particulièrement le département Recherche-Développement-Innovation (RDI). Certains ingénieurs forestiers qui produisent des connaissances opérationnelles pour la gestion

partagent également cette vision des futurs des forêts. On retrouve également cette vision dans certains rapports et documents d'orientation, notamment le *Plan Recherche & Innovation 2025 pour la filière forêt-bois* (Vedele, 2016). Ainsi, cette vision se déploie plutôt chez les acteurs institutionnels, comme l'Académie d'Agriculture, ou certains acteurs du secteur économique de la filière forêt-bois, comme au FCBA.

Face à un futur ouvert et non-linéaire, la notion de risque et les pratiques qui visent à le minimiser constituent une maxime d'action. La sociologue spécialiste des conduites à risque (addiction, jeux d'argent, etc.), Gerda Reith (2004) propose un état de l'art de la notion de « risque » en sciences sociales à partir des travaux d'Ulrich Beck et de Niklas Luhmann en passant par ceux de François Ewald. Ce qu'elle retient de la notion de risque est qu'elle n'est pas un moyen de prévoir le futur mais d'orienter la prise de décision. Face à un futur ouvert, non-linéaire et incertain, la notion de risque peut constituer un *criterium* pour l'action rationnelle :

« L'argument avancé ici est que l'utilité de la notion de « risque » ne réside pas dans sa capacité à prédire correctement des états futurs (elle ne parvient pas réellement à le faire au niveau des individus) mais plutôt dans sa capacité à fournir une base à la prise de décision »¹⁵⁷ (Reith, 2004, p.394)

Pour l'autrice, il ne faut pas mettre en avant le caractère « épistémologique » du concept de risque, mais bien son « rôle pragmatique » (Reith, 2004, p.398) dans la mesure où il confère une orientation à l'action rationnelle face à un futur ouvert et incertain. C'est pourquoi la notion de risque a ce double statut de menace et d'opportunité. Pour comprendre sur quoi repose cette vision du futur des forêts par le prisme la notion de risque, on peut se référer aux discours tenus par le GIP ECOFOR sur le thème « Changement climatique et autres risques »¹⁵⁸ :

« Les progrès des connaissances dans ce domaine [*nb : le changement climatique*] porte d'abord sur une réduction des incertitudes et une amélioration des informations quant à l'avenir des forêts. Mais il s'attache de plus en plus à identifier les actions à entreprendre à diverses fins dans un contexte d'incertitudes et risques multiples : juguler les sources de risque (atténuation) ; en limiter les conséquences (adaptation) ; conjuguer atténuation et adaptation au niveau des parcelles et des territoires. »

¹⁵⁷ “The point being made here is that the utility of the notion of ‘risk’ lies not in its ability to correctly predict future conditions (at which, on the level of the individual, it is not particular successful), but rather in its ability to provide a basis for decision making.” (Reith, 2004, p.394).

¹⁵⁸ Voir le site du GIP ECOFOR : http://www.gip-ecofor.org/?page_id=1077

On voit bien les différents éléments qui constituent cette vision : les futurs des forêts sont envisagés par rapport aux notions de risque et d'incertitude : connaître et comprendre les risques. Cette appréhension des risques constitue un moteur de l'action rationnelle pour atténuer ou s'adapter au changement climatique. La production d'informations claires, précises et mobilisables par la décision politique est un des éléments centraux de cette vision. Je reviendrai, dans la suite de ce chapitre, plus précisément sur le statut de cette information et la conception tacite des relations science-société qui est inhérente à cette dernière. L'idée d'une information précise repose sur les promesses d'une surveillance technologique et globale des forêts.

a. Les promesses d'une surveillance technologique et globale des forêts

La production d'une information précise, claire et transparente sur les forêts et leurs évolutions est intimement liée, dans cette vision, aux nouvelles technologies d'acquisition et de traitement de données numériques, notamment la mise en avant de la télédétection et de la modélisation et de la simulation pour traiter, analyser et utiliser ces données. La télédétection par laser, ou *LIDAR*, est vue comme une technologie capable de produire des informations plus précises sur la composition des forêts, leur structure et leur localisation, que celles produites par les missions d'inventaires classiques. Pour Baptiste, modélisateur à IRSTEA, c'est d'ailleurs l'une des promesses clairement identifiées de la télédétection.

La technologie *LIDAR* embarqué dans un drone aéroporté permet de cartographier les surfaces forestières qui étaient difficilement accessibles aux missions pédestres d'inventaire, et dont la photographie aérienne ne permettait pas aisément de calculer les surfaces forestières. Dans cette perspective, la technologie *LIDAR* permet d'avoir une information précise sur la localisation des différents massifs forestiers, ainsi que leurs conditions d'exploitabilité. Dans un contexte futur où la production de bois est censée être stimulée par l'utilisation du bois-énergie, et où les forêts comme 'puits de carbone' jouent un rôle important, la télédétection offre la promesse d'une meilleure connaissance de la ressource qui permettrait une gestion stratégique des espaces forestiers, en réservant par exemple les gisements de bois difficilement accessibles à une fonction de stockage de carbone, tandis que les gisements les plus accessibles assureraient les fonctions de production.

Ces promesses de la télédétection rejoignent les promesses du *monitoring* environnemental tel qu'il se développe à l'échelle internationale dans des projets de recherche comme le projet COPERNICUS qui est la version européenne du projet Global Earth Observation System of Systems qui vise à développer les technologies de *monitoring* du Système-Terre (satellites, télédétection, réseaux de capteurs, etc.). C'est une vision « déterrestree » (Bonneuil et Fressoz, 2016 ; Grevsmühl, 2014) dont le projet porté par Google et l'université du Maryland « *Global Forest Watch : Forest Monitoring for Action* » peut constituer un cas exemplaire.

La télédétection occupe ainsi une place prépondérante dans cette vision du 'futur-risqué' des forêts qui vise à développer une « foresterie de précision ». Si le futur des forêts est risqué, ouvert et incertain, il est tout de même possible de minimiser les risques et d'endiguer l'avènement de futurs non-souhaitables grâce aux « progrès des connaissances », comme le mentionne la citation du GIP ECOFOR ci-dessus. Le futur risqué ne rompt pas avec la vision linéaire et optimiste de la « flèche du progrès », comme en témoignent les places qu'occupent les technologies de télédétection et les « ressources génétiques forestières » dans le rapport *Recherche & Innovation de la filière forêt-bois* (Vedele, 2016, p. 155) : « les ressources génétiques forestières constituent un levier important pour adapter les forêts aux changements environnementaux et pour produire durablement une ressource adaptée ». Les travaux de sélection et d'expérimentation génétiques dans les *arboretums*, ou les tentatives de migrations assistées d'essences, comme le projet GIONO porté par l'ONF sont des dispositifs sociotechniques d'anticipation au cœur de cette vision des 'Forêt-Infrastructures'.

b. Urgence, réactivité et flexibilité : le cadre temporel de la « foresterie de précision »

Le 'futur-risqué' des forêts françaises est un appel à l'action malgré les incertitudes. Au cœur de cette vision, on retrouve le concept de « foresterie de précision. » Dans l'action C-2-3 du plan « Recherche & Innovation 2025 de la filière forêt-bois » (Vedele, 2016, p.161), la « foresterie de précision » est envisagée par les termes et innovations suivantes : « une connaissance précise de la ressource et les moyens d'échanger l'information, y compris au cours du processus, au travers de la télédétection, la géomatique et l'échange de données informatisées. », « le recours au machinisme et à la robotisation », « de nouveaux schémas

organisationnels intra et inter acteurs pour optimiser et déployer les concepts technologiques précédents ».

Pour déployer cette « foresterie de précision », les acteurs mettent l'accent sur les dispositifs sociotechniques qui visent à cartographier l'état et l'évolution des forêts : cartes d'aires de répartition, cartes de répartition des risques forestiers, développement de bases de données qui permettent d'envisager quelle essence forestière est adaptée à quel type de station forestière. Ces dispositifs sociotechniques sont des arrangements d'humains et non-humains comme on l'a vu dans le cadre du réseau RENECOFOR, ou le rôle joué par le Département Santé des Forêts dans le « suivi sanitaire des forêts ». Sont alors mises en avant les notions d'urgence – il faut agir dès maintenant pour endiguer le changement climatique – et de « crises ». L'ONF dispose d'ailleurs de plusieurs cellules de crises qui portent sur des problèmes phytosanitaires précis comme la chenille processionnaire ou la chalarose du frêne (champignon). Pour minimiser les risques multiples qui pèsent sur les forêts, les simulateurs de croissance et d'intervention sylvicole, comme la plateforme de modélisation CAPSIS, permettent d'entrevoir les conséquences possibles d'un type de gestion forestière. Cette flexibilité est un élément caractéristique d'une foresterie de précision. Les différents éléments de ces infrastructures de surveillance visent à produire des « chaînes de modélisation [qui] permettent de tester les effets combinés des changements climatiques et des évolutions d'itinéraires techniques sur la productivité, l'atténuation des risques, évaluent les marges de manœuvres sylvicoles, la faisabilité économique des itinéraires sylvicoles et des options d'adaptation ainsi que les incertitudes associées à ces diverses projections. » (*Ibid.*, p. 147).

Les capacités intégratives des modèles et des simulateurs – intégrateurs de différents formalismes, de diverses sources de données – permettent l'agrégation de ces informations multiples pour produire des projections d'évolution des forêts. La modélisation, la simulation, et le développement de la puissance de calcul des ordinateurs qui leur sont associés constituent la pierre angulaire de ce que cette première vision des futurs des forêts nomme « le pilotage intelligent des forêts » (*Ibid.*, p. 35).

2. *Piloter technologiquement et politiquement les 'Forêts-Infrastructures' : un ethos de la confiance*

Le futur des forêts est incertain. La vision du 'futur-risqué' admet cette incertitude mais en fait un moteur de l'action *via* la notion de risque. Dans cette perspective, il est important de prévoir et d'anticiper le changement climatique, et de multiplier les simulations et les modèles différents pour permettre une meilleure appréhension des risques. Comme l'a montré Gerda Reith (2004), le futur incertain envisagé par la notion de risque entraîne des stratégies anticipatives qui visent à « endiguer » – « *contain* » – l'éventail des futurs possibles. Dans cette perspective, il est important de développer de nombreux modèles, à diverses échelles spatio-temporelles, pour réussir à déterminer quels futurs possibles sont les plus susceptibles d'advenir.

Cette '*ethos* de l'anticipation' – prévoir et anticiper malgré les incertitudes – est intimement lié à une vision politique des écosystèmes forestiers : réformer les structures politiques et juridiques des forêts françaises, notamment à cause du morcellement de la propriété forestière privée, pour réussir à développer une 'Forêt-Infrastructure' capable de relever les défis du changement climatique (bois-énergie, stockage du carbone, réserve de biodiversité, peuplements résilients à l'augmentation des températures, etc.). C'est d'ailleurs le sens de la troisième caractéristique de la foresterie de précision : « de nouveaux schémas organisationnels intra et inter acteurs pour optimiser et déployer les concepts technologiques précédents » (*Ibid.*, p. 161). C'est également le sens des propos de Dominique quand il m'explique comment le changement climatique doit nous inviter à repenser totalement l'organisation politique de la gestion forestière en France. Chez lui, le changement climatique ne concerne pas seulement des enjeux en termes d'écologie et d'écophysiologie des arbres, mais également des enjeux liés à la structure juridique de la propriété forestière :

« Par rapport au changement climatique, il y a aussi un autre enjeu extrêmement important qui est que, dans la mesure où on veut commencer à transformer les choses, ça pose un problème évident de l'efficacité de la gestion forestière actuelle. La forêt communale est beaucoup trop éclatée, il y a actuellement onze mille communes forestières. Pour l'instant elles sont gérées de façon indépendante, donc il y a un enjeu de regroupement de la gestion, il faut absolument faire de grandes entités pour l'aménagement, la gestion, prévoir la chasse, pour mener des expérimentations. Et à plus forte raison, en forêt privée, on a encore plus cet impératif. Je pense que le modèle actuel de la gestion de la forêt privée ne marche plus, c'est complètement inefficace, et c'est ça qu'il faut

transformer dès maintenant avec des dispositifs de mutualisation, des choses comme cela. Et là, Le Foll¹⁵⁹ n'est pas allé jusqu'au bout, ce sera le boulot du suivant, il faut progresser dans la gestion concertée pour faire de grandes entités, et éventuellement du public-privé dans certaines régions. Ça me paraît aujourd'hui inévitable pour que les gens puissent se consacrer aux vrais problèmes qui sont : comment transformer les forêts de manière très ouverte, tester des choses... voilà. Je suis à 100% pour dire qu'il faut commencer tout de suite, et je trouve qu'on a déjà pris du retard depuis 10 ans » (Dominique, INRA et ONF).

On décèle deux dimensions politiques fondamentales de cette première vision : pour s'adapter au changement climatique, il est nécessaire d'opérer des réformes politiques et économiques concernant la structuration administrative et juridique des forêts. Puis, il faut effectuer ces réformes dès à présent, l'urgence des changements en cours nous enjoignant d'agir dès maintenant.

Enfin, au cœur de cette vision, il y a l'idée que la qualité et la transparence de l'information produite sur les forêts est un enjeu primordial pour orienter la décision politique. Pas de bonne décision sans une bonne information, d'où l'accent mis sur les technologies d'acquisition et de traitement des données forestières. C'est grâce à ces informations que les ingénieurs forestiers pourront réaliser le pilotage intelligent des forêts françaises. Cette mise en avant de la qualité de l'information comme critère essentiel à la bonne décision politique s'appuie, sur deux éléments importants eu égard à la vision du public et à la vision de la société inhérente à cette conception.

Premièrement, dans cette vision, l'information sert de support indubitable à la prise de décision. On rejoint ici les conceptions du modèle comme « juge de paix » pour trancher entre deux options socioéconomiques et écologiques différentes. Dans un travail de prospective réalisé en 2002, Hervé Brédif et Pierre Boudinot, ingénieurs agronomes, envisagent les leviers d'action pour adapter les forêts aux changements climatiques. Pour eux, un des freins qui peuvent retarder les réformes à entreprendre concerne la vision des forêts qu'en a le grand public :

« L'urbanisation croissante des populations conduit à une perte de contact avec les situations de terrain. Dans ces conditions, l'image que se forgent les populations des forêts procède d'un mélange de légendes, de récits, de lectures et d'images souvent catastrophistes « vues à la télévision ». Forêts qui partent en fumée, rhétorique pesante du désastre écologique planétaire imminent, grand méchant loup et récits de science-fiction

¹⁵⁹ Entretien réalisé en avril 2017, Stéphane Le Foll était alors ministre de l'Agriculture.

s'amalgament pour produire un imaginaire forestier où les deux motifs dominants semblent être le mystère, dans toute son ambivalence constitutive, et la nature menacée. » (Brédif et Boudinot, 2002, p.127)

Quelques pages plus loin, les auteurs mettent en avant la production d'une « information stratégique en temps réel [...] de meilleure qualité » (*Ibid.*, 213). Les réformes politiques et économiques des forêts doivent s'appuyer sur une information claire et précise, et non pas sur les images « fausses » partagées par la société, principalement l'idée de déforestation. Cette vision du futur repose donc sur une vision du public où les associations de protection de la nature, ou les collectifs de citoyens, viennent entraver la décision politique qui, elle, est informée par la science. Pour les acteurs qui partagent cette vision, il faut développer une information claire et précise et la mettre à disposition du grand public, pour éviter qu'il ne se méprenne sur l'état réel des forêts françaises. Le « pilotage intelligent » des Forêts-Infrastructures à l'échelle nationale est indissociable des assemblages sociotechniques producteurs de données. Ainsi, les décisions politiques forestières doivent être déterminées par l'ingénieur forestier. D'une certaine manière, le futur politique des 'Forêts-Infrastructures' est un futur technocratique.

Cette vision du 'futur-risqué' est critiquée par un certain nombre de travaux, notamment ceux du philosophe canadien Jean-Baptiste Vidalou (2017) qui dénonce la vision « déterrestree » que diffusent les nouvelles technologies de surveillance des forêts, et la promotion des Forêts-Infrastructures qui nient la forêt comme milieu social. Cet argument était déjà celui de Frédéric Le Play au XIX^{ème} siècle qui s'opposait à la doctrine forestière officielle qui visait à déposséder de leurs biens les populations des territoires de montagnes. De plus, comme on l'a vu dans la conclusion du premier chapitre de ce manuscrit, les cartographies ne sont jamais neutres : se replier sur une information précise peut être considéré ainsi comme une vision technocratique des politiques forestières.

Le 'futur-risqué' n'est pas un futur apocalyptique ou catastrophiste, bien au contraire. Les risques sont des opportunités d'action. Ce futur partage ainsi un certain optimisme face à l'avenir, notamment grâce aux développements de nouvelles technologies. Les discours sur les menaces et les risques qui pèsent sur les forêts se doublent d'un discours optimiste et prometteur sur les nouvelles technologies et les restructurations à entreprendre dans la gestion et la propriété forestières.

B. Le ‘futur-disruptif’ des changements globaux : les forêts sont des écosystèmes non-linéaires et stochastiques

Cette vision du futur est structurée autour de l’idée que les changements globaux bouleversent le fonctionnement des écosystèmes ainsi que nos connaissances sur le sujet. Elle est plutôt portée par les écologues et écophysioles forestiers, ainsi que certains modélisateurs. On les retrouve, notamment, au CEFÉ ou à l’INRA. Dans cette vision du futur sont critiquées les approches qui prolongent les tendances passées, comme les cartes d’aires de répartition. Dans cette vision, pour anticiper ce futur disruptif, il faut mettre l’accent sur des modèles qui simulent le comportement des écosystèmes dans des conditions limites, et non dans des conditions normales. Cette vision développe une critique des scénarios réalisés à l’échelle temporelle longue – « les cartes à l’horizon 2100 » – selon l’idée suivante : les chercheurs seraient poussés à produire ces cartes quand bien même elles n’auraient pas de pertinence scientifique, puisque le futur qu’elles cherchent à prédire est essentiellement différent de ce qui est connu aujourd’hui. Ces cartes auraient une pertinence sociale, mais pas de pertinence scientifique. Par conséquent, face à ce ‘futur-disruptif’, les chercheurs décident soit de renoncer à anticiper les effets du changement climatique sur les forêts, soit de freiner leurs activités de modélisation pour revenir au terrain ou à l’expérimentation. Cet ‘ethos de l’anticipation’ est une éthique du renoncement¹⁶⁰ à prédire.

1. Modéliser en conditions limites le fonctionnement des écosystèmes forestiers

Les acteurs qui partagent une vision disruptive des effets du changement climatique sur les écosystèmes forestiers mettent en avant des pratiques de modélisation qui viseraient à comprendre comment les écosystèmes forestiers fonctionnent dans des conditions dites limites, c’est-à-dire des conditions que l’on n’a pas encore observées à l’heure actuelle : augmentation du taux de sécheresse annuel de 30 %, fréquence possiblement accrue d’évènements extrêmes (tempêtes, sécheresses, ...). Pour ces acteurs, le ‘front de science’ se

¹⁶⁰ Ici, le renoncement renvoie à leur refus de ‘jouer le jeu’ de la prédiction. Comme me le faisait remarquer Raphaël Larrère, on pourrait dire qu’il partage aussi un *ethos* de la responsabilité dans la mesure où ils ne souhaitent pas que l’argent public de la recherche soit ‘gaspillé’ dans des technologies ‘à la mode’ mais peu pertinentes d’un point de vue scientifique, selon leur point de vue.

situé du côté de l'amélioration des connaissances écologiques dans ces conditions climatiques nouvelles et inconnues. Ainsi, ce discours qui promeut un tel type de modélisation est également très critique envers les promesses des nouvelles technologies de recueil et d'analyse de données : la télédétection d'un côté, et l'augmentation de la puissance de calcul de l'autre. Après avoir détaillé les arguments liés à la critique des promesses technoscientifiques de la télédétection et du calcul informatique des données écologiques et forestières, je trace les grandes lignes de cette « modélisation en conditions limites » qu'ils appellent de leurs vœux.

a. Une critique des promesses de la télédétection et de la puissance de calcul

L'idée centrale de la vision disruptive des futurs forestiers est que les changements globaux bouleversent nos connaissances sur les écosystèmes forestiers. Tandis que la science forestière s'est construite sur les hypothèses de la stabilité des stations forestières, le changement climatique met à défaut cette conception traditionnelle. De plus, les modèles corrélatifs s'appuient sur des bases de données anciennes à partir desquelles ils induisent le comportement de l'écosystème en question. Or cette prolongation de tendances passées n'est pas pertinente si l'on considère que le futur est disruptif. Dans cette perspective, ces acteurs critiquent fortement les promesses de la télédétection et de l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs. Pour eux, l'accumulation de données renseignant les tendances passées ou actuelles peut contribuer à escamoter la véritable nature différente et disruptive des tendances à venir. Ce n'est pas en ayant des données spatialement plus précises (télédétection) ou en agrégeant un nombre toujours accru de sous-modèles traités et calculés informatiquement (puissance de calcul et *Big data*) que l'on pourra mieux anticiper le futur des écosystèmes. Le 'front de science' se situe sur l'amélioration des connaissances fondamentales. Ce sont les propos défendus par Lionel, écophysiologue au CEFÉ, en réponse à ma question sur ce qui permettrait, selon lui, de faire progresser les connaissances, et *in fine* les capacités d'anticipation du changement climatique :

« Ce n'est pas une question de moyens de calcul, au contraire. Je trouve qu'il y a trop de puissance de calcul dans beaucoup de modèles, avec les modèles bayésiens, tous ces trucs-là... Il y a énormément de puissance de calcul, des trucs qui sont super optimisés. Moi, au contraire, je pense qu'il faut revenir à des processus beaucoup plus simples plutôt que la grosse optimisation des paramètres. C'est plutôt d'avoir des modèles assez simples qui ne modélisent qu'un processus, ou deux : le bilan hydrique, ou le bilan carbone... quelques processus et utiliser

ça avec les données, pour tester les mécanismes, faire des tests de sensibilité, et ça, je pense que c'est le plus intéressant... peut-être pas d'un point de vue, aide à la décision ou prévision, mais d'un point de vue démarche et recherche et apport de connaissance, ça m'intéresse plus que le gros modèle boîte-noire où il y a deux cents processus de modéliser, des dizaines de paramètres, le tout modélisé avec des supercalculateurs.... Mais je ne pense pas qu'on soit limité actuellement par la puissance de calcul, je pense qu'on est plus limité par les connaissances. » (Lionel, CEFE)

Le 'front de science', qui conditionne aussi la possibilité même de produire un savoir utile pour gérer les forêts, se situe sur la progression des connaissances fondamentales plutôt que sur l'augmentation de la puissance de calcul. C'est aussi l'avis de Jacques qui pense que « la puissance calcul a eu des effets délétères ». Pour lui, cela aurait engendré une mauvaise pratique scientifique qui consiste à tout « traiter par calcul numérique », et qui empêcherait de réfléchir et de comprendre le fonctionnement du système. Les propos de Jacques sont sans doute un peu exagérés, il reconnaît que la modélisation a permis de faire des progrès en écologie, seulement il regrette parfois qu'elle prenne le pas sur les connaissances fondamentales en écologie.

La technologie de la télédétection est mise en avant par certains acteurs institutionnels comme une technologie censée améliorer grandement la qualité des données, et donc la qualité des modèles. Télédétection et augmentation de la puissance de calcul sont, en quelques sortes, les deux faces d'une même médaille ; avec des données plus précises et des modèles qui calculent plus vite, on serait capable de mieux anticiper les changements globaux à venir. Le discours porté par le 'Big data' du *monitoring* environnemental est qu'aujourd'hui, la qualité de nos données et la puissance de calcul limitent nos connaissances, mais que demain, grâce aux progrès technologiques, nous serons à même de comprendre finement le fonctionnement des écosystèmes et d'anticiper leurs évolutions. Jacques critique ces promesses de « lendemains qui chantent », c'est l'objet de l'encadré 18 qui reproduit une partie de notre discussion.

Encadré 18 : Les « lendemains qui chantent » de la modélisation et la télédétection (extrait d'entretien avec Jacques)

Jacques : - Moi, je pense que la modélisation, c'est vraiment intéressant, il ne faut pas lâcher le truc, mais je n'y retrouve pas tout ce que j'aimerais y retrouver. Et je pourrais tenir exactement le même discours, pratiquement dans les mêmes termes, pour la télédétection ! C'est exactement la même chose ! C'est-à-dire que la télédétection, quand on écoute un télédécteur, c'est : « Ah non mais attends, demain ! Demain ! » . Ça sera toujours merveilleux demain ! Et ce sera merveilleux demain parce qu'on va tomber du 30 mètres au 10 mètres et du 10 mètres au centimètre, mais cette approche réductionniste est toujours... ce n'est pas ça le problème ! Le problème c'est... C'est déjà merveilleux la télédétection, mais il faut l'enlever des télédécteurs. Et je dirai que la modélisation, c'est un peu le même problème en fait.

Antoine: - Faut enlever des ordinateurs la puissance de calcul...

Jacques : - Ouais, ouais ! Et c'est ce qu'on pourrait dire un peu de tout. La biochimie c'est merveilleux mais à condition de savoir pourquoi on l'utilise, pour un écologiste en tout cas. La fin en soi, ce n'est pas la modélisation, c'est un outil quoi ! La télédétection, c'est pareil ! C'est un outil qui est déjà surpuissant, qui est déjà super-intéressant, et ce n'est pas la peine d'attendre les lendemains qui chantent ! Soyons capables au fur et à mesure de l'utiliser au mieux, voilà ! Pour moi, le vrai défi, c'est ça ! C'est d'être capable d'utiliser la modélisation, la télédétection, la biochimie de façon la plus intelligente possible, d'optimiser, en fait, ce champ disciplinaire par rapport aux objectifs de l'autre discipline »

Quand Jacques dit qu'il ne « faut pas attendre les lendemains qui chantent de la télédétection », cela signifie pour lui qu'il est vain de considérer que le 'front de science' se situe du côté de l'augmentation des puissances de calcul ou des promesses technologiques. Quand il soutient qu'il « faut l'enlever des mains des télédécteurs », Jacques veut dire qu'il faut mettre fin aux discours promotionnels, voir 'marketing', qui élèvent la télédétection au rang d'innovation de rupture, car elle est déjà assez puissante. Jacques prône un dialogue entre les différentes approches, et critique les discours qui présentent cette technologie comme la solution à tous les problèmes. Jacques critique également le réductionnisme de la télédétection : ce n'est pas parce qu'on peut descendre à une échelle très fine, ou parce qu'on va avoir des données très précises sur les écosystèmes forestiers que l'on comprendra forcément mieux les phénomènes. La télédétection, comme la modélisation, sont déjà des outils suffisamment puissants qu'il convient d'utiliser au mieux dès à présent. Il faut se départir de la tentation du réductionnisme qui pense que l'on comprendra forcément mieux les écosystèmes si on les étudie à l'échelle la plus fine possible. Pour Jacques, le plus important dans la modélisation, c'est d'aborder le phénomène étudié à la bonne échelle, l'échelle qui

« permettra de jouer sur la régulation du système ». Et ce n'est pas forcément en descendant jusqu'aux aquaporines¹⁶¹ qu'on pourra modéliser au mieux le fonctionnement d'un arbre ou d'une forêt – pour reprendre un exemple qu'il avait évoqué. L'importance de l'échelle d'étude du phénomène est primordiale, et Jacques critique le réductionnisme avec une métaphore assez parlante : « Votre voiture est en panne. Vous l'emmenez au garage. Le gars en face de vous, c'est un spécialiste du boulon. Il ouvre le capot, et il dit : « Ah ouais, ce boulon-là est cassé. » Oui, d'accord, mais il est incapable de remonter votre voiture. Donc des spécialistes du boulon, c'est très bien, mais quand on est en panne sur l'autoroute, ce n'est pas ce dont on a besoin ... [rires] »

Je détaille cette idée de la bonne échelle de modélisation par la suite. Pour conclure sur les promesses de la télédétection, il faut également avoir à l'esprit que c'est un enjeu important car il concerne la question des fonds alloués à la recherche. Est-il utile d'investir de grandes sommes d'argent pour améliorer des technologies qui permettent de fournir des données déjà suffisamment précises pour faire de l'écologie ? Pour Jacques ce n'est pas le cas :

« En télédétection, on est parti d'un pixel qui faisait 500 mètres, et puis on est tombé à des pixels qui faisaient 30 mètres, et puis on tombe à des pixels qui font 1 mètre. Bon très bien. Bon à 500 mètres, on ne peut pas faire d'écologie, à 30 mètres, on peut. Mais entre 30 mètres et 1 mètre, je ne pense pas qu'il y ait un gain conceptuel important qui nous permette de mieux utiliser la télédétection dans nos approches d'écologie » (Jacques, CEFE)

Jacques met en doute le « gain conceptuel » que procurerait une télédétection plus précise dans le recueil des données. Les doutes vis-à-vis des promesses de la télédétection se retrouvent également chez Brice, chercheur à l'IGN. Une couverture *LIDAR* de l'ensemble du territoire métropolitain français coûte 160 millions d'euros, ce qui équivaut, selon Brice, à « 30 km d'autoroutes ». C'est peu d'argent comparé à des secteurs où la France investit beaucoup comme la construction ou le nucléaire. Néanmoins, c'est un coût qui est largement supérieur au coût annuel de l'inventaire forestier français qui équivaut à 6 millions d'euros. Ainsi, pour une couverture *LIDAR* du territoire français, une photographie à l'instant *t*, on peut financer plus de 25 ans d'inventaire forestier. Le type de *monitoring* que permet l'inventaire forestier, qui suit dans le temps et l'espace l'évolution des forêts, n'est pas permis par la couverture *Lidar* qui ne donne qu'une photographie. On peut aussi rappeler la demande faite à l'IGN, après les tempêtes Klaus et Lothar, d'avoir un effort d'inventaire plus important

¹⁶¹ Les aquaporines sont des protéines membranaires qui forment des pores perméables à l'eau, et permettent ainsi le passage de l'eau dans les cellules.

et plus régulier, mais à coût constant, et qui a abouti à une telle perte de précision des inventaires forestiers qu'ils en ont perdu une part importante de leur sens.

Enfin, Baptiste, modélisateur à IRSTEA, explique les conséquences sociales que pourrait avoir la généralisation de la technologie *LIDAR* dans l'acquisition des données forestières :

« Donc avec le *LIDAR*, ça devient aussi un problème philosophique et de société. Si depuis le bureau, je suis capable de faire une description de ma forêt avec un taux d'erreur de 10% - les collègues de terrain sont plus proches de 30% - si je veux maintenir un réseau de forestier de terrain, comment je fais ? Dans le sens où je peux avoir une meilleure connaissance de ce qui se passe sur le terrain. Par contre il faudra toujours des gens pour aller vérifier sur le terrain, marquer des arbres. Donc ça veut dire que ça occasionnera peut-être un changement de métiers » (Baptiste, IRSTEA)

L'adoption de la technologie du *LIDAR* risque d'engendrer des bouleversements de métier chez les agents de terrain qui récoltent aussi les données forestières, font des inventaires, marquent les arbres à couper. Le choix du développement d'une technologie est toujours un choix politique et social. Les infrastructures technologiques créent des « dépendances de sentier » (Edwards et al., 2017) qui font que certains futurs ont, ensuite, plus de chances de se concrétiser que d'autres. Les acteurs qui critiquent la vision technocratique du 'futur-risqué' en sont bien conscients. Je reviendrai sur cette idée dans la conclusion générale de la thèse.

b. La modélisation comme maïeutique : penser les limites du fonctionnement des écosystèmes

La modélisation des écosystèmes 'en conditions limites' est au cœur de l'anticipation des effets disruptifs du changement climatique sur les forêts. C'est le sens des propos de Jacques quand il me tient ce discours : « Un modèle, ce n'est pas intéressant quand tout va bien. Ce qui est intéressant, c'est plutôt : j'ai trois mois sans pluie, qu'est-ce qui va se passer ? Et là effectivement, si on a une description simplement du modèle en conditions optimales, ça ne sert à rien ».

Les modèles de croissance, forgés pour prédire l'évolution des stocks de bois de forêts monospécifiques sont visés par cette critique de la « modélisation en conditions optimales ». Si ce type de modèles a été développé pour orienter une gestion économique optimale des

forêts françaises, les acteurs qui pensent que le changement climatique est disruptif dans ses effets critiquent ces modèles car ils se basent, notamment, sur les hypothèses d'une productivité linéaire et constante des forêts. Ainsi, pour ces acteurs, il faut se départir de l'image de la modélisation conçue comme la représentation de la réalité : « Le modèle n'est pas important pour reproduire la réalité, il est important, s'il nous permet de jouer sur la régulation du système » selon les dires de Jacques. Cette approche de la modélisation, conçue comme un travail heuristique ou une maïeutique, doit être accompagnée d'autres approches comme l'observation expérimentale des systèmes en conditions limites – possibles par exemple sur le site d'observation de Puéchabon où les écologues du CEFÉ ont monté un dispositif expérimental d'exclusion de pluies – ou grâce à des dispositifs expérimentaux comme les *écotrons* qui offrent la possibilité aux expérimentateurs de faire fonctionner des écosystèmes dans des conditions non observées actuellement, et dont on suppose qu'elles seront celles du changement climatique.

2. La « société nous demande de jolies cartes » : une critique des modèles d'aires de répartition, et une éthique du renoncement

Les cartes d'aires de répartition à l'horizon 2100, comme les cartes du projet CARBOFOR sont basées sur le concept de niche écologique, comme je l'ai déjà explicité lors du chapitre 3. Deux types de critiques ont été formulés par les acteurs à l'encontre de l'approche des aires de répartition des espèces. La première critique concerne la dimension corrélative de ces cartes. On projette, 'toute chose égale par ailleurs', la niche écologique passée et présente d'une espèce dans un climat futur. Il n'y a pas seulement une incertitude sur le climat futur, il y a également une incertitude inhérente à la projection de la niche climatique passée et présente dans le futur, car c'est une projection statistique qui ne prend pas en compte comment le fonctionnement de l'écosystème pourrait être affecté et altéré sous un climat futur. La seconde critique concerne le passage de la niche réalisée à la niche théorique. En effet, on détermine statistiquement la niche théorique à partir de diverses observations de l'espèce. Or, ces observations sont mâtinées d'incertitudes : s'il n'y a pas de chêne dans une région forestière particulière, cela signifie-t-il que les conditions ne satisfont pas sa niche potentielle ? Ou cela s'explique-t-il également par une gestion forestière particulière ? Par exemple, on a préféré planter des résineux plutôt que du chêne car ils poussent plus vite, ou parce qu'ils étaient, à l'époque, une essence dont le prix était supérieur.

Pour ces raisons, les acteurs qui partagent une vision disruptive du changement climatique sont très critiques envers ces cartes. Pour Maxime, constatant que c'est une approche en expansion, ces cartes à 2100 « servent bien la soupe ». Ses propos sont en phase avec l'émergence d'un agenda climatique tel que je l'ai détaillé dans le chapitre 3 de ce manuscrit. Ce « serait à la mode » de faire ce type de cartes, alors qu'on sait pertinemment qu'elles n'intègrent pas certains paramètres. C'est aussi le sens des propos de Jacques :

« Je ne suis pas capable de donner une équation, et de dire : « voilà comment ça marche ! » Donc je ne suis pas capable de faire une prédiction. Donc tous les gens qui font des prédictions de productivité des forêts, de stock de bois, en 2100 sous l'hypothèse qu'il pleuvra 30% de moins, ils se basent sur des règles d'allocation actuelles. On sait que ces règles d'allocations vont changer, mais on ne sait pas les modéliser. Ça ne nous empêche pas de faire des prédictions, mais quelle validité ont-elles ? Je n'en sais rien ! » (Jacques, CEFE)

Pour les acteurs qui adhèrent à cette vision du futur, les cartes d'aires de répartition correspondent à une demande sociale. Maxime me tient ce discours : « On met, dans les modèles, la mortalité carbone, ce n'est pas clair, mais ce n'est pas grave, c'est déjà dans les modèles, ça a déjà été vendu. Donc voilà, il y a des choses qui vont plus vite que la musique, il y a des choses qui ne sont pas mises et pourtant qui sont importantes... La société est tellement demandeuse de jolies cartes en couleur pour 2100 qu'il faut produire, produire et produire ... ». Pour Maxime, il y a une sorte d'injonction à produire des cartes à 2100 malgré les incertitudes inhérentes à ces approches.

Face à ces incertitudes, Maxime décide de renoncer à couper son modèle de propagation de feux de forêts avec les scénarios climatiques futurs pour faire des projections : « J'ai perdu l'intérêt de faire cela, j'ai même perdu l'intérêt de lire les publications sur ce sujet-là ». C'est aussi le sens des propos tenus par François Lebourgeois au colloque anniversaire du réseau RENECOFOR : « Je peux prédire la quantité des glandées à l'horizon 2050, mais je refuse de le faire ». Les glandées sont des phénomènes non-fréquentiels non-linéaires, on ne peut pas prévoir avec certitude si durant une année précise, les chênes produiront des glands ou non. François Lebourgeois pourrait coupler son modèle de croissance du chêne et de production de glands avec les scénarios climatiques du GIEC, il a la capacité technique de le faire. Mais n'accordant que peu de pertinence à cette approche, François refuse de le faire ; c'est bien ici l'*ethos* du renoncement qui est mise en avant dans cette vision du futur disruptif.

Enfin, pour ces acteurs, il faut agir avec prudence vis-à-vis de pratiques de gestion anticipatives qui pourraient se révéler avoir des conséquences catastrophiques, comme l'introduction d'espèces exotiques qui sont censées être mieux adaptées aux conditions climatiques futures, comme certains de mes enquêtés ont pu me le dire.

C. 'Le futur-passé' des forêts, systèmes historicisés aux dynamiques de long terme

Cette vision du futur des forêts fait, comme la deuxième vision, le constat que l'anticipation des futurs des forêts est incertaine, et que les outils qui simulent l'état et le comportement futur des forêts ne permettent pas, seuls, de produire une connaissance robuste sur la question. Cette vision est alors également critique envers les cartes d'aires de répartition à l'horizon 2100. Pour les acteurs qui partagent cette vision, le 'front de science' ne se situe pas dans l'anticipation du futur des forêts mais dans la compréhension de leur dynamiques passées. Néanmoins face à cela, ils souhaitent tout de même produire des connaissances utiles pour l'anticipation des effets du changement climatique, en essayant de comprendre les dynamiques forestières sur le long terme. Cet *ethos* de l'anticipation est une éthique de la responsabilité.

1. Comprendre les dynamiques passées des socio-écosystèmes forestiers

La compréhension de la dynamique passée des forêts est un des fronts de sciences pour anticiper les futurs des forêts mais aussi une manière pour d'appréhender comment les écosystèmes forestiers fonctionnent ou dépérissent. Quand je lui demande si ses travaux consistent à produire une connaissance sur le futur, Charles me répond en ces termes :

« Oui, je m'intéresse au futur dans mes travaux, mais la plupart du temps, c'est le passé que j'étudie ! Il me faut des données pour travailler, pour construire une théorie... Même si je fais des simulations de dynamiques forestières sur 500 ans, c'est plutôt pour identifier les leviers qui vont faire partir la forêt dans une direction plutôt qu'une autre. Ce que j'essaie de faire, c'est de comprendre comment ces leviers influent sur la dynamique

forestière. Et je n'essaie pas forcément de dire : « Ce sera comme ça dans le futur ! », tu vois la différence ? »
(Charles, IRSTEA)

Pour comprendre et anticiper les dynamiques forestières futures, il faut d'abord comprendre les dynamiques forestières passées. C'est le sens des propos de Charles qui modélise à une échelle assez fine le comportement et les évolutions des forêts de montagne. David, écophysiologue au laboratoire ESE, m'a tenu des propos similaires quand je lui demande s'il travaille sur le changement climatique :

« Je travaille sur le changement climatique mais pas avec l'objectif de prédire ce qui peut se passer dans l'avenir. Ce qui nous intéresse plus, ça va être de comprendre en lien avec le changement climatique, pourquoi on observe actuellement, et ça fait bien un siècle, pourquoi on observe des changements de productivité dans les forêts ? Donc c'est du changement climatique, mais en rétrospectif. Nous ce qui nous intéresse vraiment, c'est de voir en quoi l'augmentation des températures, les modifications des précipitations, les dépôts d'azote... changement climatique et changements globaux... en quoi ces changements observés ont entraîné des modifications de croissance, et d'ailleurs ce sont des phénomènes qui sont mal compris et qui sont très nombreux, des phénomènes de dépérissement forestier... qui existent un peu partout dans le monde... on travaille sur le changement climatique mais ça ne va pas être notre objectif de travailler sur le futur du changement climatique en fait, c'est vraiment sur l'aspect rétrospectif ... » (David, ESE)

David travaille sur le changement climatique mais plus particulièrement sur « l'aspect rétrospectif ». Cette expression quasi-antithétique renvoie au 'front de science' identifié précédemment : comprendre la dynamique passée pour anticiper la dynamique future. De plus, les forêts françaises sont déjà soumises à des changements de productivité – les modifications climatiques ont lieu depuis plusieurs dizaines d'années – sur lesquels on dispose de peu de données, car on a considéré jusqu'aux années 1980, que les forêts étaient stationnaires. Connaître le passé et les dynamiques sur le long terme des forêts pour anticiper leurs futurs n'est pas un mouvement propre aux anticipations des futurs des forêts. Le sociologue Martin Skrydstrup a fait un constat analogue dans son étude de la communauté des paléo-climatologues qui essaient de comprendre les états climatiques passés lointains pour comprendre les changements environnementaux à venir (Skrydstrup, 2017).

Un autre témoin de cette prise de conscience de l'importance de la dynamique passée pour comprendre les évolutions futures peut également être repéré dans les deux récents numéros spéciaux de la *Revue Forestière Française* consacrés aux forêts anciennes (numéro 4 et 5,

2017). Les forêts anciennes constituent un double enjeu au niveau scientifique et au niveau de la gestion forestière et de la lutte contre le changement climatique :

- Il est nécessaire de comprendre les dynamiques passées pour anticiper les dynamiques futures
- Les forêts anciennes jouent un rôle important dans la conservation du carbone et comme réserve de biodiversité ; une forêt ancienne a une valeur écologique plus importante qu'une plantation récente. Cette vision des forêts anciennes a été mise à l'agenda scientifique et politique par l'UICN forêt en 2016 (Vallauri et al., 2017, p. 560).

Comprendre les dynamiques passées des socio-écosystèmes forestiers nécessite le développement d'approches qui ne sont pas seulement écologiques, écophysiologiques ou statistiques. Il est alors important de développer des approches pluridisciplinaires. Comment être sûr que si je ne rencontre pas de hêtre dans l'ouest de la France, cela signifie qu'il ne peut pas y pousser ? Comment être sûr que cette inexistence ne s'explique pas plutôt par des éléments économiques et sociaux ? Par exemple, on a décidé de produire essentiellement du chêne. Comment être sûr que la répartition actuelle du hêtre s'explique par des facteurs écologiques, climatiques et géographiques (niche de l'espèce) et non pas par des facteurs sociaux et économiques (gestion historique de l'espèce) ? Bastien a participé à un projet de recherche qui visait à répondre à cette question :

« Il n'est pas impossible que la répartition du hêtre en France telle qu'on l'observe dans les données IFN soit sous-évaluée par rapport à ce qu'elle devrait être. Et donc, du coup, tu lances ton programme de recherche, et on avait fait un super truc avec les linguistes de l'université de Reims, et puis l'IGN. Les mecs de l'IGN ont filé aux mecs de Reims la BDNIME, c'est une base de données qui comporte tous les toponymes des cartes au 25.000. Tu as des millions d'entrées. Et les linguistes ont cherché dedans tous les toponymes qui avaient une racine « hêtre » dans les langues régionales : *fagus*, *faillar*... Et on obtient un résultat extrêmement sympa : dans la zone méditerranéenne, il n'y a pas de hêtre, et il y a quasiment pas de toponymes qui s'y rapprochent. Alors que dans l'Ouest de la France, où à l'heure actuelle, on n'a pas de hêtre ou très peu, il y a plein de toponymes qui se rapprochent du hêtre. Donc ce qui prouve bien qu'à un moment donné, il y a dû avoir beaucoup plus de hêtre qu'à l'heure actuelle. Et ce beaucoup plus de hêtre qu'on a dans l'Ouest de la France, nous, on ne le modélise pas, mais ceux qui font des modèles mécanistes, oui. Donc la limite climatique du hêtre ne serait pas là où on la place actuellement » (Bastien, INRA)

Les gestions forestières passées de la ressource française mettent en défaut les modèles corrélatifs qui extrapolent la dynamique future à partir de données présentes. Même les

données présentes semblent incertaines, car on ne peut pas savoir *a priori* si la composition de la forêt s'explique par des facteurs écologiques, géographiques ou climatiques, ou par des facteurs sociaux et économiques. Voilà pourquoi les acteurs qui partagent cette vision exhortent à une meilleure connaissance du passé des forêts.

Aussi, cette volonté de promouvoir une connaissance sur le long terme des forêts rentre en conflit avec les promesses du développement des technologies, mais aussi de la scientification et de la technologisation des recherches forestières depuis une cinquantaine d'années. Brice constate que ce qu'il nomme la « technosphère » n'a jamais été aussi puissante dans les recherches forestières, laissant pourtant de côté ces questions fondamentales de compréhension des évolutions sur le long terme des forêts :

« il existe des dynamiques de très long termes qu'on ne connaît pas exactement, des dynamiques à grandes échelles spatio-temporelles, que ce soit des problématiques de changement de croissance lié à des changement d'environnement ou des changements d'évolution de la ressource liés aux transitions économiques et industrielles des sociétés, ce sont des choses que personne n'a vu ! Et c'est là, qu'il y a un paradoxe, car on est à une époque où nos recherches sont plus faciles que jamais ! Parce qu'on a beaucoup de bases de données, d'inventaire, au niveau national, européen, parce qu'on a une capacité de calcul, avec l'informatique, avec des outils de simulation, tout ça, c'est sans précédent. Et puis parce qu'on a une recherche qui en termes d'effectif s'est beaucoup développée depuis les années 50, et la création de l'INRA. Donc on a jamais été aussi fort historiquement, sans doute, qu'aujourd'hui, c'est ça que j'appelle la « technosphère », on a jamais eu un arsenal aussi important au niveau de données, de *monitoring*, de capacité de modélisation, de capacités de recherche pour travailler sur ces forêts, et pour autant, on s'aperçoit que les constats majeurs sur l'évolution de ces forêts nous ont échappé. On les a constatés *a posteriori*, et on a bien du mal à les expliquer. Donc, c'est là où il y a un paradoxe assez net. Qu'est-ce que ça veut dire de cette capacité qui s'est développée, sur le papier, et qui est assez peu réactive, ou aussi peu apte à comprendre les choses quand elles arrivent réellement ? C'est un point assez intéressant » (Brice, IGN)

Ce paradoxe mis en avant par Brice peut se comprendre en termes d'agendas qui ont structuré les recherches forestières, et notamment le fait que la compréhension des dynamiques sur le long terme des évolutions forestières n'a jamais vraiment été au cœur de l'agenda des recherches forestières. Les modèles sylvicoles visent à prévoir la ressource pour optimiser la production de bois, tandis que les modèles écologiques se sont concentrés sur la mise en évidence des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts, dont la mort était alors pensée comme imminente. Les acteurs qui partagent la vision du 'futur-passé' des forêts militent alors pour une mise à l'agenda de ces questions sur celui des recherches forestières.

Cette connaissance du passé des forêts peut s'avérer d'autant plus importante que les modèles et les cartes qui anticipent les dynamiques futures peuvent orienter des décisions politiques. Dans ce contexte, il faut avoir à l'esprit que les modèles peuvent parfois prendre la fonction d'« engins balistiques » (Chateauraynaud, 2007) qui permettent de peser sur un débat pour en influencer la trajectoire. Dans l'encadré 19, Victor m'explique pourquoi il est critique envers les cartes d'aires de répartition. Il faut faire attention à ce que ces cartes ne viennent pas légitimer une option sylvicole plutôt qu'une autre en présentant des aires de répartition théoriques qui ne prennent pas en compte les dynamiques économiques et sociales passées des forêts.

Encadré 19 : Les cartes d'aires de répartition sont des « engins balistiques » (extrait d'entretien avec Victor)

« Les approches statiques qui consistent à prendre la répartition actuelle, la lier aux caractéristiques climatiques actuelles, regarder les caractéristiques climatiques futures, et ça permet de faire des cartes de répartition. Sauf que la répartition d'aujourd'hui de l'essence est liée certes au climat, mais pas seulement. Et donc, l'hypothèse est un peu trop forte de dire : - en gros, vu qu'elle n'est pas liée que à cela, ça crée des biais, et le fait d'avoir produit ces cartes, avec ces biais, a créé une inquiétude dans la profession qui a été très forte. Et qui a pu être un peu catastrophique dans certaines situations. Donc je pense qu'un peu de prudence aurait été la bienvenue.... Notamment pour la région Centre que je connais un peu, du hêtre dans la région centre, il n'y en a pas, mais s'il n'y en a pas, c'est qu'il y a du chêne ; le chêne dans ce secteur, région Centre, Pays de la Loire, représente 25% de recettes de l'Office, c'est énorme !!! Donc le hêtre, on lui tape dessus à fond, à fond, parce qu'on veut garder le chêne qui rapporte énormément. Donc aujourd'hui en région Centre, il n'y a pas de hêtre. Mais climatiquement, il pourrait très bien y être. Mais comme on lui a tapé dessus, il n'y en a plus, donc le modèle de distribution purement statique va dire : dans le climat de la région Centre, il n'y a pas de hêtre, donc si dans le futur, j'ai le climat de la région Centre dans le Nord-est, je n'aurai pas de hêtre. Et ça peut poser problèmes »

Face à cela, Victor se dit « prêt à limiter la diffusion de ses résultats si ça peut créer des problèmes ». Pour lui, le problème des cartes d'aires de répartition est qu'elles ont circulé dans toute la profession forestière, « et c'est peut-être sur cette dernière étape qu'il faut faire attention ». Limiter la diffusion ou diffuser les cartes en insistant sur une présentation pédagogique des différentes incertitudes, telle est l'éthique de la prédiction de cette troisième vision : malgré les incertitudes, il est nécessaire tout de même de communiquer les résultats.

Ces acteurs sont ainsi quand même prêts à ‘jouer le jeu’ de l’anticipation des futurs des forêts, notamment pour éviter que « d’autres acteurs parlent à leur place ».

2. Malgré les incertitudes, prendre la parole : une éthique de la responsabilité

Cette troisième vision du futur s’appuie sur une éthique de la prédiction qui, malgré les incertitudes et les biais qui sont inhérents aux travaux des modélisateurs et des écologues forestiers, ne renonce pas à prédire. Au contraire, il est nécessaire, pour ces acteurs, que les écologues aient leur mot à dire dans les débats qui concernent le changement climatique. Ils reconnaissent que l’écologie a un rôle social et politique important à jouer si on veut faire face au défi climatique : « L’écologie a une opportunité historique de devenir un acteur majeur du développement d’une société humaine durable » (Mouquet et al., 2015, p.1293).

C’est le point de vue défendu par Mathieu dans l’encadré 20. Lorsque je lui demande si l’écologie a pour objectif de prédire plutôt que de comprendre, Mathieu, même s’il pense que la compréhension des écosystèmes est fondamentale, accorde un statut important à la prédiction: « si nous, les écologues, on ne prend pas la parole, quelqu’un d’autre parlera à notre place », c’est en substance les propos tenus par Mathieu.

Encadré 20 : Si l’écologue ne prédit pas, d’autres acteurs parleront à sa place (extrait d’entretien avec Mathieu)

« Kepler quand il a fait ses lois d’astronomie, il s’est basé sur ce qu’il observait et il arrivait à faire de très bonnes prédictions. Mais, moi j’ai quand même tendance à toujours aller dans le sens : non il faut comprendre pour prédire même si parfois comprendre, c’est difficile voire même impossible. Généralement même avant de prédire, pour moi, l’écologie c’est de comprendre, comprendre les interactions entre les individus et l’environnement et les interactions entre les individus. Après doit-elle être prédictive ? Alors, ça dépend sous quel angle on se place. Si on prend en compte les attentes sociétales... ou plutôt, imaginons que l’écologie ne soit pas prédictive. Du coup, ce que d’autres personnes, notamment décideurs ou lobby pourraient décider parce que justement on manque de prédiction en écologie...elle le doit parce qu’il faut... c’est quand même les écologues qui sont les plus en mesure d’établir des prédictions dans ce domaine plutôt que ce soit d’autres gens qui prennent la place pour établir des scénarios d’évolution dans ce cas-là. Alors, voilà... elle ne doit pas être nécessairement prédictive, mais, j’ai envie de dire, mais quelque part, c’est un peu obligatoire »

L'écologue a une expertise particulière qui lui confère également une responsabilité, c'est bien le sens de cet *ethos* de l'anticipation. Malgré les incertitudes, il doit communiquer ses résultats, il doit entrer dans l'arène publique pour communiquer les grandes tendances des changements globaux. S'il refuse de le faire, d'autres acteurs le feront à sa place. Cette idée rejoint certains propos de chercheurs en écologie rapportés dans un article du *Monde* (Garric, 2020, mars) où plusieurs écologues insistent sur l'importance de prendre la parole dans les débats qui concernent le changement climatique ou la dégradation de la biodiversité.

A la suite de la publication en 2010 d'un livre dirigée par Sylvie Brunel, *Le ciel ne va pas nous tomber sur la tête : 15 grands scientifiques géographes nous rassurent sur notre avenir*, Mathieu et un ami ingénieur forestier à IRSTEA, décident de faire une recension de cet ouvrage qui, pour eux, présente une image erronée de l'état des forêts françaises : « Il y avait une section forêt qui relevait de référence, à notre sens, peu actuelles... Dans ce livre, on voyait une image, je crois, un peu risquée. Je suis d'accord qu'il ne faut pas avoir de discours alarmiste. Mais par contre, aller dans l'excès inverse et tout minimiser, qui était, au final, un peu le message du livre, je trouve ça dangereux » : l'illustration par l'exemple de cet *ethos* de la responsabilité.

D. Tableau récapitulatif des trois visions des futurs des forêts

	Le futur-risqué	Le futur-disruptif	Le futur-passé
Vision du futur et des actions à entreprendre	<ul style="list-style-type: none"> • Les risques actuels et futurs qui menacent les forêts sont une opportunité pour l'action. • Il faut anticiper pour agir dès maintenant. • Les promesses technologiques sont porteuses d'un futur optimiste : c'est la « flèche du progrès ». 	<ul style="list-style-type: none"> • Le changement climatique a, sur les forêts, des effets disruptifs : le futur n'est pas seulement incertain, il est inconnaissable dans les conditions actuelles. • Il est impossible de prolonger les tendances passées. • Il faut agir avec prudence 	<ul style="list-style-type: none"> • Pour connaître le futur des forêts, il faut d'abord comprendre leur passé. • Les données sur le long terme sont primordiales, il faut tout faire pour les conserver et les actualiser. • Il faut étudier et préserver les forêts anciennes.
Vision de la forêt	<ul style="list-style-type: none"> • Forêt-infrastructure : arme efficace contre le changement climatique • Assurer le pilotage intelligent des différentes fonctions des forêts. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecosystème complexe aux processus non-linéaire et stochastiques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Milieu socio-écologique et historicisé
Vision de la "science qui compte"	<ul style="list-style-type: none"> • Nouvelles technologies (<i>Big Data, Lidar</i>) • Rôle important conféré à la modélisation et la simulation pour le pilotage des forêts • Développer les réseaux d'observation et de surveillance, conserver les ressources génétiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser le comportement des écosystèmes forestiers « aux conditions limites » • Coupler la modélisation et l'approche expérimentale (<i>Ecotrons</i>) • Critiques contre les nouvelles technologies de recueil et de traitement des données et critique contre les cartes d'aires de répartition 	<ul style="list-style-type: none"> • Développer des approches interdisciplinaires • Harmoniser les données anciennes • Développer des approches historiques de l'évolution des forêts : les chercheurs forestiers sont avant tout des historiens.
<i>Ethos</i> de l'anticipation	<ul style="list-style-type: none"> • Un <i>ethos</i> de la confiance : anticiper les risques futurs pour agir dès maintenant. • La technologie et la précision de l'information garantissent la légitimité des actions politiques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Un <i>ethos</i> du renoncement : les phénomènes sont trop complexes pour être anticipés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Un <i>ethos</i> de la responsabilité : le chercheur forestier a un rôle à jouer dans la formulation des dynamiques écologiques, sociales, économiques et politiques futures. • Le chercheur forestier se doit de jouer ce rôle, sinon on parlera à sa place.
Acteurs et institutions qui portent et partagent cette vision	<ul style="list-style-type: none"> • Discours institutionnels (ONF, Ministère et Académie de l'Agriculture) • Acteurs économiques de la filière-bois • Certains modélisateurs forestiers au profil hybride (entre recherche et gestion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecologues forestiers (CEFE, INRA) – second profil 	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisateurs forestiers (second profil) • Profils hybrides (Irstea, Inra, ONF)

Tableau 4 : Trois visions des futurs des forêts françaises

Conclusion

Les futurs pluriels et incertains des forêts se déploient dans les infrastructures de recherche forestière qui cristallisent l'évolution des agendas de ces dernières. Néanmoins, pour comprendre en détail pourquoi ces futurs sont divers, l'enquête sociologique auprès des ingénieurs et des chercheurs forestiers montre que l'anticipation des futurs des forêts est un processus aux significations et aux enjeux multiples. Mettre en évidence les « engagements épistémiques » des ingénieurs et chercheurs forestiers permet alors de comprendre cette pluralité des futurs des forêts. En fonction de leurs trajectoires scientifiques, de leurs pratiques de recherches, ainsi que leurs relations avec la gestion forestière, ingénieurs et chercheurs forestiers se répartissent entre deux 'profils' idéaux-typiques : les 'modélisateurs forestiers' et les 'écologues forestiers'. Ces deux 'profils' entretiennent des « affinités électives » avec les trois visions des futurs des forêts :

[1] Le 'futur-risqué' et technocratique du pilotage des forêts infrastructures considère que le changement climatique est un défi et une opportunité pour réformer la structure politique et juridique des forêts. Cette vision met l'accent sur le développement de nouvelles technologies d'acquisition et de traitement des données. Elle s'appuie sur un '*ethos* de la confiance'.

[2] Le 'futur-disruptif' et inconnu des effets du changement climatique sur les dynamiques écologiques des forêts considère les forêts comme des écosystèmes complexes et stochastiques. Il s'appuie sur une critique des promesses technologiques et la promotion d'interactions accrues entre modélisation et expérimentation. Cette vision se base sur un '*ethos* du renoncement' à prévoir les futurs et une prudence dans le développement de stratégies anticipatives de gestion.

[3] Le 'futur-passé' des forêts les appréhendent comme des milieux socio-écologiques et historicisés où la conservation et la fabrication des données de long terme est un enjeu majeur. Pour anticiper le futur, il est d'abord nécessaire d'étudier le passé : c'est le 'front de science'. Ces derniers ne renoncent pas à anticiper les effets du changement climatique sur les forêts. Ils pensent qu'ils ont un rôle social à jouer dans la communication de leurs expertises, c'est l'*ethos* de la responsabilité.

Conclusion de la seconde partie : L'« écologie des futurs » des forêts au prisme des infrastructures de recherche forestière

L'enquête sociologique au cœur des infrastructures de recherche forestière m'a permis de mettre en évidence les dimensions sociales et politiques de la production des 'futurs numériques' des forêts façonnés par les pratiques de modélisation et de simulation des ingénieurs et chercheurs forestiers. Infrastructures de collecte de données (chapitre 4) et infrastructures informatiques (chapitre 5) sont sociotechniques. La 'politique implicite' du *monitoring* environnemental qui surveille la Nature dans une volonté de contrôle et de maîtrise (chapitre 4) n'est au final qu'une facette des futurs pluriels des forêts. En effet, les promesses technoscientifiques de surveillance et de pilotage des écosystèmes forestiers grâce aux nouvelles technologies d'acquisition et de traitement des données est emblématique de la vision du 'futur-risqué' (chapitre 6). Or cette vision du futur n'est pas partagée par tous les acteurs, et nombreux d'entre eux sont critiques envers les promesses technologiques au cœur du 'futur-risqué'. Les trois visions des futurs des forêts montrent qu'il n'y a pas de grand récit sur l'avenir des forêts qui serait partagé par tous les acteurs. Les futurs des forêts sont l'objet de débats et de compétitions entre différents acteurs qui essaient d'imposer leur vision des forêts et de leurs futurs, et de la 'science qui compte' à leurs yeux pour orienter les agendas des recherches forestières. C'est pourquoi, je propose d'appréhender les futurs des forêts par l'image de « l'écologie des futurs » (Michael, 2017). C'est l'enjeu de la conclusion générale la thèse.

Conclusion générale

I. Une étude historique et sociologique de l'écologie des futurs des forêts françaises

Cette enquête sociologique et historique au cœur des infrastructures de recherche forestière m'a permis de révéler les facteurs politiques, sociaux, économiques, scientifiques et techniques qui modèlent le visage des forêts françaises. Les forêts sont des lieux façonnés par les pratiques sociales, techniques et scientifiques des chercheurs, ingénieurs et gestionnaires forestiers, qui les appréhendent tour à tour comme ressources nationales en bois, dispositifs de prévention des catastrophes naturelles (inondations, glissement de terrain), régulateurs de la stabilité des écosystèmes (sol, eau), et infrastructures de lutte contre le changement climatique (stockage du carbone).

Au début de ce manuscrit, je remarquais que les forêts sont, aujourd'hui, de plus en plus pensées comme des infrastructures globales de lutte contre le changement climatique. Cette vision des forêts repose sur deux types de grands récits socio-environnementaux : d'une part le futur inquiétant des forêts menacées par les changements globaux, l'extension des terres agricoles ou les grands projets infrastructurels ; d'autre part le futur souhaitable des puits de carbone, des usines à biomasse, ou plus généralement de la bioéconomie. Ces grands récits, ou 'Grands Futurs' (Michael, 2017), tirent notamment leur origine d'un mouvement historique, celui de la genèse et du développement des infrastructures de recherche forestière. Le sociologue anglais Mike Michael (2017) a proposé la notion d'une 'Écologie des Futurs' pour décrire et analyser les relations intriquées, et parfois conflictuelles, entre les grands récits – 'Grands Futurs' – et les 'Petits Futurs' qui renvoient aux manières dont les grands récits sur l'avenir s'actualisent dans les pratiques quotidiennes et routinières des acteurs. Elaborée comme une intuition dans son article, la notion d'écologie des futurs me semble utile pour penser les futurs des forêts décrits et analysés tout au long de cette enquête. Ces futurs ont d'abord été analysés dans une perspective historique (partie 1), puis sociologique (partie 2). Au fil de l'enquête, j'ai étudié des grands récits, 'Grands Futurs', qui ont conditionné le développement des infrastructures de recherche forestière : les grands récits de l'affaiblissement de l'État par manque de bois, de la mort des forêts, ou celui des Forêts-

Infrastructures, menacées par le changement climatique et solution pour s’y adapter. A une échelle plus fine, mon enquête sociologique dans les laboratoires de sciences et d’écologie forestières a montré que les acteurs, les institutions, les pratiques scientifiques et gestionnaires actualisent des visions des futurs des forêts distinctes, et parfois concurrentes. D’une certaine manière, ce travail a permis de donner une chair historique et sociologique au squelette théorique proposé par le sociologue anglais. J’ai ainsi choisi d’écrire une histoire et une sociologie des sciences des forêts vue à travers le prisme des infrastructures de recherche forestière, définies comme les assemblages sociotechniques, scientifiques, politiques, organisationnels, institutionnels et juridiques qui sous-tendent les pratiques de connaissance et de gestion des forêts, et rendent pensables et anticipables leurs futurs. De la même manière que les arbres cachent les pratiques socio-économiques, scientifiques ou juridiques qui modèlent les forêts françaises, les ‘Grands Futurs’ des forêts sont portés, façonnés et orientés par les infrastructures de recherche forestière analysées dans cet ouvrage.

La première partie de ce manuscrit décrit la construction scientifique, sociale et politique des infrastructures de recherche forestière, et la manière dont elles véhiculent un nouveau rapport aux futurs des forêts. La quantification de la ressource forestière, opérée par l’administration, met à l’agenda scientifique et politique la prévision des futurs économiques des forêts, dans un contexte socio-écologique de déprise forestière sur l’ensemble du territoire français, et de demande accrue en bois de la part de l’industrie (chapitre 1). Pour empêcher le futur non-souhaitable de l’amenuisement de cette ressource naturelle, la science forestière vise à assurer une production de bois constante, continue, sans priver les générations à venir de son exploitation future. Le gouvernement des forêts s’appuie alors sur le développement d’institutions (écoles et presse forestières, stations de recherche, etc.), de techniques de gestion (la futaie, les éclaircies), de savoirs scientifiques ou de dispositions juridiques (Code forestier). L’administration forestière modèle le visage des forêts françaises *via* la généralisation de la futaie et la norme des forêts mono-spécifiques. C’est à ce moment que les forêts commencent à être appréhendées comme des infrastructures permettant la production de la ressource en bois et la prévention des risques naturels sur le territoire national, alors que le rôle des ingénieurs forestiers devient primordial dans leur aménagement. Ce processus de gouvernement de la ressource naturelle s’inscrit alors dans des orientations politiques, telles que l’affirmation de l’Etat sur son territoire fiscal ou géographique – à l’occasion de la Restauration des Territoires de Montagnes –, ou encore la politique de modernisation du territoire après la Seconde Guerre mondiale.

Par la suite, les infrastructures de recherche forestière telles qu'on les connaît aujourd'hui se développent à l'occasion de l'affaire des pluies acides qui menacent l'avenir des forêts : le *Waldsterben* (chapitre 2). Elles appréhendent les dynamiques des écosystèmes forestiers en termes de fonctionnement/dysfonctionnement. Les pluies acides et la possible mort des forêts initient puis généralisent les principes d'une surveillance biologique, écologique et sanitaire des forêts françaises et européennes. Cette dernière s'appuie sur la création d'institutions et de réseaux d'acteurs (RENECOFOR, DSF), le développement de savoirs, de technologies (modélisation et simulation informatiques, écologie et écophysiologie forestières) et de pratiques de gestion (typologie des trois facteurs de dépérissement). C'est un moment charnière de l'histoire des infrastructures de recherche forestière qui s'orientent alors vers l'anticipation des futurs écologiques et biologiques des forêts : les ingénieurs et chercheurs forestiers mesurent la concentration de certains composés chimiques (comme l'azote ou le soufre) dans ces écosystèmes, ils modélisent à l'échelle de l'arbre le fonctionnement de la photosynthèse, ils statuent sur la réalité du *Waldsterben*. C'est dans ce contexte qu'ils bricolent les modèles numériques, qui vont constituer des dispositifs technopolitiques centraux pour connaître et gérer les forêts, et anticiper leurs futurs.

L'irruption du changement climatique dans les recherches et la gestion forestières fait advenir le futur dual des forêts, menacées par les changements globaux et solution pour s'y adapter (chapitre 3). Elle témoigne également du développement incrémental des infrastructures de recherches. La « climatisation » (Aykut, Foyer et Morena, 2017) des recherches et de la gestion forestières est un processus diffus, qui s'appuie sur des mécanismes de re-labellisations et de convergences des deux grands agendas des recherches forestières. On assiste alors à une hybridation partielle des deux corpus disciplinaires des sciences des forêts : la science forestière, ou foresterie d'une part, l'écologie et l'écophysiologie forestières, d'autre part (chapitre 3). Pour endiguer les risques que le changement climatique fait peser sur l'avenir des forêts françaises, les acteurs forestiers (ingénieurs, chercheurs et gestionnaires) développent des pratiques d'anticipation qui cristallisent la construction des forêts comme infrastructures résilientes de lutte contre le changement climatique. Le grand récit des Forêts-Infrastructures, armes pour gagner la lutte contre le changement climatique, tire son origine du développement des pratiques de quantification et de mise en données, de modélisation et de simulation des écosystèmes forestiers. Comme j'ai pu le montrer dans le chapitre 6, ce grand récit est porté et actualisé par les acteurs qui adhèrent à la vision du 'futur-risqué' des forêts (Académie d'Agriculture,

ingénieurs de l'ONF) : le changement climatique est une opportunité pour développer un « pilotage intelligent des forêts » et une « sylviculture d'anticipation ». Ce grand récit ne fait pourtant pas l'unanimité parmi les acteurs de la communauté forestière.

La première partie de cet ouvrage dévoile un triple mécanisme de fabrication des futurs des forêts.

Premièrement, les futurs se pluralisent, comme en témoigne le passage de la prévision de la ressource économique grâce aux tables de production (chapitre 1) à l'anticipation des futurs contrastés et multiples des dynamiques forestières dans les climats futurs, grâce aux modèles forestiers couplés aux scénarios climatiques (chapitre 3). Ce processus de pluralisation des futurs des forêts est porté par trois développements des sciences des forêts : une 'biologisation' (chapitre 1) lorsque les scientifiques ne se préoccupent plus seulement de la ressource économique mais se mettent à étudier les liens entre l'arbre, le sol et la flore ; une 'écologisation' (chapitre 2) quand ils cherchent à comprendre les effets des polluants sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers ; et enfin une 'climatisation' (chapitre 3) par laquelle ils remettent en cause l'hypothèse de stabilité des stations et de la productivité forestières dans un contexte d'évolution des conditions climatiques.

Deuxièmement, les futurs se temporalisent. Les chercheurs et ingénieurs explorent les dynamiques forestières avec un horizon temporel défini, celui des plans d'aménagement, ou l'horizon lointain du changement climatique, à travers par exemple la cartographie des aires de répartition des essences forestières en 2100. Pour éviter que ne se réalisent les pronostics catastrophistes annonçant que « la France périra faute de bois » ou encore la disparition prochaine des forêts, chercheurs et ingénieurs forestiers mettent au point des artefacts quantificateurs, puis numériques, pour appréhender et visualiser les futurs possibles, et ainsi les rendre gouvernables.

La temporalisation rejoint alors le troisième processus : celui d'opérationnalisation de ces futurs. Grâce à la modélisation et à la simulation informatiques, les chercheurs et ingénieurs forestiers peuvent évaluer *in silico* l'influence de différents paramètres (la lumière, la disponibilité en eau, la compétition entre essences, l'effet de polluants, ...) sur les dynamiques forestières, en s'affranchissant du temps long de la croissance des forêts. Ils mettent alors au point une démarche d'anticipation pour répondre à la question suivante :

« que se passerait-il si ... ? ». En jouant ainsi avec les scénarios climatiques extrêmes, des plus optimistes aux plus pessimistes, ils déploient l'éventail des futurs possibles des forêts françaises. Les futurs numériques des forêts, qui procèdent de ce triple mouvement et résultent de la manière dont les scientifiques manipulent et font tourner les modèles numériques, sont ainsi des dispositifs techno-politiques qui visent à gouverner les forêts, notamment en les représentant et en les gérant comme des infrastructures de lutte contre le changement climatique.

La seconde partie de cet ouvrage restitue la démarche et les résultats d'une enquête sociologique au cœur des infrastructures de recherche forestière contemporaines. Les infrastructures de recueil de données, et plus généralement la production des données forestières, sont sociotechniques (chapitre 4). Elles apparaissent dans des conditions sociales et politiques qui déterminent leur fonctionnement. Elles comportent des inerties – sentier de dépendance ou « *path dependence* » (Edwards et al., 2007) – qui rendent certaines modifications coûteuses, voire impossibles. Leur fonctionnement est soumis à un risque d'« entropie » – une tendance à la désorganisation et à l'augmentation du chaos – au niveau financier, technique, et social, contre laquelle les acteurs déploient des efforts répétés. Ces infrastructures portent une promesse technologique de surveillance, de contrôle et de maîtrise des forêts. Elles rendent possible la création des futurs cybernétiques des forêts, conçus comme des dispositifs de gouvernement. Le terme « cybernétique » renvoie, ici, à son sens actuel, celui de l'écologie cybernétique et quantitative qui étudie des phénomènes complexes (Kwa, 1987). Il renvoie également à son sens étymologique : piloter un navire, et par extension le fait de gouverner.

L'étude sociologique de la production et de la circulation des artefacts informatiques montre que ces derniers ne sont pas des « boîtes noires » mais plutôt des dispositifs « translucides », plus ou moins opaques ou transparents selon la communauté d'acteurs à laquelle ils s'adressent. La plupart du temps, les modèles ont un fonctionnement « presse-bouton » pour la communauté des gestionnaires : ce sont alors des « boîtes opaques ». Toutefois, les métadonnées occupent une place primordiale dans la réappropriation de ces artefacts par d'autres modélisateurs, améliorant ainsi les collaborations à distance : ils deviennent alors des « boîtes transparentes » (chapitre 5). C'est une des caractéristiques fondamentales des infrastructures, telles que les décrivent les *Infrastructure Studies* (Star et Ruhleder, 1996). L'étude sociale de la production et de la circulation des données et modèles

forestiers démontre ainsi deux points, qui vont à l'encontre d'une compréhension naïve de la surveillance des forêts et de la production de leurs futurs numériques. D'une part, les futurs numériques ne sont pas de simples produits technologiques, mais sont toujours façonnés par des pratiques sociales. D'autre part, la surveillance et l'anticipation des futurs des forêts reposent sur des infrastructures décentralisées, loin de l'image du panoptique : les données forestières ne sont ni centralisées dans une infrastructure numérique unique, ni analysées et utilisées par un seul modèle. L'enquête sociologique menée dans les laboratoires de science et d'écologie forestières témoigne de la multiplicité des outils (bases de données, modèles et simulateurs, plateformes de modélisation) que les chercheurs et ingénieurs développent ou s'approprient pour anticiper les futurs des forêts françaises.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude des discours de justification des acteurs, pour comprendre dans quelles visions de la 'science qui compte' et des futurs des forêts ils s'inscrivent. Cette analyse mobilise la notion d'« engagement épistémique » (Granjou et Arpin, 2015 ; Granjou, Louvel et Arpin, 2015 ; Granjou, 2016) et repose sur une vision processuelle de la notion d'engagement, résultat de micro-choix opérés par les acteurs au cours de leur trajectoire professionnelle, académique et sociale. Les engagements épistémiques des acteurs forestiers renvoient plus spécifiquement aux croyances et conceptions qu'ils partagent sur ce que sont les forêts, sur les manières dont on peut, ou non, anticiper leurs futurs, sur les grands problèmes écologiques, sociaux et politiques auxquels elles seront confrontées dans les climats futurs, et les solutions à apporter pour y remédier. J'ai ainsi distingué trois types d'engagements épistémiques, liés à trois visions des futurs des forêts – le 'futur-risqué', le 'futur-disruptif' et le 'futur-passé' – qui articulent, chacune, un projet de connaissance, ou une vision de la 'science qui compte' ; une vision des forêts ; une manière de comprendre le futur et ses relations avec le passé, le présent et l'action ; enfin un *ethos* de l'anticipation (tableau 4).

Cette enquête m'a permis de conférer une épaisseur historique et sociologique à l'idée d'écologie des futurs. Deux idées ressortent alors de l'étude de l'écologie des futurs des forêts.

Premièrement, si un Grand Futur semble être aujourd'hui prépondérant concernant l'avenir climatique des forêts à travers leur futur dual, mon analyse montre qu'il faut également conférer une place à des 'Petits Futurs' – ceux qui émergent et s'actualisent dans

les pratiques quotidiennes et routinières des chercheurs, ingénieurs et gestionnaires forestiers. Etudier l'écologie des futurs, c'est ainsi être attentif aux conflits entre ces différents futurs. Les porteurs d'une vision du 'futur-risqué' des forêts invitent les communautés forestières à agir sans attendre pour s'adapter au climat futur, en mobilisant des promesses technoscientifiques (*Big Data*, *LIDAR*) qui concrétisent une surveillance des forêts. Les porteurs d'une vision du 'futur-disruptif' soulignent notre ignorance des effets des changements climatiques sur les forêts, et invitent les acteurs à agir avec prudence face à ce problème. Les porteurs d'une vision du 'futur-passé' mettent l'accent sur l'importance des données de long terme, ce « patrimoine scientifique » qui permet de dégager des tendances de fond sur les dynamiques des écosystèmes forestiers, à travers leurs trajectoires socio-écologiques, politiques et économiques. Les acteurs partageant la vision du 'futur-disruptif' critiquent avec véhémence les promesses technologiques qui sont au cœur du 'futur risqué', et adhèrent à une vision incertaine du futur. Ils militent ainsi pour inscrire d'autres priorités à l'agenda des recherches forestières, comme le développement d'approches croisées entre modélisation et expérimentation. Les futurs sont ainsi des « ressources stratégiques dans les processus de mises à l'agenda politiques et technologiques » des savoirs, technologies et infrastructures à développer (Brown, Rappert and Webster, 2000). Tout acte visionnaire est un acte politique, et les acteurs forestiers qui sont engagés dans une certaine vision des futurs des forêts partagent dans le même temps un engagement sur les infrastructures de recherches qu'il convient de développer, de modifier ou de réorienter. Pour M. Michael (2017), il faut appréhender ces futurs qui se situent à différents niveaux – *Big/Little* – non pas comme des réalités qui s'emboîtent, mais plutôt avec un « regard topologique ». Cette idée conduit à réfuter la proposition selon laquelle les 'Grands Futurs' contiendraient en eux les 'Petits Futurs' : les arguments présentés dans cette thèse témoignent en effet de la multiplicité et de l'intrication de ces futurs.

Secondement, l'enquête a montré l'importance de l'écologie des futurs pour comprendre le développement et le fonctionnement des infrastructures de recherche forestière. Ces dernières sont les soubassements matériels qui concrétisent les futurs possibles des forêts. Ainsi, les futurs ne sont pas de simples discours ou idées : ce sont les pratiques « matérielles et discursives » des acteurs qui les font (co-)exister. Ces pratiques qui contribuent au développement et au maintien des infrastructures de recherche font advenir et actualisent les futurs des forêts ; les infrastructures portent, orientent et mettent en mouvement ces futurs.

II. Une sociologie des futurs des forêts au prisme des infrastructures de recherches

Les contributions de ma thèse aux *Futures Studies* pourraient se résumer ainsi : le futur n'est ni un discours, ni une page blanche. Comme je l'ai montré dans la première partie de ce manuscrit, les discours catastrophistes sur l'avenir des forêts françaises – prédisant l'affaiblissement de l'Etat à cause de l'amenuisement de la ressource forestière, le *Waldsterben*, ou encore décrivant les conséquences de la sécheresse et la canicule de 2003 comme « l'avant-goût » des conséquences du changement climatique – ont eu un rôle moteur dans l'émergence, le développement puis la réorientation des infrastructures de recherche forestière. La simulation des forêts dans les climats futurs s'appuie sur le développement des infrastructures de production de données (chapitre 4), sur la mise au point d'artefacts informatiques simplifiés facilitant ainsi leur appropriation et réappropriation par les chercheurs et les ingénieurs (chapitre 5), et sur les nouvelles technologies d'acquisition et de traitement des données. Ces futurs, produits grâce aux modèles numériques, sont indissociables de nouvelles pratiques de gestion : la « sylviculture d'anticipation », comme le projet GIONO (chapitre 3), ou la constitution de bases de données de ressources génétiques forestières. Cette vision des forêts est au cœur de ce que j'ai nommé le 'futur-risqué', où les forêts sont conçues comme des infrastructures de lutte contre le changement climatique. Le développement de ces 'futurs numériques' démontre alors, comme a pu le mentionner le sociologue Richard Tutton (2017), que les futurs ont des trajectoires, portent en eux des inerties qui font que certains ont plus de chance d'advenir que d'autres.

L'essor des futurs mathématiques et numériques des forêts tire ses origines des pratiques de quantification de la ressource de la fin du XVIII^{ème} siècle, lorsque les arbres sont transformés en chiffres, et que les principes de la science forestière modèlent les paysages forestiers à l'image des plans de gestion et des inventaires : les 'forêts normales'. La surveillance continue des écosystèmes forestiers couplée à la modélisation et la simulation informatiques transforment alors les arbres en pixels, et porte une promesse de contrôle et de maîtrise des forêts : le « pilotage intelligent des forêts » (chapitre 6) où le développement des *Big Data* et de la télédétection constituent des technologies centrales. Ce 'futur-risqué' des forêts pourrait ainsi se trouver « verrouillé » par l'ensemble des traces matérielles que le futur numérique engendre. Néanmoins, comme le dit Richard Tutton, chaque futur emprunté est un

futur laissé de côté, et c'est pourquoi ces futurs numériques sont aujourd'hui contestés par certains acteurs scientifiques et associatifs (porteurs des visions du 'futur-disruptif' et du 'futur-passé'). Ainsi, les futurs des forêts, comme les infrastructures de recherche forestière qui les portent, comportent des inerties, des « dépendances de chemin », qui font que certains futurs ont plus de chance d'advenir que d'autres. En accord avec l'hypothèse de Richard Tutton, mon enquête a montré que les futurs des forêts laissent des « traces matérielles » et « verrouillent » des trajectoires possibles. Cela s'explique par le fait que les futurs sont des réalités « matérielles et discursives ». Cette caractéristique fait que les futurs sont des phénomènes « épineux et pernicious » à étudier – « *wicked problems* » (Tutton, 2017).

Les discours sur les futurs ont un caractère performatif, ils agissent sur la réalité qu'ils décrivent, comme quand les 'forêts normales' s'érigent. Les matérialités des futurs sont les conséquences volontaires ou involontaires qui créent les inerties et « verrouillent » des trajectoires possibles. Au début du XX^{ème} siècle, certains travaux de scientifiques germaniques, découvrant des dépérissements forestiers en Allemagne, mettent en accusation la sylviculture basée sur la science forestière, donnant lieu à ce qui est considéré comme des 'forêts-normales'. Lors de l'affaire des pluies acides, une délégation de la CFDT de l'ONF souhaite alerter sur le lien entre une « sylviculture productiviste » et dépérissement forestier (Chapitre 2-I-A), mais en 1985, l'ONF publie une note de service qui considère que le problème est à chercher dans la pollution atmosphérique et non dans la sylviculture. Les études publiées après l'affaire des pluies acides proposent l'hypothèse, qui fait aujourd'hui consensus, d'une intrication de facteurs explicatifs : les sécheresses des années 1970, la pollution atmosphérique et le mode de sylviculture. La science forestière, par la quantification, a engagé certaines forêts dans des trajectoires socio-écologiques aux conséquences matérielles involontaires. Cet exemple nous invite ainsi à penser les futurs environnementaux comme des hybrides. Reprenant l'expression de Sarah Whatmore, la sociologue Céline Granjou (2016) nous invite à penser les futurs comme « plus qu'humains », c'est-à-dire comme combinant les évolutions de la nature à celles de nos sociétés humaines :

« Penser le changement environnemental en sciences sociales, c'est reconnaître que l'homme n'est pas seul acteur de « son futur » ; c'est reconnaître que changement social et changement environnemental relèvent finalement d'une seule et même trajectoire vers les futurs conjoints de la nature et de la société. C'est se placer à ce point de jonction flou, mobile et essentiellement impur du point de vue de la démarche constructiviste, où la construction sociale du « sens » se confronte à l'activité propre du monde qui nous entoure et nous impose aussi

sa propre orientation, ses propres dynamiques, ses forces autonomes de devenir, et ses futurs « plus qu’humains ». » (Granjou, 2016, p.23)

Se situer à « ce point de jonction flou et mobile », c’est comprendre que les futurs sont des problèmes épineux et pernicious, voire même dangereux, en raison de leurs conséquences matérielles involontaires. Quelles seront les conséquences matérielles, socio-écologiques et économiques de la promotion des forêts comme puits de carbone ou des projets de centrale à bois¹⁶², pour lutter contre le changement climatique ? Comment les futurs socio-environnementaux des forêts françaises seront-ils marqués par ces promesses technologiques et économiques qui se déploient, aujourd’hui, dans un contexte politique marqué par la possible privatisation de l’Office National des Forêts ? Ces visions des futurs des forêts marqueront sans nul doute les compositions, les dynamiques et les visages de nos paysages forestiers, et des communautés qui les habitent ou qui les gèrent, dans un avenir proche.

Pour appréhender ces problèmes, C. Granjou invite alors les sociologues à « aborder le futur comme réalité matérielle ancrée dans des potentialités à l’œuvre dès à présent » (Granjou, 2016, p.17). C’est l’une des propositions de la sociologue Barbara Adam qui propose de comprendre que les futurs se déploient et s’ordonnent dans les pratiques quotidiennes :

« Ces futurs latents [et] en devenir sont mis en mouvement par des pratiques performatives, sociopolitiques, juridiques, scientifiques, économiques et quotidiennes. Et en tant que tels, ils sont réels et matériels au niveau des processus plutôt que des produits de l’action »¹⁶³ (Adam, 2008)

Les infrastructures de recherche forestière, ces assemblages qui rendent pensables et anticipables les futurs des forêts, mettent par exemple en œuvre ces pratiques qui concrétisent les futurs. Et c’est bien le cheminement qui a été le mien tout au long de ce manuscrit : analyser l’écologie des futurs des forêts françaises par l’étude des infrastructures de recherche forestière. Or, les pratiques des chercheurs, ingénieurs et gestionnaires forestiers qui font fonctionner ces infrastructures ne sont pas les seules à faire advenir et à actualiser les futurs des forêts. D’autres acteurs, associatifs et militants, s’érigent contre les futurs numériques et cybernétiques des forêts, et invitent à penser un autre rapport aux forêts, diamétralement

¹⁶²Comme le projet de reconversion de la centrale à charbon de Gardanne, qui fait toujours débat actuellement.

¹⁶³“These latent futures in the making are set in motion by socio-political, legal, scientific, economic and everyday performative, enacting practices and as such they are real and material at the level of processes rather than products of action.” (Adam, 2008)

opposé aux dispositifs techno-politiques de surveillance et d'anticipation qui ont été au cœur mon enquête.

III. Etudier les contestations des futurs cybernétiques des Forêts-Infrastructures

Cette enquête sur les infrastructures de connaissance et de gestion des forêts achevée, une piste de recherche émerge, celle de l'étude des contestations politiques et sociales d'acteurs associatifs et militants qui combattent les Forêts-Infrastructures comme les déforestations, et dont les travaux du philosophe Jean-Baptiste Vidalou (2017) constituent une éloquente illustration. Conscients que les discours, les savoirs et les technologies qui portent sur les forêts « verrouillent » des trajectoires possibles de leurs futurs, ces acteurs contestent cette vision « d'en haut » et « stratosphérique » de ces paysages (Vidalou, 2017). Ces communautés et ces lieux où se créent d'autres futurs des forêts ont été sciemment laissés de côté lors de ce travail, mais constituent une importante perspective pour poursuivre l'étude historique et sociologique des futurs des forêts françaises.

Dans cette thèse, je me suis intéressé aux futurs quantifiés et numériques des forêts. J'ai proposé de décrire ces futurs en tant qu'ils renvoient à un dispositif de gouvernement, un 'futur d'ingénieur', qui se matérialise grâce à la mise en chiffres et la mise en données, la surveillance technologique, la modélisation et la simulation informatiques : c'est le futur des Forêts-Infrastructures. Les futurs sont des ressources stratégiques que les acteurs mobilisent, ordonnent et actualisent pour venir légitimer des projets politiques et sociétaux. Ils peuvent donc faire l'objet de contestations. C'est le cas des futurs numériques et quantifiés critiqués par le philosophe Jean-Baptiste Vidalou (2017) dans son essai *Être Forêts. Habiter des territoires en lutte*. Il met en cause la vision cybernétique des forêts qui reflète une volonté de contrôle et de maîtrise de la Nature. Il condamne le *monitoring* des surfaces forestières, la bioéconomie, les usines à bois ou à biomasse forestière. La vision qu'il propose est totalement opposée à celle des Forêts-Infrastructures : pour lui, les forêts sont des « fronts », toujours en première ligne des grands projets infrastructurels, les premiers territoires à être occupés lorsqu'il s'agit de protéger les « Zones à Défendre » comme à Notre-Dame-des-Landes, à Bure ou à Kolbsheim.

Les futurs des forêts sont l'objet de rapports de force, de luttes sociales, environnementales et politiques. Ces collectifs qui souhaitent reprendre possession de ces lieux critiquent les futurs numériques des forêts pour les envisager comme des territoires à se

réapproprié, à habiter et à vivre, et comme des milieux sociaux. Ils les appréhendent également comme des fronts politiques pour contester la mise en ordre, ou la destruction de la Nature. Contre l'étendard de la Forêt-Infrastructure, ces collectifs brandissent celui de la Forêt-Territoire. Cette dichotomie n'est pas sans rappeler celle entre les « forêts infrastructures » de la doctrine forestière dominante du XIX^{ème} siècle, développée à l'occasion des Restaurations des Territoires de Montagnes, et les « forêts milieux » de l'école Le playsienne, vues comme des territoires ancrés dans des sociabilités et des économies 'traditionnelles' (chapitre 1).

Continuer l'enquête sur les futurs contestés des forêts permettrait alors de se rappeler que le futur comme « fait culturel » (Appadurai, 2013) n'est pas seulement celui des probabilités, de l'économie néo-classique, des risques et de la modélisation – ce que le sociologue indien nomme « l'éthique de la probabilité ». Le futur peut se déployer sur un autre mode – c'est « l'éthique de la possibilité » – qui met en jeu des manières de « penser, de sentir et d'agir qui accroissent notre horizon d'espérance et notre champ d'imagination » (Appadurai, 2013, p.295). C'est cet autre mode d'investigation du futur que le sociologue indien appelle de ces vœux quand il souhaite que l'anthropologie, traditionnellement focalisée sur le passé et la ritualisation, investisse l'étude des futurs, et de ses matérialisations dans les communautés *via* les notions d'imagination, d'espérance et d'anticipation. Ce sont ces futurs compris comme de nouvelles manières de vivre, d'habiter ou de faire collectif qui pourraient faire l'objet de travaux ultérieurs, comme autant de touches apportées au tableau déjà esquissé de l'écologie des futurs des forêts.

Annexes

Annexe 1 : Tableaux des enquêtés

Ces tableaux centralisent l'ensemble des entretiens réalisés avec les acteurs du milieu forestier. Les informations mentionnées sont celles qui ont été recueillies au moment de l'entretien. Certaines fonctions, grades ou thématiques ont pu changer par la suite, mais elles ne figurent pas dans les tableaux. J'ai choisi de garder le classement selon l'institut de recherche, même si l'IRSTEA et l'INRA ont fusionné le 1^{er} janvier 2020.

Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA)			
	Surnom	Informations	Thématiques
1	Christophe Modélisateur 27/11/2014	<ul style="list-style-type: none"> • Chercheur • <u>Parcours</u> : FIF (ENGREF) / Thèse 	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser les dynamiques forestières dans des contextes écologiques divers (favorables ou défavorables). • Modéliser les dynamiques forestières à large échelle (pays, continent, globe) et anticiper les impacts du changement climatique.
2	Richard Modélisateur 12/12/2014	<ul style="list-style-type: none"> • Chercheur (HDR) • <u>Parcours</u> : Master en sciences environnementale (ETH Zurich) / Thèse 	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser les effets du changement climatique sur la distribution des essences forestières • Simuler l'impact du changement climatique sur la biodiversité et les services écosystémiques forestiers.
3	Clément Modélisateur 18/02/2015	<ul style="list-style-type: none"> • Chercheur • <u>Parcours</u> : FIF / thèse cotutelle CNRS-Irstea • Réfèrent GIS Coop données • A travaillé plusieurs années à la RDI de l'ONF avant de « <i>revenir vers la recherche</i> » 	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser les compromis entre les différentes fonctions (production, protection, biodiversité) des forêts. • Contribuer à développer les bases scientifiques d'une gestion adaptative des forêts.
4	Charles Modélisateur 19/08/2015	<ul style="list-style-type: none"> • Chercheur (HDR) • <u>Parcours</u> : ENGREF / Thèse 	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser la structure et l'évolution des forêts de montagne selon différents scénarios sylvicoles ou climatiques.
5	Laurent Modélisateur 08/09/2016	<ul style="list-style-type: none"> • Doctorant • <u>Parcours</u> : Ecole d'ingénieur / Master « Biodiversité, Gestion Forestière » 	<ul style="list-style-type: none"> • Adapter un modèle de gestion de forêts mélangées de montagne pour le contexte hors-alpin. • Simuler l'évolution des forêts mélangées d'après les scénarios climatiques futurs.
6	Victor Modélisateur 09/02/2018	<ul style="list-style-type: none"> • Chercheur • <u>Parcours</u> : Ecole des Mines + DEA en biologie forestière / thèse en sciences forestières (LERFOB) 	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser et estimer le stockage du carbone dans les écosystèmes forestiers. • Etudier la productivité et la résilience des forêts mélangées.
7	Baptiste Modélisateur 26/04/2018	<ul style="list-style-type: none"> • Poste : Chercheur • <u>Parcours</u> : DEUG « Sciences de la vie » + ENITEF / Thèse en sciences forestières 	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser l'interception des chutes de blocs par les forêts de protection. • Développer des modèles de risque

Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)			
	Surnom	Informations	Thématiques
8	Damien Informaticien 28/09/2015	<ul style="list-style-type: none"> • Ingénieur en charge de la plateforme CAPSIS • <u>Parcours</u> : DEA Informatique 	<ul style="list-style-type: none"> • Développer et assurer la maintenance de la plateforme CAPSIS. • Former les nouveaux utilisateurs.
9	Robin Entomologiste 15/12/2015	<ul style="list-style-type: none"> • Chargé de recherche • <u>Parcours</u> : Thèse en biologie et génétique des populations sur un insecte ravageur forestier (Université de Tours) 	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser et prévoir l'expansion de la processionnaire du pin.
10	François Modélisateur 08/03/2017	<ul style="list-style-type: none"> • Ingénieur de recherche (AgroParisTech) • <u>Parcours</u> : Maîtrise et doctorat en modélisation forestière (Université – Québec) 	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser évolutions de forêts à échelles différentes. • Intérêt pour la propagation des erreurs statistiques entre les différentes échelles de modélisation.
11	Bastien Modélisateur 09/03/2017	<ul style="list-style-type: none"> • Ingénieur de recherche • <u>Parcours</u> : Master et thèse en biologie forestière à l'Université de Lorraine. • Participation à CARBOFOR • Membre du réseau AFORCE 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprendre les effets du changement climatique sur la distribution géographique, l'écologie et l'écophysiologie des essences forestières.
12	Grégoire Modélisateur 09/03/2017	<ul style="list-style-type: none"> • Enseignant-chercheur (AgroParisTech) • <u>Parcours</u> : DEA en biologie forestière / thèse en écologie forestière (Université de Lorraine) 	<ul style="list-style-type: none"> • Etudier la niche écologique des plantes forestières • Comprendre l'impact des changements environnementaux sur la distribution des plantes.

Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE)			
	Surnom	Informations	Thématiques
13	Mathieu Modélisateur 26/05/2015	<ul style="list-style-type: none"> Chargé de recherche (CR1) <u>Parcours</u> : FIF (ENGREF) + Master d'Ecologie / Thèse en écologie (CEFE) Comité Scientifique programme BGF du GIP Ecofor 	<ul style="list-style-type: none"> Comprendre les liens entre diversité et stabilité des écosystèmes forestiers. Anticiper l'évolution de la biodiversité forestière dans le contexte des changements globaux.
14	Charlotte Modélisatrice 26/05/2015	<ul style="list-style-type: none"> Directrice de recherche <u>Parcours</u> : Ecole d'agronomie (ENSAM) + DEA en écologie et évolution / Thèse en biologie de l'évolution (ENSAM) 	<ul style="list-style-type: none"> Modéliser les différents stades de développement phénologique des plantes et des arbres. Anticiper les aires de répartition futures des arbres en fonction des données phénologiques.
15	Jacques Modélisateur 29/09/2015	<ul style="list-style-type: none"> Directeur de recherche (DR1) <u>Parcours</u> : Maîtrise et doctorat en modélisation forestière. 	<ul style="list-style-type: none"> Modéliser les échanges de flux de matière (carbone, eau, nutriment) pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers.
16	Lionel Expérimentateur 18/11/2015	<ul style="list-style-type: none"> Chargé de recherche (CR2) <u>Parcours</u> : Ingénieur agronome (Supagro) / thèse en écologie fonctionnelle (CEFE) Coordinateur du site expérimental à Puéchabon. 	<ul style="list-style-type: none"> Comprendre les effets de la sécheresse sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers.
17	Maxime Modélisateur 19/11/2015	<ul style="list-style-type: none"> Chargé de recherche <u>Parcours</u> : Double-maîtrise : biologie et mathématiques / thèse en modélisation du paysage pour prévoir les risques incendies 	<ul style="list-style-type: none"> Prévoir et simuler le risque incendie sur les forêts méditerranéennes Anticiper les effets du changement climatique sur les risques de feux de forêts.
Laboratoire Ecologie, Systématique et Evolution (LESE)			
18	Dorian Modélisateur 20/03/2017	<ul style="list-style-type: none"> <u>Poste</u> : Enseignant-chercheur (Paris XI) <u>Parcours</u> : Master en écologie forestière / Thèse en écophysiologie végétale (Paris XI) 	<ul style="list-style-type: none"> Comprendre les déterminismes environnementaux des processus d'acquisition et d'utilisation des ressources (carbone, eau, nutriments) des arbres en forêt

Institut national de l'information géographique et forestière (IGN)			
	Surnom	Informations	Thématiques
19	Brice Modélisateur 15/06/2018	<ul style="list-style-type: none"> Poste : Chargé de recherche (CR1) <u>Parcours</u> : Ingénieur agronome (INA P-G) / thèse en sciences forestières (AgroParisTech) 	<ul style="list-style-type: none"> Modéliser les variations spatio-temporelles de la productivité forestière à partir d'observation à grande échelle (données d'inventaire)
20	Martin Modélisateur 26/06/2018	<ul style="list-style-type: none"> Poste : Conseiller technique de l'Inventaire Forestier Parcours : FIF (ENGREF) / Thèse en sciences forestière (ENGREF) 	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer les méthodes de l'inventaire forestier : qualité et précision des données, méthodes statistiques d'interprétation, ...

Office National des Forêts (ONF)			
	Surnom	Informations	Thématiques
21	Luc Utilisateur 24/07/2015	<ul style="list-style-type: none"> • RDI de l'ONF • Parcours : ENGREF / thèse en science forestière 	<ul style="list-style-type: none"> • Etudier les effets du changement climatique sur la gestion des forêts • Rédiger des guides de sylviculture
22	Corinne Utilisatrice 19/11/2015	<ul style="list-style-type: none"> • Direction territoriale de l'ONF • <u>Parcours</u> : DEA écologie végétale / thèse en modélisation de la croissance (Université de Lorraine) 	<ul style="list-style-type: none"> • Chargé de mission sur les thématiques environnementales
23	Serge Utilisateur 29/09/2015	<ul style="list-style-type: none"> • RDI de l'ONF • <u>Parcours</u> : FIF (ENGREF) / Ingénieur forestier en région puis à la RDI 	<ul style="list-style-type: none"> • Concevoir les guides de sylviculture de l'ONF pour les forêts françaises
24	Dominique Modélisateur & Utilisateur 16/03/2017	<ul style="list-style-type: none"> • Directeur de recherche (INRA), puis du pôle RDI de l'ONF • <u>Parcours</u> : ENGREF, thèse en modélisation de la croissance de peuplements 	<ul style="list-style-type: none"> • Anticiper les effets écologiques et socio-économiques du changement climatique sur les forêts • Développer des modèles de croissance des peuplements forestiers
25	Richard Modélisateur 26/06/2018	<ul style="list-style-type: none"> • Poste : Chargé de recherche • <u>Parcours</u> : Université (Québec) / Thèse à l'université de Laval en écophysiologie forestière. • plusieurs contrats INRA, ONF sur analyse de données 	<ul style="list-style-type: none"> • Assure les formations statistiques pour la RDI de l'ONF • Développement et maintenance du package <i>OnfR</i>

Département Santé des Forêts (DSF)			
	Surnom	Informations / Mission et travail	
26	Stéphane Correspondant 15/12/2015	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable environnement à l'ONF (agence de Sarrebourg) • Correspondant-observateur DSF depuis 1995 • Participe à la cellule de crise de l'ONF sur la processionnaire du pin 	
27	Frédéric Correspondant 11/07/2016	<ul style="list-style-type: none"> • Poste : Directrice de recherche • Parcours : FIF / thèse cotutelle CNRS-Irstea 	
28	Bruno DT 13/07/2016	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable santé des forêts au pôle Massif Central • Ancien correspondant-observateur • Au DSF depuis 20 ans. 	
29	Bertrand DT 20/07/2016	<ul style="list-style-type: none"> • Correspondant-observateur depuis 20 ans. • En poste à la DDT forêt : réglementations forestières (autorisation de défrichage, ...) 	
RENECOFOR			
30	Claude Agent 11/10/2017	<ul style="list-style-type: none"> • Agent forestier de l'ONF et correspondant RENECOFOR depuis le début du projet (1992) 	
31	Guillaume Agent 25/10/2017	<ul style="list-style-type: none"> • Agent forestier à l'ONF depuis presque 10 ans, et dans la région iséroise depuis quelques années 	

Annexe 2 : Modèle corrélatif et modèle fonctionnel : une opposition théorique, mais qu'en est-il en pratique ?

La distinction entre les modèles corrélatifs et les modèles fonctionnels s'est retrouvée dans tous les entretiens que j'ai menés avec les modélisateurs, qu'ils s'inscrivent dans l'agenda sylvicole ou dans l'agenda écologique. L'approche réductionniste portée par les modèles fonctionnels vise à comprendre le fonctionnement du système écologique en modélisant les processus qui sont à l'œuvre. L'approche empirique portée par les modèles corrélatifs vise plutôt, quant à elle, à aboutir à des prévisions robustes – c'est bien l'objectif des tables de production et des modèles de croissance.

D'un point de vue général, on peut faire porter la distinction sur la source de la connaissance. D'un côté, les modèles corrélatifs, ou statistiques, sont construits à partir de grandes bases de données (des accroissements d'arbres par exemple pour les modèles de croissance), c'est le cas du modèle *Fagacées*. Les équations qui modélisent le phénomène en question proviennent des données d'observations qui sont traitées statistiquement afin de faire émerger les variables pertinentes pour modéliser le système. Les modèles de croissance héritiers des tables de production, comme le modèle *Fagacées*, entrent dans cette catégorie de modèles, tout comme certains modèles d'aires de répartition à l'origine des cartes de distribution des espèces forestières françaises à l'horizon 2100 – ce sont les cartes du projet CARBOFOR (chapitre 3) dont une partie ont été construites avec le modèle de Wilfried Thuiller *Biomod2* (chapitre 5)

Les modèles fonctionnels, ou basés sur les processus, partent quant à eux de la « connaissance du système » : le modélisateur commence par écrire et formaliser les équations qui permettent de modéliser le comportement du système étudié. Dans cette catégorie, on retrouve les modèles écophysologiques comme celui de la photosynthèse (Farquar, Von Caemmerer et Berry, 1980), ou les modèles phénologiques comme *Phenofit* qui modélise tous les stades de développement d'un végétal. Ces modèles, basés sur des connaissances en écologie fonctionnelle ou en écophysologie, se développent surtout à partir des années 1980 – en France, c'est le contexte des pluies acides qui explique leur développement (chapitre 2)

Comment les acteurs statuent-ils sur cette différence ? Cette distinction, que certains acteurs envisagent comme « deux écoles de pensées différentes », correspond donc à deux histoires scientifiques et disciplinaires distinctes. Les modèles de croissance peuvent être interprétés comme les héritiers et les continuateurs des tables de production sylvicoles, et les modèles corrélatifs d'aires de répartition s'appuient sur une démarche holiste proche de l'écologie holistique menée à large échelle, comme les travaux de Vernadsky sur la biosphère, ou ceux de Robert MacArthur qui est d'ailleurs à l'origine du concept de « niche écologique ». Pour Brice, chercheur au laboratoire de l'IGN, il faut distinguer ce type d'écologie de l'écologie fonctionnelle : « L'écologie forestière en France est très synthétique. Ce n'est pas une écologie fonctionnelle, c'est une écologie qui repose sur de grandes bases de données d'observations, sur de grandes échelles, l'équipe de Grégoire a toujours travaillé à l'échelle nationale. ». On peut nuancer une partie des propos de Brice ; l'écologie fonctionnelle appliquée aux forêts existe en France et se retrouve essentiellement au CEFÉ, et notamment dans l'équipe FORECAST composée de Mathieu, Charlotte, Lionel et Maxime que j'ai rencontrés – leurs travaux se situent à mi-chemin entre l'écologie fonctionnelle et l'écophysologie. Les modèles basés sur les processus sont quant à eux les continuateurs des approches fonctionnelles et écophysologiques qui modélisent à une échelle assez fine les processus.

Au fil de mon enquête, j'ai découvert que cette opposition théorique – que l'on pourrait résumer à l'opposition classique entre causalité et corrélation – ne tient pas en pratique, et ce pour plusieurs raisons. Je m'appuie ici sur les propos de Bastien quand il m'explique comment on construit un modèle fonctionnel :

« Un modèle mécaniste est plus compliqué qu'un modèle statistique, car tu vas avoir plein de petits sous-ensembles. Un modèle mécaniste, tu vas avoir du climat qui arrive sur ton peuplement, du sol par en dessous, ton peuplement, il faut que tu choisisses si tu le fais d'une façon individuelle –un modèle individu-centré –ou bien, tu fais un modèle dit « *Big Leaf* », c'est-à-dire que tu vas considérer le peuplement comme un ensemble d'arbres moyen. Et ensuite, si tu veux faire pousser ces arbres, tu vas commencer par les équations de la photosynthèse de FARQUHAR : j'ai tant d'énergie qui m'arrive donc je peux fixer tant de carbone. Ce carbone est limité par quelque chose, par les stomates, donc il faut ouvrir et fermer les stomates. Il va être limité par la quantité d'eau disponible pour la plante, il faut que tu aies un modèle de bilan hydrique derrière. Si tu veux un modèle de bilan hydrique, il faut un modèle de répartition d'eau dans le sol, un modèle d'interception d'eau pour le couvert, que tu aies un modèle de transpiration, etc... Ensuite, tu vas fixer ton carbone, mais tu le mets où ? Qu'est-ce que j'alloue à la croissance de mes feuilles, à l'allongement de mes rameaux, à la mise en réserve ? Au grossissement du tronc ? À la fructification ? Tout ça, c'est de la phénologie, tu vois, tu emboîtes un tas de choses comme ça.

Un modèle statistique, c'est ni plus ni moins qu'un X et un Y, tu vas regarder une présence d'espèce versus un facteur de l'environnement. »

Il est faux de penser que la modélisation statistique ne mobilise aucune théorie ; le choix des données est déjà un choix théorique. De plus, il serait faux de penser que les modèles fonctionnels sont entièrement construits à partir de théories vérifiées, sinon le modèle fonctionnel pur ne ferait intervenir que des hypothèses sur le fonctionnement du système. Il faut prendre au sérieux la cascade de sous-modèles qui participent à la construction d'un modèle mécaniste. Si je décide de construire un modèle fonctionnel de la croissance d'un arbre, alors je dois intégrer dans mon modèle mécaniste un nombre important de sous-modèles : modèle de photosynthèse, modèle de bilan hydrique, modèle d'interception d'eau par le sol et le couvert forestier. La liste est longue, et on imagine clairement que pour construire un modèle purement fonctionnel, il faudrait que tous les éléments du système soient liés par des relations fonctionnelles traduites en équations. Or, comme Achille ne rattrapera jamais la tortue dans le paradoxe de Zénon, l'emboîtement des sous-modèles fonctionnels ne semble jamais s'arrêter à mesure où l'on essaie de tout déterminer par un sous-modèle fonctionnel. C'est le sens des propos de David, écophysiologue au LSCE : « Les modèles mécanistes ultimes, si on pousse la logique au bout, ils vont descendre à l'échelle du fonctionnement atomique en fin de compte ! Si vous voulez, un modèle mécaniste est un modèle réductionniste, et le réductionnisme, on peut le pousser jusqu'à tout découper, jusqu'aux molécules et aux atomes ! ». Bien entendu, aucun modélisateur ne descend jusqu'à l'échelle atomique pour modéliser la croissance ou le comportement d'un arbre. Au moment de présenter les résultats de son modèle mécaniste au colloque anniversaire du réseau RENECOFOR, Mathieu explicite cette fausse idée que l'on pourrait avoir sur le modèle purement fonctionnel : « Moi j'ai une approche mécaniste. Bon c'est un peu présomptueux de dire cela ... Si on voulait vraiment évacuer les corrélations des modèles mécanistes, il nous faudrait une autre planète ! » Une autre planète où on pourrait contrôler tous les facteurs et les éléments de l'expérimentation.

Ainsi, un modèle n'est donc jamais purement fonctionnel, ou purement corrélatif, et comme me le disait Laurent, ce n'est pas une différence de nature, mais une différence de degré : c'est un « gradient ». On peut considérer qu'un modèle est fonctionnel quand il modélise le système à une échelle inférieure. C'est ainsi que Victor distingue des deux approches :

« La différence, en fin compte, entre le modèle mécaniste et le modèle corrélatif, c'est juste l'échelle. Dans un modèle mécaniste, ce qui est modélisé est à une échelle de grandeur en-dessous de ce qui est simulé. En fait, le modèle est mécaniste ou empirique en fonction de l'échelle de simulation. On pourrait même considérer que nos modèles dendrométriques, empiriques, seraient mécanistes, si on simulait la biosphère ! Tu vois. Si on simule l'évolution de la végétation terrestre, mon modèle dendrométrique est mécaniste ! »

Ainsi, il ne faut pas se laisser abuser par les pièges du nominalisme qui tend à réifier et opposer des pratiques qui peuvent se rapprocher. Parler de « modèle fonctionnel » ou de « modèle corrélatif », c'est réifier une pratique. Ainsi, plutôt que réifier l'opposition entre le modèle fonctionnel et le modèle corrélatif, il convient de l'envisager comme un continuum entre deux pôles, où les pratiques concrètes des chercheurs peuvent tendre vers le modèle corrélatif ou le modèle fonctionnel.

Annexe 3 : Lexique des termes techniques

1. Lexique des termes en rapport aux futurs

Anticipation : prévoir ou imaginer ce qui pourrait se passer dans le futur – éventail des futurs possibles – pour agir, dès à présent, sur cette base.

Prédiction : la prédiction théorique est le résultat escompté de l'application d'une loi scientifique. Au sens statistique, c'est l'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un évènement dans le futur.

Prévision : étude de l'état futur d'un système à partir d'hypothèses et de conjectures.

Projection : prolongation d'une tendance passée ou présente dans des conditions futures.

Prophétie : c'est un discours sur le futur porté par un acteur qui prétend le connaître, ou en avoir eu la révélation.

Prospective : méthode qualitative, ou mixte, qui consiste à faire dialoguer différents scénarios du futur pour en tirer une compréhension.

Scénarisation : mise en récit des évolutions possibles et futures du comportement d'un système socio-écologique, économique ou politique. Le scénario comporte un arc narratif qui ordonne les faits (début, milieu, fin / causes probables, possibles et conséquences).

2. Lexique forestier

Arboretum : plantation d'arbres d'essences variées, consacrée à la culture expérimentale pour étudier le fonctionnement et les caractéristiques de ces dernières.

Biogéographie : étude de la distribution géographique de la faune et de la flore. Elle détermine les aires de répartition théorique et réalisée des essences et des espèces.

Biométrie : étude quantitative des êtres vivants grâce aux méthodes statistiques.

Calcul bayésien approché : approche statistique basée sur l'inférence qui ne nécessite pas qu'on se fixe une hypothèse précise à confirmer ou à infirmer. Elle se distingue de la statistique fréquentiste.

Chronoséquence : elle décrit un ensemble d'écosystèmes aux conditions écologiques similaires dans le temps. Elle se fonde sur l'hypothèse que la seule variable qui distingue les différents sites d'étude est le temps.

Débourrement : période phénologique de développement des bourgeons végétatifs et floraux des arbres.

Dendroécologie : étude de la largeur des cernes annuels de croissance des arbres en relation avec leur environnement.

Dendrométrie : ensemble des opérations qui mesurent le diamètre des arbres et certaines de leurs caractéristiques physiques comme la hauteur, le volume, ou l'âge.

Ecophysiologie [ou autécologie] : étude d'un individu biologique dans son contexte environnemental. On cherche à comprendre comment les réponses physiologiques et comportementales de cet individu font face aux contraintes du milieu dans lequel il vit.

Ecotrons : dispositif instrumenté qui permet de simuler expérimentalement le développement de petits écosystèmes dans les conditions écologiques et climatiques choisies par l'expérimentateur.

Eclaircie : opération sylvicole qui consiste à couper un certain nombre d'arbres d'une parcelle pour privilégier la croissance des autres individus.

Entomologie : branche de la zoologie qui étudie les insectes.

Futaie : forêt composée d'arbres issus de semis. Dans le traitement en futaie régulière, les arbres sont sensiblement le même âge.

LIDAR (*Light detection and ranging*): Cette technologie de recueil de données est basée sur les techniques de spectrométrie infrarouge. Le LIDAR projette à cent quatre-vingt degrés par un laser impulsif des rayons infrarouges. Quand le rayon laser touche l'objet à mesurer, il revient par la suite au radar. Grâce à la vitesse constante de la lumière, on peut calculer la distance entre le radar et l'objet mesuré.

Méristème : tissu cellulaire permettant la croissance des plantes.

Mycorhize : association symbiotique entre les racines d'un végétal et certains champignons présents dans le sol.

Parcelle : division d'une forêt. Par extension, elle va désigner l'unité de gestion où on effectue des opérations sylvicoles, ou l'unité de connaissance sur laquelle on mène des observations ou des expérimentations.

Pédologie : science qui étudie la formation des sols, leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Phytosociologie : étude des communautés végétales (associations) en relation avec leur milieu.

Station forestière : étendue de terrain homogène du point de vue climatique et topographique, et concernant les conditions du sol et celles de la végétation.

Stomate : ouverture présente sur l'épiderme de la tige ou de la feuille qui permet l'échange de gaz avec le milieu extérieur. Les stomates ont ainsi un rôle central dans le mécanisme de la photosynthèse.

Surface terrière : cette grandeur correspond à la surface de toutes les sections transversales des troncs, à 1,30 m de hauteur, des arbres présents sur un hectare de forêt. Elle s'exprime en m²/ha. Elle exprime ainsi une surface boisée.

Table de production : tableaux chiffrés décrivant l'évolution de peuplements forestiers monospécifiques, précisant leur âge, le volume et le rendement escompté.

Taillis : Peuplement forestier issu de régénération végétative (branche ou souche).

Tarif de cubage : Les tarifs de cubage présentent les volumes de bois escomptés selon l'essence et l'âge de cette dernière. Ils se présentent sous la forme de tableaux chiffrés, semblables aux tables de production

Xylogologie : étude des propriétés physiques et chimiques du bois.

Annexe 4 : Liste des encadrés et des tableaux

1. Liste des encadrés

Encadré 1 : La ‘fuite’ des cartes CARBOFOR dans la presse : le milieu forestier en émoi (extrait d’entretien avec Bastien)

Encadré 2 : Changement environnemental et changement climatique : la re-labellisation des thématiques de recherche comme modalité de la "climatisation" (extrait d’entretien avec Grégoire)

Encadré 3 : Vers une convergence des modèles sylvicoles et des modèles écologiques ? (extrait d’entretien avec Dominique)

Encadré 4 : Science forestière et sciences forestières : une défense de la foresterie (extrait d’entretien avec Brice)

Encadré 5 : Scénario optimiste et scénario pessimiste : le ‘style’ du raisonnement anticipatif (extrait d’entretien avec Laurent)

Encadré 6 : Paramétriser le modèle avec des données hétérogènes (extrait d’entretien avec Laurent)

Encadré 7 : L’astuce du ‘*space for time*’ (extrait d’entretien avec Victor)

Encadré 8 : « On n’a qu’une partie de l’histoire » (extrait d’entretien avec Bastien)

Encadré 9 : Algorithmes, logiciels et interface graphique

Encadré 10 : Les *packages R* : l’exemple de *biomod2*

Encadré 11 : La multiplicité des langages informatiques : « c’est comme si un jour, je parle français, et le lendemain, je dois apprendre le chinois » (extrait d’entretien avec Charlotte)

Encadré 12 : Un exemple de message de *commit* (extrait du package OnfR)

Encadré 13 : Les *commits* structurent les relations sociales des collectifs (extrait du package *OnfR*)

Encadré 14 : « Est-ce que les arbres poussent *ad vitam ad aeternam* ? » (extrait d'entretien avec Victor)

Encadré 15 : Distinguer le 'bug' de la 'variable' (extrait d'entretien avec Léo)

Encadré 16 : Qu'est-ce qu'être écologue ? (extrait d'entretien avec Victor).

Encadré 17 : La modélisation est un outil, parmi d'autres, pour comprendre le fonctionnement des espèces (extrait d'entretien avec Bastien)

Encadré 18 : Les « lendemains qui chantent » de la modélisation et la télédétection (extrait d'entretien avec Jacques)

Encadré 19 : Les cartes d'aires de répartition sont des « engins balistiques »

Encadré 20 : Si l'écologue ne prédit pas, d'autres acteurs parleront à sa place (extrait d'entretien avec Mathieu)

2. Liste des tableaux

Tableau 1 : La structuration des problématiques de recherche des agendas sylvicoles et écologiques

Tableau 2 : Points communs et différences de CAPSIS et OnfR

Tableau 3 : Deux profils idéaux-typiques : le 'modélisateur forestier' et l' 'écologue forestier'

Tableau 4 : Trois visions des futurs des forêts françaises

Annexe 5 : Liste des images

Image 1 : Table de production pour un peuplement en taillis de chênes purs (Vaulot, 1882, p.522)

Image 2 : Divergence dans l'évaluation des dépérissements des arbres (OPECST, 1985)

Image 3 : Présence du hêtre en France telle qu'elle est observée par l'IFN (Badeau et al., 2004)

Image 4 : Modélisation de l'aire de répartition du hêtre (Badeau et al., 2004)

Image 5 : Extrapolation de l'aire de répartition du hêtre en utilisant les données climatiques futures, ici 2100 (Badeau et al., 2004)

Image 6 : affichage du modèle Forceceps. (Xavier Morin (CNRS-CEFE, Montpellier), Harald Bugmann (ETH Zürich, Switzerland), Lorenz Fahse (University of Landau, Germany) April 2013)

Image 7 : Collecteur de litière, installé sur une placette d'observation RENECOFOR dans la forêt domaniale de Larivour (Photographie de Luc Croisé)

Image 8 : Site RENECOFOR, sous-couvert forestier, en forêt domaniale d'Anost, Saône-et-Loire (Photographie de Luc Croisé)

Image 9 : Gouttières et totalisateurs sous couvert forestier (Photographie de Luc Croisé)

Image 10 : Capture d'écran de l'interface CAPSIS à partir du modèle Twoe de G. Vieilledent

Bibliographie

Sources primaires

1. Articles scientifiques, presse forestière, presse en ligne, rapports de recherche, rapports d'activités,

Aleixandre-Benavent R, Aleixandre-Tudo J, Castello-Cogollos L and Aleixandre J (2017) "Trends in scientific research on climate change in agriculture and forestry subject areas (2005-2014)" *Journal of Cleaner Production*, 147: 406-418.

Annales Forestières (1808) *Annales Forestières faisant suite au mémorial forestier* [En ligne] consulté le 15/05/2020 [<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k58183815/f8.image>]

Annales Forestières (1842) *Annales Forestières*, 1 [En ligne] consulté le 15/05/2020 [<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6377947j>]

Antenne 2 (1990, décembre) « La forêt menacée » *INA* [En ligne] consulté le 18/05/2020 [<https://www.ina.fr/video/CAB90048951/la-foret-video.html>].

Augusto L, Bastien C, Dufrene E, Farcy C, Hervé JC, Jactel H et Pannatier E (2013) 2^{ème} *évaluation du REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers (RENECOFOR)*, novembre 2013 [En ligne] consulté le 17/05/2020 [<http://www1.onf.fr/renecofor/sommaire/renecofor/reseau/20090119-130815-828957/4/++files++/3>]

Badeau V, Dupouey JL, Cluzeau C, Drapier J et Le Bas C (2004) « Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières » In : Lousteau (dir.) *Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport final*, pp. 101-113.

Barthod C, Gauthier O, Landmann G, et Ebner P (1993) « Ecologie, débat public et politiques techniques: le dépérissement des forêts dix ans après » *Revue Forestière Française*, 45 (5): 509-524.

Barthod C (1994) « Le système de surveillance de l'état sanitaire de la forêt en France » *Revue Forestière Française*, 46 (5): 564-571.

Barthod C et Touzet G (1994) « De Strasbourg à Helsinki. Les deux premières conférences ministérielles pour la protection des forêts en Europe » *Revue Forestière Française*, 46

- (4): 319-334.
- Barthod C et Muller M (2006) « La gestion politique et technico-administrative du débat concernant l'impact des pluies acides sur les forêts françaises entre 1983 et 1991 » In : Corvol A (eds) « *Forêts et pollutions* ». *Journées d'Etudes Environnement, Forêt et Société, XVI-XXème siècle*. Paris : IHMC-CNRS, pp. 12-44.
- Barthod C (2009) « Le département santé des forêts, un corps à corps avec la complexité » *Colloque organisé à l'occasion des 20 ans du DSF*, 10 et 11 mars, à Beaune [En ligne] consulté le 16/05/2020 [https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/Le_Departement_de_la_sante_des_forets_un_corps_a_corps_avec_la_complexite.pdf].
- Barthod C et Landmann G (2017) « Mise en perspective historique du *monitoring* forestier » *Colloque organisé à l'occasion des 25 ans de RENECOFOR*, 11 à 13 octobre, à Beaune [En ligne] consulté le 16/05/2020 [http://www1.onf.fr/renecofor/++oid++6b9c/@@display_media.html].
- Bastin JF, Finegold Y, Garcia C, Mollicone D, Rezende M, Routh D, Zohner C, Crowther T (2019) "The global tree restoration potential" *Science*, 365 (6448) : 76-79.
- Baudrillart JJ (1827) *Code forestier suivi de l'ordonnance réglementaire et d'une table des matières*. Paris : Arthus Bertrand. [En ligne] consulté le 15/05/2020 [<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5831519w/f4.image.texteImage>].
- Bazire P (1984) « L'Inventaire forestier national français. » *Revue Forestière Française*, 35 (n° spécial) : 14-24.
- Becker M et Le Goff N (1988) « Diagnostic stationnel et potentiel de production » *Revue Forestière Française*, 40 (n° spécial) : 29-43.
- Bénédeau M, Sindou C, Ruchaud F, Bailly et Crémière L (2001) « Un partenariat scientifique original : la Coopérative des données sur la croissance des arbres et peuplements forestiers » *Revue Forestière Française*, 53 (2) : 171-178.
- Berger F et Dorren L (2010) « Rockfor.NET : le premier outil de diagnostic rapide de l'aléa chute de pierre à l'aval d'une forêt de protection » *Sciences, Eaux, Territoires*, 2 : 186-197.
- Birot Y, Landmann G, Bonhême I (2009) (dir.) *La forêt face aux tempêtes*. Versailles : Editions QUAE.
- Blanqui A (1846) *Du déboisement des Montagnes. Rapport lu à l'Académie des sciences morales et politiques de l'Institut de France*. Paris : Chez Renard [En ligne] consulté le

22/04/2020 [<https://play.google.com/books/reader?id=3CUDAAAAYAAJ&hl=fr&printsec=frontcover&pg=GBS.PP5>].

Bonneau M et Timbal J (1973) « Définition et cartographie des stations. Conceptions françaises et étrangères » *Annales des sciences forestières*, 30 (3) : 201-218.

Bonneau M (1989) « Que sait-on maintenant des causes du « déperissement » des forêts ? » *Revue Forestière Française*, 51 (5) : 367-386.

Bouleau G et Barthod C (2016) « Point de vue d'un acteur français sur la controverse des pluies acides (1983-1991) » *Vertigo*, 16(2) [En ligne] consulté le 16/05/2020 [<http://journals.openedition.org/vertigo/17672>].

Bouvarel P (1984) « Forces et faiblesses de la recherche forestière en France » *Revue Forestière Française*, 36 (n° spécial) : 88-94.

Brédif H et Boudinot P (2002) *Quelles forêts pour demain ? Eléments de stratégie pour une approche renouvelée du développement durable*. Paris : L'Harmattan.

CAQSIG (2016, avril) « CAQSIG 2016 (5-7 avril 2016, CNRS CEFÉ, Montpellier » [site Web] consulté le 15/05/2020 [<http://capsis.cirad.fr/capsis/documentation/reports/caqsis-2016>]

Campistron M (2019, août) « Planter quatre milliards d'arbres en Éthiopie, des paroles ou des actes ? » *France 24* [site Web] consulté le 14/05/2020 [<https://www.france24.com/fr/20190805-ethiopie-planter-quatre-milliards-arbres-environnement-deforestation-abiy-ahmed>]

Chauvière F et Bontemps JD (2017, juin) « L'état surprenant des forêts françaises » *France Inter. Les Savanturiers* [En ligne] consulté le 17/05/2020 [<https://www.franceinter.fr/emissions/les-savanturiers/les-savanturiers-04-juin-2017>].

Commission permanente du Congrès international de statistique (1874) « Compte-rendu des conférences de Stockholm » [En ligne] consulté le 16/05/2020 [<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6569072b.texteImage>].

Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux (2008, juin) *La forêt française en 2050 – 2100. Essai de prospective*. [En ligne] consulté le 15/05/2020 [<https://www.vie-publique.fr/rapport/33412-la-foret-francaise-en-2050-2100-essai-de-prospective>]

Courbaud B (1997) *Modélisation de l'éclaircissement et de la croissance de l'épicéa (Picea abies L.) en forêt irrégulière de montagne*. Thèse de doctorat en science forestière, Lyon 1.

- Courbaud B, Sardin T, De Coligny F, Cordonnier T, Deleuze C, François D, Riond C, Lafond V et Lagarrigues G (2016) « Utilisation du modèle individu-centré *Samsara2* pour analyser les sylvicultures en peuplement irrégulier » *Rendez-vous Techniques*, 53 : 12-23.
- Crutzen P et Stoermer E (2000) “The ‘Anthropocene’” *IGBP Newsletter*, 41 : 17-18.
- Decourt N (1964) « Les tables de production. Leurs limites et leur utilité » *Revue Forestière Française*, 8-9 : 640-657
- Decourt N (1965) « Les tables de production pour le pin sylvestre et le pin laricio de Corse en Sologne » *Revue Forestière Française*, 12 : 818-831.
- Decourt N (1967) « Table de production pour le Douglas dans le Nord-est du Massif Central » *Revue Forestière Française*, 8 (9) : 547-557.
- Decourt N et Lemoine B (1969) « Le Pin maritime dans le Sud-Ouest de la France : tables de production provisoires » *Annales des sciences forestières*, 26 (1) : 3-44.
- Decourt N (1971) « Tables de production pour l'épicéa commun dans le Nord-Est de la France » *Revue Forestière Française*, 23 (4) : 411-418.
- Delaballe C (2016) *L'Office National des Forêts ou le sentiment d'entreprendre : carnets 1964-1974*. Fontainebleau : ONF.
- Dhôte JF (1990) *Modèles de la dynamique des peuplements forestiers : articulation entre le niveau de l'arbre et du peuplement : applications à la sylviculture des hêtraies*. Thèse de doctorat en science forestière, Lyon 1.
- Dhôte JF, Cornu S, Richter C, Morneau F, François D, Renaud JP, Jolly A, Riond C, Bock J, Descroix L, Munoz A, Legay M, Dreyfus P, Ladier, Deleuze C, Piboule A, Micheneau C, Chopard B, Gibaud G, Boulanger V, Goutal N, Piat J, Girard Q, Ulrich E, Conrard F, Château J, Nicolas M, Hergibo D, Rakotoarison H et Conche J (2015) *Rapport d'activité soumis pour l'évaluation des activités R&D de l'Office National des Forêts période 2010-2014*. Fontainebleau : ONF.
- Doucet R et Côté M (2009) (dir.) *Manuel de foresterie*. Québec : Editions Multimondes.
- Drège P O (2003) « Editorial » In : Rey B (dir.) *Rendez-vous Technique*, 1, p.2
- Dufour-Kowalski S, Courbaud B, Dreyfus P, Meredieu C and De Coligny F (2012) “CAPSIS : an open software framework and community for forest growth modeling ” *Annals of Forest Science* 69: 221-233.
- Duvigneaud P (1971) « Résumé du colloque, remarques et conclusions. » In: Duvigneaud P (eds) *Productivité des écosystèmes forestiers. Actes du colloque de Bruxelles organisé*

- par l'Unesco et le Programme Biologique International (27-31 Octobre 1969). Paris : Unesco, pp. 687-703.
- Ellenberg H (1971) « The Solling Project, an IBP/PT integrated project in the Federal Republic of Germany » In: Duvigneaud P (eds) *Productivité des écosystèmes forestiers. Actes du colloque de Bruxelles organisé par l'Unesco et le Programme Biologique International (27-31 Octobre 1969)*. Paris : Unesco, pp. 667-670
- Fady B, Benard A, Pichot C, Peiffer M, Leban JM et Dreyer E (2014) “The open data debate: a need for accessible and shared data in forest science ” *Annals of Forest Science*, 71(5): 523-525.
- Farquhar GD, Von Caemmerer S, Berry JA (1980) “A biochemical model of photosynthesis CO₂ assimilation in leaves of C₃ species” *Planta*, 149 (1): 78-90.
- Ferretti M and Fischer R (2013) (eds.) *Forest Monitoring: Methods for Terrestrial Investigations in Europe with an overview of North America and Asia*. Amsterdam : Developments in Environmental Sciences.
- Flot JL (2004) « Sécheresse et canicule 2003 : du diagnostic à la gestion » *Rendez-vous techniques*, 3 : 56-60.
- Flot JL (2009) « L'évolution des missions du DSF et du dispositif de surveillance de la santé des forêts » *Colloque organisé à l'occasion des 20 ans du DSF*, 10 et 11 mars, à Beaune [En ligne] consulté le 18/05/2020 [https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/Evo_DS_Flot_ppt.pdf].
- France 3 Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (2019, octobre) « Découvrez le travail des agents de l'Office National des Forêts » [site Web] consulté le 15/05/2020 [<https://france3-regions.francetvinfo.fr/provence-alpes-cote-d-azur/var-decouverte-office-national-forets-1349045.html>].
- Garric A (2020, mars) « Savants ou militants ? Le dilemme des chercheurs face à la crise écologique » *Le Monde* [En ligne] consulté le 19/05/2020 [https://www.lemonde.fr/sciences/article/2020/03/09/savants-ou-militants-le-dilemme-des-chercheurs-face-a-la-crise-ecologique_6032394_1650684.html].
- GIP ECOFOR (2004) *Activités 2004. Perspectives 2005* [En ligne] consulté le 16/05/2020 [<http://www.gip-ecofor.org/rapport-dactivites-2004/>]
- Griset P (2011) *Du Cemagref à IRSTEA : Un engagement pour la recherche environnementale*. Paris: Editions Quae.

- Guehl JM, Birot Y et Caquet T (2016) « Les recherches forestières à l'INRA : acquis, évolutions et défis pour le futur » *Archorales*, 16 [En ligne] consulté le 16/05/2020 [<http://www.inra.fr/archorales/Billets/Archorales-Tome-16-chercheurs-en-foret>].
- Guinier P (1952) « Préface » In : Perrin H *Sylviculture. Tome Premier : Bases scientifiques de la Sylviculture*. Nancy : Ecole Nationale des Eaux et Forêts, pp. IX-XXII.
- Guinier P (1955) « La science forestière et la xylogologie au VIII^e Congrès International de Botanique » *Revue Forestière Française*, 4 : 249-257.
- Guinier P et Rol R (1995) *L'écologie forestière enseignée par Philibert Guinier suivie par le forestier devant le phytosociologue par René Rol*. Nancy : ENGREF.
- Godchaux (1869) « Méthode pour calculer l'accroissement des bois » *Revue des Eaux et Forêts*, 8 : 459-460.
- Hilborn R and Mangel M (1997) *The Ecological Detective. Confronting Models with Data*. Princeton (New Jersey): Princeton University Press
- Huffel G (1904) *Economie Forestière*. Tome 2. Paris : Lucien Laveur.
- Huffel G (1929) « Les débuts de l'enseignement forestier en France par Bernard Lorentz 1825-1830 » *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences*, 3 : 1-135.
- Ladier J, Rey F et Dreyfus P (2012) *Guide des Sylvicultures de Montagne des Alpes du Sud françaises*. Fontainebleau : ONF et IRSTEA.
- Landmann G (1990) « Le dépérissement des forêts : la pollution atmosphérique, seule responsable ? » *Annales des Mines – Réalités industrielles*, n° spécial : 37-42.
- Landmann G (1991) (eds.) *Les Recherches en France sur le Dépérissement des Forêts. Programme DEFORPA. 2^{ème} Rapport : Dépérissements des Forêts et Pollution Atmosphérique*. Nancy : ENGREF.
- Landmann G, Dupouey JL, Badeau V, Lefevre Y, Bréda N, Nageleisen LM, Chuine et Lebourgeois F (2007) « Le hêtre face aux changements climatiques » *Rendez-vous techniques*, hors-série n°2 : 29-38.
- Landmann G, Dupouey JL, Badeau V, Lefevre Y, Bréda N, Nageleisen LM, Chuine et Lebourgeois F (2008) « Le hêtre face aux changements climatiques » *Forêt-entreprise*, 180, mai, pp. 28-33
- Landmann G (2017) « Quelles perspectives pour le suivi des forêts ? Introduction à la thématique » *Colloque organisé à l'occasion des 25 ans de RENECOFOR*, 11 à 13 octobre, à Beaune [En ligne] consulté le 16/05/2020 [<http://www1.onf.fr/renecofor/sommaire/colloque/future/@@index.html>].

- Le Hir P (2017, mai) « La *Vie secrète des arbres*, best-seller et leçon de bonheur. » *Le Monde* [En ligne] consulté le 14/05/2020 [https://www.lemonde.fr/idees/article/2017/05/29/lecon-de-bonheur-des-arbres_5135312_3232.html]
- Le Play F (1847 [1996]) *Des forêts considérées dans leurs rapports avec la constitution physique du globe et l'économie des sociétés*. Ecole Normale Supérieure de Fontenay Saint-Cloud, collection Sociétés, espace, temps.
- Legay M et Mortier F (2006) *La forêt face au changement climatique : adapter la gestion forestière*. Collection dossiers forestiers, n°16. Fontainebleau : ONF.
- Le Roy CG (1757) « FORET » In : *L'Encyclopédie*, 1ere édition, Tome 7 : 129-133 [En ligne] consulté le 15/05/2020 [https://fr.wikisource.org/wiki/L%E2%80%99Encyclop%C3%A9die/1re_%C3%A9dition/FORET].
- Lousteau D (2004) (coord.) *Rapport Final du projet CARBOFOR. Séquestration du Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts des différents scénarios climatiques et sylvicoles*
- Maillet A (2014) (dir.) « EMERGE – Elaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Energie » *Rendez-vous Techniques*, n°44 : 17-80.
- Manifeste de Tronçais (2018) « Manifeste de Tronçais : pour la forêt française, notre bien commun » [En ligne] consulté le 19/05/2020 [<https://marche-pour-la-foret.webnode.fr/files/200002879-3f02e3ffbb/Manifeste%20de%20Tron%C3%A7ais-0.pdf>]
- Mathieu A (1874) « Les forêts à l'exposition universelle de Vienne en 1873 » *Revue des Eaux et Forêts*, 13 : 145-167.
- Mouquet N, Lagadeuc Y, Devictor V, Doyen L, Duputié A, Eveillard D, Faure D, Garnier E, Gimenez O, Huneman P, Jabot F, Jarne P, Joly D, Julliard R, Kéfi S, Kergoat G, Lavorel S, Le Gall L, Meslin L, Morin X, Morand S, Morlon H, Pinay G, Pradel R, Schurr F, Thuiller W et Loreau M “Predictive ecology in a changing world” *Journal of Applied Ecology*, 52(5): 1293-1310.
- Mwai P (2019, December) “Did Ethiopia plant four billion trees this year?” BBC [site Web] consulté le 14/05/2020 [<https://www.bbc.com/news/world-africa-50813726>]
- Myers J, Zoeller T and Vom Saal F (2009) “A clash of old and new scientific concept in toxicity, with important implications of public health” *Environmental Health Perspectives*, 117(11): 1652-1655.

- National Science and Technology Council (1997) *Integrating the Nation's Environmental Monitoring and Research Networks and Programs: A proposed Framework*.
- Meijers E (1986) "Defining Confusions ? Confusing definition" *Environmental Monitoring and Assessment*, 7 (2): 157-159.
- Millier C (1973) « Méthodologie mathématique des études des liaisons station-production » *Annales des sciences forestières*, 30 (3) : 351-366.
- National Science and Technology Council (1997) *Integrating the Nation's environmental monitoring and research networks and programs: a proposed framework*. March 1997.
- Nicolas M, Cecchini S, Croisé L et Macé S (2017) *RENECOFOR – Bilan de l'année technique 2016*. Fontainebleau: ONF, Direction forêts et risques naturels.
- Nouaillas O (2018, juin) « L'effet Wohlleben souffle sur la forêt » *La Vie* [site Web] consulté le 14/05/2020 [http://www.lavie.fr/actualite/ecologie/l-effet-wohlleben-souffle-sur-la-foret-18-06-2018-90850_8.php].
- OPECST (1985) *Rapport sur les formes de pollution atmosphérique à longue distance dites « pluies acides »*. [En ligne] consulté le 16/05/2020 [<https://www.senat.fr/rap/r85-211/r85-2111.pdf>].
- Otto HJ (1994 [1998]) *Ecologie Forestière*. Paris : Institut pour le Développement Forestier (Traduction de française de Matthis Kempf et Anne Piantanida).
- Ottorini JM (1995) « Simulation et sylviculture du Douglas » *Revue Forestière Française*, 47 (n° spécial) : 97-105.
- Oudin A (1956) « Dix ans d'activité de la Station de Recherches et Expériences forestières de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts », *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences*, 169-338.
- Pardé J et Ayral P (1956) « Douglas et tables de production » *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences*, 137-168.
- Pardé J (1976) « Naissance et vie de l'IUFRO » *Revue Forestière Française*, 38 (6) : 478-480.
- Pardé J et Bouchon J (1998) *Dendrométrie*. Nancy : AgroParisTech (seconde édition).
- Payot M (2018, juillet) « Les grands comptes des succès de librairie » *L'Express* [site Web] consulté le 14/05/2020 [https://www.lexpress.fr/culture/livre/les-grands-comptes-des-succes-de-librairie_2022887.html].
- Perrin H (1923) « Le Danemark forestier » *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences*, 1-106.

- Perrin H (1928) « Les Recherches forestières en France » *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences*, 2 : 137-154.
- Perrin H (1952) *Sylviculture. Tome Premier : Bases scientifiques de la Sylviculture*. Nancy : Ecole Nationale des Eaux et Forêts.
- Peuchet J et Chanlaire P G (1807) *Description topographique et statistique de la France*, Vol. 1, Paris [En ligne] consulté le 15/05/2020 [<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k85116g>].
- Plaisance G (1966) « Une conversion réussie. Œuvre de B. Lorentz (1775-1865) » *Revue Forestière Française*, 2 : 82-98.
- Poupardin D et Bouchon J (1995) « Entretien de Jean Bouchon avec Denis Poupardin » *Archorales*, 1. [En ligne] consulté le 16/05/2020 [<http://www7.inra.fr/archorales/t1bouchon.pdf>].
- Poupardin D, Cussenot M et Bouvarel P (1995) « Entretien de Pierre Bouvarel avec Denis Poupardin et Michèle Cussenot » *Archorales* [En ligne] consulté le 16/05/2020 [<https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/412329-edafd-resource-archorales-03-temoignage-pierre-bouvarel.pdf>]
- Probst A, Bastrup-Birk AM, Legay M, Lebourgeois F, Ranger J, Dupouey JL et Jacobée F (2006) *Evaluation du réseau RENECOFOR. Suggestions pour l'avenir*, 14 novembre 2006 [En ligne] consulté le 17/05/2020 [<http://www1.onf.fr/renecofor/sommaire/renecofor/reseau/20090119-130815-828957/4/++files++/1>].
- Puettmann K, Coates D, Messier C (2009) *A Critique of Silviculture. Managing for complexity*. Washington, Covelo & London: Islandpress.
- Saur M (1928) « Notes sur l'Italie forestière » *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences*, 2 : 393-535.
- Schaeffer L (1953) « La méthode statistique et foresterie » *Revue Forestière Française*, 11 (n° spécial) : 11-14.
- Valeix J (2006) (dir.) « Sécheresse et canicule 2003 » *Rendez-vous Techniques*, 11 : 13-54.
- Vallauri D, Ducouso A, Persuy A et Teillac-Deschamp P (2017) « Ancienneté : perspectives pour la conservation des forêts. » *Revue Forestière Française*, 69(4) : 560-570.
- Valroff J (1985) *Pollution atmosphérique et pluies acides. Rapport au premier ministre*. Paris: La Documentation Française.
- Vaulot G (1882) « De l'estimation des forêts en fonds et en superficie au moyen de la méthode par inventaire » *Revue des Eaux et Forêts*, 21 : 518-530.

- Vedele F (2016) (dir.) *Plan Recherche & Innovation 2025 filière forêt-bois* [En ligne] consulté le 19/05/2020 [https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/2016_rapport_filiere_foretbois_2025.pdf].
- Velay L (1972) « Vingt cinq ans d’histoire du Fonds Forestier National » *Revue Forestière Française*, 24 (n° spécial) : 506-517.
- Veldman J , Aleman J C, Alvarado S T, Anderson T M, Archibald S, Bond W J, Boutton T W, Buchmann N, Buisson E, Canadell J G, Dechoum M, Diaz-Toribio M H, Durigan G, Ewel J J, Fernandes G W, Fidelis A, Fleischman F, Good S P, Griffith D M, Hermann J-M, Hoffmann W A, Le Stradic S, Lehmann C E R, Mahy G, Nerlekar A N, Nippert J B, Noss R F, Osborne C P, Overbeck G E, Parr C L, Pausas J G, Pennington R T, Perring M P, Putz F E, Ratnam J, Sankaran M, Schmidt I B, Schmitt C B, Silveira F A O, Staver A C, Stevens N, Still C J, Strömberg C A E, Temperton V M, Varner J M and Zaloumis N P (2019) “Comment on ‘The global tree restoration potential’” *Science*, 366(6463).
- Vennetier M (2012) « Changement climatique et dépérissements forestiers: causes et conséquences », in Corvol A. (dir.) *Changement climatique et modification forestière*, Cahier d’Etudes n°22, Forêt, Environnement et Société.
- Verdier M (2004, août) « Dossier : les forêts à la veille d’une grande mutation. » *La Croix* [En ligne] consulté le 18/05/2020 [<https://www.la-croix.com/Archives/2004-08-31/Dossier-Les-forets-a-la-veille-d-une-grande-mutation- NP -2004-08-31-216309>].
- Viney R (1956) « Les débuts de la presse forestière périodique » *Revue Forestière Française*, 5 : 347-352
- Winckel G (2017) (eds.) *Towards a sustainable European forest-based bioeconomy. What Science can tell us*. European Forest Institute.
- Wohlleben P (2017) *La vie secrète des arbres*. Paris : Les Arènes (Traduction française de Corinne Tresca).

2. Webographie (sources non datées)

AFORCE [<https://www.reseau-aforce.fr/>] consulté le 19/05/2020.

AllEnvi [<https://www.allenvi.fr/groupe-transversaux/infrastructures-de-recherche/les-soere/que-sont-les-soere>] « Les Systèmes d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement » consulté le 17/05/2020.

CAPIS [<http://capsis.cirad.fr/capsis/presentation>] consulté le 19/05/20.

GIP ECOFOR [http://www.gip-ecofor.org/?page_id=1077] « Changement climatique et autres risques » consulté le 19/05/2020

GIP ECOFOR [<http://www.gip-ecofor.org/f-ore-t/mesures.php>] « F-ORE-T. Les dispositifs et les mesures » consulté le 17/05/2020.

Global Forest Watch [<https://www.globalforestwatch.org/>] consulté le 14/05/2020.

Office National des Forêts [<https://www.onf.fr/+2b6::toutsavoirusurlesforets-pourquoi-certains-arbres-sont-marques-en-foret.html>] « #Toutsavoirusurlesforets : Pourquoi certains arbres sont marqués en forêt ? » consulté le 15/05/2020.

Office National des Forêts [<https://www.onf.fr/+2f9::projet-giono-en-images-le-grand-exode-climatique-des-arbres.html>] « Changement climatique : le projet GIONO expérimente la migration assistée des arbres » consulté le 18/05/2020.

Sources secondaires

- Acot P (1989) *Histoire de l'écologie*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Adam B and Groves C (2007) *Future Matters: Action, Knowledge, Ethics*. Leiden and Boston: BRILL.
- Adam B (2008) "Of timescapes, futurescapes and timeprints." *Lünburg Talk Web*, Lünburg University, 17 June 2008. [En ligne] [<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.594.1289>] dernière consultation le 28/04/2020.
- Adams V, Murphy M and Clarke A E (2009) "Anticipation: Technoscience, life, affect, temporality" *Subjectivity*, 28: 246-265.
- Amoore L (2013) *The Politics of Possibility. Risk and Security beyond Probabilities*. Durham and London: Duke University Press.
- Anderson B (2009) "Affective atmospheres" *Emotion, Space and Society*, 2(2): 77-81.
- Anderson B (2010) "Preemption, precaution, preparedness: Anticipatory action and future geographies" *Progress in Human Geography*, 34(6): 777-798.
- Anker P (2001) *Imperial Ecology. Environmental Order in the British Empire, 1895-1945*. Cambridge (Mass) and London: Harvard University Press.
- Aradau C and van Münster R (2011) *Politics of Catastrophe. Genealogies of the Unknown*. London: Routledge.
- Arnould P et Da Lage A (1993) « Pluies acides et presse forestière française : 1980-1989, une information sans repères ? » *Annales de géographie*, 102(572) : 397-411.
- Aronova E, Baker K S and Oreskes N (2010) "Big Science and Big Data in Biology: From the International Geophysical Year through the International Biological Program to the Long Term Ecological Research (LTER) Network, 1957 – Present" *Historical Studies in the Natural Sciences*, 40(2): 183-224.
- Appadurai A (2013) *The Future as Cultural Fact. Essays on the Global Condition*. London and New York: Verso.
- Asiyanbi A and Lund J F (2020) (eds) "Special Section: Stabilizing a policy: reproducing REDD+" *Journal of Political Ecology*, 27: 378-495.
- Aykut C S et Dahan-Dalmedico A (2014) *Gouverner le climat ? Vingt ans de négociations internationales*. Paris : Les Presses de Sciences-Po.
- Aykut S C, Foyer J et Morena E (2017) (eds) *Globalising the climate. COP21 and the climatisation of global debates*. London and New York: Routledge.

- Aykut C S, Demortain D and Benbouzid B (2019) “Foreknowledge in public policy: toward a political sociology of predictive expertise – Introduction to the special issue” *Science & Technology Studies*, 34(4): 2-12
- Baker K and Millerand F (2010) “Infrastructuring ecology: challenges in achieving data sharing” In: Parker J, Vermeulen N and Penders B (eds) *Collaboration in the new life sciences*. United Kingdom: Routledge.
- Barton G A (2002) *Empire Forestry and the Origins of Environmentalism*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Beck U (1986 [2008]) *La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité*. Manhecourt : Flammarion (traduction française de Laure Bernardi).
- Blavascunas E (2013) “Signals in the Forest: Cultural Boundaries of Science in Bialowieza, Poland” In: Jorgenson D, Jorgenson F A and Pritchard S (eds) *New Natures: Joining Environmental History with Science and Technology Studies*. Pittsburg: University of Pittsburg Press.
- Bloor D (1976) *Knowledge and Social Imagery*. London: Routledge.
- Bonneuil C (2014) « L'Anthropocène et ses lectures politiques ». *Les Possibles*, 3, [site Web] consulté le 14/05/2020 [<https://france.attac.org/nos-publications/les-possibles/numero-3-printemps-2014/dossier-l-ecologie-nouvel-enjeu/article/l-anthropocene-et-ses-lectures>].
- Bonneuil C et Fressoz JB (2016) *L'évènement Anthropocène. La Terre, l'histoire et nous*. Paris: Editions du Seuil. (2nde édition)
- Bouleau G, Deuffic P, Sergent A, Paillet Y et Gosselin F (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, la revue électronique en sciences de l'environnement*, 16(2) [En ligne] consulté le 15/05/2020 [<https://journals.openedition.org/vertigo/17592?lang=en>].
- 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*, 6(2) [site Web] consulté le 11/09/2019 [<http://journals.openedition.org/vertigo/4446>].
- Boutefeu B et Arnould P (2006) « Le métier de forestier : entre rationalité et sensibilité » *Revue Forestière Française*, 58(1) : 61-72.
- Bowker G C (1994) *Science on the run. Information management and industrial geophysics at Schlumberger, 1920-1940*. Baskerville : MIT Press.

- Bowker G C and Star S L (1999 [2002]) *Sorting Things Out. Classification and its consequences*. Cambridge (Mass.) and London : MIT Press.
- Braverman I (2016) “Bleached! Managing Coral Catastrophe” *Futures*, 92: 12-28.
- Brown N, Rappert B and Webster A (2000) *Contested Futures. A sociology of prospective techno-science*. Farnham: Ashgate Publishing.
- Brüggemeier FJ (2002) « Le dépérissement de la forêt (*Waldsterben*) : construction et déconstruction d’un problème d’environnement » In : Bernhardt C et Massard-Guilbaud G (dir.) *Le Démon Moderne. La pollution dans les sociétés urbaines et industrielles d’Europe*. Clermont-Ferrand : Presses Universitaires Blaise-Pascal.
- Brunet L (2018) *La vie affective des services écosystémiques : recherche, communication scientifique et protection de la nature*. Thèse de doctorat en sociologie, Université Grenoble Alpes.
- Brunton F (2013) *Spam. A shadow history of internet*. Cambridge (Mass.) and London : MIT Press.
- Bush L (2014) *Le marché aux connaissances. Néolibéralisme, enseignement et recherche*. Paris : Editions Quae, collection : Sciences en questions.
- Buttoud G (1983) *L’Etat forestier: politique et administration des forêts dans l’histoire française contemporaine*. Thèse de doctorat en Sciences politiques, Université Nancy 2.
- Buttoud G (1998) *Les politiques forestières*. Paris : Presses Universitaires de France, collection : Que-sais-je ?
- Callon M et Latour B (1982) (dir.) *La science telle qu’elle se fait. Anthologie de sociologie des sciences de langue anglaise*. Paris : La Découverte.
- Callon M (1986) « Eléments pour une sociologie de la traduction. La domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc » *L’Année Sociologique*, 36 : 169-208.
- Carse A (2017) “Keyword: Infrastructure. How a humble French engineering term shaped the modern world” In: Harvey P, Bruun Jensen C and Morita A, *Infrastructures and Social Complexity. A companion*. London and New York : Routledge.
- Castagnino F (2018) « Critique des *surveillance studies*. Eléments pour une sociologie de la surveillance. » *Médecine & Hygiène*, 42(1) : 9-40.
- Chalvet M (2011) *Une histoire de la forêt*. Paris : Seuil.
- Chamboredon JC (1982) « La diffusion de la chasse et la transformation des usages sociaux de l’espace rural » *Etudes rurales*, 87-88 : 233-260.

- Chateauraynaud F (2011) *Argumenter dans un champ de forces. Essai de balistique sociologique*. Paris : Editions PETRA.
- Clarke A et Fujimura J (1992 [1996]) (dir.) *La matérialité des sciences. Savoir-faire et instruments dans les sciences de la vie*. Plessis-Robinson : Les Empêcheurs de penser en rond (traduction de Françoise Bouillot avec la participation d'Emilie Hermant).
- Coleman D C (2010) *Big Ecology. The Emergence of Ecosystem Science*. Berkeley, London and Los Angeles: University of California Press.
- Coleman R and Tutton R (2017) "Introduction to Special Issue of *Sociological Review* on 'Futures in Question: Theories, Methods, Practices'" *The Sociological Review*, 65(3): 440-447.
- Collins H et Pinch T (1993 [1994]) *Tout ce que vous devriez savoir sur la science*. Paris: Seuil (traduction française de Thierry Piélat).
- Coreau A, Pinay G, Thompson J D, Cheptou PO and Mermet L (2009) "The rise of research on futures in ecology: rebalancing scenarios and predictions" *Ecology Letters*, 12: 1277-1286.
- Cornil C (2011) « La mise à l'agenda scientifique et politique des migrations environnementales » *Revista Interdisciplinar da Mobilidad Humana*, 36 : 75-96.
- Corvol A (1987) *L'Homme aux bois. Histoire des relations de l'homme et de la forêt (XVIIe-XXe siècle)*. Paris: Fayard.
- Corvol A (2012) « Lucien Daubrée : 1912 et la statistique forestière » [En ligne] consulté le 16/05/2020 [http://www.ign.fr/institut/sites/all/files/presentation_corvol.pdf].
- Couture S (2012) « L'écriture collective du code source informatique. Le cas du *commit* comme acte d'écriture » *Revue d'Anthropologie des Connaissances*, 6(1) : 21-42.
- Cramer F (2008) "Language" In: Fuller M (eds.) *Software Studies: A lexicon*. Cambridge (Mass.) and London: MIT Press, pp. 168-173.
- D'Allens G (2019) *Main basse sur nos forêts*. Lonrai : Le Seuil, collection Reporterre.
- Dahan-Dalmedico A (2007) (dir.) *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques: enjeux scientifiques et politiques*. Paris: La Découverte.
- Dahan A (2010) "Putting the Earth System in a numerical box? The evolution from climate modeling toward global change" *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41(3): 282-292.
- Daston L et Galison P (2007 [2012]) *Objectivité*. Dijon : Les Presses du réel. (Traduction française de Sophie Renaut et Hélène Quiniou)

- Dean W (1995) *With Broadax and Fireband. The Destruction of the Brazilian Atlantic Forest*. Berkeley : University of California Press.
- Decocq G, Kalaora B et Vlassopoulos C (2016) *La Forêt Salvatrice. Reboisement, société et catastrophe au prisme de l'histoire*. Ceyzérieu : Champ Vallon.
- Decourt N (1999) *La Forêt*. Paris: Presses Universitaires de France, collection Que sais-je?
- Decourt N (2001) *La Forêt dans le monde*. Paris : L'Harmattan.
- Deffuant G, Banos A, Chavalarias D, Bertelle C, Brodu N, Jensen P, Lesne A, Müller JP, Perrier E et Varenne F (2015) « Visions de la complexité. Le démon de Laplace dans tous ses états » *Natures, Sciences, Sociétés*, 23(1) : 42-53.
- Deléage JP (1991) *Histoire de l'écologie. Une science de l'homme et de la nature*. Paris : La Découverte.
- Deleuze G et Guattari F (1980) *Capitalisme et Schizophrénie. Mille Plateaux*. Paris : Les éditions de Minuit.
- Demeritt D (2001) "Scientific forest conversation and the statistical picturing of nature's limits in the Progressive-era United States" *Environment and Planning D: Society and Space*, 19: 431-459.
- Demeritt D, Nobert S, Cloke H and Pappenberger F (2013) "The European Flood Alert System (EFAS) and the communication, perception and use of ensemble predictions for operational flood risk management" *Hydrological Process*, 47: 147-157.
- Demortain D (2019) « Les jeux politiques du calcul. Sociologie de la quantification dans l'action publique » *Revue d'Anthropologie des Connaissances*, 13(4) : 953-972.
- Denis J et Pointille J (2012) « Les petites mains de la société de l'information » *Revue d'Anthropologie des Connaissances*, Vol. 6, n°1.
- Descola P (2005) *Par-delà Nature et Culture*. Paris : Gallimard.
- Desrosières A (1993 [2010]) *La politique des grands nombres. Histoire de la raison statistique*. Paris : La Découverte.
- Desrosières A (2008) *Pour une sociologie historique de la quantification. L'argument statistique I*. Paris : Presses de l'Ecole des Mines.
- Devictor V and Bensaude-Vincent B (2016) "From ecological records to big data: the invention of global biodiversity" *History and Philosophy of the Life Sciences*, 38(4): 13.
- Doel R (2009) « Quelle place pour les sciences de l'environnement physique dans l'histoire environnementale ? » *Revue d'histoire moderne & contemporaine*, 56(4) : 137-164.

- Dolez A, Granjou C and Louvel S (2019) “On the Plurality of Environmental Regimes of Anticipation. Insights from Forest Science and Management” *Science & Technology Studies*, 32(4): 78-96.
- Dupuy M (2004) *Les cheminements de l'Écologie en Europe – Une histoire de la diffusion de l'écologie au miroir de la forêt 1880 – 1980*. Paris : L'Harmattan.
- Eco U (1994) *La Recherche de langue parfaite dans la culture européenne*. Paris : Seuil (traduction française de Jean-Paul Manganaro).
- Edwards P (1999) “Global climate science, uncertainty and politics: Data-laden models, model-filtered data” *Science as Culture*, 8(4): 437-472.
- Edwards P N (2003) “Infrastructure and Modernity : Force, Time, and Social Organization in the History of Sociotechnical Systems” In : Misa T., Brey P. and Feenberg A. (eds) *Modernity and Technology*. Cambridge (Mass.) and London: MIT Press.
- Edwards P, Jackson S, Bowker G and Knobel C (2007) “Understanding Infrastructure: Dynamics, Tensions, and Design” Report of a workshop on “History & Theory of Infrastructure: Lessons for New Scientific Cyberinfrastructures.”, January.
- Edwards P N (2010) *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*. Cambridge (Mass.) and London: The MIT Press.
- Edwards P N, Mayernik M S, Batcheller A L, Bowker G C and Borgman C L (2011) “Science friction: Data, metadata, and collaboration” *Social Studies of Science*, 41(5): 667-690.
- Edwards P N, Jackson S, Chalmers M, Bowker G C, Borgman C, Ribes D, Burton M and Calbert S (2012) “Knowledge Infrastructures : Intellectual Frameworks and Research Challenges”. Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation and the Sloan Foundation, University of Michigan School of Information, 25-28 May.
- Edwards P N (2017) “Knowledge infrastructures for the Anthropocene” *The Anthropocene Review*, 4(1): 34-43.
- Fabiani JL (1982) « Quand la chasse populaire devient un sport. La redéfinition sociale d'un loisir traditionnel » *Études Rurales*, 87-88 : 309-323.
- Filieule O (2001) « Propositions pour une analyse processuelle de l'engagement individuel. Post scriptum » *Revue Française de Science Politique*, 51(1) : 199-215.
- Flamant-Hubert M et Lewis N (2019) « Vous avez-dit conservation ? Parcours d'une notion dans l'immensité de la forêt québécoise » In : Busca D et Lewis N (dir.) *Penser le gouvernement des ressources naturelles*. Presses de l'Université de Laval : pp. 209-244.
- Flechter R, Dressler W, Büscher B and Anderson Z (2016) “Questioning REDD+ and the Future of Market-Based Conservation” *Conservation Biology*, 30(3): 673-675.

- Fleck L (1935 [2005]) *Genèse et développement d'un fait scientifique*. Paris : Les Belles Lettres. Traduction française de Nathalie Jas
- Fortmann L and Ballard H (2011) "Sciences, knowledges, and the practice of forestry" *European Journal of Forest Research*, 130(3): 467-477.
- Foucault M (2004) *Sécurité, Territoire, Population. Cours au Collège de France (1977-1978)* Lonrain : Gallimard Seuil.
- Foyer J, Viard-Créat et Boisvert V (2017) « Néolibéraliser sans marchandiser ? La bioprospection et les mécanismes REDD dans l'économie de la promesse » In : Compagnon D et Rodary E (dir.) *Les politiques de biodiversité*. Paris : SciencesPo Les Presse.
- Fressoz JB et Locher F (2010) « Le climat fragile de la modernité. Petite histoire climatique de la réflexivité environnementale » *La vie des idées* [En ligne] consulté le 15/05/2020 [<https://laviedesidees.fr/Le-climat-fragile-de-la-modernite.html>].
- Fressoz JB (2018, novembre) « La collapsologie : un discours réactionnaire ? » *Libération* [site web] consulté le 16/05/2020 [https://www.liberation.fr/debats/2018/11/07/la-collapsologie-un-discours-reactionnaire_1690596].
- Frickel S and Gross N (2006) "A General Theory of scientific intellectual movements" *American Sociological Review*, 70: 204-232.
- Frickel S and Moore K (2006) (eds.) *The New Political Sociology of Science. Institutions, Networks, and Power*. Madison: University of Wisconsin Press.
- Frickel S, Gibbon S, Howard J, Kempner J, Ottinger G, and Hess D J (2009) "Undone Science: Charting Social Movement and Civil Society Challenges to Research Agenda Setting" *Science, Technology, & Human Values*, 35(4): 444-473.
- Fujimura J H (1987) "Constructing 'Do-able' Problems in Cancer Research: Articulating Alignment" *Social Studies of Science*, 17(2): 257-293.
- Fuller M (2008) (eds.) *Software Studies: A lexicon*. Cambridge (Mass.) and London: MIT Press.
- Gadrey J et Jany-Catrice F (2012) *Les nouveaux indicateurs de richesse*. Paris : La Découverte.
- Galison P (2011) "Computer Simulations and the Trading Zone" In : Gramelsberger G. (eds) *From Science to Computational Science*. Zürich: Diaphanes, pp. 118-157.
- Garraud P (1990) « Politiques nationales : l'élaboration de l'agenda » *L'Année sociologique*, 40(3) : 17-41.
- Gillepsie T (2010) "The politics of 'platforms'" *New media & Society*, 12(3): 347-364.

- Gingras Y (2013) *Sociologie des sciences*. Paris : Presses Universitaires de France, collection : Que-sais-je ?
- Ginzburg C (1980) « Signes, traces, pistes. Racines d'un paradigme de l'indice » *Le Débat*, 6(6) : 3-44.
- Goëta S (2018) « 'Données recherchent publics' : les politiques d'*open data* à l'épreuve de la réutilisation » In : Gourgues G et Mazeaud A (dir.) *L'action publique saisie par ses « publics »*. Villeneuve d'Ascq : Septentrion Presses Universitaires, pp. 137-154.
- Granjou C, Mauz I, Barbier M and Breucker P (2014) "Making taxonomy environmentally relevant. Insights from an All Taxa Biodiversity Inventory" *Environmental Science & Policy*, 38: 254-262.
- Granjou C and Arpin I (2015) "Epistemic commitments. Making relevant science" *Science, Technology and Human Values*, 40(6): 1022-1046.
- Granjou C, Louvel S et Arpin I (2015) « Des promesses scientifiques aux engagements épistémiques. Le cas de la nanomédecine et des sciences de la biodiversité » In : Audétat M (eds) *Sciences et technologies émergentes : Pourquoi tant de promesses ?* Paris : Hermann, pp. 211-226.
- Granjou C (2016) *Sociologie des changements environnementaux. Futurs de la nature*. London: ISTE Editions.
- Granjou C and Walker J (2016) "Promises that Matter: Reconfiguring Ecology in the Ecotrons" *Science & Technology Studies*, 29(3): 49-67.
- Granjou C, Walker J and Salazar J (2017) "The politics of anticipation: On knowing and governing environmental futures" *Futures*, 92: 5-11.
- Grevsmühl S V (2014) *La Terre vue d'en haut. L'invention de l'environnement global*. Paris : Seuil.
- Gupta A, Lövbrand E, Turnhout E and Vijge MJ (2012) "In pursuit of carbon accountability: the politics of REDD+ measuring, reporting and verification systems" *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4: 726-731.
- Haas P M (1989) "Do regimes matter? Epistemic communities and Mediterranean pollution control" *International Organization*, 43(3): 377-403.
- Haas PM (1992) "Introduction: Epistemic Communities and International Policy Coordination" *International Organization*, 46(1): 1-35.
- Hackett E J (2005) "Introduction to the special guest-edited issue on scientific collaboration" *Social Studies of Science*, 35(5): 667-671.

- Hacking I (1999 [2008]) *Entre Science et Réalité. La construction sociale de quoi ?* Paris : La Découverte. (traduction française de Baudouin Jurdant)
- Hajer M (1995) *The Politics of Environmental Discourse. Ecological Modernization and the Policy Process*. Oxford : Clarendon Press.
- Haggerty K D and Ericson R V (2000) “The surveillant assemblage” *British Journal of Sociology*, 51(4): 605-622.
- Harraway D (1988) “Situated Knowledges: The Science Question in Feminism and the Privilege of Partial Perspective” *Feminist Studies*, 14(3): 575-599.
- Harrison R (1992 [1993]) *Forêts. Essai sur l’imaginaire occidental*. Paris : Flammarion (Traduction française de Florence Naugrette).
- Hartog F (2003) *Régimes d’historicité. Présentisme et expérience du temps*. Paris : Le Seuil.
- Hastrup K and Skrydstrup M (2013) (eds.) *The Social Life of Climate Change Models*. New York and London : Routledge.
- Hecht S and Cockburn A (2010) *The Fate of Forest. Developers, Destroyers and Defenders of the Amazon*. Chicago and London: the University of Chicago Press.
- Herrington S (2014) “The Forests of Canada: Seeing the Forests for the Trees” In: Uekötter F and Lübken U *Managing the Unknown. Essays on Environmental Ignorance*. New York and Oxford: Berghahn Books, pp. 53-71.
- Hölzl R (2010) “Historicizing Sustainability: German Scientific Forestry in the Eighteenth and Nineteenth Centuries” *Science as Culture*, 19(4): 431-460.
- Hölzl R (2018) « Forêts en guerre: Populations rurales et foresterie moderne dans l’Allemagne préindustrielle, 1760-1860 » In : Graber F et Locher F (dir.) *Posséder la nature. Environnement et propriété dans l’histoire*. Paris : Editions Amsterdam, pp. 165-186.
- Hughes T P (1983) *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Jas N (2005) « Déqualifier le paysan, introniser l’agronome, France 1840-1914 » *Ecologie & Politique*, 31(2) : 45-55.
- Jansen S (2002) « Histoire d’un transfert de technologie. De l’étude des insectes à la mise au point du zykron B » *La Recherche*, hors-série 7 : 52-55 (traduction française de Denis Mater).
- Jasanoff S et Martello M (2004) *Earthly Politics – Local and Global Environmental Governance*. Cambridge (Mass.) and London: MIT Press.
- Jensen P (2018) *Pourquoi la société ne se laisse pas mettre en équations*. Paris : Seuil.

- Joly PB (2015) « Le régime des promesses technoscientifiques » In : Audétat M (dir.) *Pourquoi tant de promesses ?* Paris : Hermann, pp. 31-48.
- Jouvenet M (2007) « La culture du « bricolage » instrumental et l'organisation du travail scientifique. Enquête dans un centre de recherche en nanosciences » *Revue d'Anthropologie des connaissances*, 1(2) : 189-219
- Jordan K et Lynch M (1992 [1996]) « Rituel et rationalité dans l'exécution de la « préparation des plasmides » In : » In : Clarke A. et Fujimura J. (dir.) *La matérialité des sciences. Savoir-faire et instruments dans les sciences de la vie*. Plessis-Robinson : Les Empêcheurs de penser en rond. (Traduction de Françoise Bouillot avec la participation d'Emilie Hermant)
- Kalaora B (1979) *Le tourisme en forêt : naissance et développement d'un loisir urbain, le cas de la forêt de Fontainebleau*. Thèse de doctorat en sociologie, Université Paris X Nanterre
- Kalaora B et Poupardin D (1984) *Le corps forestier dans tous ses états : de la Restauration à la Belle Epoque*. Orléans : INRA, Laboratoire de recherches et d'études sur l'économie des industries agricoles et alimentaires.
- Kalaora B et Poupardin D (1988) « L'administration forestière entre 1860 et 1940 : l'esprit de corps à travers les nécrologies » *Ethnologie française*, 18(1) : 27-41.
- Kalaora B et Savoye A (1985) *La restauration des territoires de montagne de 1882 à 1913, l'Aigoual et sa légende*. Paris : L'Harmattan.
- Kalaora B et Savoye A (1986) *La forêt pacifiée. Les forestiers de l'Ecole de Le Play, experts des sociétés pastorales*. Paris : L'Harmattan.
- Kalaora B (1998) *Au-delà de la Nature : l'environnement. L'observation sociale de l'environnement*. Paris : L'Harmattan.
- Kalaora B et Vlassopoulos C (2013) *Pour une sociologie de l'environnement. Environnement, société et politique*. Seyssel: Champ Vallon.
- Kalaora B et Charles L (2014) « Sociologie et environnement: tout contre l'Etat » In : Charles L, Lange H, Kalaora B et Rudolf F, *Environnement et sciences sociales en France et en Allemagne*. Paris : L'Harmattan, pp. 273-306.
- Karasti H, Baker K S and Millerand F (2010) "Infrastructure Time: Long-term Matters in Collaborative Development" *Computer Supported Cooperative Work*, 19: 377-415.
- Karasti H, Millerand F, Hine C and Bowker G C (2016) "Knowledge Infrastructures: Part I" *Science & Technology Studies*, 29 (1): 2-12.

- Kohn E (2017 [2013]) *Comment pensent les forêts : vers une anthropologie au-delà de l'humain*. Bruxelles: Zones Sensibles (Traduction de française de Grégory Delaplace).
- Kon Kam King J and Granjou C (2020) "Mapping soil, losing ground? Politics of soil mapping" In: Salazar J, Kearnes M, Granjou C, Kryzwszynska A and Tironi M (eds) *Thinking with Soils. Material Politics and Social Theory*. London: Bloomsbury.
- Knorr-Cetina K (1979) "Tinkering toward Success: Prelude to a Theory of Scientific Practice" *Theory and Society*, 8(3): 347-376.
- Knorr-Cetina K (1999) *Epistemic Cultures. How the sciences make knowledge*. Cambridge (Mass.) and London: Harvard University Press.
- Koselleck R (1979 [2016]) *Le futur passé. Contribution à la sémantique des temps historiques*. Paris : Editions EHESS (Traduction française de Jochen Hoock et Marie-Claire Hoock).
- Kwa C (1987) "Representations of Nature Mediating Between Ecology and Science Policy: the Case of the International Biological Programme" *Social Studies of Science*, 17: 413-442.
- Kwa C (1993) "Modeling the Grasslands" *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 24(1): 125-155.
- Larrère R, Brun A, Kalaora B, Nougarède O et Poupardin D (1981) « Forestiers et paysans ; le reboisement en montagnes depuis l'Empire » In : Anselme M, Parisis JL, Peraldi M et Ronchi Y (coord.) *Tant qu'il y aura des arbres. Pratiques et politiques de la nature. 1870 – 1960*. Paris : Recherches.
- Larrère R et Poupardin D (1990) « La forêt dans l'histoire des systèmes agraires : de la dissociation à la réinsertion » *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, 15-16 : 12-38.
- Latour B (1987) *La science en action. Introduction à la sociologie des sciences*. Paris : La Découverte.
- Latour B et Woolgar S (1988) *La vie de laboratoire. La production des faits scientifiques*. Paris : La Découverte (traduction française).
- Latour B (1991) *Nous n'avons jamais été modernes. Essai d'anthropologie symétrique*. Paris : La Découverte.
- Legay JM (1997) *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode*. Paris : Editions Quae, collection : Sciences en questions.
- Lowood H (1990) "The Calculating Forester: quantification, cameral science, and the emergence of scientific forestry management in Germany" In: Frängsmyr T, Heilbron

- JL and Rider R E (eds.) *The Quantifying Spirit in the Eighteenth Century*. Berkeley, Los Angeles, London: University of California Press.
- Mackenzie A (2006) *Cutting Codes. Software and Sociality*. New York : Peter Lang Publishing, 2006.
- Mackenzie D, Muniesa F and Siu L (2007) *Do Economists make Markets? On the Performativity of Economics*. Princeton and Oxford: Princeton University Press
- Mahrane Y et Bonneuil C (2014) « Gouverner la biosphère. De l'environnement de la guerre froide à l'environnement néolibéral » In : Pestre D (dir.) *Le gouvernement des technosciences. Gouverner le progrès et ses dégâts depuis 1945*. Paris : La Découverte.
- Maris V (2018) *La part sauvage du monde. Penser la nature dans l'Anthropocène*. Paris: Seuil.
- Maris V, Huneman P, Coreau A, Kéfi S, Pradel R and Devictor V (2018) "Prediction in ecology: promises, obstacles and clarifications" *Oikos*, 127(2): 171-183.
- Marty G (2015) « « Juste » prix et réputation professionnelle : un double enjeu pour les enchères de bois public » *Ethnologie française*, 154(4) : 735-744.
- Masure A (2014) *Le Design des Programmes – Des façons de faire du numérique*. Thèse de doctorat en Esthétique et Sciences de l'Art, Université Paris I Panthéon-Sorbonne.
- Mathews A S (2011) *Instituting Nature. Authority, Expertise, and Power in Mexican Forests*. Cambridge (Mass.) and London: MIT Press.
- Mathews A and Barnes J (2016) "Prognosis: visions of environmental futures" *Journal of the Royal Anthropological Institute*, N.S. : 9-26.
- Mauz I et Granjou C (2010) « La construction de la biodiversité comme problème politique et scientifique, premiers résultats d'une enquête en cours » *Sciences, Eaux & Territoires*, 3 : 10-13.
- Mauz I et Granjou C (2011) « Rendre visible les « travailleurs invisibles » ? Vers de nouveaux collectifs de travail en écologie » *Terrains & Travaux*, 18(1) : 121-139.
- Merz M (2006) "Locating the Dry Lab on the Lab map" In: Lenhard J, Küppers G and Shinn T (eds.) *Simulation : Pragmatic Construction of Reality*. Dordrecht : Springer, pp. 155-172.
- Michael M (2017) "Enacting Big Futures, Little Futures: Toward an ecology of futures." *The Sociological Review*, 65(3): 509-524.
- Millerand F (2003) *L'appropriation du courrier électronique en tant que technologie cognitive chez les enseignants chercheurs universitaires. Vers l'émergence d'une*

- culture numérique ?* Thèse de doctorat en sciences de la communication, Université de Montréal.
- Millerand F, Ribes D, Baker K S and Bowker G S (2013) “Making an issue out a Standard: Storytelling Practices in a Scientific Community” *Science, Technology, Human Values*, 38(1): 7-43.
- Mitchell T (2002) *Rule of Experts. Egypt, Techno-Politics, Modernity*. Berkeley, Los Angeles, London : University of California Press.
- Mitra J and Zoukas G (2020) “Unpacking the concept of bioeconomy: Problems of Definition, Measurement, and the Attribution of ‘Value’” *Science & Technology Studies*, 33(1): 2-21.
- Monniaux D (2018) « Algorithmes vs logiciel ». Article de blog. En ligne [<http://david.monniaux.free.fr/dotclear/index.php/post/2018/06/02/Algorithmes-vs-logiciel>] (consulté le 30/01/2020).
- Neale T (2016) “Burning anticipation: Wildfire, risk mitigation and simulation modeling in Victoria, Australia” *Environment and Planning A*, 48(10): 2026-2045.
- Nelson N, Geltzer A and Hilgartner S (2008) “The Anticipatory State: Making Policy-Relevant Knowledge about the Future” *Science & Public Policy*, 8(8): 546-606.
- Nichols K and Gogineni (2018) “The Anthropocene’s dating problem: Insights from the geosciences and the humanities” *The Anthropocene Review*, 5(2): 107-119.
- Oreskes N, Schrader-Frechette K and Belitz K (1994) “Verification, validation, and confirmation of numerical models in Earth sciences” *Science*, 63(2): 641-646
- Pahun J, Fouilleux E et Daviron B (2018) « De quoi la bioéconomie est-elle le nom ? Genèse d’un nouveau référentiel d’action publique » *Natures, Sciences, Sociétés*, 26(1) : 3-16.
- Pestre D (2006) *Introduction aux Sciences Studies*. Paris: La Découverte, Repères.
- Pickering A (1992) (eds) *Science as Practice and Culture*. Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Pickering A (1995) *The Mangle of Practice. Time, Agency and Science*. Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Porter T (1994) “Making Things Quantitative” *Science in Context*, 7: 389-407.
- Porter T (1995 [2017]) *La confiance dans les chiffres. La recherche de l’objectivité dans la science et dans la vie publique*. Paris: Les Belles Lettres. (Traduction française de Gérard Marino)
- Protest D & McCombs M (1991) (eds.) *Agenda-Setting – Readings on Media, Public Opinion, and Policymaking*. New York: Routledge.

- Rajala R (1998) *Clearcutting the Pacific Rain Forest. Production, Science and Regulation*. Vancouver : University of British Columbia Press.
- Reith G (2004) “Uncertain Times. The notion of ‘risk’ and the development of modernity” *Time & Society*, 13(2/3): 383-402.
- Roqueplo P (1988) *Pluies acides : menaces pour l’Europe*. Paris : Economica.
- Roqueplo P (1990) « Le statut social des pluies acides » *Annales des mines, Réalités industrielles*, novembre 1990.
- Roqueplo P (1993) *Climats sous surveillance. Limites et conditions de l’expertise scientifiques*. Paris : Economica.
- Saarikoski H and Raitio K (2013) “Science and Politics in Old-Growth Forest Conflict in Upper Lapland” *Nature and Culture*, 8(1): 53-73.
- Sahlins P (1994) *Forest Rites. The War of the Demoiselles in Nineteenth-Century France*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Schatzki T R, Knorr-Cetina K and von Savigny E (2001) (eds) *The Practice Turn in Contemporary Theory*. London and New York: Routledge.
- Scott J C (1998) *Seeing Like a State. How certain schemes to improve human condition have failed*. New Haven & London: Yale University Press.
- Sellato B (2016) « Société et forêt tropicale : Bornéo, de la tribu à la mondialisation » In : Choné A, Hajek I et Hamman P (dir.) *Guide des Humanités Environnementales*, Villeneuve d’Ascq : Presses Universitaires du Septentrion, pp. 363-372.
- Sergent A (2013) *La politique forestière en mutation: une sociologie politique du rapport secteur-territoire*. Thèse de doctorat en Science politique, Université Bordeaux 4.
- Shepens F (2008) « Monde professionnel et marché des travaux forestiers » *Revue Française de Sociologie*, 49(2) : 351-378.
- Shinn T (1988) « Hiérarchies des chercheurs et formes de recherches » *Actes de la recherche en sciences sociales*, 74 : 2-22.
- Sismondo S (1999) “Models, Simulations, and Their Objects” *Science in Context*, 12 (2): 247-260.
- Skrydstrup M (2017) “Envisioning the future by predicting the past: Proxies, praxis and prognosis in paleoclimatology” *Futures*, 92: 70-79.
- Soler L, Zwart S, Lynch M, Israel-Jost V (2014) (eds) *Science After the Practice Turn in the Philosophy, History, and Social Studies of Science*. New York and London: Routledge.

- Star SL and Griesemer (1989) “Institutional ecology, ‘Translations’, and Boundary objects: amateurs and professionals on Berkeley’s museum of vertebrate zoology” *Social Studies of Sciences*, 19(3): 387-420.
- Star SL and Ruhleder K (1996) “Steps Toward an Ecology of Infrastructure: Design and Access for Large Information Spaces” *Information Systems Research*, 7(1) : 111-134.
- Star S L (1999) “The Ethnography of Infrastructure” *American Behavioral Scientist*. 43(3) : 377-391.
- Star S L (2018) « L’ethnographie des infrastructures » *Tracés, Revue de Sciences humaines*, 35 [en ligne] consulté le 15/05/2020 [<https://journals.openedition.org/traces/8455>] (traduction française de Tizinia Beltrame et Ashveen Peerbaye).
- Thomas W and Thomas D (1928) *The Child in America*. New York: Knopf.
- Thompson E P (2014) *La guerre des forêts. Lutttes sociales dans l’Angleterre du XVIIIème siècle*. Paris : La Découverte (traduction française de Christophe Jaquet).
- Tucker R P and Richards J F (1983) (dir.) *Global Deforestation in the Nineteenth Century World Economy*. Durham: Duke University Press.
- Tucker R P and Richards JF (1988) (dir.) *Global Deforestation in the Twentieth Century*. Durham: Duke University Press.
- Turnhout E, Neves K and De Lijster E (2014) “‘Measurementality’ in biodiversity governance: knowledge, transparency, and the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)” *Environment and Planning A*, 46: 581-597.
- Turnhout E, Gupta A, Weatherley-Singh J, Vijge M, de Koning J, Visseren-Hamakers I, Herold M and Lederer M (2017) “Envisioning REDD+ in a post-Paris era: between evolving expectations and current practice” *WIREs Climate Change*, 8: 425.
- Tutton R (2017) “Wicked Futures: Meaning, Matter and the Sociology of Future.” *The Sociological Review*, 65(3): 478-492.
- Varenne F (2003) « La simulation informatique face à la « méthode des modèles ». Le cas de la croissance des plantes » *Natures, Sciences, Sociétés*, 11 : 16-28.
- Varenne F (2004) *Le destin des formalismes à propos de la forme des plantes. Pratiques et épistémologie des modèles face à l’ordinateur*. Thèse de doctorat en Histoire, Université Lumière Lyon 2.
- Varenne F (2011) *Modéliser le social. Méthodes fondatrices et évolutions récentes*. Paris: Dunod.

- Varenne F (2012) *Théorie, réalité, modèle. Epistémologie des théories et des modèles face au réalisme des sciences*. Paris: éditions Matériologiques.
- Varenne F et Silberstein M (dir.) (2013) *Modéliser et Simuler : épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation. Tome 1*. Paris : Editions Matériologiques.
- Varenne F et Silberstein M (dir.) (2014) *Modéliser et Simuler : épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation. Tome 2*. Paris : Editions Matériologiques.
- Viard-Créat A (2014) « Quantifier le carbone pour sauver le climat : quelle construction spécifique d'une 'façon de voir' les forêts ? » In : Harpet C, Billet P et Pierron JP (dir.) *A l'ombre des forêts. Usages, images et imaginaires de la forêt*. Paris : L'Harmattan.
- Vidalou JB (2017) *Êtres forêts. Habiter des territoires en lutte*. Paris : La Découverte.
- Vinck D (2007) *Science et société. Sociologie du travail scientifique*. Paris : Armand Colin.
- Walker J (2007) *Economy of Nature. A genealogy of the concepts 'Growth' and 'Equilibrium' as Artefacts of Metaphorical Exchange between the Natural and the Social Sciences*, PhD Thesis in Philosophy, University of Technology of Sydney
- Whited T (2000) *Forests and Peasant Politics in Modern France*. New Haven & London: Yale University Press
- Woronoff D (1990) *Forges et forêts. Recherches sur la consommation proto-industrielle de bois*. Paris : Editions de l'EHESS.

Résumé / Abstract

Connaître et gérer les forêts, anticiper leurs futurs. Enquête au cœur des infrastructures de recherche forestière françaises

Les changements globaux ont mis sur le devant de la scène politique et scientifique les forêts, appréhendées comme des dispositifs de lutte contre le changement climatique, et comme des écosystèmes menacés par les climats futurs. Chercheurs, ingénieurs et gestionnaires forestiers déploient des stratégies pour anticiper leurs dynamiques futures afin de les préparer aux enjeux écologiques, socio-économiques et politiques de demain. Ces préoccupations pour l'avenir des forêts ne sont pourtant pas nouvelles, elles sont au cœur des sciences et de la gestion des forêts depuis la fin du XVIII^{ème} siècle, comme le grand récit de la « mort des forêts » (*das Waldsterben*) ou celui des « puits de carbone » pour atténuer le changement climatique. Cette thèse étudie d'un point de vue historique et sociologique comment sont façonnés les futurs des forêts françaises. S'inscrivant dans le courant des *Science and Technology Studies (STS)*, ce travail s'appuie sur le concept d'infrastructures de recherche forestière pour décrire et analyser comment les forêts sont transformées en chiffres et en données, comment elles sont quantifiées, modélisées et simulées informatiquement pour être gérées et gouvernées. Les infrastructures de recherche forestières renvoient alors aux assemblages sociotechniques, organisationnels et scientifiques qui visent à surveiller les forêts, et rendre leurs futurs anticipables et gouvernables. L'enquête au cœur de ces infrastructures a été menée dans plusieurs laboratoires français de recherche forestière et s'appuie sur des entretiens réalisés avec des chercheurs, ingénieurs et gestionnaires, ainsi qu'une analyse documentaire de leurs productions. L'étude des pratiques de quantification, de modélisation et de simulation des forêts, et des acteurs, collectifs et institutions qui les portent, dévoile alors les dimensions sociotechniques de la production des futurs des forêts. Ces futurs ont une histoire et une matérialité : ils suivent les trajectoires prises par les infrastructures de recherche forestière. Ces futurs sont pluriels : les acteurs portent des visions concurrentes sur les rôles joués par les forêts dans les climats futurs, et sur les savoirs, technologies et pratiques à mettre en œuvre pour les adapter aux changements globaux.

Mots-clefs : Etudes des futurs ; Infrastructures de recherche ; Pratiques de modélisations et de simulations ; *Science and Technology Studies*, ; Sciences des forêts ; Sociologie de l'environnement.

Knowing and managing forests, anticipating their futures. Investigation into French forest research infrastructures

Global changes have put forests at the forefront of the political and scientific agendas. Then, they are understood as devices to fight climate change as well as ecosystems threatened by future climates. Forest researchers, engineers and managers are thus developing strategies to anticipate their future dynamics so as to prepare them for tomorrow ecological, socio-economic and political challenges. However these concerns for forest futures are not new. They have been at the core of forest science and management since the end of 18th century, such as the major narrative of the “death of forests” (*das Waldsterben*) or the one of the “carbon sink” to mitigate climate change. This PhD-thesis investigates from an historical and sociological perspective how French forest futures are shaped. Following the *Science and Technology Studies (STS)* approach, this study draws on the concept of forest research infrastructures to describe and understand how forests are transformed into numbers and data and how they are quantified, modeled and computer-simulated to be managed and governed. Forest research infrastructures thereby refer to the sociotechnical, scientific and organizational assemblages aiming to monitor forests and make their futures anticipable and governable. The investigation into these infrastructures has been conducted in several French forest research laboratories and relies on interviews with researchers, engineers and managers, and on a documentary analysis of their productions. Studying forest quantification, modeling and simulating practices, and the actors, collectives and institutions that carry them out, reveals the sociotechnical dimensions of the production of forest futures. These futures are both historical and material: they reflect the trajectories taken by forest research infrastructures. These futures are plural: actors have competing visions of the role to be played by forests in future climates, as well as of the knowledge, technologies and practices to be mobilized in order to adapt them to climate changes.

Key-words: Futures Studies; Research infrastructures; Modelling and simulation practices; Science and Technology Studies; Forest Sciences; Environmental Sociology.