



HAL
open science

Etude des trajectoires écologiques des socio-écosystèmes : vers des approches rétro-fonctionnelles intégrées

Vincent Robin

► **To cite this version:**

Vincent Robin. Etude des trajectoires écologiques des socio-écosystèmes : vers des approches rétro-fonctionnelles intégrées. Biodiversité et Ecologie. Université de Lorraine, 2020. tel-02979132

HAL Id: tel-02979132

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02979132>

Submitted on 26 Oct 2020

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

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



Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Etude des trajectoires écologiques des socio-écosystèmes : vers des approches rétro-fonctionnelles intégrées

Vincent Robin

UMR 7360 (Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux)
Université de Lorraine, UFR en Sciences Fondamentales et Appliquées
Campus Bridoux, 8 rue du Général Delestraint, 57070 Metz, France



Soutenu le 8 Juillet 2020

Devant la commission d'examen formée de :

Mme Gudrun Bornette DR-CNRS, chrono-environnement

Mme Déborah Closset-Kopp MCF(HDR)-Université de Picardie, EDYSAN

M Didier Galop DR-CNRS, GEODE

Mme Thiébault Stéphanie DR-CNRS, INEE

M Jean-Luc Dupouey DR-INRAE, SILVA

M François Guérold Pr-Université de Lorraine, LIEC

Rapporteuse

Rapporteuse

Rapporteur

Examinatrice

Examineur

Parrain scientifique

Remerciements

Si je peux passer cette nouvelle étape dans mon parcours académique c'est en grande partie grâce aux belles, enrichissantes, et stimulantes rencontres faites depuis mon recrutement au LIEC en 2015.

Pour cela je remercie l'ensemble des collègues du LIEC, en particulier Anne Poszwa, Laurence Mansuy-Huault, Philippe Wagner, Pascale Bauda, Annick Schnitzler, Laure Giamberini, Simon Devin, et bien-sûr François Guérold qui m'a accompagné dans le travail de cette habilitation, et en amont de cela depuis mon arrivé au LIEC lors de très passionnantes, et passionnées, discussions.

Je remercie aussi très chaleureusement Catherine Drui, Catherine Pierson, Romuald Charpentier, Christine Aussenac, Aurélie Quintas, Sabrina Hajri, Céline Vozzola, pour leur travail sur les procédures administratives et l'ingénierie financière dont ils ont la très précieuse expertise. Je vous embête régulièrement à propos de ces aspects pour lesquels je n'ai pas une grande appétence, mais vous semblez encore me supporter, pourvu que ça dure. Merci à vous !

Merci également aux collègues d'autres laboratoires ou d'autres universités, Xavier Rochel, Fabien Hein, Jean-Luc Dupouey, Sandrine Chauchard, Thomas Feiss, Pascale Ruffaldi, Anne-Véronique Walter-Simonnet, Damien Ertlen, Pierre-Alexis Herrault, Dominique Schwartz, Anne Gebhardt, Cédric Pradalier Benjamin Cancès, Jessy Jaunat, Murielle Georges-Leroy, et Alexa Dufraisse, pour les collaborations que nous avons développées.

Je n'oublie pas de remercier les collègues avec qui j'ai travaillé plus anciennement, Oliver Nelle, Brigitte Talon, Annegret Larsen, Stefan Dreibrodt, Hannes Knapp, avec qui j'espère retravailler plus concrètement bientôt !

Je suis aussi très reconnaissant pour les perspectives développées lors de très enrichissantes discussions avec des acteurs de la gestion des espaces naturels, en particulier avec Eric Magnier responsable ONF de la forêt domaniale d'Hémilly (entre autres secteurs) et Loïc Duchamp conservateur de la RNN des rochers et tourbières du Pays de Bitche, avec qui je ne me lasse jamais d'échanger. Je remercie aussi Jean-Claude Génot et Marie L'Hospitalier du PNR des Vosges du nord, Christophe Courte, Quentin Mori et Thibault Hingrey du CEN de Lorraine, et Pierre-Olivier Lausecker de l'AERM.

Je remercie également ceux qui sont des éléments structurants d'un parcours d'enseignant-chercheur, les étudiants, en premier lieux les doctorants, David Gocel-Chalté et Claudia Oliveira, que j'accompagne au quotidien (ou presque), ainsi que Benjamin Keller et Emilie Gouriveau. Bonne route à vous ! Et puis bien-sûr les stagiaires de L3, M1 et M2 (Mathilde, Jérôme, Amélie, Sophie, Alexia, Elisa, Jacob, Quentin, Perrine, et les courageuses Mélina, qui refait un deuxième stage avec moi, et Marianne, qui refait un troisième stage avec moi), que j'ai eu le plaisir d'encadrer, de mon mieux, et avec qui j'ai partagé de chouettes moments sur le terrain, au labo, et aux microscopes, avec ou sans café. Merci à vous !

Enfin, je n'oublie pas de remercier mes parents (et en particulier ma mère pour ces indispensables relectures), mes frères et ma sœur, qui sont toujours présents même s'ils sont loin. Et bien-sûr, je remercie tout spécialement Claire, mon bonheur au quotidien, qui a supporté et accompagné mes moments d'euphorie et de fatigue au cours des derniers mois. Et puis bien-sûr il y a le petit bonhomme arrivé en route, Hugo, qui a été la meilleure raison au monde pour faire des pauses lors de la rédaction de ce document.

Table des matières

1. Les grands enjeux de la connaissance du passé	1
2. Volet rétrospective : curriculum vitae	7
2.1. Parcours universitaire	7
2.2. Implications pédagogiques.....	8
2.2.1. Enseignements.....	8
2.2.2. Responsabilités pédagogiques.....	11
2.2.3. Encadrements pédagogiques et scientifiques.....	12
2.2.4. Vulgarisation pédagogique	13
2.3. Implications dans la recherche.....	15
2.3.1. Projets de recherche	15
2.3.2. Organisation d'évènements scientifiques.....	20
2.3.3. Communications en conférences.....	22
2.3.4. Publications.....	23
2.3.5. Relectures d'articles et évaluation de projets.....	25
2.3.6. Autres implications scientifiques	25
3. Etat actuel : Positionnement conceptuel et méthodologique.....	27
3.1 Cadre conceptuel.....	27
3.2 Outils et indicateurs rétrospectifs	39
3.2.1 La palynologie	39
3.2.2 L'anthracologie sédimentaire.....	43
3.2.3 La pédoanthracologie	46
3.2.4 L'anthracologie de charbonnières.....	50
3.2.5 La dendroécologie	53
3.2.6 Approches complémentaires	56
3.3 Notion de références.....	58
3.4 Notion d'héritages	64
4. Volet prospectif : orientations futures	73
4.1 Développements rétro-fonctionnels.....	73
4.2 Développements intégratif	89
5. Conclusion	98
6. Bibliographie	99
7. Annexes	117

1. Les grands enjeux de la connaissance du passé

Les enjeux environnementaux apparaissent de plus en plus cruciaux pour l'avenir des sociétés humaines (Dietz & Adger 2003, Balbi et al. 2019). L'acquisition sans cesse croissante de connaissances scientifiques relatives à l'environnement dresse un constat qui montre sans ambiguïté que la biodiversité est fortement menacée et déjà en cours de dégradation que ce soit à l'échelle locale, régionale ou planétaire (Tilman et al. 1994, Hughes et al. 1997, Chapin III et al. 2000, Barnosky et al. 2011, McCallum 2015, Tollefson 2019; Figure 1).

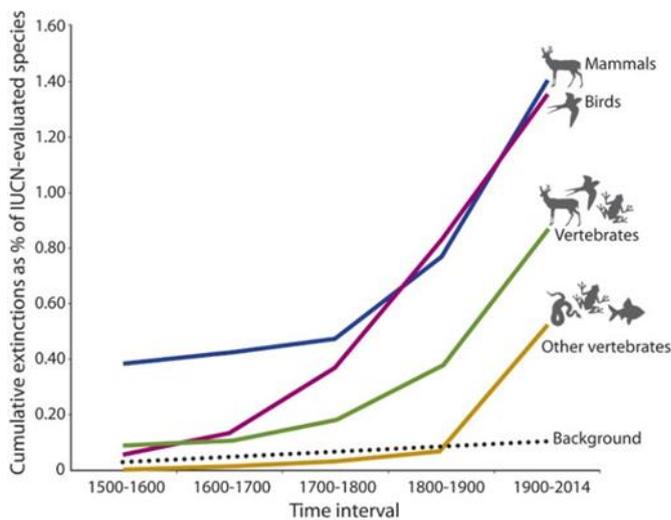


Figure 1 | Courbes de pourcentages du nombre d'espèces de vertébrés éteintes (ou éteintes à l'état sauvage) par groupes taxonomiques selon l'UICN (modifié depuis Ceballos et al. 2015)

Ce constat nous indique que la biodiversité est actuellement confrontée à une sixième grande crise d'extinction dont l'origine est intimement liée aux activités anthropiques à l'inverse des cinq crises précédentes qui résultaient de phénomènes naturels (Wake & Vredenburg 2008, Díaz et al. 2019, IPBES 2019). Cette crise du vivant n'est pas sans conséquences majeures sur la composition, la structure et le fonctionnement des écosystèmes et *in fine* de la biosphère. Les causes majeures en sont l'artificialisation des sols (Béchet et al. 2017), la fragmentation des habitats (Fahrig 2003, Fischer & Lindenmayer 2007, Mitchell et al. 2015), l'agriculture intensive (Tilman 1999, Reidsma et al. 2006, Holt et al. 2016), les pollutions chimiques (Barker 1992, Guérold et al. 2000), la surexploitation de ressources (Coleman & Williams 2002, Johst & Schöps 2003), les invasions biologiques (Van Der Wal et al. 2008, Powell et al. 2011), et le réchauffement climatique (Willis and Bhagwat 2009, IPCC 2014, 2019).

Ces menaces sur la biodiversité mettent en péril la durabilité des sociétés puisqu'elles contraignent directement ou indirectement tout ou partie des services écosystémiques qui soutiennent et satisfont les besoins des sociétés humaines (MEA 2005, Worm et al. 2006, Maresca et al. 2011, Vanbergen et al. 2013, Bull et al. 2016). Par exemple, la dégradation de la qualité des masses d'eau douce se traduit par une altération du fonctionnement des écosystèmes aquatiques qui hypothèque alors le service d'approvisionnement en eau potable (FAO 2019, Guérold et al. 2000, Woodcock et al. 2007, Lee et al. 2009). Ainsi, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE 2000) stipule que « L'état d'une masse d'eau est qualifié par son état chimique et son état écologique. Il est reconnu bon si l'état chimique est bon et si l'état écologique l'est également ». Le bon état écologique des écosystèmes, supports de la biodiversité, est donc essentiel pour la qualité de celle-ci et de ses services. On parle d'intégrité écologique (Figure 2) pour le maintien et/ou l'amélioration du bon état écologique visé par divers textes réglementaires nationaux en Europe et des directives européennes (Directive Habitat-faune-flore 92/43/CEE 1992, Directive cadre sur l'eau 2000/60/CE 2000, Convention européenne sur les paysages STE n°176 2000). Ainsi, pour assurer le maintien et/ou le développement socio-économique des sociétés actuelles mais également pour anticiper les besoins futurs d'une population mondiale en augmentation, la durabilité des services écosystémiques constitue un enjeu incontournable pour l'avenir. Il s'agit donc de questionner l'utilisation des écosystèmes et des ressources que ces derniers procurent (Daily 1997, Balbi et al. 2019).



Figure 2 | Représentation graphique des variations de niveau d'intégrité écologique d'un écosystème par rapport aux activités humaines (PSIE 2014)

Au cours de l'histoire de l'humanité, un certain nombre de sociétés se sont effondrées à cause de leur mode d'exploitation des ressources naturelles dans un contexte d'aléas climatiques et/ou des crises socio-démographiques (Diamond 2009, Tainter 2013). Par exemple, de récentes recherches archéologiques ont montré que la civilisation Maya (c. 2600 ans BCE – 1400 ans CE ; Demarest 2007) avait développé un système d'agriculture intensive, impliquant notamment des réseaux d'irrigation très développés, sur de grandes surfaces déboisées pour l'utilisation agricole des sols (Canuto et al. 2018 ; Figure 3).

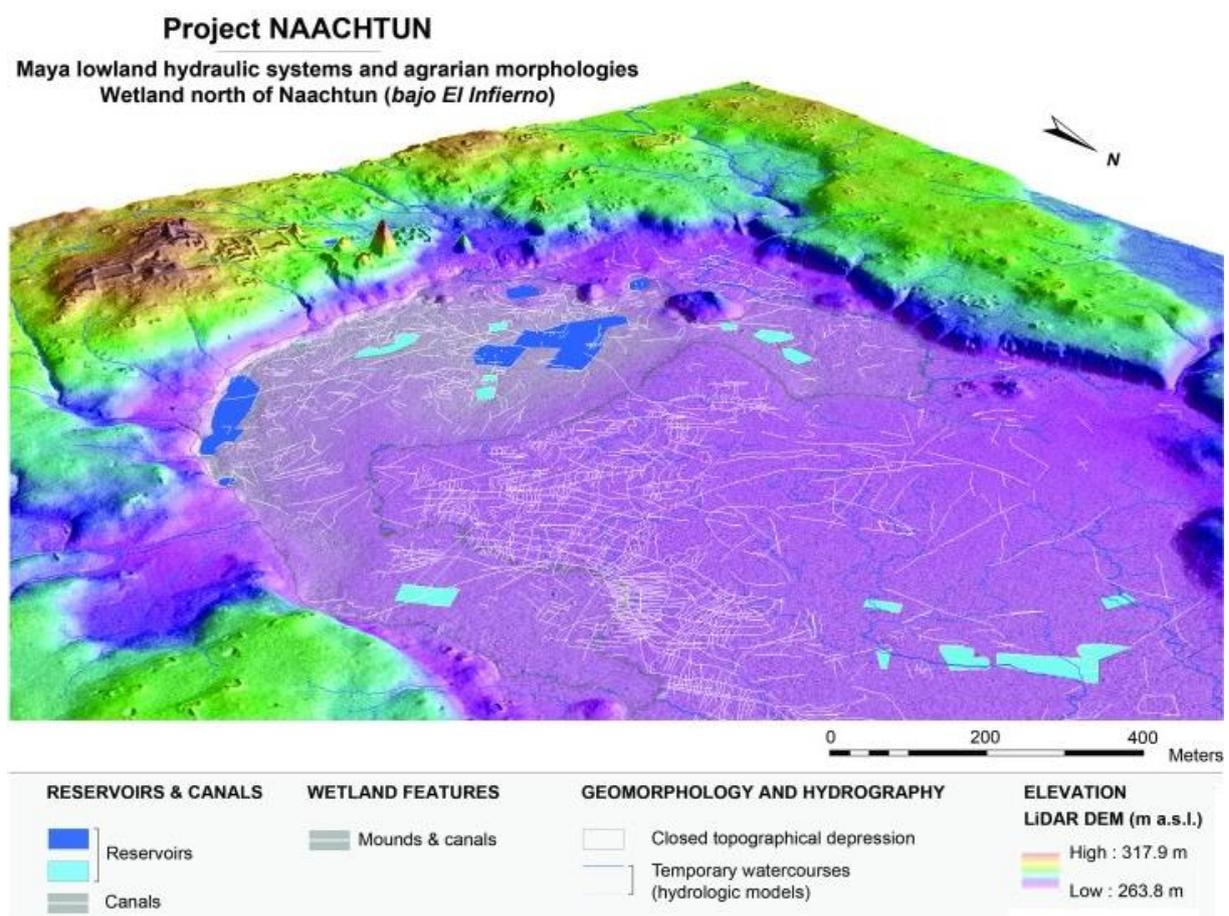


Figure 3 | Modèle numérique de terrain, représenté par niveau altitudinal, produit à partir de relevés LiDAR, permettant de détecter les micro-variations topographiques et les formes de reliefs dues à la présence humaine, dans un espace aujourd'hui sous couvert forestier dense (Canuto et al. 2018)

Cette agriculture était alors nécessaire pour nourrir jusqu'à près de 10 millions de personnes répartis dans des centaines de cités lors de l'apogée maya, entre 600 et 800 ans CE (Sharer & Traxler 2006, Coe 2011). Pour autant cette civilisation, après c. 4000 ans d'histoire, s'est effondrée. Si les causes exactes de cet effondrement restent

discutées (Salomon 2009), les connaissances actuelles tendent à montrer que parmi divers facteurs, comme l'existence de rivalités entre cités et des révoltes internes, la surexploitation des ressources par la production agricole intensive (épuiement des sols) représente certainement la cause critique de l'effondrement de cette civilisation. Le système agricole développé semble avoir perdu progressivement sa capacité de rendement, qui plus est au cours d'une période de sécheresse, elle-même entretenue par la déforestation locale pour l'agriculture (Oglesbuy et al. 2010, Cook et al. 2012, Douglas et al. 2016).

Aujourd'hui, ces anciens espaces Mayas, agricoles et urbains, sont majoritairement redevenus des espaces forestiers. Pour autant, après plus de 1000 ans de trajectoire écologique forestière, les conséquences des pratiques agricoles Mayas passées restent prégnantes. Ainsi, il a été récemment montré que les sols de forêts tropicales situées dans anciens sites Maya sont particulièrement carencés en matière organique. Ceci s'observe sur des enregistrements paléo-environnementaux qui couvrent la période amont du développement à la fin de la civilisation maya, et jusqu'à aujourd'hui, où les stocks de carbone dans les sédiments et sols restent plus faibles qu'avant la déforestation assurée par les Mayas (Douglas et al. 2018 ; Figure 4). Ainsi, on observe que les pratiques anciennes des Mayas ont un héritage sur les systèmes écologiques¹ actuels et à venir.

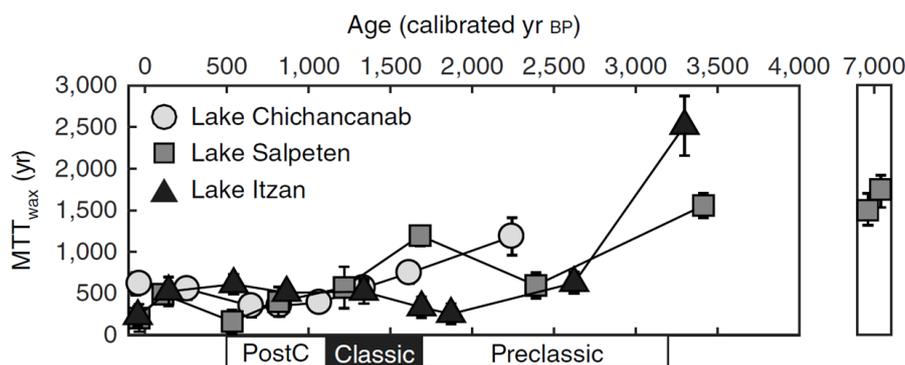


Figure 4 | Changement des MTT_{wax}* au cours du temps pour des enregistrements sédimentaires de trois lacs des anciennes plaines Maya (Modifié d'après Douglas et al. 2018 ; *MTT_{wax} : déterminé selon la présence en cire végétale (*plant waxes*) quantifié d'après le temps moyen de transit dans le sol (*mean soil transit time*) calculé selon la différence entre l'âge radiocarbone de la cire végétale et l'âge du sédiment duquel elle est extraite

¹Le terme de système écologique est utilisé dans ce document pour désigner un ensemble complexe et dynamique d'interactions biotique et abiotique, sans que soit précisé le niveau d'organisation spatiotemporel (Baudry 1992 ; cf. partie 3.1 Cadre conceptuel).

Il apparaît donc que l'état actuel d'un écosystème et sa durabilité sont non seulement conditionnés par les pratiques en cours mais également par des pratiques passées. Cette dimension temporelle de l'état des systèmes écologiques, souvent discrète, est de plus en plus considérée comme pouvant avoir une influence significative sur l'état de la biodiversité actuelle (Balée & Erickson 2006, Hermy & Verheyen 2007, Dambrine et al. 2007, Svenning & Skov 2007), sur des mécanismes fonctionnels (Dupouey et al. 2002a), et sur l'intégrité des paysages (au sens de l'écologie du paysage ; Bürgi et al. 2017). Les pratiques anciennes peuvent donc représenter des facteurs déterminants des trajectoires écologiques dans le sens où elles influencent et modifient la résistance et la résilience d'un écosystème face aux perturbations², qu'elles soient naturelles ou anthropiques comme dans le cas de socio-écosystèmes fortement soumis aux mutations socio-économiques (Berkes & Folke 1998, Lagadeuc & Chenorkian 2009). Pour appréhender cette dimension temporelle il est nécessaire d'avoir recours à des approches rétrospectives qui permettent de caractériser des états passés antérieurs aux perturbations. Il s'agit d'identifier des états dit de « référence » à différents pas de temps dans les trajectoires écologiques d'un écosystème donné, à tel ou tel niveau d'organisation spatiale des systèmes. Ces références passées sont essentielles pour 1) la définition d'état(s) écologique(s) cible(s) et d'objectif(s) pour les programmes de restauration écologique (Bakker et al. 2000, Jackson & Hobbs 2009, Balaguer et al. 2014), 2) l'identification du niveau de "bon état écologique" à maintenir par la conservation biologique (Foster et al. 1996, Feurdean & Willis 2008, Birks 2012), 3) la définition des actions de gestion durable de ressources naturelles (Agnolletti 2007). Par ces approches rétrospectives il est également possible de chercher à identifier et à comprendre comment les écosystèmes ont changé, par quelles interactions, sur quelle échelle d'espace et de temps, sous l'influence de quel(s) déterminisme(s), et avec quels héritages sur les systèmes actuels et pour les dynamiques à venir (Willis et al. 2007). Ainsi, les connaissances rétrospectives contribuent nécessairement aux approches prédictives des dynamiques écosystémiques en fournissant des connaissances sur l'adaptabilité potentielle des espèces et des habitats, sur les seuils et mécanismes de résilience (May 1977, Willis et al. 2010), sur les interactions homme-milieu (Willis & Birks 2006).

²Évènement ponctuel, d'origine naturelle ou anthropique, qui cause la destruction, totale ou partielle de la biomasse d'un système écologique.

De plus, les données rétrospectives sont très utiles, et nécessaires, à la validation et à la calibration des scénarios futurs issus de modèles prédictifs (Anderson et al. 2006, Guiot et al. 2008). Ceci étant un enjeu essentiel de la gestion environnementale par nos sociétés dans l'anthropocène (Steffen et al. 2015). C'est dans ce cadre général que se déroulent mes travaux de recherches ainsi que mes enseignements universitaires.

Dans le présent document, après avoir présenté dans un volet rétrospectif mon parcours académique, mes implications pédagogiques et de recherche, je présenterai l'état actuel du positionnement conceptuel de ma recherche, et ses méthodes/indicateurs, que j'illustrerai avec des exemples de travaux réalisés ou en cours de réalisation. Dans une dernière partie, prospective, je présenterai les perspectives que je souhaite pouvoir développer à moyen et long terme.

2. Volet rétrospective : curriculum vitae

En amont de mon cursus universitaire, c'est lors de mes années de BTS Gestion Forestière en 2001/2002 que j'ai découvert mon intérêt pour la compréhension d'une passion d'enfance, la nature, à travers notamment des cours d'écologie forestière et de pédologie. La suite de mon cursus universitaire n'a été motivé que par la volonté de comprendre l'environnement que je connaissais comme amateur de nature, avec une attirance de plus en plus grande pour les approches scientifiques. Cet intérêt pour la science est devenu une priorité de choix d'orientation lors de mes années de master de 2005 à 2007, puis au cours d'un séjour professionnel de quelques mois en 2007/2008 à l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage en Suisse (WSL) au cours duquel j'ai pu découvrir une nouvelle ambiance et de nouvelles thématiques de recherche.

2.1. Parcours universitaire

Mon parcours universitaire de recherche commence en 2008 avec le début de mon doctorat en sciences de l'environnement (*Reconstruction of fire and forest history on several investigation sites in Germany, based on long and short-term investigations – Multiproxy approaches contributing to naturalness assessment on a local scale*) réalisé en cotutelle entre l'université de Kiel en Allemagne et l'université d'Aix-Marseille en France, encadré par Oliver Nelle et Jean-Louis Edouard. Mon rattachement principal était l'école doctorale *Human development in landscape* de l'université de Kiel. Au-delà de l'apprentissage technico-scientifique et de la découverte du monde de la recherche, inhérent au doctorat, l'encadrement de thèse en cotutelle m'a permis de garder un lien concret avec la recherche universitaire en France (e.g., participations aux séminaires de l'école doctorale *Sciences de l'environnement* de l'université d'Aix-Marseille, à des conférences/ateliers nationaux, etc.). De plus, grâce à cette cotutelle j'ai pu développer mes premières expériences universitaires dans deux contextes assez différents et d'autant plus enrichissants, notamment pour le développement de mon réseau professionnel. J'ai obtenu mon doctorat en 2011, avec « la plus grande distinction du jury » (*summa cum laude*) composé de Hans-Rudolf Bork, Stéphanie Thiébault, Thomas Ludemann, et Brigitte Talon.

De 2012 à 2014, j'ai réalisé un premier post-doctorat, toujours à l'*Institute for Ecosystem Research de l'université de Kiel*, dans la continuité d'une partie de mes travaux de doctorat. Ce post-doctorat a été réalisé dans le cadre du programme de recherche de la *German Research Foundation : Holocene fire history in Northern Germany, inferred from peat and sediment charcoal records with various spatial resolution in selected areas of Schleswig-Holstein* piloté par Oliver Nelle et Marie-Josée Nadeau (DFG-Projekt NE970/9-1).

J'ai ensuite réalisé un deuxième post-doctorat de 2014 à 2015, hébergé au département *Land, Environment, Agriculture and Forestry* de l'université de Padoue en Italie, pour le montage d'un projet de recherche, en collaboration avec Emanuele Lingua (projet de recherche « Sainte Baume »).

Depuis 2015, je suis enseignant-chercheur à l'Unité de Formation et de Recherche en Sciences Fondamentales et Appliquées (UFR SciFA), au sein du Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC – UMR 7360, CNRS, Université de Lorraine), au campus universitaire de Bridoux à Metz (France).

2.2. Implications pédagogiques

2.2.1. Enseignements

En parallèle de mes travaux de doctorat et de post-doctorat à l'université de Kiel en Allemagne, je suis intervenu dans des cursus universitaires avec des enseignements portant sur mes recherches sur les paléo-environnements et en écologie forestière. Ces enseignements comprenaient principalement des sessions de travaux dirigés et pratiques pour l'identification d'indicateurs paléo-environnementaux (i.e., pollen et charbon de bois), dans le module « Wood and Charcoal Analysis », et des sorties terrain dans le module « Geoarchaeological and Holocene Palaeoenvironmental Field and Laboratory Analysis » ou en écologie forestière dans les modules « Terrestrial Ecosystems » et « Field Studies ».

Ces premières expériences d'enseignements m'ont permis de me confronter à la réalité, et aux difficultés de la pédagogie pour la transmission des connaissances. Avec le recul, je sais aujourd'hui que ces premières expériences d'enseignements n'étaient pas très compliquées d'un point de vue pédagogique puisqu'elles reposaient essentiellement sur le contenu de mes travaux de recherches en cours. Or, il apparaît évident qu'il est plus facile de construire un contenu pédagogique sur des thématiques

qui font le quotidien de l'activité plutôt que sur des thématiques théoriques ou conceptuelles de connaissances générales. De plus, ces interventions étaient en majorité réalisées dans des modules portés par des collègues professeurs de l'université, ayant une expérience certaine de l'enseignement qu'ils ont mis à profit pour encadrer mes interventions. Ainsi, ces premières expériences ont été des opportunités très formatrices pour apprendre à construire des contenus d'enseignements et à les communiquer de façon pédagogique, dans un cadre « sécurisé et sécurisant ».

Depuis mon poste de maître conférence à l'université de Lorraine, en 2015, j'interviens dans des formations de l'Unité de Formation et de Recherche en Sciences Fondamentales et Appliquées de l'université de Lorraine (Figure 5), en :

- Licence Sciences de la Vie : L1 (Projet personnel & professionnel), L2 (Diversité des Organismes Eucaryotes, Evolution, Ecologie), L3 (Typologie des écosystèmes, Floristique, Biodiversité et Ecosystème)
- Licence Professionnelle Agronomie, parcours Agriculture, Durabilité, Nouvelles Technologies (Gestion durable et services écosystémiques, La biodiversité, les paysages et l'agriculture)
- Master Gestion de l'Environnement : M1 (Ressources naturelles et enjeux environnementaux, Changements globaux) et M2 (Principes, outils et applications de la gestion conservatoire, Gestion durable des zones humides)
- Diplôme Universitaire Biodiversité, Ecosystèmes et Territoires (Ecologie du paysage, Ingénierie écologique)



Figure 5 | Photos de situations d'enseignements sur le terrain et en laboratoire (A : sur un chantier de construction pour l'observation des mesures de préventions environnementales avec les M2 GEMAREC ; B : TP de palynologie avec les M1 GESTE ; C : sur une tourbières dans les Vosges du Nord avec les L3 SV ; D : A la recherche de batraciens en forêt avec les L3 SV)

Ainsi, entre mes premières expériences d'enseignements à l'université de Kiel et celles actuellement en cours à l'université de Lorraine, je suis passé de quelques interventions sur mes propres travaux de recherche dans le cadre d'enseignements de professeurs de mon institut de l'époque, à mes propres enseignements à l'université de Lorraine, théoriques et en général déconnectés de mon activité quotidienne de recherche. Si ce passage a pu s'avérer assez abrupt, la pratique de l'enseignement depuis 2015 m'a confirmé que cette mission est une responsabilité passionnante notamment parce qu'elle permet de partager des connaissances scientifiques et techniques sur l'environnement, ce qui revient à transmettre une passion. D'autre part, depuis mon entrée en fonction dans ce poste de maître conférence j'ai eu de nombreuses occasions d'échanges avec les étudiants. Ces échanges s'avèrent le plus souvent riches et passionnants, et permettent de nourrir des vraies réflexions avec les étudiants au-delà du contenu des enseignements. Ce type d'échanges sont aussi des raisons fortes de mon intérêt pour l'enseignement.

2.2.2. Responsabilités pédagogiques

Dans la maquette de formation 2018-2022 du Master Gestion de l'Environnement de l'UFR SciFA, je suis responsable de l'UE Principes, outils et applications de la gestion conservatoire du parcours Gestion des Milieux Aquatiques Restauration et Conservation (GEMAREC, UE912). Cette UE repose essentiellement sur des interventions de professionnels de la gestion et de la conservation de l'environnement (e.g., Metz Métropole, Réserve Naturelle, CEN de Lorraine, etc.). Il s'agit d'un choix pédagogique pour permettre aux étudiants de la formation de rencontrer des professionnels de la gestion environnementale et d'aborder des cas réels, de manière concrète. Ces interventions de professionnels sont pour moi autant d'opportunités de rencontres et de discussions enrichissantes à propos des préoccupations et enjeux du secteur professionnel de l'environnement (associatif ou institutionnel).

Depuis 2018, je suis responsable pédagogique du parcours en alternance Agriculture, Durabilité, Nouvelles technologies (ADNT) de la licence professionnelle agronomie de l'université de Lorraine, à l'UFR SciFA à Metz. Ce parcours universitaire était nouveau à l'université de Lorraine, il a donc fallu réaliser l'ensemble de la maquette pour son accréditation et l'ouverture de la formation (structure générale, contenus, intervenants, volumes horaires, modalités d'examens, etc.). Cette démarche réalisée en 2017 a été très formatrice pour moi, notamment pour découvrir les rouages universitaires et le monde des formations en apprentissages. De plus, mon implication dans cette formation est pour moi l'opportunité de me rapprocher d'experts en nouvelles technologies et d'outils potentiellement utiles pour mes recherches comme les technologies de télédétection. Par exemple, pour cette formation nous sommes en train d'acquérir des équipements de télédétection (e.g., drones, caméras et capteurs multispectraux, logiciels, etc.) pour mettre en place la plateforme REFEREE (i.e., Plateforme feRmE du Futur : obsErvation aérienne des cultuREs par dronEs). Cette plateforme permettra de mener des travaux pratiques d'initiation au pilotage de drone, à la réalisation de mesures spectrales sur sols et végétations par des capteurs embarqués sur des drones, et finalement au traitement de ces données.

2.2.3. Encadrements pédagogiques et scientifiques

En parallèle de mes travaux de doctorat et de post-doctorat à l'université de Kiel de 2012 à 2015 j'ai eu l'opportunité de co-encadrer deux stages de deuxième année de master dans le domaine de la dendroécologie. Un premier en 2012 sur la thématique *Growth patterns and characterization of black alder (Alnus glutinosa) forest stands*, puis un second en 2014 sur la thématique *Impact of the drainage and rewetting on beech (Fagus sylvatica) forests stands attributes and radial growth in northern Germany*. De plus, en 2014 je suis intervenu dans l'encadrement d'un stage de licence de biologie en palynologie.

Depuis que je suis en poste à l'UFR SciFA, en 2015, j'ai encadré six stages de 3^{ème} année de licence SV, six stages de 1^{ère} année de master GESTE (ou de l'ancien master EEE), et trois étudiants en stage de 2^{ème} année de master GESTE (ou de l'ancien master EEE).

Ces stages se sont déroulés sur différentes thématiques de mes axes de recherches. En effet, dans la grande majorité des cas, les sujets de stage que je propose aux étudiants sont partie prenante de mes travaux de recherches en cours. Par exemple le stage de Mathilde Dufour (L3) « Reconstitution de l'histoire des incendies d'une vallée de moyenne montagne des Vosges du nord » en 2016, en lien avec un programme de recherche de l'OHM du Pays de Bitche, ou le stage de Alexia Vichard « Etude de l'histoire des incendies d'une tourbière à fort intérêt biologique (Marais des Hauts Buttés) » en lien avec un programme de recherche avec l'AERM dans le Parc Naturel Régional des Ardennes. Aussi bien du point de vue de l'accompagnement pédagogique, que de la réalisation du stage en lui-même, et des contributions de ces stages à mes travaux de recherche, l'ensemble de ces stages se sont déroulés de façon satisfaisante, voire très satisfaisante lorsqu'ils ont débouché sur d'autres stages, ou sur des projets comme le stage d'Amélie Rondu « Etude comparative de l'histoire forestière de stations hydromorphes et drainantes dans la forêt d'Hemilly et d'Elvange (Moselle) » également en 2016 qui a abouti au programme de recherche UEM-labex ARBRE (cf. partie 2.3.1. Projets de recherche).

Depuis 2016, je codirige deux doctorats. Le doctorat de David Gocel-Chalté (2016-2020) qui bénéficie d'une bourse ministérielle de l'Ecole Doctorale (SIReNa) « *Déterminants spatio-temporels de la qualité des cours d'eau dans un contexte de déprise des activités et d'évolution des paysages : rôle des facteurs du passé et enjeux*

de la restauration » encadré avec François Guéroid (directeur de la thèse). Et le doctorat de Claudia Oliveira (2018-2021) « *De bois et d'houille : le charbon, ressource énergétique au fort impact environnemental dans le passé, enjeu clé pour la transition énergétique du futur* » encadré avec Simon Devin (directeur de la thèse) pour 2018-2021 avec une bourse du programme LUE-DEEPSURF, également à l'école doctorale SIRENa de l'université de Lorraine.

Ces deux thèses abordent l'étude anthracologique des charbonnières et les possibles conséquences de la production de charbon de bois sur les écosystèmes forestiers passés et actuels. Ainsi, ces encadrements s'inscrivent dans une certaine continuité en ce qui concerne les approches et les questionnements que je développe au sein du LIEC.

J'ai également encadré 2 post-doctorants. Un 1^{er} le post-doctorat de Hannes Knapp (2017-2019) « *Histoire et impact de l'utilisation des ressources ligneuses sur le passé et l'état actuel des forêts du Pays de Bitche* », financé par une bourse du Labex DRIHM-OHM du Pays de Bitche. Le sujet traite également de l'étude anthracologique des charbonnières et qui est donc grandement complémentaire du doctorat de David Gocel-Chalté, dans les Vosges du Nord. Et enfin, j'ai encadré, avec Jean-Luc Dupouey (Silva-INRAE), le post-doctorat de Thomas Feiss (2018-2019) « *Histoire Forestière du Plateau lorrain* » financé par une bourse du Labex ARBRE. Ce projet post-doctoral reposait sur une approche pédoanthracologique.

2.2.4. Vulgarisation pédagogique

La vulgarisation scientifique fait partie des missions de l'enseignant-chercheur. A ce titre, mais aussi parce que cette démarche oblige à rendre intelligibles nos démarches et résultats de recherches, et parce que c'est souvent l'occasion d'échanges passionnants, relativement représentatifs de la relation et des attentes de la société envers les sciences de l'environnement, j'ai participé à un certain nombre d'évènements de vulgarisation.

En 2017, j'ai co-animé une sortie avec le conservatoire des espaces naturels de Lorraine sur le marais de Pagny-sur-Meuse à propos de l'étude de l'histoire des zones humides. J'ai organisé une journée d'introduction aux sciences de la paléoécologie au lycée Teyssier de Bitche avec l'Observatoire Homme-Milieus du Pays de Bitche. Je suis intervenu lors d'un des *Samedis Scientifiques du PNR des Vosges du nord* avec

une communication orale (*Une première histoire des incendies et de l'utilisation des ressources en bois dans les Vosges du nord*). Enfin, j'ai fait une présentation (*Les zones humides : archives du passé, fenêtres vers l'avenir*) lors du séminaire du Programme Régional d'Actions en faveur des Mares, organisé par le Conservatoire des Espaces Naturels de Lorraine, devant un large panel de parties prenantes de la gestion, conservation et restauration de ces milieux, qui sont au cœur de forts enjeux environnementaux et qui sont des archives paléo-environnementales cruciales pour mon activité de recherche.

En 2018, j'ai co-animé une soirée de cinéma-débat autour de la projection du film *La magie des tourbières* avec le parc régional des Vosges du Nord. Je suis intervenu lors d'un des Samedis Scientifiques du PNR des Vosges du Nord avec une communication orale (*Comment les sciences de la nature abordent la notion de sauvage*). J'ai animé un stand lors du rallye nature des 20 ans de la réserve naturelle nationale des Rochers et tourbières du Pays de Bitche. J'ai organisé une conférence publique au jardin botanique Jean-Marie Pelt à Nancy, puis à la mairie de Bitche dans le cadre de l'Université du Temps Libre de l'Université de Lorraine. Enfin, j'ai organisé un stand *Paléoécologie* lors de la fête des sciences 2018 au campus Bridoux à Metz et, en 2019, pour les 80 ans du CNRS à la mairie de Nancy.

Par ailleurs, en 2018, j'ai publié un article de vulgarisation à propos de l'étude des charbonnières pour le site *Planet-Vie* qui assemble de la documentation comme ressources en sciences de la vie pour les enseignants (Robin 2018; <https://planet-vie.ens.fr/article/2529/reconstruire-histoire-forets-etude-production-charbon-bois>). En 2019, j'ai publié dans les pages de brèves du Groupe Tétrastyles Vosges à propos des études pédoanthracologiques (Robin 2019).

2.3. Implications dans la recherche

2.3.1. Projets de recherche

Depuis 2012, puis dans le cadre de mon activité de maître de conférence, j'ai construit et participé à 18 projets de recherche, dont 10 comme porteur et 8 comme participant (Figure 6). A titre indicatif l'ensemble des budgets impliqués dans la réalisation de ces projets correspond à un montant de l'ordre de 500 000 EUR, frais de fonctionnement, missions, analyses et salaire inclus. Un certain nombre de ces projets sont finalisés ou en cours de finalisation.

Ainsi, en ordre chronologique, j'ai porté les projets, aujourd'hui finalisés, suivants :

TooEarly (2012-2015): Description et mise en perspective d'une « anomalie » paléo-environnementale par les approches pédoanthracologique et géomorphologique, en collaboration avec Hans-Rudolf Bork (Institute for Ecosystem Research, université de Kiel, Allemagne) et Oliver Nelle (State Office for Cultural Heritage Baden-Wuerttemberg, Allemagne)

Aboutissements :

Robin V, Nadeau M-J, Grootes PM, Bork H-R, Nelle O, 2016. Too early and too northerly: evidence of temperate trees in northern Central Europe during the Younger Dryas. New Phytologist 212, 259-268

Robin V, Nadeau M-J, Grootes PM, Bork H-R, Nelle O, 2016. Paleobotanical and climate data support the plausibility of temperate trees spread into central Europe during the Late Glacial. New Phytologist 212, 19-21

Sainte Baume (2014-2016) : Reconstitution de l'histoire paléo-environnementale de la forêt mature de la Sainte Baume et des zones adjacentes. Etude pédoanthracologique et géomorphologique en collaboration avec Stefan Dreibrodt (Institute for Ecosystem Research, université de Kiel, Allemagne) et Brigitte Talon (IMBE, université d'Aix-Marseille, France), avec le soutien de l'université de Kiel en Allemagne.

Aboutissement : une publication en cours d'évaluation dans la revue *The Holocene*

CharPyBi (2016-2019) : histoire du Charbonnages du Pays de Bitche. Etude anthracologique et historique en collaboration avec Xavier Rochel (Loterr, Université

de Lorraine, Nancy), avec le soutien de l’OHM “Pays de Bitche”, du Commissariat au massif des Vosges, et du programme PEPS Mirabelles de l’université de Lorraine.

Aboutissement : Gocel-Chalté D, Guerold F, Knapp H, Robin V, 2020. Anthracological analyses of charcoal production sites at a high spatial resolution: the role of topographical parameters in historical tree taxa distribution in Northern Vosges Mountains (France). *Vegetation History and Archaeobotany*. Sous presse

PalTouBi (2016-2020) : Palécologie des tourbières du Pays de Bitche. Etude palynologique, anthracologique et geo-sédimentaire en collaboration avec Annik Schnitzler (LIEC, université de Lorraine, Metz), Pascale Ruffaldi et Anne-Véronique Walter-Simonnet (Chrono-Environnement, université de Franche-Comté, Besançon), et Damien Ertlen (LIVE, université de Strasbourg). Avec le soutien de l’OHM “Pays de Bitche”, du Commissariat au massif des Vosges, et de l’Agence de l’Eau Rhin Meuse.

Aboutissement : Gouriveau E, Ruffaldi P, Duchamp L, Robin V, Schnitzler A, Walter-Simonnet A-V, 2020. Holocene vegetation history in the Northern Vosges Mountains (NE France): palynological, geochemical and sedimentological data. *The Holocene*, Sous presse

HFPL (2018-2020) : Etude de l’Histoire Forestière du Plateau lorrain. Approche pédoanthracologique et pédologique en collaboration avec Jean-Luc Dupouey (Silva, INRAE Grand-Est), avec le soutien de la fondation de l’Usine d’Electricité de Metz et du Labex ARBRE.

Aboutissement : Publications en cours de rédaction

J’ai participé aux projets finalisés suivants :

Hillslope Spessart (2010-2014) : Contribution au projet de doctorat « Past Natural and Anthropogenically Altered Sediment Flux in the Spessart Mountains – a Central European Landscape » d’Annegret Larsen. Approches géomorphologique et anthracologique avec le soutien de l’école doctorale « Human Development in landscape » de l’université de Kiel en Allemagne.

Aboutissement : Larsen A, Robin V, Fu Lling A, Larsen J, Bork H-R, 2016. The influence of historic land-use changes on hillslope erosion and sediment redistribution. *The Holocene* 26, 1248-1261

INSTALL-HAIES (2017) : Des paysages du passé à ceux du futur : réinstaller des haies dans les vallées vosgiennes ? Etude géomorphologique et pédoanthracologique, porté par Dominique Schwartz (LIVE, université de Strasbourg), avec le soutien du programme CNRS-INEE PEPS Paysages.

Aboutissement : Schwartz D, Robin V, Adam P, et al. (2019). Les géosciences au service de l'archéologie agraire Une étude de cas sur les rideaux de culture de Goldbach (68). Soumit à la revue Archimed

MéToubMi (2018/2019) : Mémoire et rôle environnemental des tourbières du camp militaire de Bitche. Analyse interdisciplinaire de séquences de tourbe porté par Benjamin Cancès (GEGENA, Université de Reims), avec le soutien de l'OHM "Pays de Bitche"

Regio-Mineralia (2016-2020) : Etude en SHS et sciences environnementales des « origines de la culture industrielle dans le Rhin supérieur » porté par Joseph Gauthier (Chrono-Environnement, CNRS, Besançon) et Pierre Fluck (CRESAT, université de Haute-Alsace, Mulhouse), avec le soutien du programme INTERREG Rhin Supérieur.

Je porte les projets en cours suivants :

ExSoChar (2010-2020) : Expérimentation sur l'enregistrement des assemblages pédoanthracologiques. Suivi à long terme des processus d'enfouissement et de fragmentation des fragments de charbon de bois dans les sols, en conditions semi-contrôlées. En collaboration avec Rudiger Kelm (musée en plein air d'Albersdorf en Allemagne), avec le soutien de l'école doctorale « *Human Development in landscape* » de l'université de Kiel en Allemagne.

MACHAIS (2017-2020) : Etude paléoécologie de la tourbière du Mâchais dans les Hautes-Vosges. Analyses chronologiques, palynologiques, anthracologiques et sédimentaires, avec le soutien financier de la réserve naturelle nationale de la tourbière de Machais.

DBDH (2018-2021) : De Bois et D'Houille : le charbon, ressource énergétique au fort impact environnemental dans le passé, enjeux clé pour la transition énergétique du futur. Etude anthracologique, historique et environnementale de charbonnières et de Mardelles dans le Grand Est. En collaboration avec Simon Devin, Laurence Mansuy-

Huault, Anne Poszwa (LIEC, université de Lorraine), Jean-Luc Dupouey (Silva, INRAE Grand-Est), Xavier Rochel (Loterr, Université de Lorraine, Nancy), avec le soutien du programme IMPACT : DEEPSURF de Lorraine Université d'Excellence.

DiSTMaB (2018-2021) : Caractérisation de la Distribution Spatio-Temporelle des Mares/Mardelles du Bischwald, Moselle. Etude palynologique et géochimique en collaboration avec Laurence Mansuy-Huault (LIEC, université de Lorraine, Nancy). Avec le soutien de l'Agence de l'Eau Rhin Meuse.

HiFoZHA (2018-2021) : Caractérisation de l'Histoire de la végétation et de l'état Fonctionnel de Zones Humides du PNR des Ardennes). Etude palynologique et géochimique en collaboration avec Laurence Mansuy-Huault (LIEC, université de Lorraine, Nancy). Avec le soutien de l'Agence de l'Eau Rhin Meuse.

Up and Down (2019/2020) : Analyse comparative de différents signaux paléo-environnementaux de Lorraine pour l'identification d'un signal régional de référence. Méta-analyse et étude palynologique avec le soutien du programme Jeune chercheur du pôle OTELo de l'université de Lorraine.

Je participe aux projets en cours suivants :

NUTCAP (2018-2020) : Les charbonnières sont-elles des sources de contaminations et/ou des réservoirs de nutriments ? Impact d'une activité humaine historique sur la qualité actuelle des milieux. Etude géochimique, pédologique et anthracologique, porté par Anne Poszwa et Laurence Mansuy-Huault (LIEC, université de Lorraine, Nancy), avec le soutien de l'OHM "Pays de Bitche" et du programme Projet Interdisciplinaire du pôle OTELo de l'université de Lorraine.

SylvaCharb (2019/2020) : Dynamique à long terme des peuplements forestiers : quels impacts du charbonnage sur les écosystèmes forestiers actuels ? Approche interdisciplinaire pour l'évaluation de l'impact de la production historique de charbon de bois sur la composition et structure des peuplements forestiers des Vosges du nord, porté Jean-Luc Dupouey (Silva, INRAE Grand-Est), avec le soutien de l'OHM "Pays de Bitche".

SOLHOM (2019-2020) : Etude des « Interactions hommes-milieux et évolution des sols au cours des deux derniers millénaires dans le massif du Fossard (Remiremont,

Vosges) » ; Approches géoarchéologique, pédologique, et pédoanthracologique, porté par Anne Poszwa (LIEC, université de Lorraine, Nancy) avec le soutien du programme Projet Interdisciplinaire du pôle OTELo de l'université de Lorraine.

Géo² Grand-Est (2018-2021) : « Geohistoire et geoarchéologie des paysages agraires dans le Grand Est : formes, parcellaires et territoires ». Etude géomorphologique et pédoanthracologique porté par Dominique Schwartz (LIVE, université de Strasbourg) avec le soutien de l'OHM "Pays de Bitche" et de la région Grand-Est.

Enfin j'ai également participé à divers projets de façon ponctuelle comme par exemple:

L'étude pédoanthracologique d'échantillons de sol de forêt boréal.

Aboutissement : Carcaillet C, Despons M, Robin V, Bergeron Y, 2019. Long-term steady-state dry boreal forest in the face of disturbance. ECOSYSTEMS. In Press

L'étude d'enregistrements anthracologiques sédimentaires de Malte.

Aboutissement : Marriner N, Kaniewski D, Gambin T, Gambin B, Vannière B, Morhange C, Djamali M, Tachikawa K, Robin V, Rius D, Bard E, 2019. Fire as a motor of rapid environmental degradation during the earliest peopling of Malta 7500 years ago. Quaternary Science Reviews 212, 199-205

L'étude pédoanthracologique d'échantillons de terrasses alluviales de Jordanie.

Aboutissement : Contreras DA, Robin V, Gonda R, Hodara R, Dal Corso M, Makarewicz C, 2014. (Before and) After the flood: A multiproxy approach to past floodplain usage in the middle Wadi al-Hasa, Jordan. Journal of Arid Environments 110, 30-43

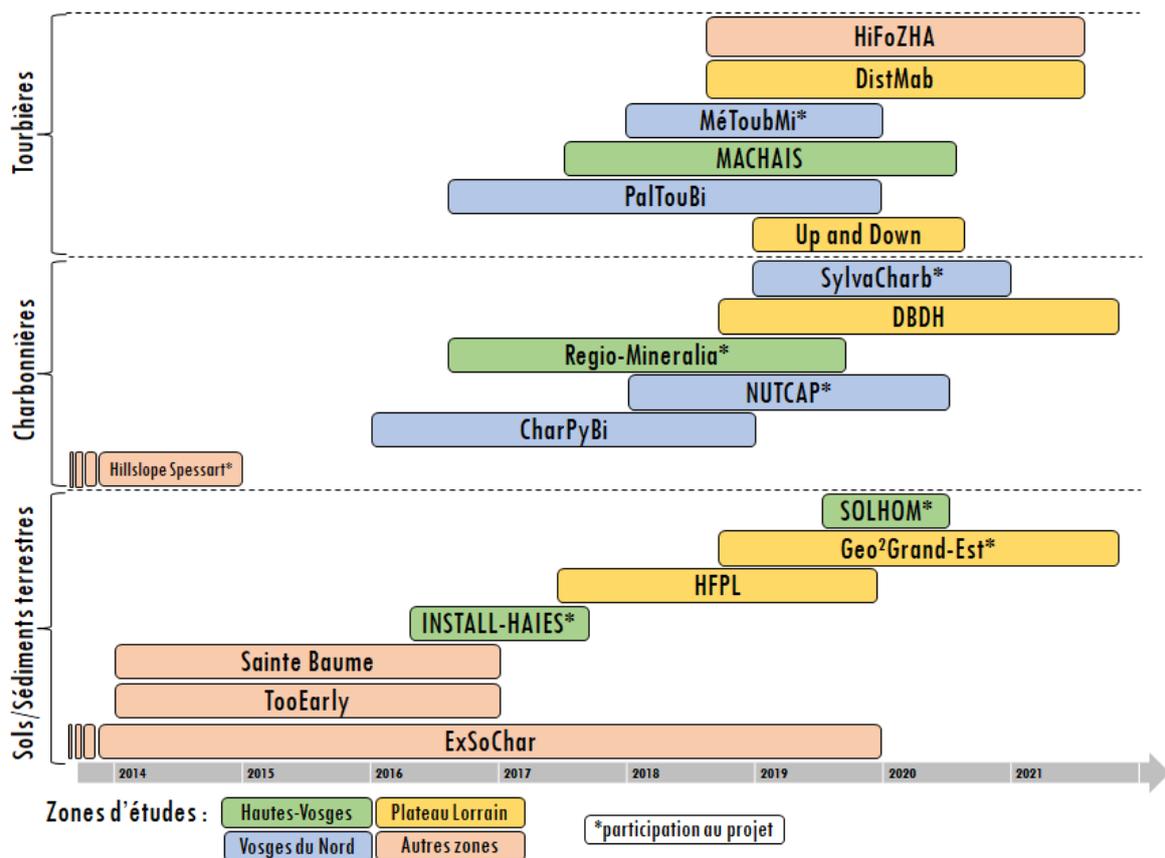


Figure 6 | Chronologie des principaux projets de recherche que je/j'ai porté(e) et de ceux auxquels j'ai/je participe(e)

L'ensemble de ces projets sont interconnectés soit parce qu'ils concernent les mêmes zones géographiques, soit parce qu'ils sont basés sur des approches scientifiques similaires ou du moins comparables (Figure 6). De plus, et surtout, ils sont reliés selon des axes/thématiques de recherches transdisciplinaires et multi-site/archives. Ces axes/thématiques sont développés dans la troisième partie de ce document (cf. partie 3. Etat actuel : Positionnement conceptuel et méthodologique).

2.3.2. Organisation d'évènements scientifiques

En 2010, avec Oliver Nelle (State Office for Cultural Heritage Baden-Wuerttemberg, Allemagne) et Brigitte Talon (IMBE, Université d'Aix-Marseille), nous avons organisé le 1^{er} workshop international de pédoanthracologie à Aix-en-Provence. Ce premier workshop pour cette approche scientifique relativement jeune a réuni une soixantaine de personnes sur la thématique « *Pedoanthracology and environmental studies* ». A la suite de ce 1^{er} workshop, j'ai organisé avec Oliver Nelle (State Office for Cultural Heritage Baden-Wuerttemberg, Allemagne), le second rendez-vous de cette

communauté en 2013 à Kiel en Allemagne sur deux jours avec une vingtaine de participants sur la thématique « *Improving the link between charcoal analysis and geosciences – towards a geoanthracology?* ». Puis j'ai organisé avec Marie-Claude Bal (Geolab, Université de Limoges) le 3^{ème} workshop international de pédoanthracologie à Limoges en octobre 2017 sur trois jours avec une trentaine de participants sur la thématique « *The contribution of the pedoanthracology to the development of territories* ». Les deux premiers workshops ont été suivis d'actes publiés dans la revue internationale de rang A, *Quaternary International* :

Nelle O, Robin V, Talon B, 2013 (Editorial). *Pedoanthracology: Analysing soil charcoal to study Holocene palaeoenvironments*, *Quaternary International* 289, 1-4

Robin V, Talon B, Nelle O, 2015 (Editorial). *Charcoal: resource and ubiquitous proxy*". *Quaternary International* 366, 1-2

En 2013, j'ai organisé une session au workshop international de l'école doctorale « *Human Development in Landscape* » de l'université de Kiel : *Socio-environmental dynamics over the last 12.000 years : the creation of landscapes III, Session 5 : Wood and Charcoal: Socio-Economical Constraints of a Resource and Environmental Indications of a Proxy*. Cet évènement a réuni une quarantaine de personnes sur deux jours.

En 2016, j'ai co-organisé avec Thierry Dutoit (CNRS, IMBE-Université d'Avignon), la session « *Biodiversity, Ecosystem services or Naturalness, is this the question?* » au colloque international *Ecosummit / Ecological sustainability engineering change*, à Montpellier. Cette session a réuni environ 80 personnes sur une journée.

En 2017, j'ai organisé la 1^{ère} Journée d'Ecologie Historique de Lorraine, au campus Bridoux à Metz. Cette journée a réuni environ 60 personnes du monde de la recherche et des gestionnaires de l'environnement en Lorraine. Cette journée a été un évènement facilitateur important pour mon intégration dans le réseau paléo-environnement/écologie historique du Grand-Est. De plus, il a posé les bases d'un groupe de communication et d'échanges sur cette thématique en Lorraine et de l'organisation d'une conférence internationale en Ecologie Historique du 25 au 29 mai 2020 à Metz : *Historical Ecology for the Future*, organisé conjointement avec des collègues du laboratoire Silva (INRAE, AgroParisTech, Université de Lorraine). Enfin, je suis impliqué dans l'organisation du colloque de la SFE² qui se tiendra en 2022 à Metz.

2.3.3. Communications en conférences

Depuis 2007, j'ai effectué ou participé avec 56 communications dans des colloques ou workshops d'envergure nationale ou internationale (Figure 7), dont 35 comme 1er auteur, deux comme orateur invité et 19 comme coauteur.

Au-delà des communications, et des échanges informels souvent tout autant utiles, dans les différents colloques et workshops auxquels j'ai participé je retiens en particulier certains colloques, notamment celui de Chambéry en octobre 2008 « Biodiversité, naturalité, humanité – Pour inspirer la gestion des forêts » particulièrement formateur aux thématiques d'écologie forestière, de naturalité, et à propos des enjeux des liens entre recherche et gestion environnementale. Je retiens

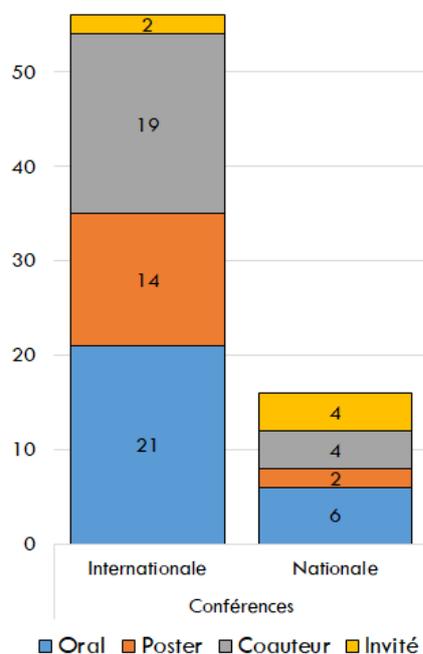


Figure 7 | Comptabilisation de l'ensemble des participations à des évènements de communications scientifiques depuis 2007

également le 5^{eme} colloque international d'anthracologie de Valence en Espagne en Septembre 2011 qui coïncidait avec la finalisation de mes travaux de doctorat et qui a donc été une occasion très utile de présenter les aboutissements scientifiques de mes travaux. Puis, je retiens le 6^{eme} colloque international d'anthracologie de Freiburg en Allemagne 2015, qui a été important pour moi en terme de développement de réseau, suite à mon entrée en fonction dans le poste d'enseignant-chercheur à l'université de Lorraine quelques semaines auparavant. Enfin, je retiens le 61^{eme} colloque international de l'*International Association for Vegetation Science* (IAVS) à Bozman (USA), « *Natural Ecosystems as Benchmarks for Vegetation Science* », en juillet 2018, qui a été une

opportunité importante de me situer scientifiquement dans la thématique de l'Ecologie Historique. Il a également été constructif pour la mise en réseau avec des collègues Français et Européens.

2.3.4. Publications

J'ai rédigé mes premières publications alors que j'étais étudiant en master (2006-2008), pour la revue de l'association de sauvegarde du patrimoine du pays du Buëch et des Baronnies (Hautes-Alpes). Puis dans des revues locales et des recueils de résumés de participation à des conférences. Ces premières publications de littérature dite « grise », au-delà de leur propre intérêt de diffusion des connaissances et de valorisation, m'ont permis de me former à la rédaction scientifique, jusqu'à mon premier article dans une revue indexée (*The Holocene*) en 2012 (Figure 8). Depuis ce premier article, j'ai publié 10 articles en 1^{er} auteur et j'ai participé à la publication de 12 articles comme coauteur, dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture (Figure 9 ; Table 1).

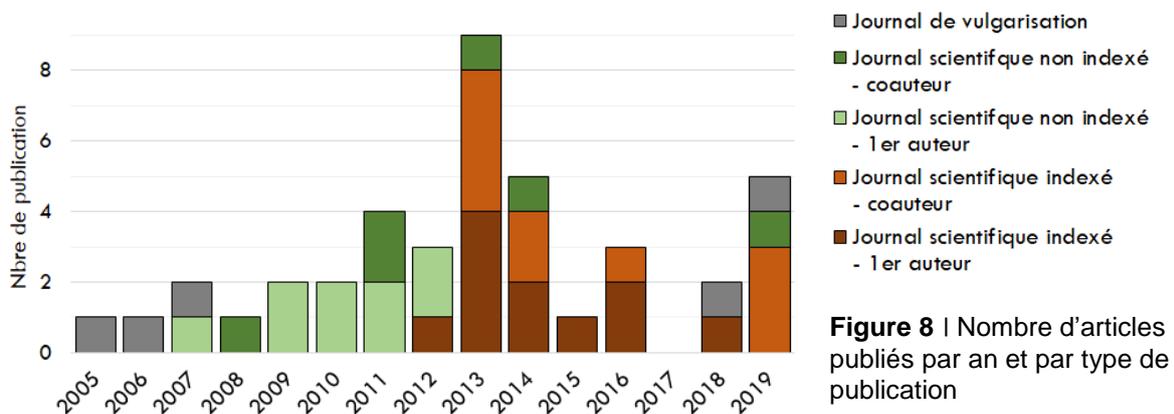


Figure 8 | Nombre d'articles publiés par an et par type de publication

Mes travaux de doctorat ont permis, directement ou indirectement, de publier six articles. Mes travaux de post-doctorat sont pour partie en cours de rédaction.

De plus, différents projets parallèles et diverses collaborations, m'ont permis de publier neuf articles. Enfin, les travaux en cours depuis que je suis en poste à l'université de Lorraine, ont pour le moment abouti à deux articles publiés (deux autres articles sont actuellement en cours de relecture dans les revues scientifiques à comité de lecture, et deux autres articles sont en cours de rédaction).



Figure 9 | Indicateurs du niveau de publication dans des revues scientifiques internationales indexées depuis 2012

Table 1 | Bilan des publications par journal

Revue	Facteur d'impact	Quartile	Sujet du journal en lien avec la publication	Année	Position/nombre total d'auteurs
<i>ECOSYSTEMS</i>	4.555	Q1	Ecologie Processus naturels	2019	3/4
<i>Vegetation History and Archaeobotany</i>	2.482	Q1	Biogéosciences Archéologie	2020	4/4
				2014	1/2
<i>Quaternary Science Reviews</i>	4.641	Q1	Géomorphologie, archéologie, sciences du sol, Paléobotanique	2019	9/11
<i>The Holocene</i>	2.547	Q1	Géosciences Géographie physique Changements environnementaux	2020	4/6
				2018	1/8
				2016	2/5
				2014	1/4
				2012	1/4
<i>New Phytologist</i>	7.299	Q1	Changements globaux	2016	1/5
				2016	1/5
<i>Quaternary International</i>	1.952	Q1	Etude du quaternaire Paléoenvironnements	2015	1/3
				2013	11/12
				2013	2/3
				2013	3/5
				2013	1/4
				2013	1/3
				2013	2/4
<i>Journal of Arid Environments</i>	1.825	Q1	Paléoenvironnements Geomorphologie Anthropologie	2014	2/6
<i>Journal of Archaeological Science</i>	3.03	Q2	Archéobotanique	2014	2/5
				2013	2/8
<i>Quaternaire</i>	0.614	Q2	Paléoenvironnements	2013	1/5

2.3.5. Relectures d'articles et évaluation de projets

Missions inhérentes du travail de chercheur, la relecture de manuscrits pour des revues scientifiques à comité de lecture, ainsi que l'évaluation de projets de recherche pour des agences de financements, ont été très utiles pour ma propre évolution dans la rédaction scientifique et le montage de projet, comme un « effet miroir », par comparaison avec les documents à évaluer. Ainsi depuis 2012, j'ai été amené à relire 19 manuscrits pour 13 différents journaux scientifiques internationaux de rang A (e.g., *The Holocene*, *Scientific Reports Nature*, *Science of the Total Environment*, *Ecological Indicators*, *Landscape Ecology*, etc.). Et j'ai évalué quatre projets de recherche pour des agences de financement nationales en Europe et Amérique du nord.

2.3.6. Autres implications scientifiques

Entre 2012 et 2014, lors de mon 1^{er} postdoctorat, j'ai été responsable du groupe de travail « paleoecology » de l'*Institute for Ecosystem Research*, à l'université de Kiel en Allemagne. Ce groupe incluait deux doctorants, un autre post-doctorant et un chercheur associé. Il s'agissait principalement de gestion administrative et d'échanges scientifiques.

J'ai été deux fois éditeur invité pour la revue scientifique internationale de rang A : *Quaternary International*, pour les numéros spéciaux 289 (2013) pour 10 articles, et 366 (2015) pour huit articles, suite aux 1^{er} et 2^{ème} workshop internationaux de pédoanthracologie en 2010 et 2013 (Cf. partie 2.3.2. Organisation d'évènements scientifiques).

Depuis 2016, je suis membre du Conseil scientifique du parc naturel régional des Vosges du Nord Est (Commission Territorial Est). C'est une opportunité très intéressante pour une meilleure connaissance d'un territoire dans lequel j'ai un certain nombre de projets de recherche, mais aussi pour élargir le champ de vision à d'autres enjeux de connaissances à l'échelle territoriale.

Depuis 2017, je suis membre du Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel du Grand-Est. Ceci est une excellente opportunité d'être au contact de la réalité des enjeux de la gestion de l'environnement et de mettre mon expertise scientifique au service de ces enjeux. Ainsi, par exemple, j'ai été amené à accompagner et évaluer le plan de gestion de Réserve Naturelle du Tanet-Gazon-du-Faing, dans les Hautes-Vosges, avec le Conservatoire d'Espaces Naturels de Lorraine (Figure 10), et à

évaluer le plan de gestion de la Réserve Naturelle Régionale de Téterchen, Velving, Ottonville, en Moselle.

Je suis membre du conseil d'administration du Groupe d'Histoire des Forêts Françaises depuis 2017, ce qui est occasion d'élargir et de diversifier encore mon réseau professionnel et d'avoir une ouverture sur des aspects plutôt patrimoniaux de l'histoire des forêts.

Enfin, nous avons mis en place en 2017, avec des collègues de l'INRAE à Champenoux, le Groupe d'Ecologie Historique de Lorraine, suite à la journée d'Ecologie Historique de Lorraine en 2017 à Metz, que j'organisais en 2017 à Metz. Il s'agit principalement d'un groupe d'échanges et de communication sur cette thématique de l'Ecologie Historique. Je suis animateur de ce GEHL depuis sa mise en place.



Figure 10 | Visite sur le terrain de la Réserve Naturelle du Tanet-Gazon-du-Faing avec les gestionnaires du CEN de Lorraine dans le cadre des mon activité au CSRPN Grand-Est (photo ©V.Robin)

3. Etat actuel : Positionnement conceptuel et méthodologique

3.1 Cadre conceptuel

Mes travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre général de l'étude des changements d'états des systèmes écologiques au cours du temps pour l'identification d'états de références passés et d'héritages sur les systèmes actuels. Pour cela je réalise des analyses rétrospectives des trajectoires écologiques, de leur résistance et résilience face aux causes de changements.

Les systèmes écologiques sont des systèmes dynamiques complexes constitués d'un ensemble d'entités biotiques et abiotiques en interaction. Ces interactions holistiques se déroulent à différents niveaux de temps et d'espace, hiérarchisés, qu'elles influencent réciproquement les uns par rapport aux autres (Baudry 1992, Levin 1992, Förster 2012). Ainsi les systèmes écologiques sont en perpétuel changement. Ceci se matérialise notamment à travers les mécanismes de successions végétales et communautés biotiques associées. Cet enchaînement progressif d'états écologiques qui répond à des changements environnementaux, induit des modifications de composition, structure et fonctionnement des systèmes écologiques. Ceci depuis des phases initiales pauvres en biomasse et sujets à des successions primaires, puis des phases de croissances de successions secondaires avec des écosystèmes semi-ouverts (e.g., Landes arbustives, garrigues ; Robin et al. 2018), jusqu'à des phases matures présentant de fortes biomasses, avec des dynamiques intra-système en mosaïques, sur de fines échelles spatiales (Podlaski 2008, Heiri 2009, Taylor et al. 2009 ; Figure 11).

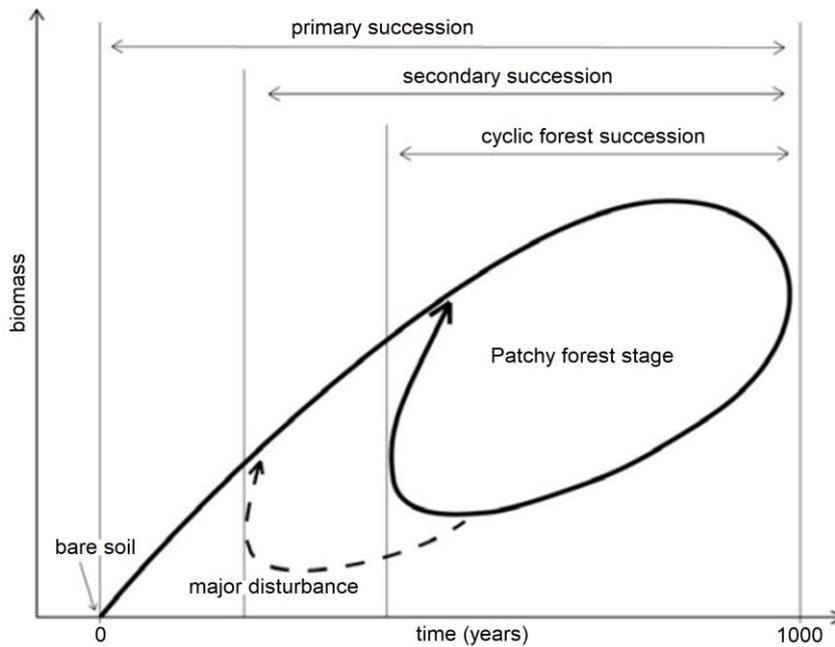


Figure 11 |
Représentation
graphique des
dynamiques écologiques
en biomasse au cours
du temps (Modifié
d'après Matter & Schütz
2002, Heiri 2009)

Cet enchaînement d'états successifs constitue les trajectoires écologiques, objets de mes recherches. Les directions prises par ces trajectoires sont variables selon les apports et flux de matière et d'énergie dans le système, par exemple entre les niveaux trophiques. Les traits biologiques des espèces et les relations interspécifiques qui en résultent, tels que la compétition, la facilitation, l'inhibition, etc., sont des processus clés des trajectoires écologiques. De plus, une même trajectoire va varier dans le temps et dans l'espace en fonction de l'occurrence d'évènements qui provoquent une perte totale ou partielle de la biomasse, c'est-à-dire des perturbations (e.g., incendies, ravageurs biologiques, sécheresse, crue, etc. ; Figure 12A ; Pickett & White 1985). Toute perturbation se définit par un régime qui lui est propre c'est à dire un ensemble de paramètres qui la caractérise (Figure 12B).

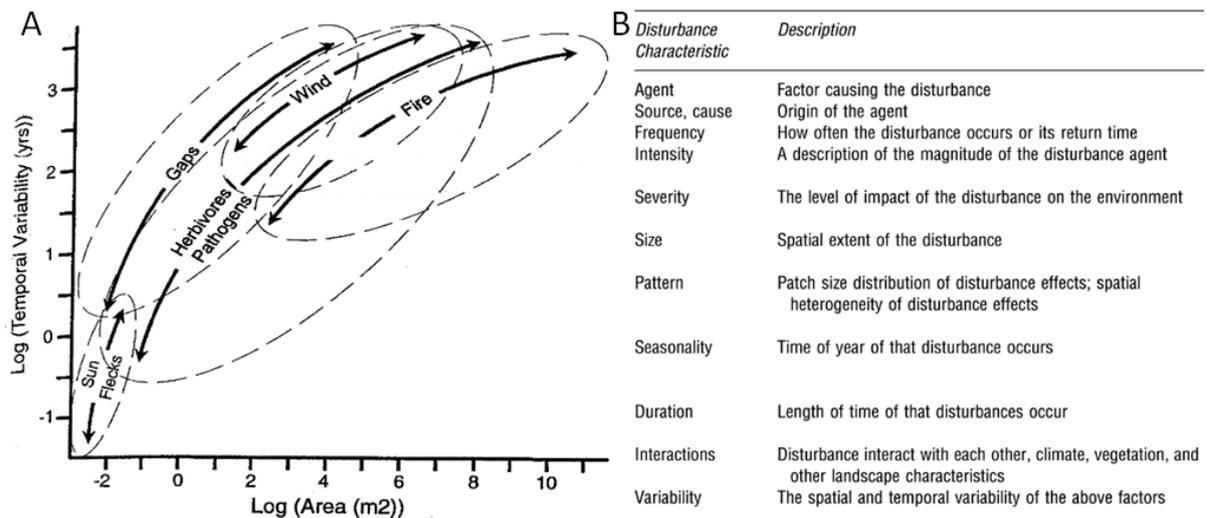


Figure 12 | Les perturbations écologiques : A. Exemples de perturbations avec leurs résolutions spatiotemporelles ; B. Descripteurs des régimes de perturbations (Pickett & White 1985)

Des variations dans le régime de perturbation impliquent que celle-ci va impacter différemment, avec des conséquences plus ou moins fortes, le système écologique qu'elle touche. Par exemple l'occurrence d'évènements d'incendie avec une forte fréquence dans le long terme peut induire un changement drastique de végétation en favorisant des espèces pyrophytes (Figure 13A ; Martínez-Sánchez et al. 1995, Núñez & Calvo 2000), ce qui ne serait pas le cas d'un incendie ponctuel, rare ou localisé.

Les systèmes écologiques réagissent aux perturbations selon leur vulnérabilité (Gaillard 2010). Face à un évènement donné un système peut avoir une certaine capacité de résistance, c'est-à-dire présenter des attributs qui ne permettent pas à l'évènement de se traduire en perturbation, ou alors d'y faire face sans être impacté significativement (Brang 2001, Spiecker 2003). Par exemple, une forêt humide est peu sensible aux incendies naturels. Si un feu démarre, par exemple suite à un éclair (i.e., l'évènement), celui-ci sera rapidement arrêté et l'incendie (i.e., la perturbation) ne se produira pas. En effet, les forêts tropicales humides ou tempérées présentent des espèces avec des teneurs en humidité relativement importantes, ce qui explique la résistance de ces milieux.

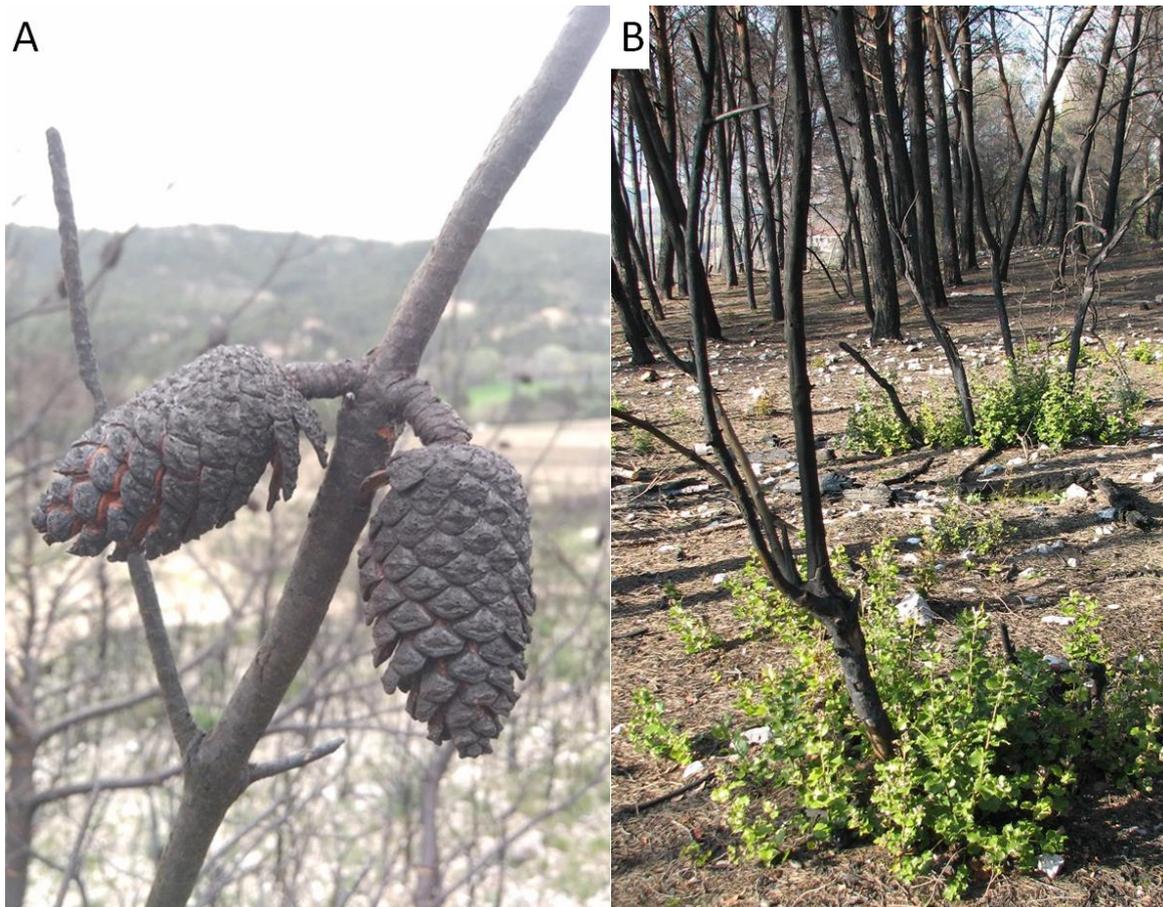


Figure 13 | Exemples de végétation liée aux incendies : A. Cônes de pin d'Alep (*Pinus halepensis*) quelques jours après un incendie ; B. Rejets proventifs de chêne vert (*Quercus ilex*) quelques mois après un incendie (photos ©V.Robin)

De plus, les systèmes écologiques présentent différentes capacités leur permettant de se redévelopper après une perturbation. Ceci correspond à la résilience du système. Elle dépend des capacités d'adaptation des espèces qui composent l'écosystème perturbé (Holling 1973, Gunderson 2000, Adger & Brown 2009 ; Figure 13B). Ainsi, la direction que peut prendre la trajectoire écologique d'un écosystème dépend de la perturbation et des capacités de résistance et résilience du système. Ces dernières seront variables pour un même écosystème selon le régime de perturbation. Par exemple, une perturbation intense peut faire passer un seuil au système et alors induire un changement de trajectoire écologique (Whittaker et al. 2001, Willis & Bailey 2010, Seddon et al. 2011, Robin et al. 2018 ; Figure 14).

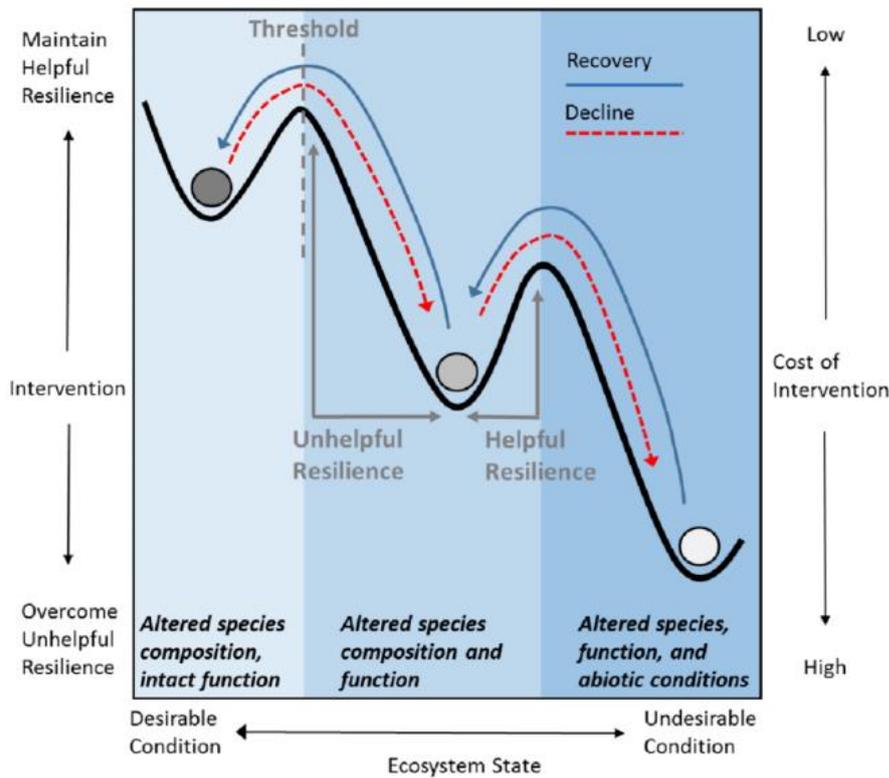


Figure 14 | Représentation schématique des états écologiques selon des perturbations qui induisent des changements (Decline & Recovery ; Ralston et al. 2017)

Moins une trajectoire écologique sera impactée par des perturbations (Figure 15A1), plus sa direction sera continue. De fait, son domaine de variation sera restreint, c'est-à-dire que ses variations d'état au cours du temps seront d'amplitudes assez limitées (Figure 15A2). Inversement plus une trajectoire écologique sera impactée par des perturbations (Figure 15B1) plus la direction sera chaotique (Scheffer et al. 2001). Elle présentera également une plus large amplitude de variations d'état au cours du temps (Figure 15B2).

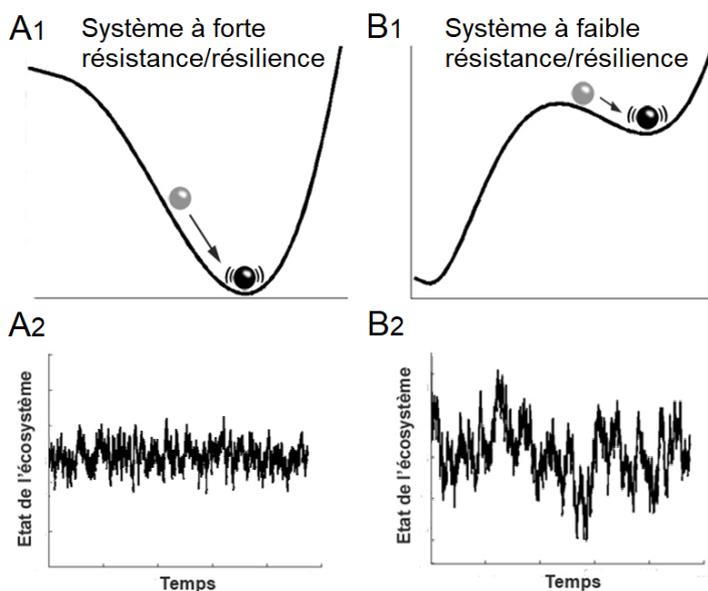


Figure 15 | Représentation schématique des niveaux de variations des systèmes écologiques (Modifié d'après Kéfi 2012)

Gunderson & Holling (2002) décrivent la dynamique d'un écosystème comme un cycle adaptatif qui inclut une phase de croissance (ou d'exploitation pour les socio-écosystèmes), une phase de conservation, une phase de relâche, et une phase de réorganisation (Figure 16A ; Gunderson & Holling 2002). Ce cycle se produit dans un cadre spatiotemporel hiérarchisé qui permet des variations de trajectoire selon l'importance de l'exploitation et/ou de la réorganisation du cycle aux échelles spatiotemporelles fines, et grâce à la mémoire des niveaux spatiotemporels plus larges (i.e., *Panarchy* ; Figure 16B ; Holling et al. 2002). Ce cadre adaptatif est une vision intégrative de la gestion durable des systèmes écologiques puisqu'il inclut au sein de la définition des dynamiques écologiques les changements, ainsi que leur moteur que sont les perturbations, et les paramètres de réponses des systèmes écologiques qui sont les traits biologiques des espèces et les conditions abiotiques des sites (Habron 2003, Moore et al. 2011, Fath et al. 2015).

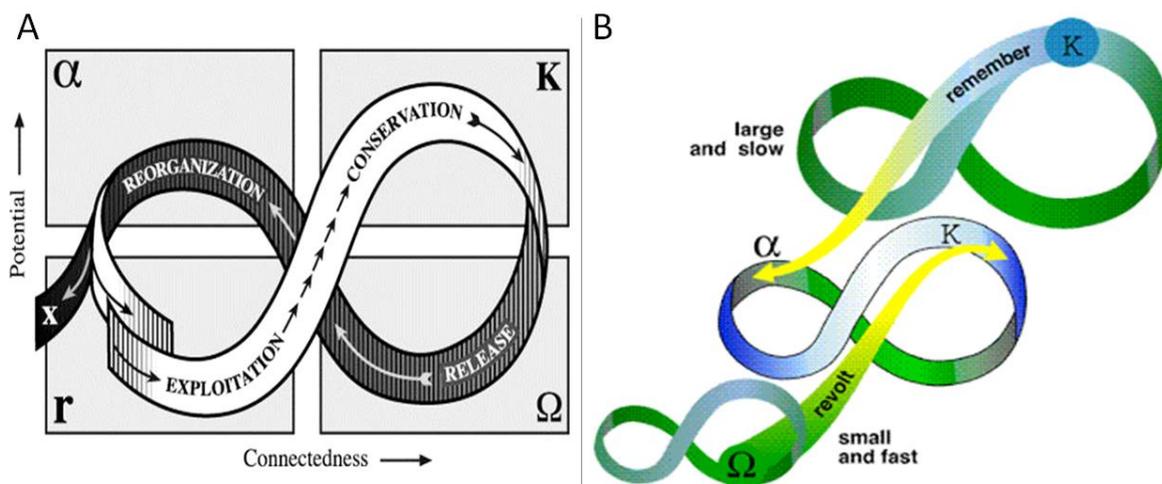


Figure 16 | Le cycle adaptatif de dynamique des écosystèmes (A) qui inclut les phases de *growth or exploitation* (r), *conservation* (K), *collapse or release* (ω), *reorganization* (α) et le cadre spatiotemporel hiérarchisé de ces cycles adaptatifs (B), d'après Gunderson & Holling 2002

Le climat est l'un des principaux déterminismes qui contrôle les régimes d'un grand nombre de perturbations dites « naturelles ». A travers diverses variables climatiques, de l'échelle microclimatique à l'échelle globale, selon une résolution annuelle ou sur du temps long, les aléas climatiques induisent, directement ou indirectement, des perturbations des systèmes écologiques. Par exemple, le rôle des tempêtes comme perturbation directe des forêts, induisant les dynamiques intra-forestières en mosaïque est plutôt bien connu (Carrer & Urbinati 2001, Fischer et al. 2002, Podlaski 2008 ; Figure 17).

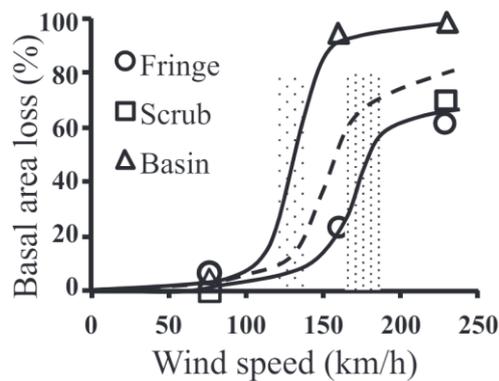


Figure 17 | Perte de surface terrière selon les vitesses des vents, pour différents types de mangroves (de frange/fringe, buissonnante/scrub, de bassin/basin (Modifié d'après Imbert 2018)

Par ailleurs, le climat est aussi un déterminisme indirect de perturbation des écosystèmes. Par exemple, le réchauffement actuel est un facteur important de contrôle de perturbations forestières résultant des attaques d'insectes ravageurs tels que le scolyte typographe (*Ips typographus*). Ce coléoptère est un ravageur de l'épicéa (*Picea abies* ; Léveux et al. 1985) qui cause depuis quelques années de forte mortalité dans certains territoires du centre et de l'est de la France (Nageleisen 2020, DSF 2018). En effet, le réchauffement climatique induit des températures hivernales plus chaudes et ne permet donc plus la régulation naturelle des populations de cet insecte qui voit ses populations en forte expansion. De plus, l'intensité et la durée des périodes de sécheresse sont bien plus marquées ces dernières années et causent un stress hydrique pour les peuplements forestiers dont les arbres sont affaiblis (DSF 2019). Ces conditions sont propices au développement « épidémique » du scolyte dans les pressières, causant de forts niveaux de mortalité³ (Jakoby et al. 2015, Saintonge 2018). Dans cet exemple la perturbation est la mortalité des arbres, c'est-à-dire la perte de biomasse, due à l'insecte ravageur. Sur du temps long⁴ (i.e., échelle multimillénaire) un certain nombre de changements climatiques ont été assez intenses et/ou assez longs pour impacter les biocénoses en place et donc induire des changements environnementaux visibles. Il s'agit des changements climatiques dits abrupts (on parle aussi des événements de *Bond* d'après le chercheur qui a identifié ces changements climatiques ; Bond et al. 1997, 2001). Ces changements ne sont pas

³Dans les forts niveaux de mortalité dû à la présence du scolyte entre aussi en jeu la structure monospécifique des peuplements gérés d'épicéa qui permet au ravageur de croître en surface sans obstacles comme pourrait l'être par exemple la présence de Sapin (*Abies alba*) et/ou de hêtre (*Fagus sylvatica* ; Mélières & Riou-Nivert 2019).

⁴La notion de temps long fait ici référence à la période de l'interglaciaire actuel, soit les 11000-10000 dernières années. Les changements climatiques à plus long terme nous renvoient à l'étude de processus Quaternaires, voire plus anciens, qui ne sont pas l'objet de mon cadre et de mes perspectives prioritaires de recherche.

homogènes. Certains sont secs et chauds, comme celui qui date de 8200 ans BP (i.e., évènement dit 8.2), d'autres sont froids et humides comme lors de l'Age du Bronze (i.e., évènement dit 4.2). Dans tous les cas il s'agit de changements climatiques significatifs dont on retrouve les traces dans les enregistrements paléo-environnementaux / paléoécologiques car ils ont impacté les trajectoires écologiques passées, depuis l'échelle globale jusqu'à l'échelle locale (Severinghaus et al. 2009, Wanner et al. 2011; Figure 18). Ces changements sont souvent systémiques avec des modifications de type végétation, de densité de couvert végétal (Tinner & Lotter 2001), de changements sédimentaires et géomorphologiques (i.e., augmentation des phénomènes d'érosion ; Dreibrodt et al. 2010).

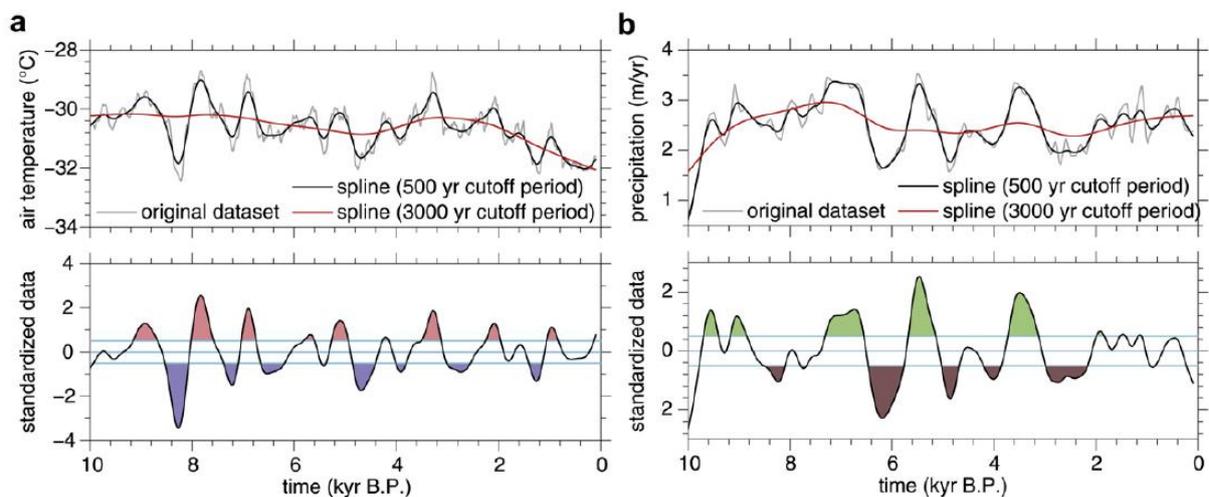


Figure 18 | Représentation des changements de température (a) et de précipitation (b) à l'échelle globale pour les 10000 dernières années (Modifié d'après Wanner et al. 2011)

Les perturbations dites anthropiques apparaissent comme ayant des conséquences particulièrement significatives sur les trajectoires des systèmes écologiques. Ceci s'exprime par l'émergence de l'anthropocène, c'est-à-dire la dominance des effets des activités humaines, plutôt que des processus naturels (biotiques et abiotiques), comme déterminisme des trajectoires géo-environnementales de la planète (Crutzen and Stoermer 2000, Steffen et al. 2007, Steffen et al. 2011, Zalasiewicz et al. 2018). Si le positionnement chronologique de la borne initiale de cette période reste en débat (Lewis and Maslin 2015, Zalasiewicz et al. 2017, Zalasiewicz and Waters 2018), le constat de l'existence de cette période est aujourd'hui majoritairement partagé. Il existe désormais des indicateurs globaux clairs concernant la nature anthropique du déterminisme du changement climatique en cours (IPCC 2019, Summerhayes &

Zalsiewicz 2018) ou encore de l'érosion de la biodiversité (IPBES 2019), et de façon générale sur l'état des systèmes écologiques (Steffen et al. 2015, Cooper et al. 2018). Les développements démographiques (Figure 19), socioéconomiques et industriels se traduisent par un accroissement de la consommation des ressources naturelles.

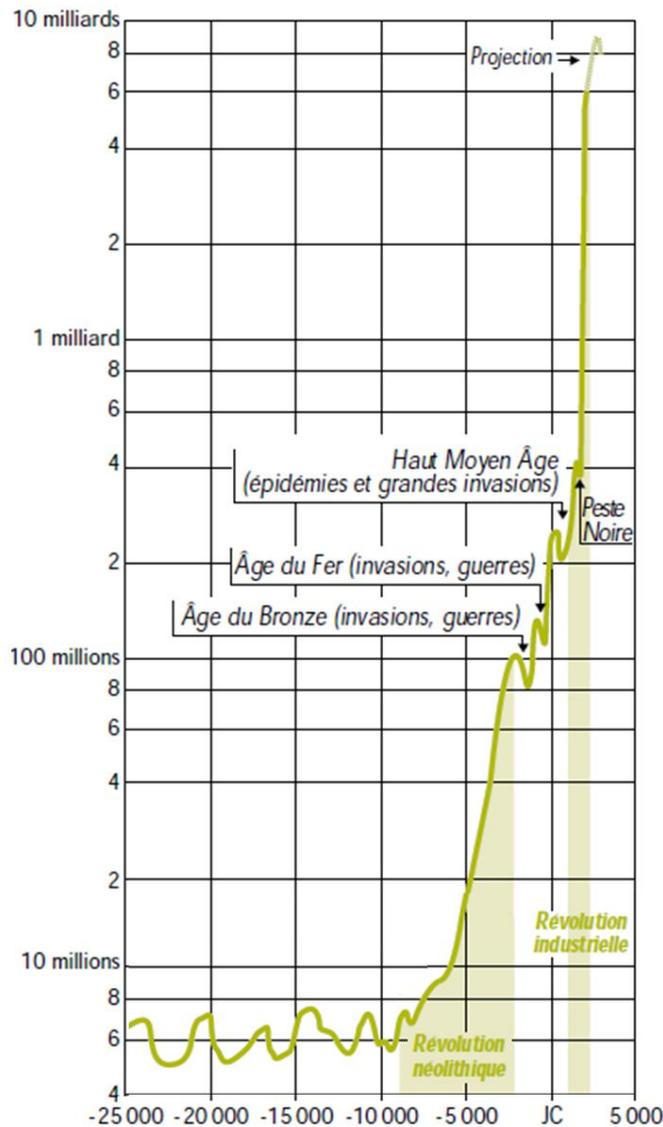


Figure 19 | Evolution démographique globale depuis le dernier maximum glaciaire (Modifié d'après Biraben 2003)

Ces développements passent par des périodes charnières de progrès comme ce fut le cas de la Révolution Néolithique qui a vu émerger la domestication d'espèces essentielles aux premières formes d'agriculture et à la sédentarisation (Lumley & Midant-Reynes 2006, Barker 2009, Zohary et al. 2012, ArchaeoGLOBE Project 2018). Plus récemment, la révolution industrielle du 19^e siècle a fait passer certaines sociétés agraires à des sociétés industrielles grâce à l'avènement de nouvelles énergies qui a permis le développement ferroviaire, puis routier et aérien et l'usage de plus en plus

important des énergies fossiles (Jonsson 2012, Messerli et al. 2000). Ces évolutions technologiques, socio-économiques, sont des causes de changements d'états des systèmes écologiques que je suis amené à observer dans mes travaux de recherche, plus ou moins clairement selon les cas. Pour cela j'étudie les interactions Homme-Milieu (Chenorkian 2012, Barbault 2014), ou comment nous sommes globalement passés de sociétés contraintes par la disponibilité en ressources naturelles, à des sociétés contraignantes pour la disponibilité des ressources naturelles dans ce qui est aujourd'hui appelé des socio-écosystèmes (Berkes & Folke 1998, Messerli et al. 2000, Schoon & van der Leeuw 2015). Sur le temps long, le Néolithique est une période de changements environnementaux bien identifiés, avec en particulier l'occurrence des premiers défrichements, des premières cultures de céréales, des augmentations de fréquence d'incendie et d'évènements d'érosion postglaciaires (Reiss et al. 2009, Cortés-Sánchez et al. 2012, Sadovnik et al. 2014). Ces perturbations anthropiques néolithiques restent en général assez limitées dans l'espace et le temps, sauf dans pourtour méditerranéen où elles sont déjà de large ampleur. Elles ne se généralisent en Europe centrale qu'au cours de l'Age de Bronze. On trouve alors couramment des impacts synchrones et assez homogènes sur de larges échelles spatiales (Kalis et al. 2003, Zolitschka et al. 2003, Nielsen et al. 2012). Un nombre important de travaux ont été réalisés sur ces aspects en Europe (Behre 1988, Kalis et al. 2003, Zolitschka et al. 2003, Berglund 2003, 2011, Willis & Birks 2006, Dotterweich 2008, Head 2008, Gaillard et al. 2009, Marlon et al. 2010). Globalement, ces travaux illustrent la dégradation des systèmes écologiques par la perte d'intégrité et par l'homogénéisation des composantes des systèmes, plus ou moins rapide, plus ou moins directe et irréversible, à différentes échelles de temps et d'espace, par l'action de l'homme parfois couplé à un effet péjoratif du climat (Lade et al. 2019). Ceci questionne la durabilité des systèmes écologiques actuels et à venir, face à l'empreinte anthropique grandissante, et interroge sur les réponses à apporter en terme de gestion (i.e., prélèvements), conservation et/ou restauration, nécessaires pour la durabilité des ressources et des services écosystémiques (Figure 20).

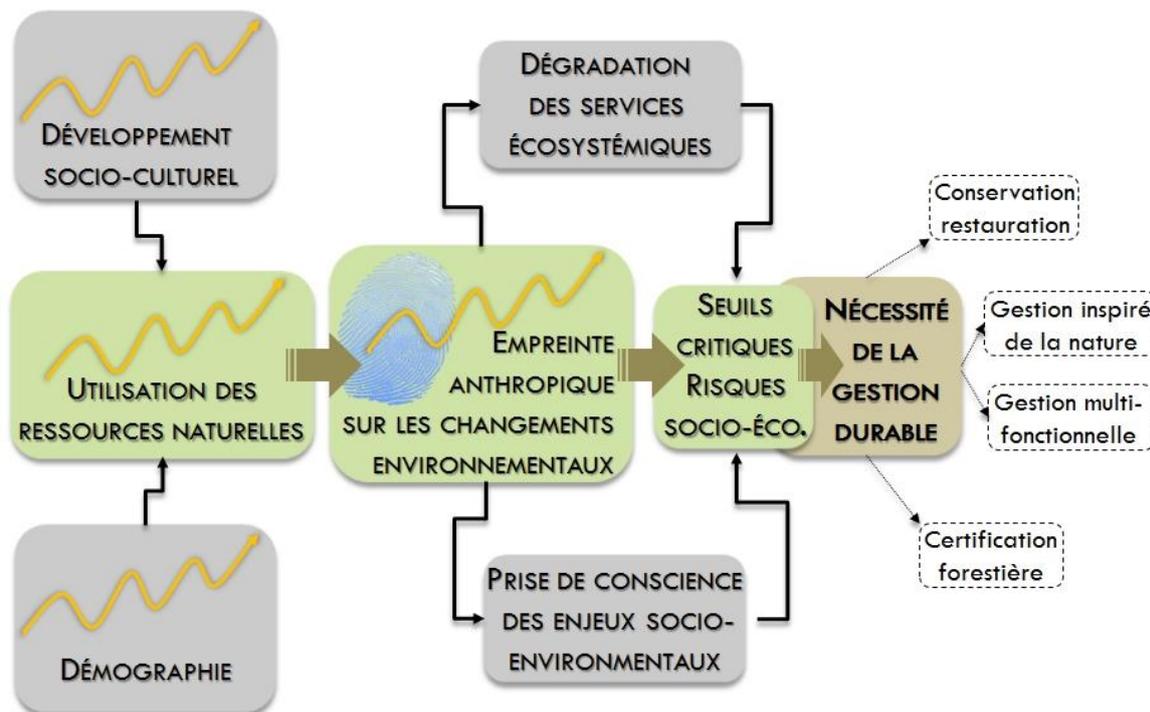


Figure 20 | Représentation schématique des liens / influences entre l'utilisation de ressources naturelles (forestières) et la nécessité de gestion durable de l'environnement (Figure ©V.Robin)

Face à ces questionnements, des éléments de réponses peuvent être apportés à partir des données rétrospectives (paléo- et/ou historiques), notamment par l'évaluation de la résilience / résistance des systèmes et par l'identification de seuils de basculement face aux perturbations, en particulier les perturbations anthropiques (Foster et al. 1990, 1996, Foster 2002a, Girel 2006, Willis et al. 2007, Seddon et al. 2011, Birks 2012).

C'est dans cette perspective que je place mes travaux, via l'analyse des trajectoires des systèmes écologiques et de patrons et déterminismes (mécanismes) de changement (Figure 21). De plus, je souhaite positionner mes travaux au plus près des enjeux et problématiques de gestion, conservation et/ou restauration. Pour cela, j'ai souhaité collaborer avec un certain nombre de gestionnaires territoriaux (ONF, CEN de Lorraine, PNR de Lorraine et des Ardennes, etc.) et je suis impliqué dans des conseils scientifiques d'instance de gestion (CSRPN Grand-Est, PNR des Vosges du nord). Plus précisément, pour développer mes thématiques de recherche, je m'intéresse à des archives paléo-environnementales et j'utilise des indicateurs qui peuvent fournir des informations rétrospectives précises et fines spatialement et temporellement. Sur la base de ces informations, il est alors possible d'apporter des

éléments précieux pour orienter, guider la gestion actuelle de sites naturels. De telles approches peuvent trouver des applications intéressantes par exemple à l'échelle locale (parcelle forestière, tourbières, pelouse calcicoles), tout en étant liées à des processus macro-écologiques (i.e., supra-locaux).

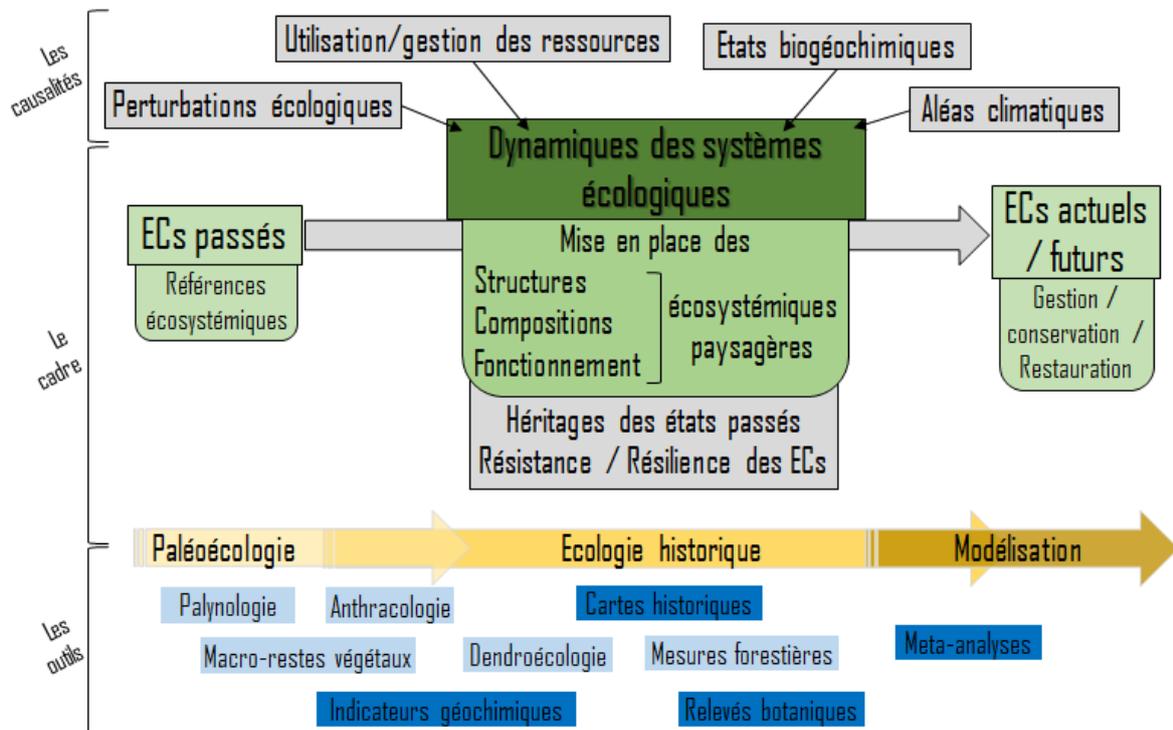


Figure 21 | Représentation schématique de l'approche de recherche que je développe et des outils utilisés (en bleu clair : les outils que j'utilise dans cette approche pluridisciplinaire, en bleu foncé : les principaux outils complémentaires utilisés dans une approche interdisciplinaire ; Figure ©V.Robin)

3.2 Outils et indicateurs rétrospectifs

L'approche que je propose repose sur l'utilisation de différents outils indépendants qui forment un corpus méthodologique pluridisciplinaire au service de l'analyse d'indicateurs phyto-historiques (Figure 21). Ce corpus méthodologique et ses indicateurs permettent d'étudier rétrospectivement, à différentes échelles spatio-temporelles, l'état de la biodiversité et des milieux. En ce sens ces outils sont étroitement complémentaires. Néanmoins, le contexte d'archivage des indicateurs et leur préservation *in-situ* contraint grandement leur signification spatio-temporelle ce qui conditionne la pertinence de l'utilisation de certaines approches selon les problématiques étudiées.

3.2.1 La palynologie

Cette discipline est la plus ancienne et la plus souvent utilisée des approches paléoécologiques/paléo-environnementales. Rappelons brièvement, que cette approche consiste à prélever des archives sédimentaires chrono-stratigraphiques⁵ par carottages (Figure 22A) pour en extraire les enregistrements en pollens fossiles à différentes profondeurs, qui donc correspondent à différents pas de temps. L'intérêt majeur de la palynologie est sans nul doute la grande précision taxinomique des enregistrements. En effet, toutes les espèces végétales produisent saisonnièrement des pollens (ou des spores), potentiellement identifiables au niveau de l'espèce (Beug 2004). Les grains de pollens sont transportés dans l'air et sont susceptibles de se déposer dans des contextes d'archivage au sein desquels ils pourront être préservés durant des milliers d'années, voire des dizaines de milliers d'années (e.g., de Beaulieu & Reille 1992, Tzedakis et al. 2003, Müller et al. 2003). Cette préservation est possible d'une part grâce à la résistance de leur exine et d'autre part grâce aux conditions environnementales du site d'archivage. En effet, les grains de pollens sont idéalement préservés dans des sédiments de milieu humide comme par exemple les sédiments lacustres ou de tourbières. La faible teneur en oxygène de ces milieux limite fortement l'activité biologique et l'oxydation de la matière organique. Ainsi, après prélèvements et préparation en laboratoire, les enregistrements en pollens sont isolés et montés sur

⁵C'est-à-dire des archives dans lesquelles le matériel accumulé et préservé se fait au cours du temps de manière « étagée ». Donc le matériel le plus ancien sera plus en profondeur que le matériel le plus récent.

lame de verre pour identification au microscope et comptage (Figure 22B), afin de déterminer les quantités des espèces observées, en proportions, en valeurs absolues, ou en flux/concentrations (Fægri & Iversen 1989, Moore et al. 1991, Bennett et al. 2001, Joosten & Klerk 2002). In fine, cela permet d'obtenir un spectre pollinique par échantillon traité, correspondant à une profondeur et/ou une amplitude d'âges. L'interprétation spatiotemporelle de ces enregistrements est toutefois dépendante de divers paramètres. Elle est en partie déterminée par la morphologie du pollen lui-même puisque certaines espèces produisent du pollen qui peut se déplacer sur de longues distances comme par exemple celui des pins (*Pinus sylvestris*; Figure 22C) et d'autres, plus lourds qui s'accumulent plutôt localement comme par exemple celui du hêtre (*Fagus sylvatica*; Figure 22D).



Figure 22 | L'approche palynologique ; A : Carottage d'une tourbière dans le Harz ; B : Vue au microscope d'une lame d'observation de pollens ; C : grain de pollen de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) ; D : grain de pollen de hêtre (*Fagus sylvatica*) ; Photos ©V.Robin)

La taille de l'archive d'où sont extraits les pollens conditionne également la résolution spatio-temporelle des enregistrements polliniques. Une grande archive, comme par exemple les sédiments d'un grand lac alpin, forme une large surface de dépôt potentiel pour les pluies polliniques. Elle présente donc une forte probabilité d'enregistrement de pollens issus de transport sur longue distance (e.g., David et al. 2001). Inversement, une mare forestière représente en général une petite surface de dépôt potentiel, qui

plus est sous couvert végétal qui l'isole pour partie des pluies polliniques supra-locales. La probabilité d'avoir des enregistrements polliniques à dominance régionale est donc plus faible (e.g., Etienne et al. 2010, Robin et al. 2012). Le cadre temporel des enregistrements palynologiques est défini pour chaque séquence analysée par la modélisation de la relation entre la profondeur et l'âge du sédiment. Cette relation existe pour toutes les archives chrono-stratigraphiques. Elle repose sur le principe que le matériel qui est le plus profond a un âge plus ancien que tout matériel au-dessus de lui. Par contre il n'existe pas de modèle par défaut concernant la relation entre la profondeur et l'âge. Chaque séquence sédimentaire doit faire l'objet d'une modélisation âge/profondeur spécifique sur la base d'un certain nombre de datations radiocarbone à différentes profondeurs le long de la séquence (Bronk Ramsey 2017). Ces datations sont mises en relation sur l'ensemble de la séquence par la définition d'un modèle probabiliste d'accumulation du sédiment entre deux âges (Bronk Ramsey 1998, 2009, Steier & Rom 2000). Les modèles âge/profondeur fournissent des taux d'accroissement/accumulation du sédiment au cours du temps (Bronk Ramsey 2008). Ces taux peuvent être plus ou moins élevés voire même discontinus (i.e., présence de hiatus) pour une même séquence. Les modèles âges/profondeurs représentent des descripteurs indispensables du cadre chronologique des séquences sédimentaires d'où sont extraits les assemblages palynologiques.

J'ai commencé à me familiariser avec les données palynologiques dans le cadre des enseignements que j'ai suivis à l'université d'Aix-Marseille en licence et en master. J'ai également renforcé cet intérêt via une démarche plus personnelle à travers une étude paléoécologie qui m'avait particulièrement intéressé puisqu'elle concernait un territoire pour lequel j'avais des attaches personnelles, le Pays du Buëch et le Gapençais dans les Hautes-Alpes, avec l'analyse palynologique du lac de Pelleautier (de Beaulieu et Reille 1983).

Par la suite au cours de mon stage de recherche de master j'ai eu l'occasion de me familiariser plus avec la palynologie grâce à l'étude de l'histoire des forêts dans les Alpes du sud, où j'ai été amené à utiliser des données palynologiques pour l'interprétation de mes résultats (Robin et al. 2007).

Au cours de mon doctorat j'ai travaillé en étroite collaboration avec des palynologues de l'université de Kiel en Allemagne où j'ai réalisé ma thèse. J'ai utilisé directement des données palynologiques par exemple dans une approche interdisciplinaire sur un de mes sites d'étude dans le nord de l'Allemagne ou nous avons combiné des données

anthracologiques avec des données palynologiques. Ceci nous a permis d'identifier le maintien de l'état boisé du site au cours des derniers millénaires avec néanmoins un usage des forêts par les populations locales, au moins depuis l'âge du fer, notamment pour du pastoralisme sous couvert forestier. Pour ce site d'étude j'ai réalisé des analyses anthracologiques (cf. ci-après) et mon collègue, Björn-Henning Rickert, a réalisé les analyses palynologiques (Robin et al. 2012).

Au cours de mon premier post-doctorat, j'ai été amené à réaliser moi-même des analyses polliniques, depuis la préparation des échantillons en laboratoire jusqu'au comptage des pollens et la réalisation de diagrammes palynologiques. Ces analyses étaient centrales dans le projet, avec l'étude de cinq séquences de plusieurs mètres de sédiments de sites localisés dans le nord de l'Allemagne. Ces travaux sont en cours de publication mais ont déjà fait l'objet de cinq communications orales, dont une comme orateur invité dans une conférence internationale, et deux posters (Annexes 1a et 1b)

Depuis ma nomination au LIEC, j'ai mis en place cette compétence qui n'existait pas encore ni localement ni régionalement bien qu'un certain nombre d'études existe pour le Grand-Est (e.g., Ruffaldi 1999, Ruffali et al. 2007, Etienne et al. 2011, Riddiford et al. 2012, Etienne et al. 2013). Je suis actuellement responsable d'une étude paléoécologique interdisciplinaire qui concerne des sites localisés dans le Pays de Bitche (projet PalTouBi ; cf. partie 2.3.1. Projets de recherche) étude au-sein de laquelle la plus grande partie des analyses palynologiques est réalisée dans le cadre du doctorat d'Emilie Gouriveau (thèse en cours au Laboratoire chrono-Environnement de l'université Bourgogne Franche-Comté, sous la direction de d'Anne-Véronique Walter Simonet, d'Annick Schnitzler et de Pascale Ruffaldi ; Gouriveau et al. 2020).

Depuis 2018, la plateforme de palynologie du LIEC est opérationnelle. Elle fonctionne en routine et permet la réalisation de différents projets en cours (projets DBDH, HiFoZHA, HFPL, Machais dans lequel est intervenu Hannes Knapp pour une partie de son post-doctorat au LIEC et DiSTMaB cadre d'un master 2 que j'encadre (Marianne Romain) : *Caractérisation spatiale et temporelle des mardelles de la plaine du Bischwald : Conséquences pour l'identification des enjeux de conservation* ; Figure 23).



Figure 23 | Photo du terrain du stage de Marianne Romain dans le cadre du projet DiSTMaB : A. carottage d'une mardelle, B. échantillonnage sur site d'une carotte de mardelle (Photos ©V.Robin)

3.2.2 L'anthracologie sédimentaire

Sur les mêmes séquences sédimentaires qui sont potentiellement utilisées pour la palynologie, je peux être amené à réaliser des analyses du signal anthracologique sédimentaire. Il s'agit de l'étude quantitative des enregistrements de particules carbonisées contenues dans des séquences sédimentaire (Mooney & Tinner 2011). Cette approche permet de reconstituer l'histoire des incendies selon le cadre chronologique obtenu pour la séquence étudiée. Les taux d'accumulation, estimés nombre de particules par cm^3/an ou en surface de particules par cm^3/an , sont analysés statistiquement pour identifier la part d'accumulation secondaire et/ou biaisée dans le signal incendie. Cette analyse permet d'identifier des paramètres descriptifs du régime d'incendie passé comme l'intensité des épisodes, l'intervalle de retour des épisodes de feux, ou encore la fréquence d'occurrence d'épisodes d'incendie (Higuera 2009). Deux types d'analyses permettent d'obtenir des signaux d'incendies indépendants et complémentaires (Robin et al. 2013a&b).

L'analyse des enregistrements en micro-charbons ($<100\mu\text{m}$) permet de renseigner l'histoire des incendies à l'échelle supra-locale/régionale. Ce type de signal est obtenu par la quantification en microscopie optique (comptage) du nombre de particules carbonisées, en parallèle de l'analyse palynologique. L'analyse des enregistrements en macro-charbons ($>150/200\mu\text{m}$) permet quant à elle d'identifier l'histoire des incendies à l'échelle locale du bassin versant.

Ce type d'enregistrement est extrait du matériel échantillonné par tamisage. Le résultat du tamisage de chaque échantillon (Figure 24) est digitalisé pour effectuer les mesures de surfaces de macro-charbons par traitement d'image (Mooney & Black 2003, Robin et al. 2012).

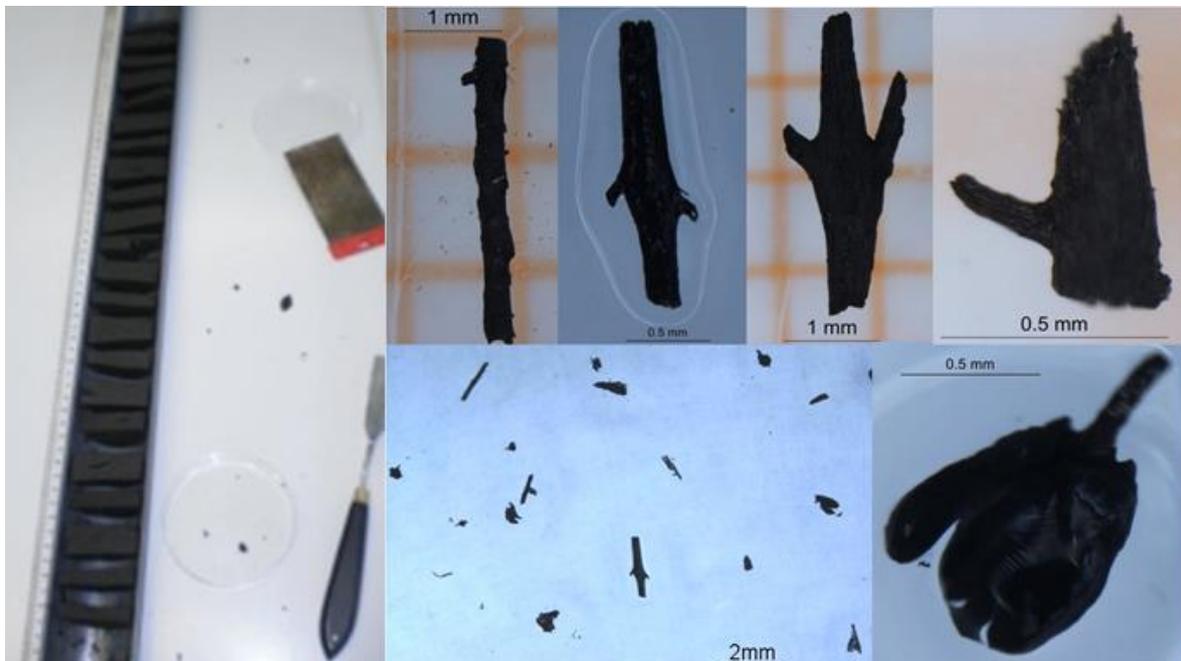


Figure 24 | Analyse du signal incendie par la quantification des macro-charbons (>200 μ m) ; A gauche : échantillonnage d'une carotte de sédiment organique ; A droite : photos de fragments de macro-charbons (Photos ©V.Robin)

Je me suis formé à l'analyse du signal incendie par les enregistrements en macro-charbons au cours de mon doctorat. Pour cela je suis allé apprendre la méthode au laboratoire de paléoécologie du *Department Biology & Environmental Science* de *Linnaeus University* à Kalmar en Suède avec Marie-José Gaillard et son doctorant de l'époque Fredrik Olsson (Olsson et al. 2010). Cette compétence a ensuite été mise à profit dans le cadre interdisciplinaire de mes travaux de thèse et a été valorisée par deux publications (Robin et al. 2013a&b). Nous avons adapté le protocole pour pouvoir le réaliser dans le cadre de mon doctorat, notamment parce que nous avons rapidement vu la grande complémentarité de cette approche avec les analyses en micro-charbons sur lames polliniques et avec la pédoanthracologie qui correspond à l'analyse des enregistrements en méga-charbons (voir ci-après ; Figure 25 ; Robin et al. 2013a&b). Cette complémentarité de signaux paléo-environnementaux est à l'origine de mon premier post-doctorat, à l'université de Kiel en Allemagne.

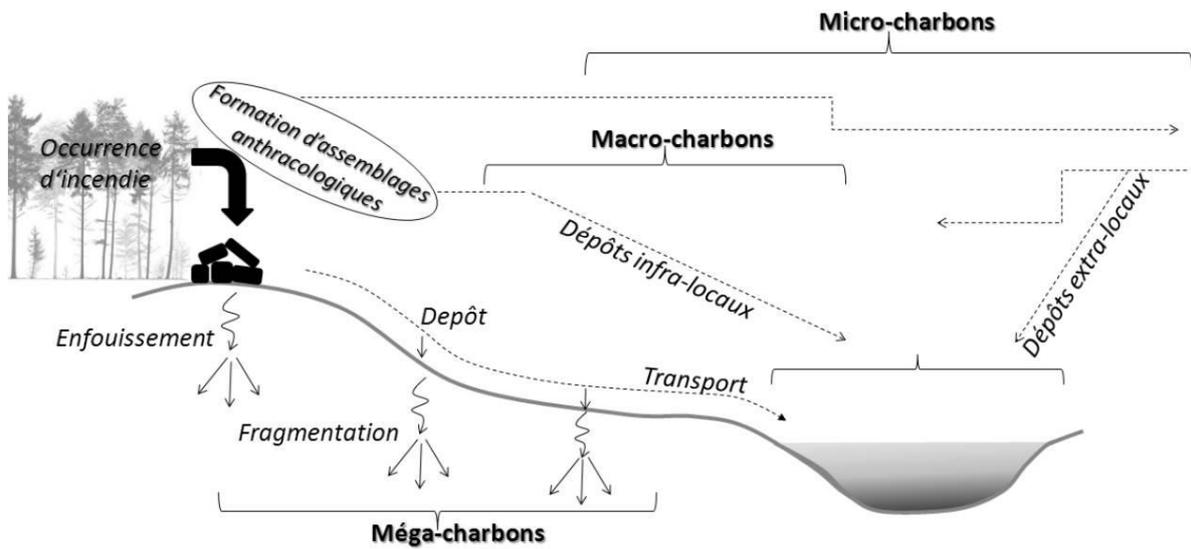


Figure 25 | Processus taphonomique simplifié de la formation des enregistrements anthracologiques (d'après Robin et al. 2013a)

Cette approche analytique des enregistrements en macro-charbons a été mise en place dès mon arrivée au LIEC à l'université de Lorraine. Elle a par exemple été le sujet des stages de quatre étudiants (trois en L3 et un en M1) entre 2016 et 2018 (Figure 26).



Figure 26 | Campagnes sur le terrain pour le carottages de tourbières (A : dans les Ardennes & B : dans le Pays de Bitche (Photos ©V.Robin)

3.2.3 La pédoanthracologie

La pédoanthracologie consiste en l'analyse qualitative et quantitative d'assemblages de fragments de charbon de bois contenus dans des sols et/ou dans des dépôts sédimentaires terrestres (Nelle et al. 2013, Leopold et Völkel 2007 ; Figure 27A).

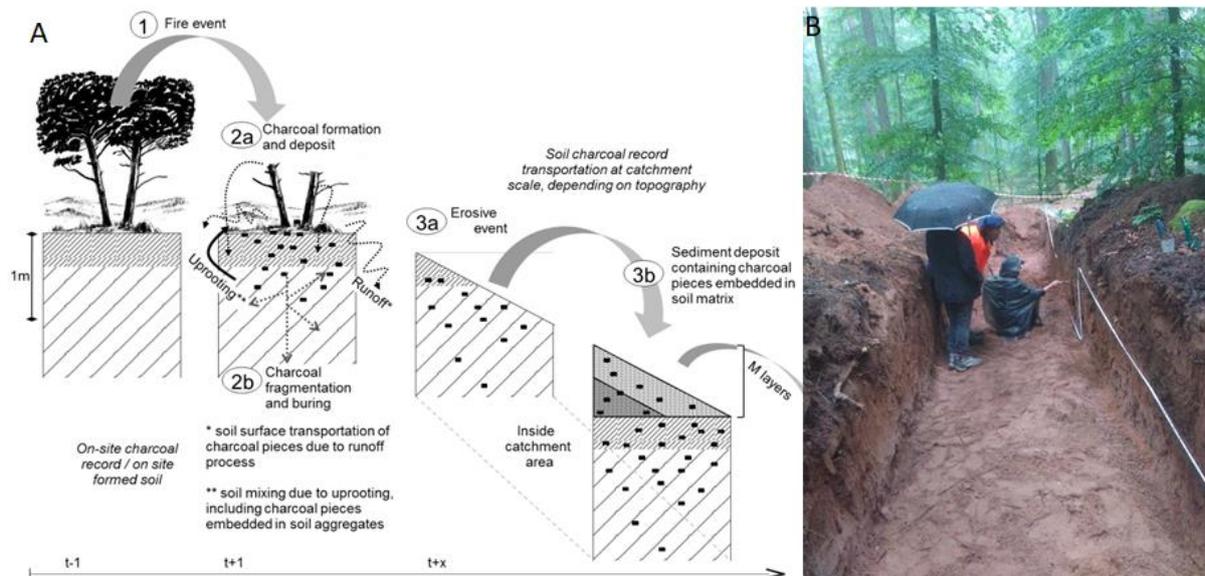


Figure 27 | L'approche pédoanthracologique ; A : Processus taphonomique simplifié de la formation des enregistrements pédoanthracologiques (d'après Robin et al. 2014) ; B : Observation des horizons de sol sur une tranchée pédologique des Vosges du nord (Photo ©V.Robin)

Elle repose sur l'analyse de fragments de charbons de bois supérieurs à 800 μ m/1mm (i.e., méga-charbons) pour être identifiables taxonomiquement sur la base d'observation au microscope de structures anatomiques du bois carbonisé (Robin et al. 2014 ; Figure 28). En effet la carbonisation fixe l'anatomie du bois qui, mis à part quelques rétrécissements et légères déformations (Théry-Parisot 2001, Braadbaart et Poole 2008, McParland et al. 2010), permet d'identifier en général les genres et quelques fois les espèces, grâce à des atlas anatomiques, des clés d'identifications (Jacquot et al. 1973, Schweingruber 1990) et des collections de référence (Scheel-Ybert 2016).

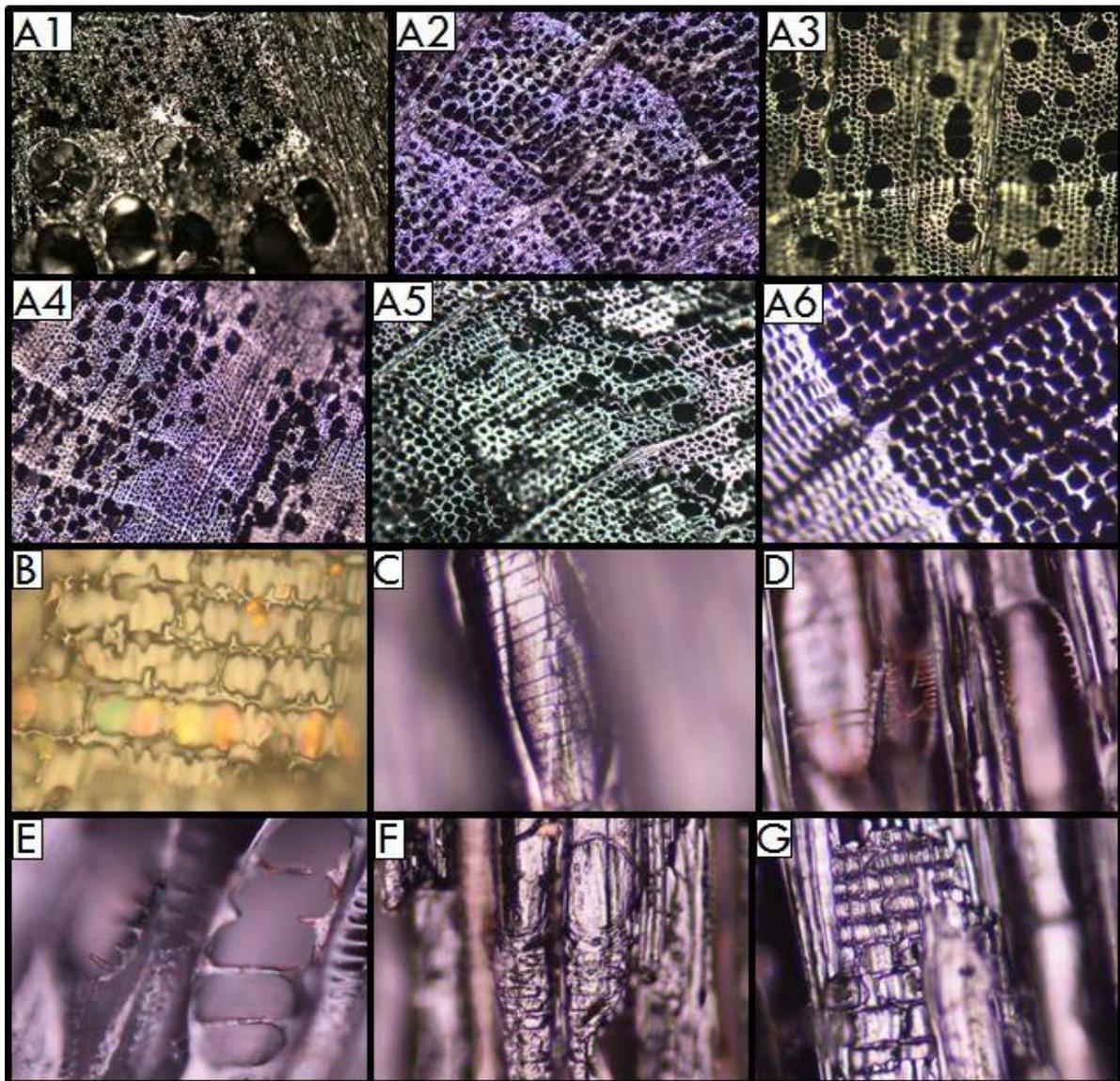


Figure 28 | L'identification taxonomique de fragments de charbon de bois ; Photos de structures anatomiques du bois sur des fragments de charbon de bois de collection de référence [A: vue transversale de la distribution des pores regroupés en zone poreuse (1-*Quercus* décidu x100), semi-diffuse (2-*Fagus sylvatica* x100), diffuse (3-*Acer platanoides* x200), en bandes radiales (4-*Carpinus betulus* x100 et 5-*Tilia platyphyllos* x100), et vue transversale de bois homogène de conifère (6-*Pinus sylvestris* x200); B: cellule dentée de parenchyme dans un rayon de champ de croisement (*Pinus sylvestris* x500); C: vaisseau avec un épaississement spiralé (*Acer platanoides* x200); D & E: perforations scalariformes (*Betula pendula* x200 et *Corylus avellana* x500); F: perforation simple (*Fagus sylvatica* x200); G: rayon hétérogène (*Salix alba* x200); Photos ©V.Robin ; Robin et al. 2014]

La pédoanthracologie fournit donc des indications sur l'histoire des incendies et sur la composition de la végétation ligneuse incendiée (type de combustible ; Fesenmyer & Christensen 2010, Robin et al. 2014) avec une haute résolution spatiale (Dutoit et al. 2009, Touflan et al. 2010). Les enregistrements pédoanthracologiques sont extraits d'échantillons de sols/sédiments terrestres prélevés à partir de fosses ou tranchées pédologiques (Figure 27B). Les niveaux de prélèvements sont définis au cas par cas

selon l'observation des horizons de sols ou des unités stratigraphiques (Bork et Lang 2003, Emadodin et al. 2011, Robin et al. 2014). Les fragments de charbon de bois sont extraits des échantillons de sols/sédiments terrestres par tamisage et tri (Carcaillet et thinson 1996). Ils sont quantifiés en concentration globale ou par taxon (mg/kg) par site, profil et/ou niveau stratigraphique de prélèvement (Talon et al. 1998). L'interprétation chronologique des enregistrements pédoanthracologiques est essentiellement basée sur des datations radiocarbone de fragments de charbon. Cependant, celle-ci reste limitée puisque les sols/sédiments terrestres ne forment pas des archives chronostratigraphiques au sens strict (Carcaillet 2001). Les niveaux pédologiques correspondent à des brassages non-linéaires de la matrice sol principalement dus à la bioturbation (Darwin 1881, Jégou et al. 1998) et au retournement du sol par les déracinements (Gavin 2003, Šamonil et al. 2010). Pour autant il est possible d'obtenir un cadre chronologique général en utilisant un nombre suffisant de datations radiocarbone de fragments de charbon, voire des datations par luminescence stimulée optiquement (OSL, Crombé et al. 2018). Ainsi, il apparaît utile de corréliser les données pédoanthracologiques au cadre pédologique et/ou géomorphologique de la séquence de sol échantillonnée (Robin et al. 2014).

J'ai été initié à la pédoanthracologie en 2005 lors d'un stage de L3 à l'IMEP (aujourd'hui IMBE), dans le cadre de mon cursus universitaire à l'université d'Aix-Marseille. Ce stage était encadré par Brigitte Talon et portait sur : *Etude des critères microscopiques de distinction du bois carbonisé des Fagacées*. J'ai ensuite continué au plus près de cette discipline qui m'a immédiatement passionné et qui m'a permis de combiner des motivations liées d'une part à l'écologie forestière et d'autre part à la pédologie. Cet intérêt pour la pédoanthracologie m'a permis de réaliser, toujours avec Brigitte Talon, mes stages de M1 (*Contribution à l'étude du passé d'un ancien peuplement forestier subalpin dans le parc naturel régional du Queyras*) et de M2 (*Histoire et dynamique de peuplements forestiers d'altitude à caractère semi-naturel dans le Parc Naturel Régional du Queyras par l'Analyse des charbons contenus dans les sols*) dans les Hautes-Alpes.

Par la suite, cette approche a été centrale dans mes travaux de doctorat. En effet, mes recherches sur l'histoire des forêts et des incendies dans le nord et le centre de l'Allemagne visaient à identifier des patrons et mécanismes locaux. Dans cette

perspective les enregistrements en méga-charbons ont constitué le principal socle de connaissances et ont abouti à deux publications (Robin et al. 2014, Robin & Nelle 2014). Dans la continuité de ces travaux de thèse, la pédoanthracologie a également été utilisée dans l'approche interdisciplinaire développée au cours de mon premier post-doctorat, là encore dans l'optique d'obtenir des informations sur la composition forestière passée et les événements de feux à l'échelle locale en complément des analyses palynologiques et des analyses de signal incendie. J'ai également utilisé la pédoanthracologie, en complémentarité avec l'expertise en géomorphologie de Stefan Dreibrodt (université de Kiel) dans le projet développé lors de mon deuxième post-doctorat, à l'université de Padoue en Italie, sur l'étude de la dynamique forestière passée du massif de la Sainte Baume dans le sud-est de la France (Annexe 2). En parallèle de ces travaux nous avons amorcé en 2010 avec Brigitte Talon et Oliver Nelle l'organisation d'une série de workshop internationaux de pédoanthracologie dont la troisième a eu lieu en 2017 à Limoges (Nelle et al. 2013, Robin et al. 2015).

Suite à ma nomination au LIEC, la pédoanthracologie fut la première approche que j'ai mise en place dans l'unité. Rapidement, cette approche a été incluse dans l'étude paléo-environnementale interdisciplinaire que j'ai développée dans le cadre de l'OHM « Pays de Bitche » (cf. projet PalTouBi ; cf. partie 2.3.1. Projets de recherche), notamment en collaboration avec Damien Ertlen du LIVE à l'université de de Strasbourg (Figure 26B). Souhaitant évaluer la pertinence de l'approche pédoanthracologique dans un contexte de sols hydromorphes que je ne connaissais pas bien, j'ai proposé et encadré en 2016 un stage de M1 concernant l'*Etude comparative de l'histoire forestière de stations hydromorphes et drainantes dans la forêt d'Hemilly et d'Elvange - Moselle*). Les résultats prometteurs de ce stage nous ont incité à élaborer et à réaliser une étude pédoanthracologique de plus grande ampleur sur le plateau lorrain visant à révéler les patrons historiques de distribution et de dynamique forestière du hêtre et des chênes. Ce projet a permis de proposer un stage post-doctoral (Thomas Feiss, co-encadré avec Jean-Luc Dupouey, Silva-INRAE), qui devrait être prochainement valorisé par deux publications internationales, et qui déjà fait l'objet de huit communications scientifiques dans des colloques nationaux et internationaux.

3.2.4 L'anthracologie de charbonnières

Les charbonnières sont des espaces circulaires (i.e., plateformes ; Figure 29A) sur lesquels étaient montés des empilements de bois (i.e., meules ; Figure 29B) qui étaient recouverts de feuillages, mousses, boue, etc. pour les isoler de l'oxygène atmosphérique afin de permettre la carbonisation du bois de la meule par pyrolyse (Figure 29C). Cette technique était utilisée pour la production de charbon de bois au moins depuis le moyen-âge et jusqu'au 20^{ème} siècle en Europe (Davasse 2000, Nelle 2003, Paradis-Grenouillet 2012, Deforce et al. 2013). L'analyse anthracologique des charbonnières concerne les restes (ou déchets) de la production de charbon de bois. Ces fragments de charbon de bois s'accumulent pendant l'exploitation du site et demeurent en place à l'exception d'une certaine fraction qui peut être transportée par ruissellement ou érosion (Knapp et al. 2013). Sur la même plateforme, la succession de carbonisations et l'accumulation des « déchets » forme un niveau (ou horizon) de charbon (Figure 29D), constitué de cendres, de sédiments carbonisés, et de fragments de charbon de bois de quelques millimètres à quelques centimètres. Ce niveau de charbon couvre la surface de la charbonnière. Pour les charbonnières installées sur une zone de relief, la pente aval de la charbonnière s'avère généralement particulièrement riche en fragments de charbon de bois car c'est depuis cette partie de la charbonnière que s'effectuait le chargement du charbon de bois pour le transport (Robin 2018).

L'échantillonnage d'une charbonnière consiste à prélever dans ce niveau de charbon un certain nombre de fragments, individuellement ou bien par le prélèvement de sédiments qui sera ensuite tamisé en laboratoire pour en extraire les fragments. Pour s'assurer de la représentativité de l'ensemble de la charbonnière, l'échantillonnage doit inclure au moins 100 fragments, prélevés en différents points de la charbonnière, au centre et sur la pente en contrebas immédiat de la charbonnière. Les fragments de charbon de bois sont identifiés selon le même principe que pour la pédoanthracologie (Figure 28). Les résultats sont classiquement présentés en valeurs relatives par taxon identifié. L'âge de production de charbon de bois sur le site peut être évalué par datation radiocarbone de fragment de charbon de bois du niveau échantillonné. En plus des identifications taxonomiques, certains fragments de charbon de bois de charbonnières peuvent faire l'objet de mesures dendro-anthracologiques. Pour cela ils doivent nécessairement présenter des séries de cernes de bois bien visibles. Il existe

différents types de mesure dendro-anthracologiques (e.g., Marguerie & Hunot 2007, Dufraisse et Garcia-Martinez 2011). Celle que je réalise en routine permet d'estimer les dimensions minimales type de bois brûlé, et par extension le type de structure du peuplement forestier d'où est originaire le combustible ligneux, par l'observation et la classification des cernes par classes de degré de courbure (Ludemann et Nelle 2002, Nelle 2003, Robin 2018). Ainsi, l'anthracologie des charbonnières fournit des informations précieuses sur la composition et la structure passée des peuplements forestiers à une échelle locale (i.e., infra bassin versant ; Gocel-Chalté 2020). Elle nous renseigne également sur l'utilisation par l'homme de la ressource ligneuse pour la production de charbon de bois, et donc sur les besoins industriels de l'époque à l'échelle d'un territoire.

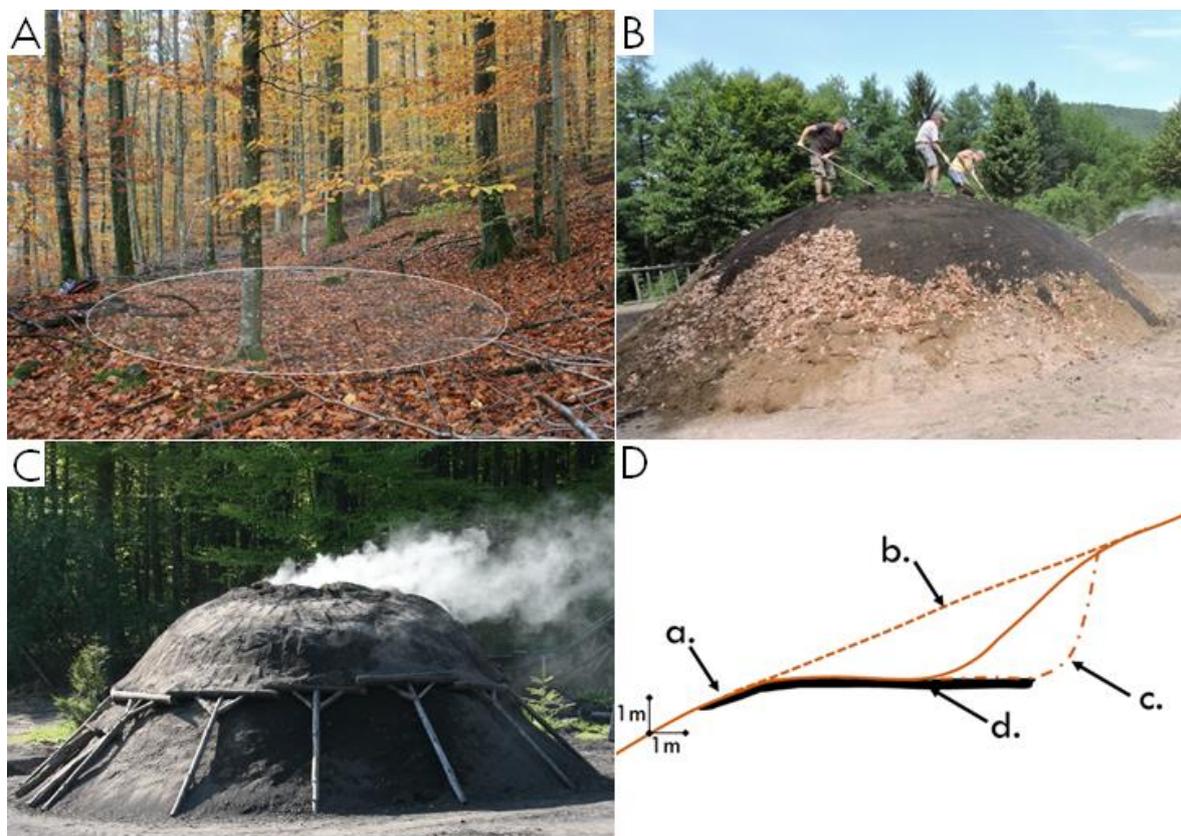


Figure 29 | L'analyse anthracologique de charbonnières ; A : Matérialisation d'une plateforme de charbonnière en forêt ; B : Meule en cours de couverture ; C : Meule en cours de combustion ; D : Evolution topographique avant, pendant et après l'exploitation du site pour la production de charbon de bois (a. Surface actuelle, b. Surface pré-exploitation, c. surface lors de l'exploitation, d. niveau de charbon ; Photos ©V.Robin)

J'ai commencé à me familiariser avec l'analyse des charbonnières en parallèle de mes travaux de doctorat. J'ai ainsi été amené à participer à des campagnes de terrain pour échantillonner des charbonnières en Allemagne, d'une part en lien avec les travaux de recherche de mon directeur de thèse dont une des principales expertises est l'antracologie de charbonnières (Ludemann and Nelle 2002, Nelle 2003, Nelle et al. 2014 ; Figure 30) et d'autre part en collaboration avec un collègue doctorant dont le sujet principal était l'étude des charbonnières. Ces recherches ont permis une publication d'une étude comparative des enregistrements anthracologiques de charbonnières et de sols (i.e., enregistrements pédoanthracologiques ; Knapp et al. 2013).



Figure 30 |
Fouille d'une plate-forme de charbonnage (charbonnière) en forêt noire, en Allemagne en 2013 (Photo ©V.Robin)

Depuis mon arrivé au LIEC, j'ai eu l'opportunité de développer des études anthracologiques de charbonnières dans un contexte de passé industriel (ou proto-industriel) dans la région Grand-Est. En effet, cette région fortement forestière, en plaine comme en moyenne montagne, présente un grand nombre de sites d'étude potentiels, présentant souvent d'importantes densités de charbonnières qui n'ont encore fait l'objet d'aucune études à l'exception des Hautes-Vosges où elles ont été en partie déjà explorées (e.g., Nölken 2005). J'ai donc démarré l'étude de charbonnières dans le Pays de Bitche situé dans les Vosges du nord (Programme de recherche CharPyBi). Ce programme de recherche a fait l'objet d'un doctorat (David Gocel-Chalté) qui portait sur les *Déterminants spatio-temporels de la qualité des cours*

d'eau dans un contexte de déprise des activités et d'évolution des paysages : rôle des facteurs du passé (direction François Guérold - LIEC).

Ce doctorat a notamment permis l'analyse d'une centaine de charbonnières sur quatre bassins versants (Gocel-Chalté et al. 2020). Ces travaux de doctorat ont abouti notamment sur l'ouverture de perspectives d'études interdisciplinaires avec des questionnements relevant de la pédologie et de la chimie organique, en lien avec des processus d'écologie fonctionnelle, en collaboration avec Anne Poszwa et Laurence Mansuy-Huault du LIEC.

Dans une démarche comparable en termes d'interdisciplinarité, nous avons réalisé l'analyse d'environ 120 charbonnières supplémentaires, à plus large échelle dans les Vosges du nord, dans l'optique de comparer les résultats obtenus à des données de sources historiques écrites (i.e., registres de martelages anciens), en collaboration avec Xavier Rochel (Loterr, université de Lorraine).

Dans la continuité de ces travaux, en 2018 j'ai développé un projet de recherche pour l'étude de charbonnières dans le sud de la Meuse (dans le cadre du programme DEEPSURF de Lorraine Université d'Excellence). Dans un souci de renforcer les études interdisciplinaires les approches anthracologiques sont couplées à des analyses de sources historiques écrites, de pédologie/géochimie et des aspects d'écologie forestière en collaboration avec Jean-Luc Dupouey (Silva-INRAE). C'est dans ce cadre que se déroule le doctorat de Claudia Oliveira (*De bois et d'houille : le charbon, ressource énergétique au fort impact environnemental dans le passé, enjeu clé pour la transition énergétique du futur*, direction Simon Devin, LIEC).

3.2.5 La dendroécologie

La dendroécologie, est un champ d'application à l'écologie de la dendrochronologie, c'est-à-dire de l'évaluation des années de formation de cernes de croissance d'arbres (Fritts 1971, Smith 2008, Eckstein et Schweingruber 2009). Ainsi, les signaux dendroécologiques correspondent aux patrons de croissance radiale des arbres de populations forestières cibles. Leur étude va permettre d'analyser les déterminismes de croissance forestière à l'échelle séculaire, du contrôle climatique à la perturbation intra-forestière (Lebourgeois et al. 2005, Rasmussen 2007, Nagel et al. 2007), en passant par les influences de l'utilisation et de la gestion des ressources forestières par l'homme (Eckstein 2007, Haneca et al. 2009).

La dendroécologie repose sur le carottage radial d'un certain nombre d'arbres pour obtenir les séries de cernes (Figure 31A).

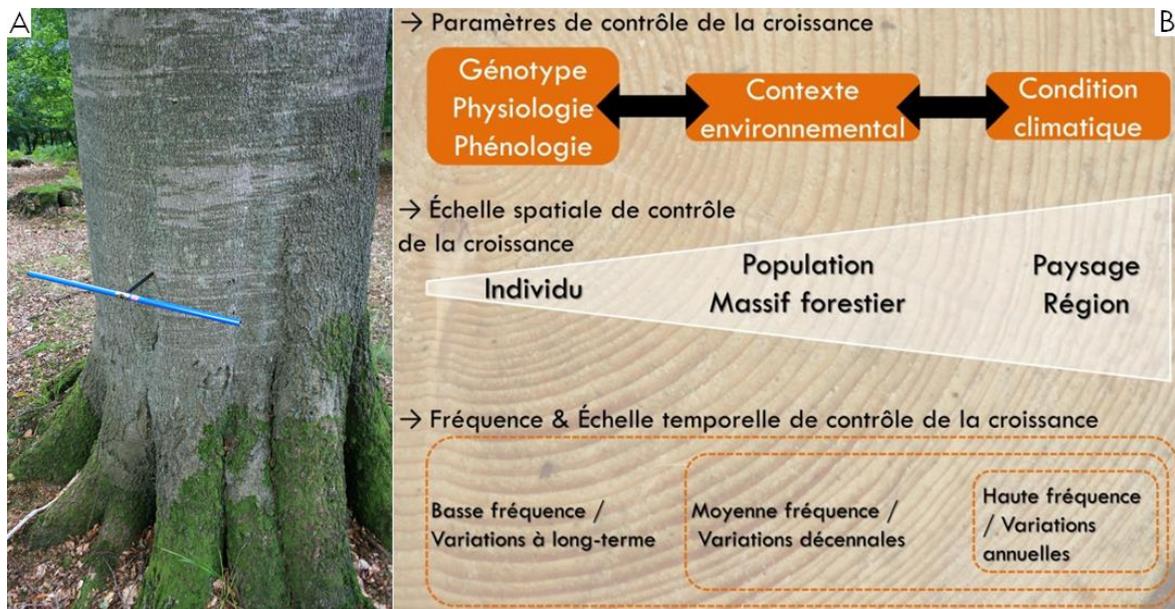


Figure 31 | Représentation des différents types de signaux dendroécologiques, avec la résolution spatiale et les paramètres de contrôle correspondants (Photo ©V.Robin)

Pour cela, une fois les carottes séchées et polies, les séries de cernes sont mesurées une à une, interdatées, et analysées statistiquement (i.e., standardisation ; Rinn 2003, Rubino and McCarthy 2004), afin de discriminer les signaux en haute (patrons de croissance en résolution annuelle), moyenne (patrons de croissance de quelques années à quelques décennies), et basse fréquence (patrons de croissance en résolution de plusieurs décennies ; Figure 31B), pour l'échelle temporelle couverte par l'ensemble des séries de cernes (Black and Abrams 2003, 2005). De plus, les patrons de croissance identifiés à l'échelle des populations forestières peuvent être comparés à diverses échelles spatiales afin d'identifier des convergences et/ou divergences régionales et extrarégionales, notamment en utilisant des séries de cernes de références en libre accès (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring>).

Mon premier contact avec la dendroécologie a eu lieu lors de mon master à l'université d'Aix-Marseille, au cours duquel j'ai participé à des campagnes de terrain de collecte de bois subfossiles pour l'analyse de leur croissance radiale afin de contribuer à la construction de chronologies longues de référence pour l'Europe de l'ouest (Miramont et al. 2010, 2011). Par la suite j'ai toujours eu une attirance particulière pour cette

approche qui fait appel à des notions d'écologie forestière ce qui me renvoyait notamment à mes études de BTS Gestion Forestière en 2001/2002. J'ai utilisé cette discipline dans mes travaux de doctorat pour l'échantillonnage de peuplements forestiers de hêtre, de chênes et d'épicéa, sur neuf sites d'étude dans le nord et le centre de l'Allemagne. J'ai également encadré des stages sur cette discipline dans le cadre de différents enseignements et d'un programme international (Figure 32). Ces travaux sont toujours en cours de publication. Ils ont fait l'objet d'une communication en conférence scientifique sous la forme d'un poster en 2014 (Annexe 3).

J'ai mis en place au sein du LIEC, la capacité analytique standard de la dendroécologie, avec par exemple l'acquisition d'une table de mesure des cernes de bois. Ceci a été utilisé lors d'un stage de M1 en 2016 : *Analyses dendroécologiques en forêt d'Hemilly (Moselle)*.

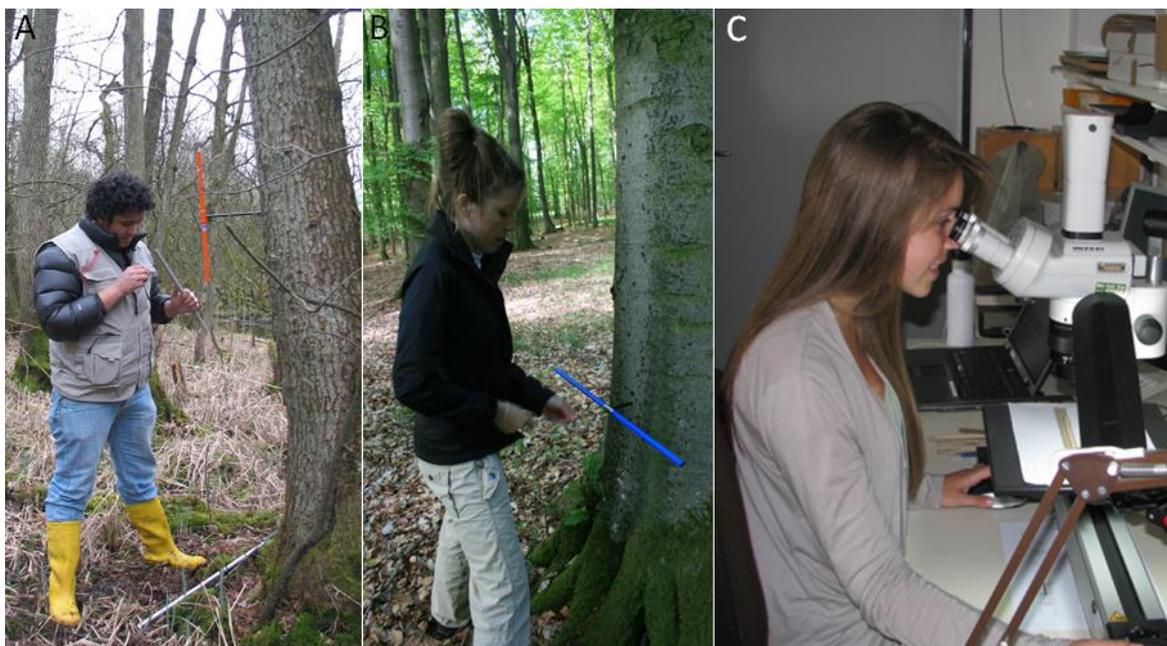


Figure 32 | Etudiants de l'université de Kiel en Allemagne, encadrés entre 2011 & 2013 pour des analyses dendroécologiques (Photos ©V.Robin)

3.2.6 Approches complémentaires

Chacune des méthodes et chacun des indicateurs présentés succinctement précédemment fait appel à une ou plusieurs disciplines complémentaires, pour lesquelles je n'ai pas d'expertise bien qu'elles me soient assez familières. Ces disciplines fixent clairement le positionnement interdisciplinaire de mes recherches (Figure 33).

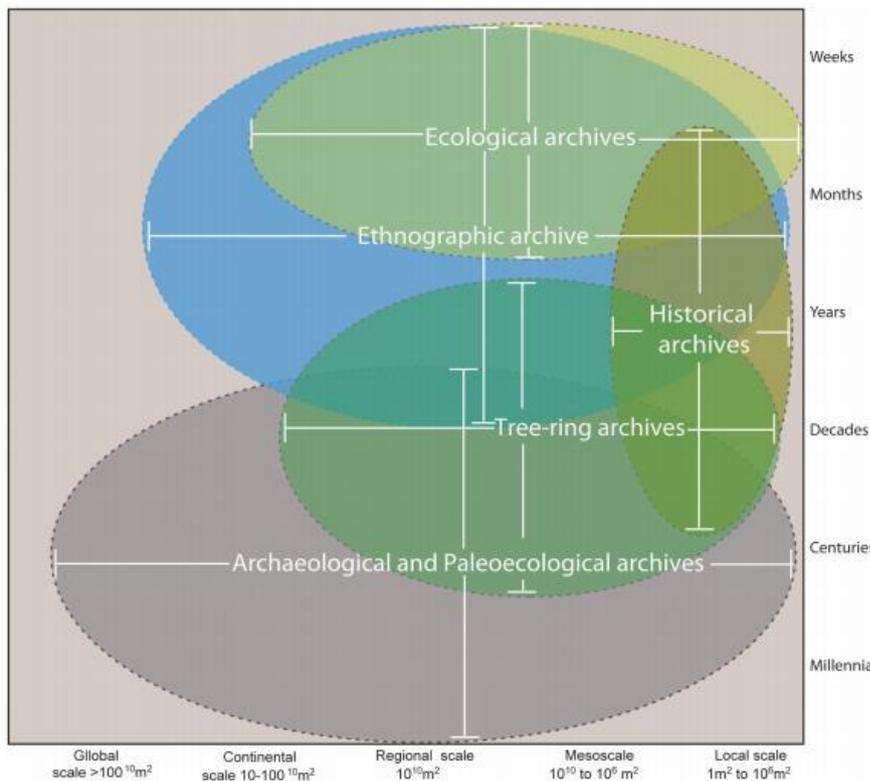


Figure 33 | Cadre spatiotemporel des approches rétrospectives potentiellement complémentaires pour une démarche interdisciplinaire (Power et al. 2018)

Ainsi par exemple, les approches palynologiques que je mets en place peuvent complétées par des approches en géochimie et paléolimnologie d'une part pour décrire la séquence sédimentaire d'où sont extraits les enregistrements palynologiques, ce qui permet de mieux les interpréter et, d'autre part, pour identifier de possibles facteurs explicatifs d'un enregistrement donné. De la même façon, l'apport de données archéologiques et/ou historiques, selon l'échelle de temps des enregistrements étudiés peut constituer une aide intéressante. Ces dernières approches de SHS sont de façon générale complémentaires avec l'ensemble de mes approches (Table 2).

La pédoanthracologie et l’anthracologie de charbonnières s’inscrivent nécessairement dans ce cadre transdisciplinaire qui permet de contextualiser les enregistrements étudiés. Typiquement la pédologie et la géomorphologie permettent de comprendre comment se sont formées les archives pédologiques ou sédimentaires (e.g., accumulation sédimentaire par colluvionnement ; Robin et al. 2014) d’où seraient extraits des assemblages anthracologiques. De plus, cette complémentarité permet d’acquérir des informations concernant des états possibles, par exemple fonctionnels, des sites étudiés en lien avec les activités / mécanismes passés. Enfin, la dendroécologie fait appel au corpus de méthodes de la dendrométrie et de l’écologie forestière, là aussi pour mieux pouvoir comprendre et interpréter les signaux obtenus, soit par rapport à des mécanismes anciens, soit par rapport à des états actuels.

Table 2 | Table de synthèse des outils potentiellement utilisés pour mon approche pluridisciplinaire

Approche	Indicateur	Archive	Résolution		Approches complémentaires
			Espace	Temps	
Palynologie	Pollens	Sédiments de lacs et de tourbières	régional à local	Séculaire à millénaire	Géochimie Paléo-limnologie Archéologie/histoire
Anthracologie sédimentaire	micro-/macro-charbons				
Pédoanthracologie	Méga-charbons	Sols Sédiment terrestres	Local	Millénaire	Pédologie Géomorphologie Archéologie/histoire
Anthracologie de charbonnières	Méga-charbons	Charbonnières	Local	séculaire	Pédologie Archéologie/histoire
Dendroécologie	Cernes annuels de croissance	Peuplements forestiers	Local	séculaire	Dendrométrie Ecologie forestière Signal climatique

3.3 Notion de références

L'analyse des trajectoires d'un système écologique consiste à identifier une succession d'états écosystémiques qui résulte de changements plus ou moins rapides dans le temps et restreints dans l'espace. Il s'agit d'évaluer comment un état de système S1 passe à un état S2 en réponse à une perturbation. Dans ce changement, S2 est l'état post-changement et S1 est l'état initial, que l'on qualifie de référence. Sur du temps long, les trajectoires écologiques d'un système sont composées d'un nombre variable de changements d'états, et par conséquent d'un nombre variable de références (S1), potentiellement très important. Enfin, un même état de référence peut donner une grande variété d'états post-changements (S2).

L'aspect essentiel pour considérer le passage d'un état à un autre, soit pour distinguer la référence (S1) de l'état post-changement (S2), est l'expression de la causalité de changement, c'est-à-dire de la perturbation. Si celle-ci est active, alors l'état initial de référence (S1) est déjà effacé pour un état en cours de changement, ou un état post-changement dans lequel la perturbation est exprimée (S2). Si celle-ci n'est plus active, alors il s'agit d'un état post-changement qui peut alors être considéré comme un nouvel état de référence (S1bis) par rapport au prochain changement à venir et à l'état qui en découlera (S2bis). Ainsi, il n'existe pas d'état de référence unique et absolu, mais différents états de références et d'états post-changements qui forment alors une succession d'états S1 -> S2 -> S1bis -> S2bis -> ... (Figure 34).

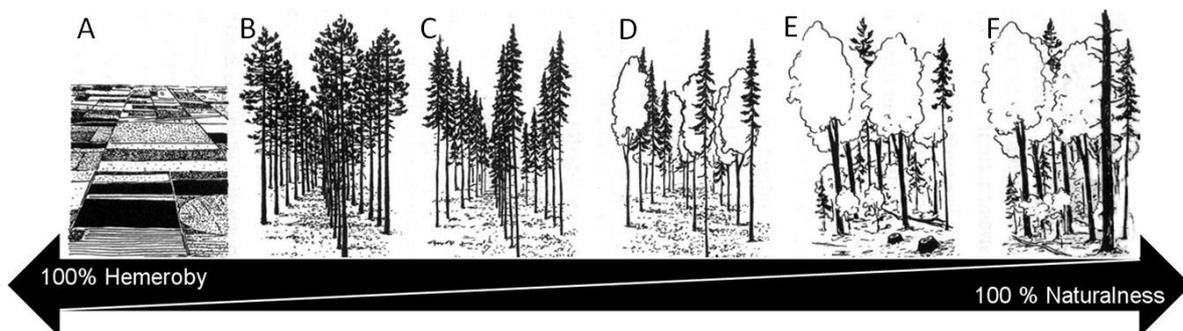


Figure 34 | Succession d'états écologiques le long d'un gradient d'anthropisation (depuis A vers F) versus naturalité (depuis F vers A ; Modifié d'après Hunter 1999, Winter et al. 2010)

Les changements d'états peuvent être plus ou moins abrupts selon le régime de la perturbation qui les induit, et selon la résistance du système face à la perturbation. Un état post-changement (S2) pour lequel la perturbation qui a induit le changement n'est plus active peut être rendu proche, voire similaire, de l'état de référence (S1). Ceci

dépend des capacités de résilience du système perturbé et de la nature et magnitude de la perturbation elle-même. On voit ici l'importance des processus de résistance et de résilience dans la compréhension des trajectoires écologiques et des changements d'états qu'elles incluent. Ainsi, pour identifier au mieux les trajectoires écologiques, il convient d'identifier les états de références et les processus/mécanismes de changements et les conséquences de ces changements sur les systèmes, afin d'évaluer si celui-ci a passé, ou pas, des seuils de résistance et/ou de résilience. En effet, des systèmes écologiques peuvent être influencés par des perturbations mais poursuivre une même trajectoire écologique dans le long terme grâce à leur capacité de résistance et/ou de résilience.

C'est par exemple le cas de la forêt de la Sainte Baume dans le sud-est de la France. J'ai été amené à étudier l'origine et l'histoire multimillénaire de la dynamique forestière de ce massif lors de mon post-doctorat à l'université de Padoue en Italie en 2014. Ce massif forestier, assez restreint, est reconnu comme particulier dans le contexte des paysages méditerranéens de garrigues et de pinèdes de la Provence calcaire, puisqu'il présente une physionomie et une composition végétale de forêt tempérée avec par exemple la présence d'espèces forestières comme le hêtre (*Fagus sylvatica*), l'if (*Taxus baccata*), des tilleuls (*Tilia* spp.), etc. Sur la base de quelques analyses préexistantes (Chalvet 2013, Darras et al. 2017) et de nos propres travaux (Annexe 2), il est clair que la présence de cette forêt est la résultante d'une part d'un micro/méso-climat dû à la présence d'une falaise surplombant la forêt, et d'autre part à la présence d'un monastère depuis le 13ème siècle, ce qui confère un certain degré de protection à la forêt dû à un caractère « sacré » (Figure 35A). Ainsi, au-delà des dernières décennies de gestion conservatoire du site (la forêt de la Sainte Baume est une réserve biologique de l'ONF depuis 1974, et elle est classée sous le label « Forêt d'Exception » depuis 2018), des paramètres naturels et anthropiques locaux ont fortement contribué à maintenir la trajectoire écologique du massif vers un degré élevé de naturalité et de maturité forestière, principalement par le maintien des états forestiers de références (S1). Ces états de références ont été identifiés comme correspondant 1) à une hêtraie grâce à l'identification de fragments de charbon de bois de hêtre dans les sols locaux et de datations radiocarbone de ces fragments à plusieurs millénaires avant aujourd'hui (le plus ancien est daté à c. 8000 ans BP), et 2) à une chênaie caduque, probablement pubescente, là encore sur la base des enregistrements en charbon de bois dans les sols. Néanmoins, la présence de ces

charbons de bois indique justement que les peuplements forestiers ont brûlé, et ce de manière répétée depuis des millénaires. Comme il s'agit de gros fragments de charbon ces évènements d'incendies se sont produits localement (cf. partie 3.2 Outils et indicateurs rétrospectifs), dans le massif qui a donc été sujet à la perturbation incendie. Ceci est aussi indiqué par la présence dans les sols locaux de niveaux d'accumulation sédimentaire (i.e., colluvion ; Figure 35B ; Leopold & Völkel 2007, Emadodin et al. 2011) qui résulte classiquement de l'érosion suite à la mise à nu du sol après la destruction du couvert végétal par exemple après un incendie (Pierce et al. 2004, Shakesby & Doerr 2006). Nos résultats indiquent d'ailleurs les plus fortes concentrations en charbon de bois dans les niveaux d'érosion (Figure 35C), comme c'est le cas pour d'autres études comparables en Europe centrale (Robin et al. 2014, Robin & Nelle 2014).

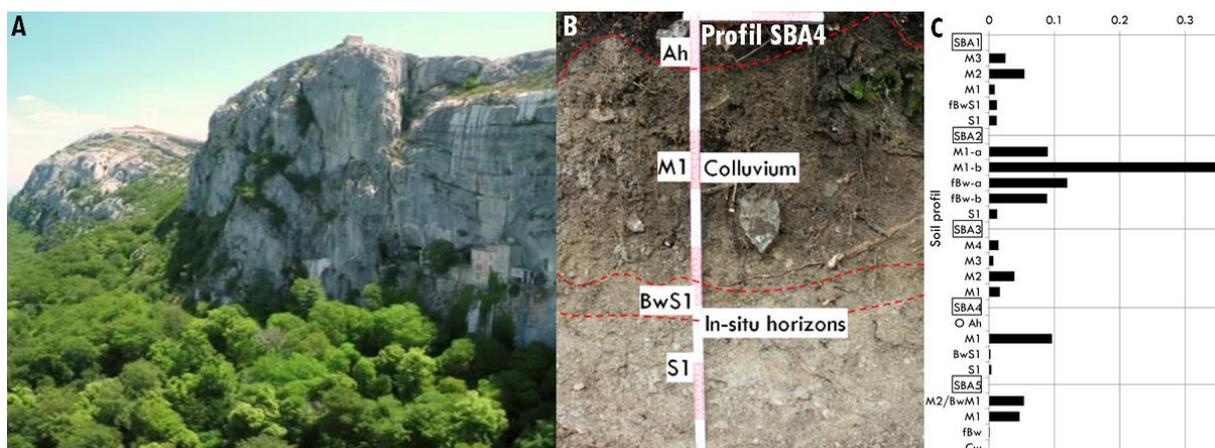


Figure 35 | Etude menée sur l'origine et l'histoire du massif de la Sainte Baume : A. La forêt tempérée de la Sainte Baume au pied de la falaise sur laquelle est installé le monastère ; B. Profil de sol de la forêt de la Sainte Baume ; C. Concentrations en charbon de bois (>1mm) par niveaux de sol pour cinq profils de la forêt de la Sainte Baume [les niveaux de colluvion sont indiqués par la lettre M] (Photo et figures ©V.Robin)

Notre étude a donc permis d'identifier que le système étudié a été perturbé par l'occurrence d'évènements d'incendies. Ceux-ci ont induit des changements d'état assez intenses pour permettre par exemple des évènements d'érosion, comme corollaires aux incendies. Pour autant notre étude montre également que le système étudié reste sur la même trajectoire écologique dans le long terme. Ainsi, les perturbations identifiées au niveau intra-forestier n'ont pas causé le passage de seuils de résistance à l'échelle du massif. A l'échelle locale, le système semble avoir présenté

un niveau de résilience qui lui a permis de rester dans une trajectoire écologique proche des états de références.

C'est aussi le cas de la hêtraie de Stodthagen Wald dans le nord de l'Allemagne (Figure 36A), que j'ai étudiée au cours de mon doctorat (Robin et al. 2012). Il s'agit d'une hêtraie dans une matrice paysagère agricole, faite de vallons et collines de basse altitude, sous climat océanique. Des données palynologiques régionales indiquent clairement les dynamiques d'ouverture des paysages forestiers vers des paysages agraires à partir du Néolithique, puis au cours de l'âge du Bronze (Nelle & Dörfler 2008, Nielsen et al. 2012, Wieckowska et al. 2012). Mais pour le massif de Stodthagen Wald les différents enregistrements palynologiques étudiés n'indiquent pas d'ouverture forestière claire. A partir d'enregistrements provenant de sites situés plus au sud-est, en direction d'un site archéologique de l'Âge de Fer, nous avons observé un recul des pollens forestiers au profits des pollens de céréales et marqueurs anthropogéniques. Toutefois, pour le reste du massif les enregistrements palynologiques indiquent une continuité forestière sur du temps long. Les états de références identifiés correspondent clairement à de la hêtraie, avec quelques autres espèces de feuillus décidus. Néanmoins, la présence de charbon de bois dans les sols, parfois en grande concentration, indique que le massif a bien été sujet à une perturbation incendie (Figure 36B). L'identification taxonomique des fragments de charbon indique également les états de références identifiés, de hêtraie mixte, qui ont donc brûlé. Mais ces forêts, tempérées, n'ont pas pu brûler sans l'intervention de l'homme pour démarrer et maintenir le feu. Ce dernier est ici certainement utilisé par l'homme comme un moyen pour entretenir la structure forestière, sous couvert forestier, puisque que les pollens (Figure 36C) indiquent le maintien de la hêtraie à des âges synchrones avec les datations radiocarbone obtenues avec les charbons de bois. Nous pouvons alors proposer que le recours au feu permettait certainement de fournir assez de lumière au sol pour disposer d'un tapis d'herbacées autorisant le pâturage, tout en maintenant la ressource forestière.

L'étude sur la hêtraie de Stodthagen Wald indique des perturbations intra-forestières par l'occurrence d'évènement d'incendies, certainement anthropiques, sur une échelle de temps multimillénaire, sans que cette perturbation ne fasse passer le milieu en question au-delà de seuils de résistance. Il s'agit donc d'un des rares massifs forestiers en Europe de l'ouest identifié comme ayant une continuité forestière multimillénaire. Pour autant ce site de Stodthagen Wald ne présente pas aujourd'hui une forte

naturalité puisque que ce massif a été fortement impacté par les activités humaines locales, jusqu'à son classement en réserve biologique il y a une vingtaine d'années.



Figure 36 | Etude menée sur l'histoire de la hêtraie de Stodthagen Wald dans le nord de l'Allemagne (land de Schleswig-Holstein) : A. Parcelle de hêtraie mature ; B. Echantillonnage de sol pour les analyses pédoanthracologiques (cf. partie 3.2 Outils et indicateurs rétrospectifs) ; C. Carottage d'une tourbière intra-forestière (Photos ©V.Robin)

Le degré de naturalité apparaît également très faible dans les milieux ouverts utilisés et entretenus par des pratiques agricoles extensives comme les prairies de fauches ou les pâturages. L'origine de ces milieux en Europe est une question classique de l'écologie des communautés et de l'histoire des écosystèmes (Thomas 1989, Bush 1993, Wilmans 1997, Vera 2000, Dutoit et al. 2003, Baumann & Poschlod 2008, Kuneš et al. 2015). J'ai abordé cette thématique lors d'un travail de synthèse bibliographique de travaux paléo-environnementaux réalisés sur six sites de pelouses pauvres en Europe de l'ouest (Robin et al. 2018). Sur ces sites les enregistrements en charbon de bois, et en pollens pour certains sites, indiquent sans trop de surprise à l'échelle locale la présence de peuplements forestiers précédant l'état de pelouse. Il s'agit d'états de références constitués par des peuplements de feuillus décidus, par exemple la hêtraie pour les Hautes-Vosges (Goep 2007, Schwartz et al. 2005, et al. 2015). La perturbation à l'origine des changements observés est l'occurrence d'évènements d'incendies d'origine anthropique, qui ont induit de fortes modifications et durables de l'état de référence. Le feu est ici encore utilisé comme un outil pour l'ouverture et le maintien

de l'état ouvert, pour des usages agricoles. Les états de pelouses sont donc maintenus tant que l'activité anthropique est présente, ici sur du temps long, à l'échelle de plusieurs millénaires. Ainsi la trajectoire des peuplements forestiers tempérés de ces sites a été fortement modifiée par le passage de seuils de résistance depuis les états de références de forêts tempérées feuillues à des états post-changements de pelouses pauvres en nutriments. Ces milieux herbacés semblent avoir présenté de très faibles niveaux de résilience puisqu'ils sont restés en l'état durant des millénaires, tant que la perturbation contraignant les trajectoires est restée active (Figure 37).

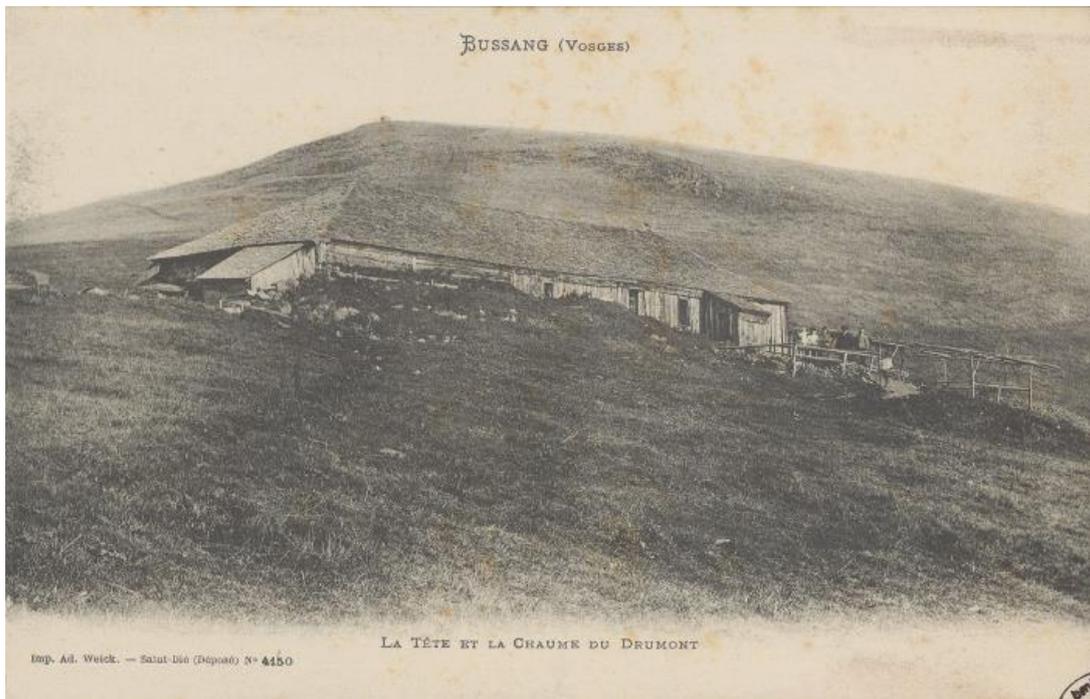


Figure 37 | Carte postale de la fin du 19ème siècle montrant « La Tête et la chaume du Drumont, Bussang, Vosges » (Image internet libre de droit)

Ces états post-changements de pelouses sont des héritages écologiques de pratiques humaines anciennes qui constituent aujourd'hui des écosystèmes spécifiques présentant souvent des niveaux de biodiversité remarquables et la présence d'espèces patrimoniales qui ne subsistent régionalement plus que dans ces écosystèmes (Klimek et al. 2007, Gustavsson et al. 2007, Habel et al. 2013).

3.4 Notion d'héritages

Un héritage écologique correspond à un état ou mécanisme écologique (biotique ou abiotique) résultant de changements passés dus à des perturbations anthropiques (e.g., changements de végétation, érosion, incendies, crues, pollutions, etc. ; e.g., Glatzel 1991, Gimmi et al. 2013). Il peut aussi résulter d'une combinaison de plusieurs perturbations anthropiques, ou-bien de la combinaison de perturbations anthropiques et naturelles, avec des effets de péjorations. Un héritage écologique s'exprime aujourd'hui dans un système écologique en ayant une influence, plus ou moins forte et visible, sur l'état actuel du système considéré et sur sa trajectoire en cours (Bürgi et al. 2017, Culbert et al. 2017). Cet héritage n'est pas nécessairement directement lié aux changements passés mais il en résulte au moins indirectement. Par exemple, l'ancienneté d'un état écologique, c'est-à-dire la continuité dans le long terme d'une trajectoire écologique, induit souvent le développement d'un cortège d'espèces bien spécifique. Ce cortège d'espèces est l'héritage indirect de l'ancienneté de l'état écologique en question. C'est le cas des forêts anciennes qui présentent une composition floristique spécifique avec notamment la présence d'espèces qui s'établissent préférentiellement dans ces milieux car elles ont des traits biologiques, notamment leur capacité de dispersion et leur sensibilité à la lumière, qui limitent leur établissement dans d'autres milieux (e.g., *Anemone nemorosa*, *Vinca minor*, *Lamium galeobdolon*, *Paris quadrifolia* ; Dupouey et al. 2002b, Verheyen et al. 2003, Hermy & Verheyen 2007, Baeten et al. 2010). Ceci n'étant pas sans conséquences sur les enjeux de gestion et de conservation forestière et paysagère (Hermy et al. 1999, Mansourian et al. 2013).

Les processus d'héritages reconnus comme les plus remarquables sont issus de changements à des échelles spatiales intermédiaires, par exemple à l'échelle d'un bassin versant, et sur une échelle chronologique relativement récente, quelques décennies à plusieurs siècles. Pour autant, de plus en plus de travaux montrent que certains mécanismes très anciens peuvent avoir des héritages sur les systèmes écologiques actuels, traduisant ainsi une longue latence post-changement, peut-être de l'ordre multimillénaire. C'est le cas des sols forestiers de plaines dans le Grand-Est, dont les patrons spatiaux des niveaux actuels de pH et de teneurs en phosphore et en azote résultent directement des pratiques agricoles sur ces mêmes sites lors de la

période romaine soit plus de 2000 ans auparavant (Dupouey et al. 2002a, Dambrine et al. 2007, Georges-Leroy et al. 2009).

Par ailleurs, nous savons qu'un même mécanisme dans différents sites d'un même écosystème aura des héritages similaires. Ainsi, des héritages écologiques peuvent s'exprimer sur de relativement petites surfaces, disjointes, mais qui considérées de manière comparative peuvent représenter de grandes surfaces. C'est le cas des systèmes écologiques dits de pelouses en Europe de l'Ouest, de moyenne et basse altitude, dont les états de références, des forêts feuillues, sont identifiés (cf. partie 3.3 Notion de références ; Robin et al. 2018). Ces milieux ouverts, après des millénaires de trajectoires écologiques, ont développé des communautés végétales spécifiques, adaptées aux conditions environnementales des sites, en lien avec les pratiques humaines agricoles locales. Or, depuis les années 1960, l'empreinte anthropique dans les zones rurales, en particulier en moyenne montagne, a fortement changé en raison des changements socio-culturels de ces territoires. Les pratiques agricoles extensives ont fortement reculé, laissant à l'abandon une grande partie de ces espaces (Cavailhes & Normandin 1993, Lee & Slak 2007). Avec quelques décennies de recul, on observe que la résilience forestière de ces espaces est en cours (Figure 38A). Suite au recul de la perturbation à l'origine de l'ouverture, les pelouses se referment progressivement (Figure 38B). Ces dynamiques de résiliences en cours sont des héritages des états de références forestiers disparus localement après le passage de seuils de résistance il y a plusieurs milliers d'années.

Aujourd'hui, cette résilience forestière pose un certain nombre de questions aux gestionnaires de ces milieux. En effet, la flore et faune spécifique de ces pelouses se voient fortement modifiées par les changements environnementaux dus à la (re-) fermeture du milieu (e.g., Kahmen & Poschlod 2004, Habel et al. 2013). Elles sont remplacées par des espèces de cortèges pré-forestiers, puis forestiers, sciaphiles. Les gestionnaires de ces espaces se positionnent souvent pour maintenir ces espaces ouverts afin de conserver les cortèges d'espèces concernées, par exemple par la réalisation de travaux pour éliminer les semis forestiers (e.g., WallisDeVries et al. 2002, Schrautzer et al. 2009). Pour autant, les états de références « naturels » de ces milieux sont forestiers et l'état ouvert de pelouses est anthropique.

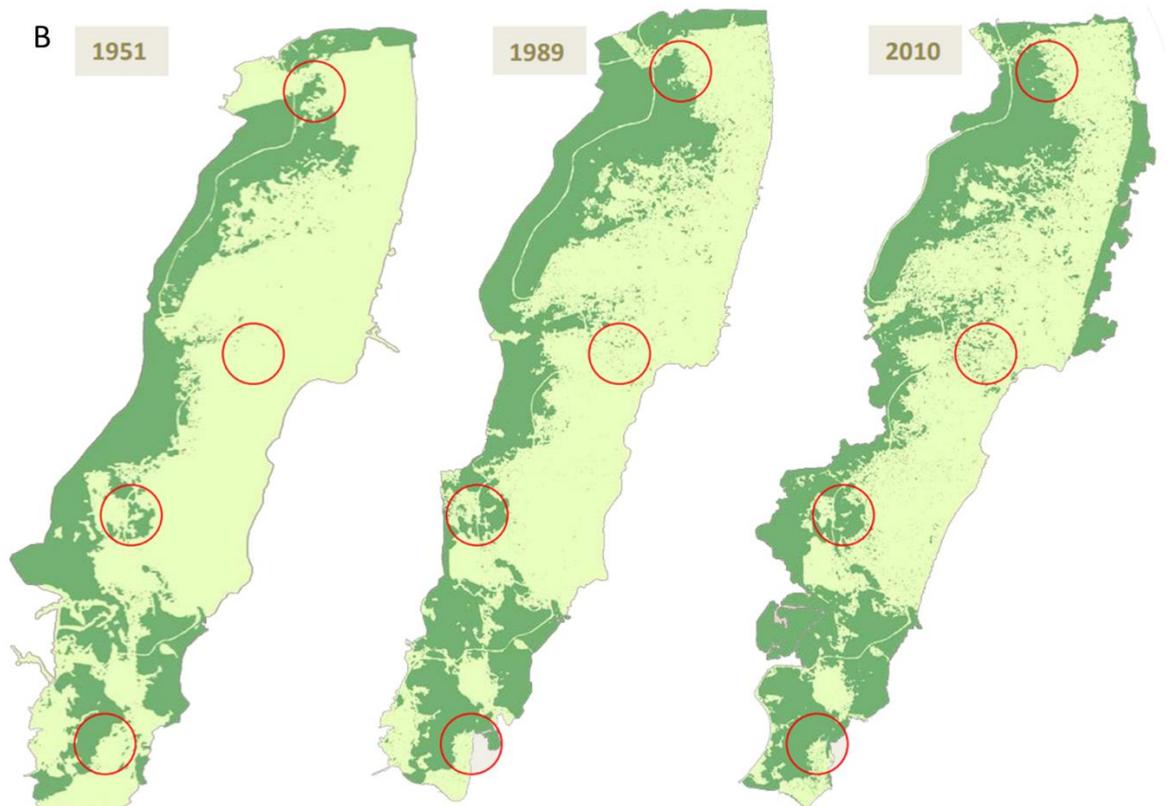


Figure 38 | Observations de la résilience forestière dans la Haute-Chaume du Tanet-Gazon du Faing dans les Hautes-Vosges. A : Accrues forestières en 2019 (Photo ©V.Robin) ; B : Etude diachronique de la couverture ligneuse sur la RNN montrant « une fermeture progressive du milieu par le hêtre et surtout l'épicéa » à partir de foyers de colonisation (cercles rouges) « Cette fermeture s'est principalement déroulée entre les années 1950 à 1980 avec une apparition d'un très grand nombre de semis au sein des chaumes. Ce phénomène est à relier avec l'arrêt du pâturage des chaumes avéré dès 1954 » (Figure du Conservatoire d'Espaces Naturels Lorraine 2012)

Il s'agit donc de maintenir un état « artificiel » ouvert, plutôt que de laisser se ré-établir un « état naturel » forestier⁶. Le choix de gestion entre interventionnisme pour la biodiversité et « en libre évolution » (vers plus de naturalité) est un dilemme récurrent, qui prend une dimension quasiment philosophique, pour un grand nombre de milieux et d'enjeux de conservation locaux (e.g., Goldammer et al. 2009, Bugalho et al. 2011, Steinhoff 2012, Manenti et al. 2013). Dans ce dilemme, les approches et données rétrospectives ont un rôle important à jouer par l'identification des références et des héritages, et l'évaluation des niveaux de résistance et de résilience des trajectoires écologiques, face aux pressions anthropiques. Il s'agit de répondre à la question générique suivante : Qu'est ce qui est « naturel » ? Ceci pour évaluer ce qui relève de l'héritage culturel ou de l'héritage naturel (Sprugel 1991, Birks et al. 2004, Willis & Birks 2006, Gaillard et al. 2009, Robin et al. 2013c, Rochel 2016, Rull 2018).

En terme de gestion, il s'agit d'utiliser les connaissances de l'histoire des changements écologiques et environnementaux pour contribuer à identifier des états cibles pour la restauration écologique (Bakker et al. 2000, Jackson & Hobbs 2009, Balaguer et al. 2014), définir des priorités de conservation écologique (Foster 2002b, Willis et al. 2007, DeClerck et al. 2010), guider les actions de gestion durable des ressources (Farrell et al. 2000, Agnoletti 2007, Lynch et al. 2019).

L'évaluation de l'influence et de l'importance des héritages des pratiques humaines passées concerne évidemment également les peuplements forestiers, notamment parce que ceux-ci sont, ou ont été, gérés depuis des siècles, voire des millénaires. C'est le cas des forêts du plateau Lorrain. Ce territoire forme une plaine de 935 000 ha, avec des reliefs de faible énergie (entre 150 et 450 mètres d'altitude), bordée par les Vosges à l'est et les côtes de Moselle à l'ouest. Les sols sont essentiellement limoneux-argileux et le substrat est constitué de marnes-argileuses du Keuper et du Muschelkalk, ou, localement, de marnes-calcaires (CRPF 2006, Madesclaire 2016). Il présente approximativement 25% de surface boisée, essentiellement composée de peuplements forestiers tempérés feuillus, dominés à plus de 25% par le chêne sessile (*Quercus petraea*) et le chêne pédonculé (*Quercus robur* ; CRPF 2006). Comme dans beaucoup de régions de France et d'Europe, ces deux espèces sont les cibles

⁶Tout en sachant que les états forestiers naturels passés comprenaient un certain degré d'ouverture dû à l'activité des troupeaux de grands herbivores bien plus nombreux dans le passé (Vera 2000, Mitchell 2005, Vera et al. 2006).

prioritaires de la gestion forestière de ce territoire car elles permettent les plus intéressantes valorisations, en particulier en bois d'œuvre. Cette « promotion » des chênes semble remonter assez loin dans le temps. En effet, sur la base de sources historiques écrites, régionales ou nationales (e.g., anciens plans de gestion, registres historiques de martelages, des cartes historiques, etc.), les chênaies sont identifiées, directement ou indirectement, comme les peuplements « à favoriser » depuis au moins le Moyen Âge (Plaisance 1950, Sevrin 1997) principalement pour les propriétés physiques et biologiques du bois qui sont particulièrement intéressantes pour la production de bois d'œuvre, de bois de chauffage et de glands pour l'alimentation des porcs (Dion 1970, Kremer 2015 ; Figure 39).



Figure 39 | Peintures illustrant l'importance des chênes et des glandées. A : « Harvesting acorn to feed swine » XIII^e siècle ; B : Jean Colombe fin du XV^e siècle

Ainsi, les chênes ont été, et sont toujours favorisés souvent au détriment du hêtre qui, en théorie, devrait être l'espèce forestière dominante sur bon nombre d'espaces du plateau Lorrain. En effet, de nombreuses études indiquent que la compétition en condition naturelle entre les chênes et le hêtre tourne presque toujours à l'avantage de ce dernier, en station drainante, puisqu'il présente un plus fort pouvoir de régénération, une croissance initiale plus rapide et, surtout, une plus forte tolérance à l'ombrage (Rameau et al. 1989, Bílek et al. 2009, Silva 2010, Barna 2011, Ligot et al. 2013). Cependant, on observe que le hêtre est aujourd'hui le plus souvent restreint à la marge des peuplements forestiers ou bien en sous-étage de peuplements dominés par les chênes. Les discussions à ce propos avec les acteurs locaux de la gestion forestière sont particulièrement intéressantes car elles révèlent que les chênaies sont considérées comme étant naturellement le stade plus avancé et le plus mature de la dynamique forestière, et donc le plus pertinent territorialement (Discussions

personnelles avec des agents ONF et des techniciens du département Moselle). Pour autant, aucune donnée biologique/écologique historique ne confirme ce qu'indiquent les sources écrites historiques, ni ne permet de préciser les patrons spatio-temporels de ce « remplacement » du hêtre par les chênes. Sur la base de ce constat, j'ai abordé ce questionnement, en collaboration avec Jean-Luc Dupouey (Silva-INRAE), avec qui j'ai encadré le post-doctorat de Thomas Feiss sur cette thématique de 2017 à 2019 (cf. partie 2.3.1. Projets de recherche). Nous avons réalisé une étude pédoanthracologique sur 18 sites forestiers, et 36 points de prélèvements, pour retracer spécifiquement les enregistrements locaux de chênes et de hêtres dans les sols du plateau Lorrain (Figure 40).

Nos résultats, qui se basent sur plus de 5000 identifications de fragments de charbon de bois et 71 datations radiocarbone, mettent en évidence une trame régionale forte caractérisée par une très large dominance des chênes (plus de 57%), et la récurrence du hêtre et du charme, dans les assemblages de fragments de charbon de bois. Cette trame régionale pourrait correspondre à la promotion anthropique généralisée des chênes, et donc à la limitation du hêtre.



Figure 40 | Photos de tranchées pédologiques ouvertes dans des forêts du plateau Lorrain pour des prélèvements pédoanthracologiques (Photos ©V.Robin)

En effet, les données analysées régionalement par PCA montrent que les taxons pionniers, héliophiles, que sont le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et le noisetier (*Corylus avellana*), sont associés à la présence des chênes (Figure 41). Cela semble indiquer que les chênes, également héliophiles, sont liés à l'occurrence de perturbations de l'état forestier. Quand on considère que cet enregistrement en chênes est régional, il semble que la perturbation la plus plausible à cette échelle est l'intervention humaine pour promouvoir les chênes, au détriment du hêtre qui est moins présent mais qui reste récurrent à l'échelle régionale.

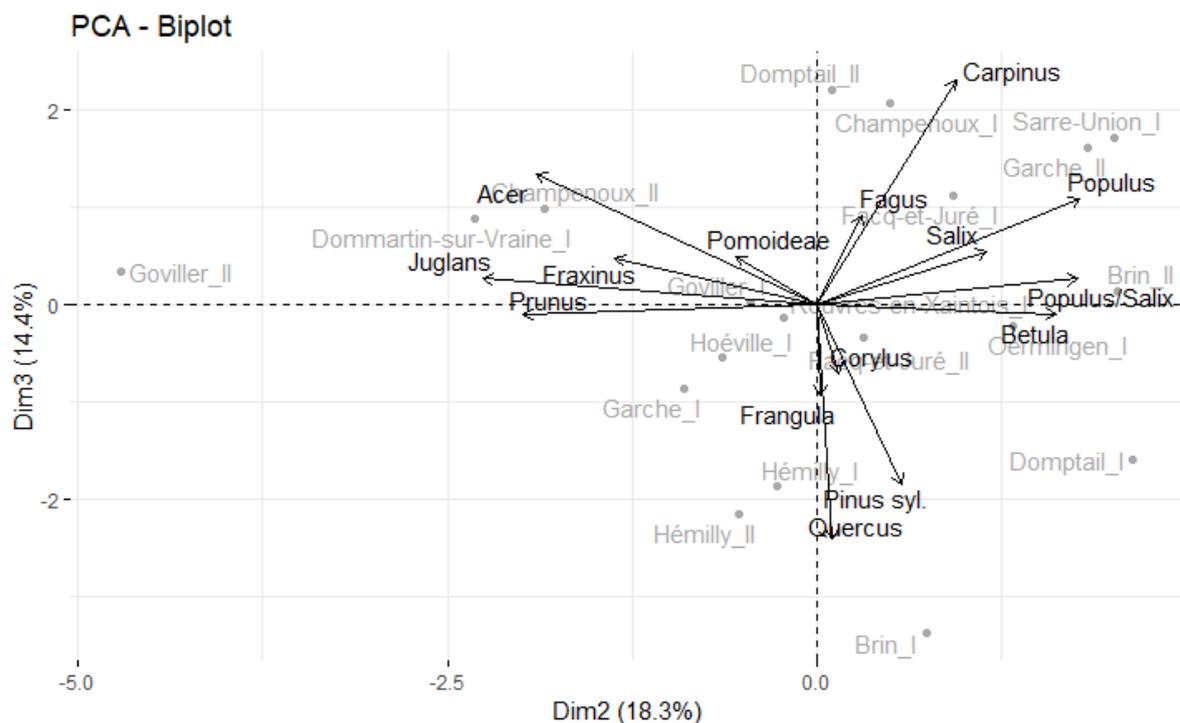


Figure 41 | Analyse en composantes principales des concentrations totales en charbon de bois par taxon identifié (vecteurs en noir) par point de prélèvement (en gris ; Figure ©T.Feiss)

Le ciblage spécifique du chêne par la gestion forestière passée est corroboré par les niveaux d'hétérogénéité des enregistrements des autres taxons identifiés. En effet, à une échelle spatiale fine (station forestière), on observe des enregistrements très divers de site en site, c'est à dire à l'échelle inter-massif forestier du plateau Lorrain, mais également entre les prélèvements au sein d'un même massif (Figure 42). Ces différences locales impliquent diverses espèces forestières pionnières comme l'érable, le bouleau, ou de peuplements forestiers humides (mésos-hygrophiles à hygrophiles) comme les saules, les peupliers, les frênes, certainement présentes localement en

réaction à des changements/contraintes de station, a priori environnementales (e.g., ouverture de la canopée, affleurement de nappe, etc.). Pour autant ces contraintes stationnelles ne sont peut-être pas exclusivement naturelles comme l'indique la présence d'espèces classiquement liées à l'anthropisation des écosystèmes forestiers tel que les pomoidés, le noisetier, les noyers, etc. (Figure 42).

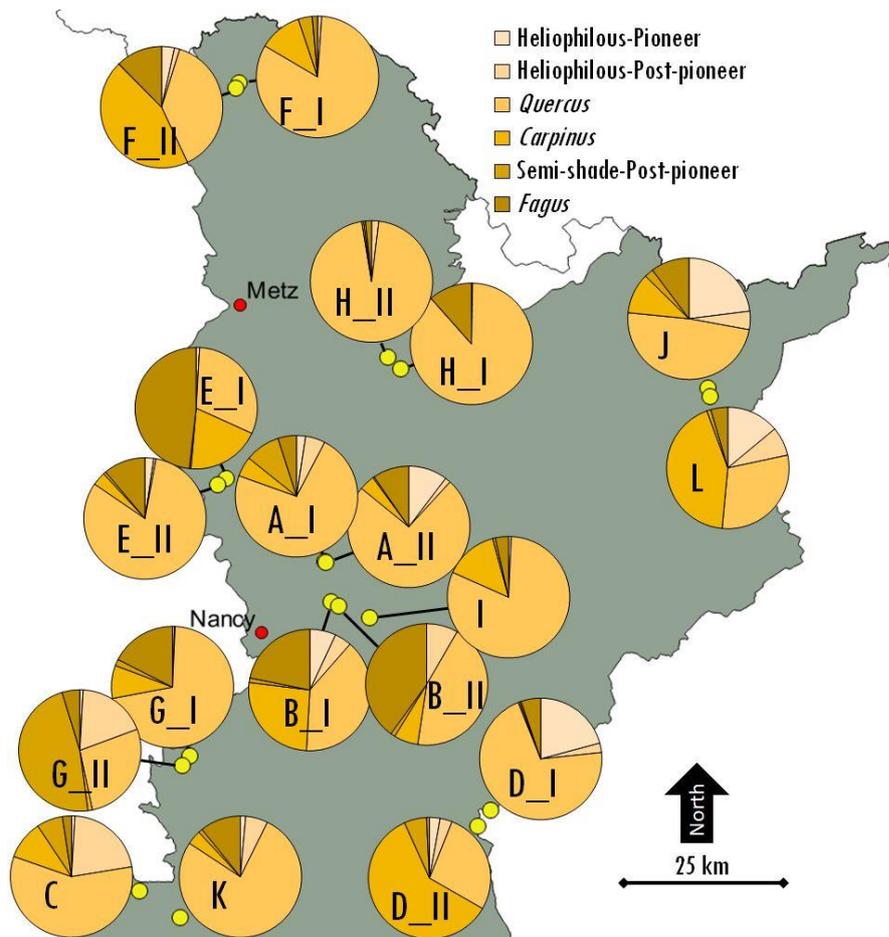


Figure 42 | Résultats locaux des analyses taxonomiques des assemblages pédoanthracologiques des sites d'étude sur le plateau Lorrain (Figure ©V.Robin)

Chronologiquement, le rôle de l'homme dans les trajectoires des forêts tempérées décidées de basse altitude s'avère plus ancien que ce que l'on pensait jusqu'à maintenant, avec une substitution des hêtres par les chênes dès le début de l'Antiquité. On observe aussi que le hêtre est présent avec les chênes, à l'échelle régionale, de façon continue depuis le début du Moyen Âge.

Ainsi, les forêts du plateau lorrain semblent avoir franchi des seuils de résistances, et avoir été maintenues dans un « état anthropisé », post-changement, depuis plusieurs millénaires. Elles semblent aussi avoir conservé certaines capacités de résilience avec le maintien, encore actuel, du hêtre, et la présence de certaines espèces qui sont

adaptées aux conditions locales de station. Il semble donc que les forêts tempérées feuillues du plateau Lorrain ont gardé un niveau intéressant de résilience potentiel, ou d'adaptabilité. Pour autant nous n'allons pas considérer que le stade forestier résilient potentiel à promouvoir est la hêtraie puisque nous savons que celle-ci s'avère sensible au réchauffement climatique en cours (Badeau et al. 2004, Landmann et al. 2008, Badeau et al. 2010). Ici les modèles prédictifs sont des indicateurs cruciaux pour les choix de gestion. Ils seront d'autant plus pertinents et solides qu'ils incluront des données rétrospectives (Anderson 1995, Anderson et al. 2006, Henderso et al. 2009, Hegerl & Russon 2011, Maguire et al. 2015, Monsarrat et al. 2019), comme par exemple ici les trajectoires respectives des chênaies et de la hêtraie sur le plateau Lorrain, ou encore, comme dans le cas d'étude précédente, l'origine et la trajectoire des milieux ouverts.

4. Volet prospectif : orientations futures

Mon projet scientifique vise à renforcer mon ancrage dans le champ de l'écologie historique, sur la base conceptuelle et méthodologique que j'utilise depuis une dizaine d'années (cf. partie 3. Positionnement conceptuel et méthodologique).

Pour cela, je souhaite développer mes recherches selon une double approche. D'une part une approche conceptuelle que je qualifie « d'écologie rétro-fonctionnelle » et d'autre part une approche méthodologique que je qualifie « d'intégrative ».

4.1 Développements rétro-fonctionnels

La paléoécologie s'intéresse classiquement à la composition et à la structure des peuplements/écosystèmes du passé, et plus rarement au fonctionnement, même si un nombre grandissant de travaux existe (e.g., Dreibrodt & Wiethold 2014, Dendievel et al. 2019). Plus spécifiquement, les analyses paléolimnologiques s'intéressent depuis plusieurs décennies à l'histoire fonctionnelle des lacs et des étangs par l'étude de leurs sédiments et des indicateurs qu'ils peuvent contenir (e.g., Anderson 1995, Lotter & Birks 2003, Laperrière et al. 2009, Mariet et al. 2018). Mais en dehors des écosystèmes lacustres ou des zones humides, assez peu d'études « paléo » s'intéressent au fonctionnement passé des écosystèmes (van Breeman & Wright 2004, Birks & Birks 2006). De la même façon, peu d'études cherchent à identifier des références et/ou des héritages fonctionnels sur l'état actuel de fonctionnement des écosystèmes alors même que les approches rétro-fonctionnelles semblent être des plus pertinentes pour répondre à certains défis socio-environnementaux de conservation, restauration, gestion durable des ressources naturelles et des écosystèmes (e.g., Foster 2002a, Willis et al. 2007, Seddon et al. 2011, Birks 2012). Par exemple, à partir de l'analyse d'indicateurs chronologiques (datations C¹⁴), sédimentologiques (e.g., perte au feu, granulométrie), géochimiques (composition élémentaire) et biologiques (ADN de plantes et mammifères) issus d'archives lacustres (carottages) et d'archives sédimentaires terrestres dans le bassin versant du lac de Gers en Haute-Savoie, Bajard et al. (2020) ont mis en évidence sur 4600 ans d'enregistrement, 127 dépôts sédimentaires soudains, dont 93 identifiés comme des dépôts de crues. Les événements de crues et d'érosions les plus anciens semblent liés aux péjorations climatiques abruptes de l'Holocène moyen (i.e., 8.2 ka - 4.2 ka ;

Walker et al. 2018). Par ailleurs, les auteurs ont également observé au cours de l'Holocène récent (i.e., 4.2 ka – Présent), des périodes de colluvionnement important lié au déboisement dans le bassin versant synchrones avec les dépôts sédimentaires lacustres de crues datés entre 1900 et 1750 ans cal. BP d'une part, et 900 et 400 ans cal. BP d'autre part (Figure 43).

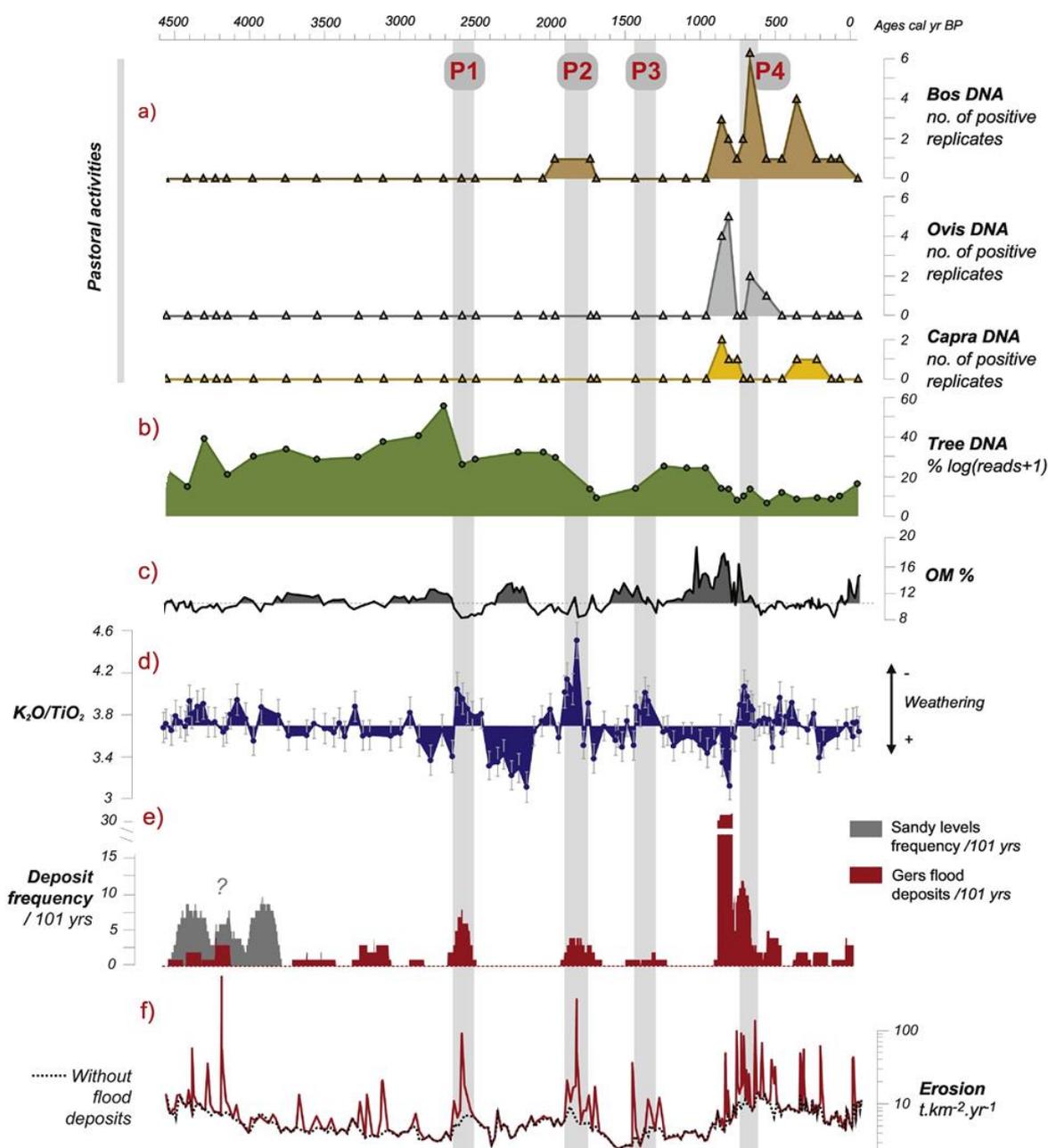


Figure 43 | Indicateurs des changements environnementaux du lac de Gers et de son bassin versant : a) traces d'ADN des espèces d'élevage; b) traces d'ADN des espèces d'arbres; c) taux de matière organique; d) ratio oxyde de potassium (K_2O) / Dioxyde de titane (TiO_2), indicateur de sédimentation lacustre ; e) taux de sédimentation ; f) taux d'accumulation érosive [P1 a P4 sont les principales périodes de crues & d'érosions identifiées ; modifié d'après Bajard et al. 2020]

Ces périodes correspondent à l'époque romaine et au Moyen Âge qui se caractérisent notamment par un fort impact humain sur les écosystèmes, principalement à travers des déboisements visant à rendre plus de terres propices au pastoralisme (Zolitschka et al. 2003, Nielsen et al. 2012).

Des signaux similaires ont été mis en évidence par Brisset et al. (2017) à partir d'une étude du lac d'Allos, dans les Alpes-de-Haute-Provence basée sur une analyse interdisciplinaire d'enregistrements sédimentaires. Les auteurs ont ainsi montré que les déboisements dans le bassin versant seraient une cause directe de l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des crues à partir de c. 1700 ans cal. BP. De telles études, nous enseignent qu'au cours des 2000 ans passés, les régimes de crues ont été influencés par les pratiques humaines, suite à un point de basculement fonctionnel à l'antiquité. Ce point de basculement correspond au passage d'un seuil à partir duquel les forêts de montagnes ne se sont plus avérées résilientes face aux perturbations anthropiques (i.e., déboisements), situation qui perdure encore actuellement. Ainsi, malgré le recul voire l'abandon du pastoralisme dans de nombreux territoires ruraux, la dégradation passée des sols (qui induit la présence actuelle de sols pauvres et peu évolués), combinée aux contraintes climatiques de montagnes, limite la recolonisation forestière. Il apparaît donc particulièrement intéressant et important de comprendre que ce sont précisément des facteurs de péjoration des déboisements anciens, qui maintiennent la trajectoire post-déboisements comme héritage. Par conséquent, les déboisements anthropiques anciens de plusieurs millénaires influencent encore aujourd'hui le régime de crue. Cet héritage fonctionnel doit nécessairement être pris en compte pour définir les stratégies d'aménagement et de gestion des risques socio-environnementaux face aux aléas environnementaux, comme le suggère Garnier (2019). D'autant plus quand on considère les tendances actuelles à la hausse des événements climatiques extrêmes (Figure 44A) et leurs conséquences, notamment économiques, pour la société (Figure 44B ; Décamps 2010, IPCC 2012).

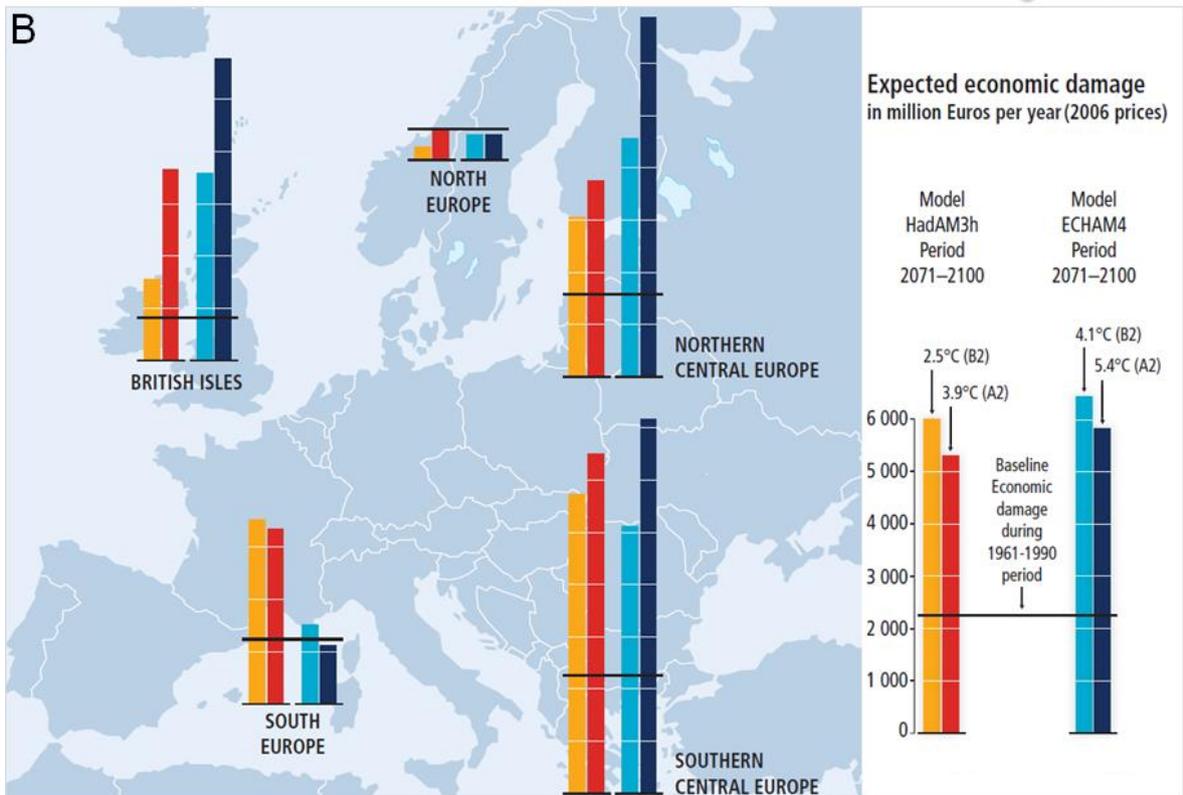


Figure 44 | Observations des évènements de extrêmes de pluviométrie, avec A : intensité des pluies extrêmes en région méditerranéenne [valeurs selon une référence moyenne de 1961-1990 ; courbe : moyenne mobile centrée sur 11 ans – data Météo France], B : prévision des dommages économiques dûs aux inondations pour la période 2071-2100 (modifié d'après IPCC 2012)

Ces travaux paléo-environnementaux illustrent bien l'importance des approches rétro-fonctionnelles pour acquérir des connaissances qui permettent d'appréhender au mieux les changements passés et les héritages possibles sur le fonctionnement des socio-écosystèmes actuels. Cette observation motive le développement de mes recherches vers une approche « d'écologie rétro-fonctionnelle ». C'est-à-dire l'analyse rétrospective du fonctionnement des écosystèmes, l'identification d'états fonctionnels de références et d'héritages fonctionnels dans les écosystèmes actuels.

Il s'agit de s'inspirer des questionnements et approches analytiques de l'écologie fonctionnelle pour aborder l'étude des changements passés de fonctionnement d'un système écologique. Pour faire cela, je souhaite utiliser les outils/indicateurs « phyto-historiques » (cf. partie 3.2 Outils et indicateurs rétrospectifs) dans un cadre interdisciplinaire qui inclurait des approches de géochimie et/ou de microbiologie. Cela consisterait à coupler des données de paléo-/histoire écologique avec des données de géosciences et/ou de paléolimnologie. Ce type de développement interdisciplinaire a été identifié comme un enjeu des approches paléoécologiques (Birks & Birks 2006). J'ai récemment amorcé ce développement avec des collègues du LIEC (Anne Poszwa, Laurence Mansuy-Huault, et François Guérol) dans le cadre de projets de recherche en cours dans les Vosges du Nord (Projets CharPyBi & NUTCAP, cf. partie 2.3.1. Projets de recherche). Dans ce territoire, de moyenne montagne gréseuse, la production de charbon de bois au cours des trois derniers siècles a laissé un nombre important de plateformes de charbonnages (i.e., héritage topographique ; Figure 29). Ces plateformes de charbonnage forment des niveaux de « cendres/charbons » dans les sols actuels (Robin 2018). Nous cherchons actuellement à évaluer si ces niveaux de sols anthropisés, qui résultent donc de pratiques historiques, peuvent être des puits et/ou des sources de nutriments, comme cela a été observé dans d'autres contextes (Gómez-Luna et al. 2009, Hardy et al. 2016, Hirsch et al. 2017, Ajiboye et al. 2019). De plus, pour les écosystèmes particuliers que sont les têtes de bassins versants, nous cherchons à identifier si cette pratique historique de production de charbon de bois a eu, et a encore, des conséquences fonctionnelles à travers des transferts d'éléments via une dynamique charbonnières-sol-végétation et/ou charbonnières-sol-cours d'eaux (Figure 45).

Dans ce travail, il s'agit donc d'évaluer les éventuels héritages fonctionnels géochimiques/pédologiques du charbonnage historique dans les écosystèmes des Vosges du Nord, sur sols sableux. Cette analyse se base sur des travaux anthracologiques des charbonnières réalisés dans le cadre du doctorat de David Gocel-Chalté et du post-doctorat de Hannes Knapp (Gocel-Chalté et al. 2020).

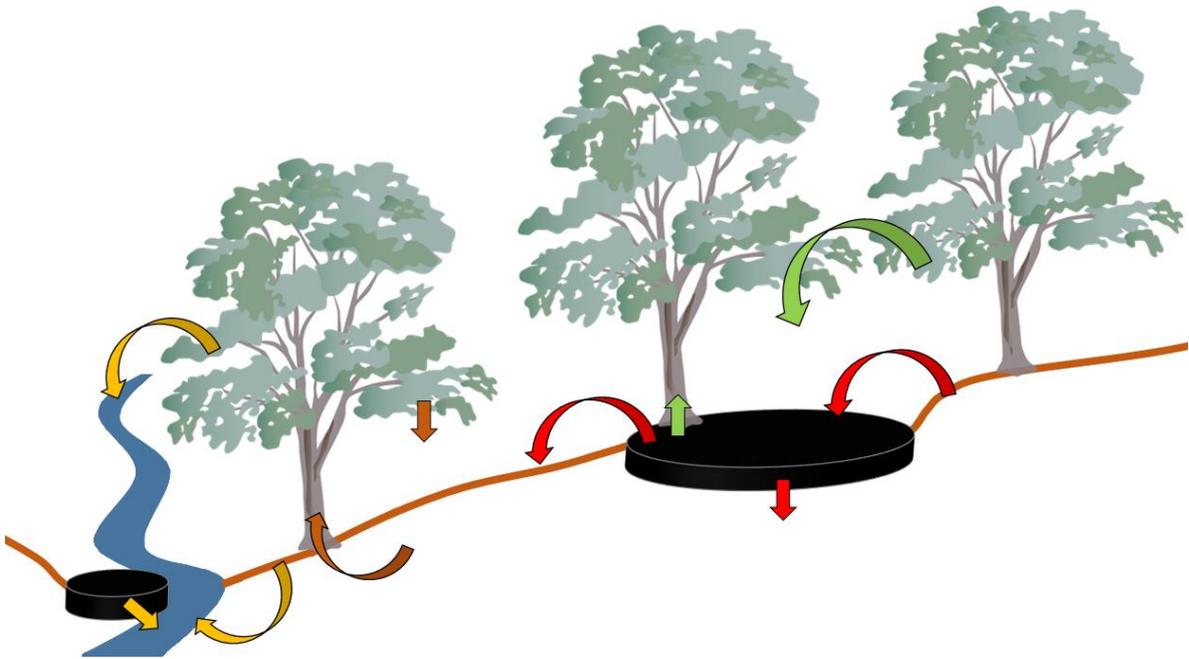


Figure 45 | Evaluation des possibles transferts charbonnières-sol-végétation dans le cadre de nos recherches sur les héritages fonctionnels dans les écosystèmes forestiers suite à la production de charbon de bois au cours des trois derniers siècles (en rouge les transferts sols/charbonnières, en vert les transferts charbonnières/végétation, en marron les transferts sols/végétation, en orange les transferts sols/charbonnières/végétation/rivière).

Sur chaque charbonnière il est prélevé des échantillons de sols, du niveau noir-cendré issu du charbonnage (Figure 46A), et du niveau pédologique dessous celui-ci. Il est également prélevé des échantillons de sols sur des fosses pédologiques hors charbonnière à une dizaine de mètres en amont et en aval de celle-ci. Ces échantillons sont analysés pour mesurer des paramètres pédologiques (pH, granulométrie, capacité d'échange cationique, composition élémentaire). Les premiers résultats, pour deux charbonnières, montrent des teneurs en carbone et en calcium légèrement supérieures aux sols adjacents de références qui eux sont pauvres en nutriments et acides (Figure 46B). Le pH dans les niveaux de charbonnage est légèrement plus haut, tout comme les valeurs de capacité d'échange cationique (CEC). Il est donc observé de légers effets positifs du charbonnage sur les propriétés des sols, comparés aux sols « non charbonnés », dans le contexte des sols pauvres, sableux, et acides, des Vosges du nord. Ces résultats restent à être confirmés par plus de mesures. De plus, nous prévoyons d'évaluer si ces effets positifs, s'ils sont validés, sont aussi présents dans d'autres contextes pédologiques, par exemple dans des sols riches en nutriments.

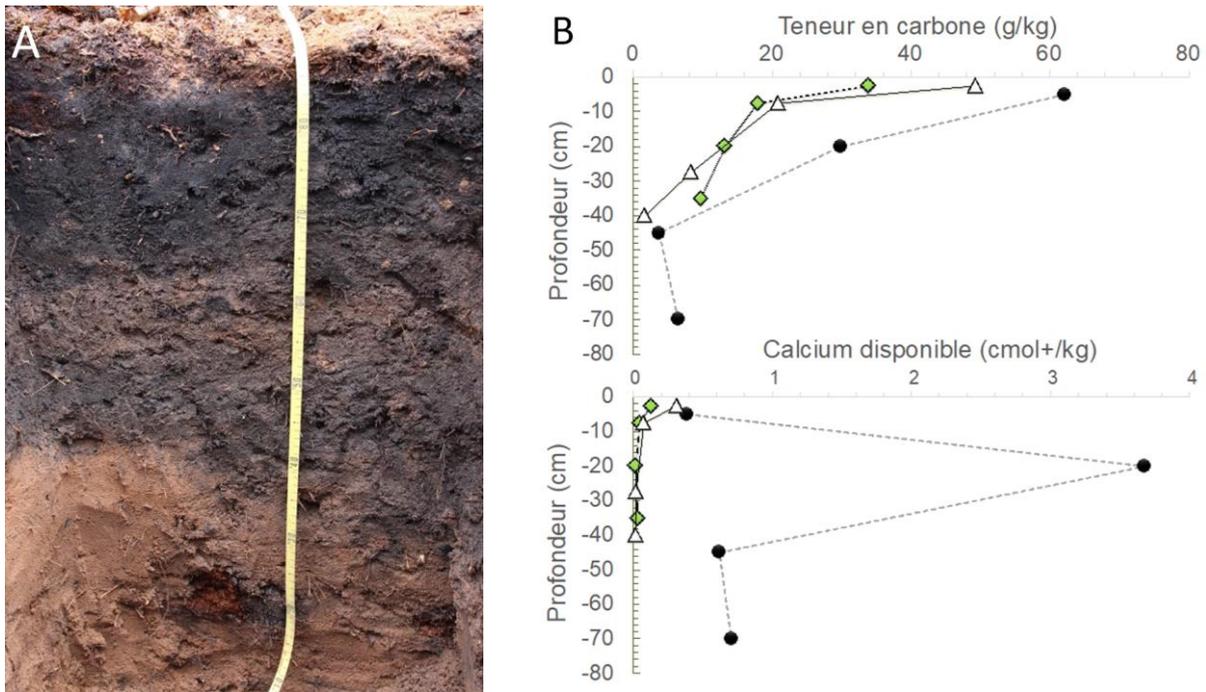


Figure 46 | Analyses pédologiques sur et à proximité des charbonnières. A : profil pédologique d'une charbonnière des Vosges du nord (Photo ©V.Robin) ; B : Résultats des mesures en carbone et calcium d'une charbonnière (points noirs) et des sols en amont (losanges verts) et en aval (triangles blancs) ; analyses et graphiques Anne Poszwa

Par ailleurs, pour évaluer de possibles transferts d'éléments depuis les charbonnières vers la végétation, nous cherchons à évaluer si les teneurs en élément minéraux des feuilles sont différentes en fonction de leurs distances aux charbonnières. Pour cela nous avons échantillonné dans le périmètre de 18 charbonnières, des feuilles sénescentes de hêtre (collectées sur l'arbre au moment de leur abscission ; Figure 47A). Le hêtre (*Fagus sylvatica*) est une espèce courante dans les têtes de bassin des Vosges du nord et couramment utilisée pour la production de charbon de bois ; Gocel-Chalté et al. 2020). Ces feuilles ont été séchées et broyées. Les teneurs en C, N, P, Ca et Mg des broyats de chaque échantillon ont été mesurées pour sept charbonnières d'un même bassin versant. Ces premiers résultats nous indiquent un patron de distribution spatiale significatif des teneurs en phosphore. Nous observons avec une diminution significative de la teneur en phosphore dans les feuilles en fonction de l'éloignement depuis les charbonnières (Figure 47B). Ces résultats restent à confirmer à partir des échantillons en lien avec 11 charbonnières d'un autre bassin versant des Vosges du nord. Les analyses sont en cours.

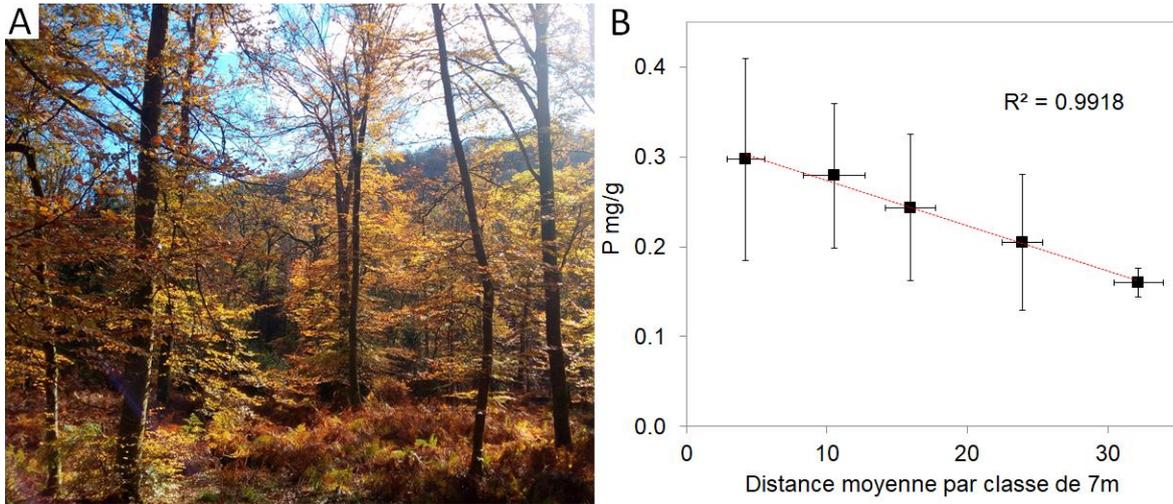


Figure 47 | Analyses des teneurs en phosphore de feuilles sènescentes de hêtre (A : *Fagus sylvatica*) pour sept charbonnières, par classe de distance (B)

Les enregistrements en phosphore restent à évaluer précisément dans les sols et dans les charbonnières afin d'évaluer s'il y a un enrichissement en phosphore de l'échelle locale au bassin versant. En effet, David Gocel-Chalté montre dans son doctorat (dont je suis co-directeur, avec François Guérold) des concentrations en phosphore (PO₄) dans les cours d'eau (Figure 48A) différentes selon la densité de charbonnière dans 13 bassins versants et sous bassins versants dans les Vosges du nord. Ces concentrations sont significativement plus élevées dans les secteurs qui présentent de plus hautes densités de charbonnières (Figure 48B).

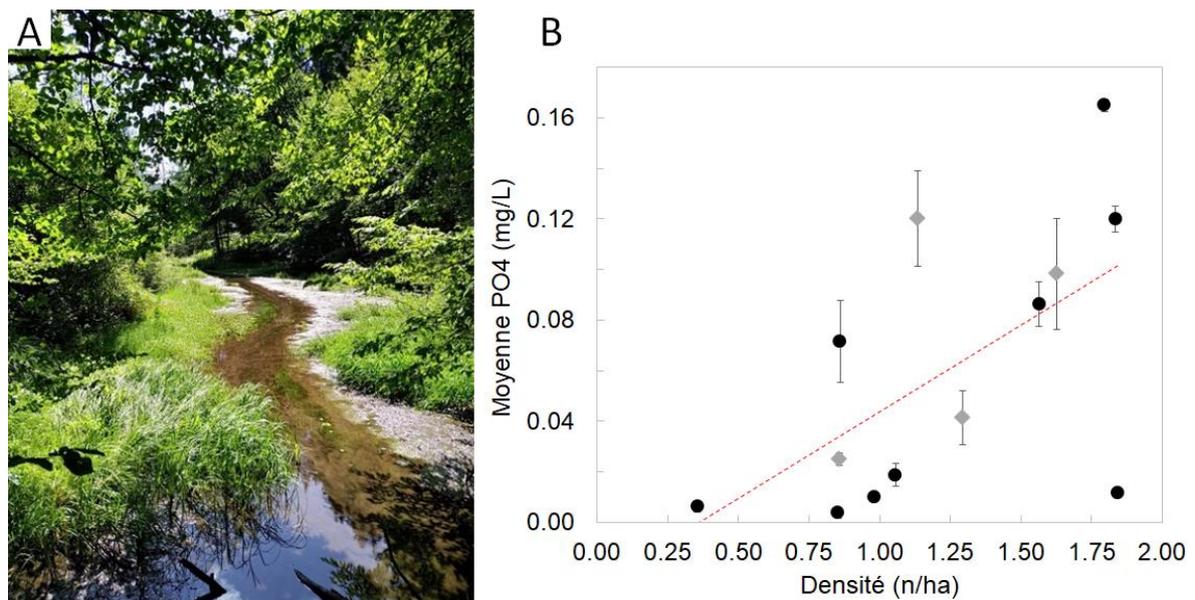


Figure 48 | Concentrations moyennes en orthophosphates (PO₄) des stations de prélèvements sur huit cours d'eau des Vosges du Nord (A), en fonction de la densité spatiale en charbonnière dans le secteur correspondant au sous bassin versant à l'amont de chaque station de prélèvement sur les cours d'eau. Les losanges gris sont les stations de prélèvements situées à l'aval d'étangs, qui peuvent être influencées par ceux-ci (B ; Mesures et graphique David Gocel-Chalté)

Par ailleurs, une conséquence potentielle des héritages fonctionnels des charbonnages historiques peut concerner des modifications des patrons de biodiversité des écosystèmes. Il a par exemple été observé dans le centre de l'Espagne par González-De Linares et al. (2013) un développement marqué et durable d'espèces forestières pionnières suite à la production de charbon de bois. Pour évaluer si de tels héritages existent sur la végétation actuelle des anciens sites de charbonnage, nous réalisons actuellement avec des collègues écologues forestiers du laboratoire SILVA (Jean-Luc Dupouey et Pierre Montpied), des analyses comparatives de compositions végétales et de mesures dendrométriques en lien avec le charbonnage. Ces analyses sont réalisées d'une part à l'échelle du massif forestier en comparant des zones de fortes densités en charbonnières avec des zones présentant peu ou pas de charbonnières (projet SylvaCharb, cf. partie 2.3.1. Projets de recherche) et, d'autre part, à l'échelle locale le long de gradients de distance par rapport à des charbonnières. Cette dernière approche sera réalisée dans le cadre du doctorat de Claudia Oliveira, que je co-dirige avec Simon Devin (projet DEEPSURF, cf. partie 2.3.1. Projets de recherche). La zone d'étude de ces travaux se situe dans le sud de la Meuse, dans le Barrois, sur des sols limoneux-calcaires. Dans ce secteur nous réaliserons également des prélèvements et analyses pédologiques pour caractériser l'influence et l'héritage du charbonnage sur les sols à l'instar des analyses en cours dans les Vosges du nord, mais donc dans un contexte pédologique et topographique bien différent.

Un autre domaine important de développement de l'approche rétro-fonctionnelle que je souhaite mettre en place consiste à étudier les pollutions historiques. Celles-ci sont définies d'après Rotolo (2017) et Centonze & Manacorde (2017), comme la présence de contaminants issus de sources complexes et multifactorielles, liée à la production et/ou aux déchets industriels et domestiques, susceptibles de causer des dommages à la santé humaine et à l'environnement. Ces pollutions historiques peuvent intervenir dans le temps de manière statique (et donc constituer une perturbation d'un état écologique de référence), ou de manière dynamique (et donc constituer un héritage dans les trajectoires écologiques). L'échelle de temps d'une pollution historique correspond à la temporalité des dommages qu'elle induit (autant sur l'environnement que sur la santé). Ainsi, l'échelle de temps d'une pollution historique dépend du type de contaminant, en particulier de son effet dose-réponse. Les pollutions

contemporaines ne sont pas déconnectées des pollutions historiques puisqu'elles peuvent en constituer un héritage ancien, ou être dans la continuité d'une pollution historique. En terme de fonctionnement des écosystèmes, ces pollutions sont potentiellement d'importantes sources de perturbation. Par exemple, dans les Vosges, sur la commune de Sainte-Marie-aux-Mines, Mariet et al. (2016) mettent en évidence par des analyses combinées en palynologie et géochimie sur des échantillons de carottes de tourbe, une corrélation entre la composition des communautés herbacées locales et la présence en éléments traces métalliques au cours des périodes d'activité minière dans le secteur (16-17ème siècle et début du 20ème siècle ; Figure 49).

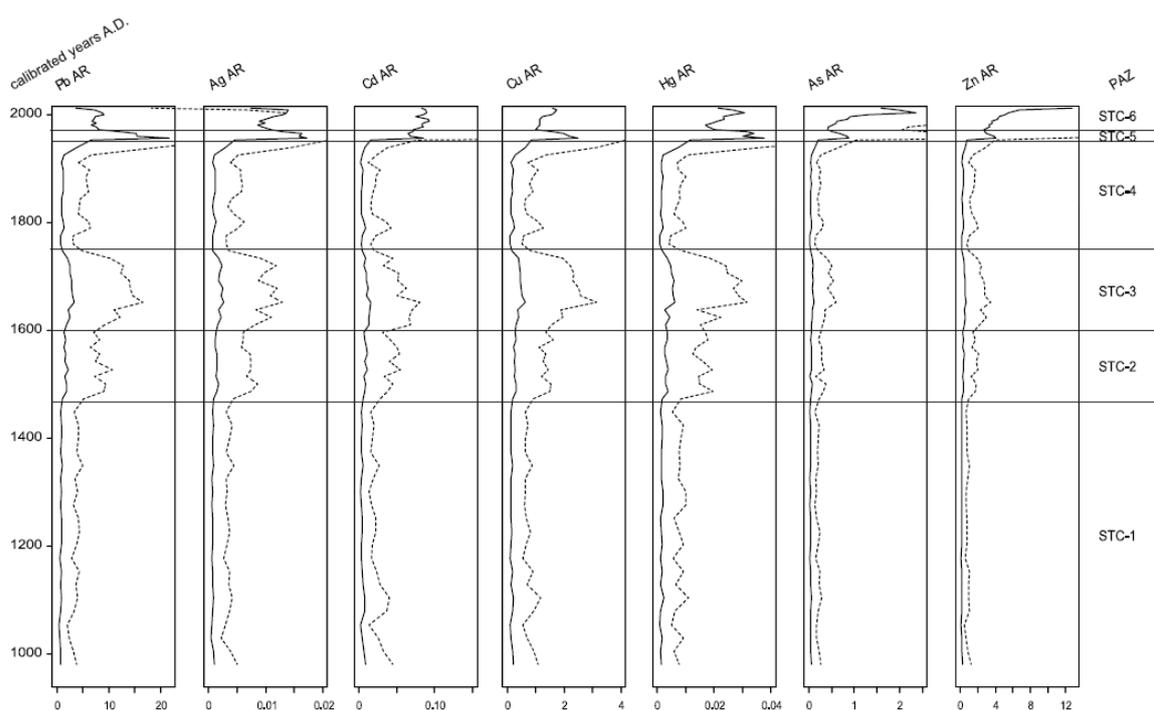


Figure 49 | Enregistrement des éléments traces métalliques sur la carotte de tourbe de « Le Hury » (Résultats en $\mu\text{g}^2/\text{an}$; d'après Mariet et al. 2016)

De façon plus générale, un assez grand nombre d'études abordent les pollutions liées à l'activité minière passée (e.g., Leblanc et al. 2000, Monna et al. 2000, Breitenlechner et al. 2010, Baron et al. 2013). Ces pollutions concernent principalement des contamination minérales (métaux traces) mais peu d'entre elles traitent de pollutions organiques⁷. Pour autant, ces pollutions sont particulièrement intéressantes car elles constituent des marqueurs forts et directs des activités humaines, et en particulier du développement socio-économique (e.g., hausse des émissions de carbone dans

⁷Une pollution organique est une pollution chimique dont l'agent est un contaminant carboné.

l'atmosphère ; Figure 50 ; Kaplan et al. 2011, Regnier et al. 2013), à tel point que ces signaux sont proposés pour définir le début de l'anthropocène (e.g., Lewis & Maslin 2015, Cong et al. 2016, Stocker et al. 2017).

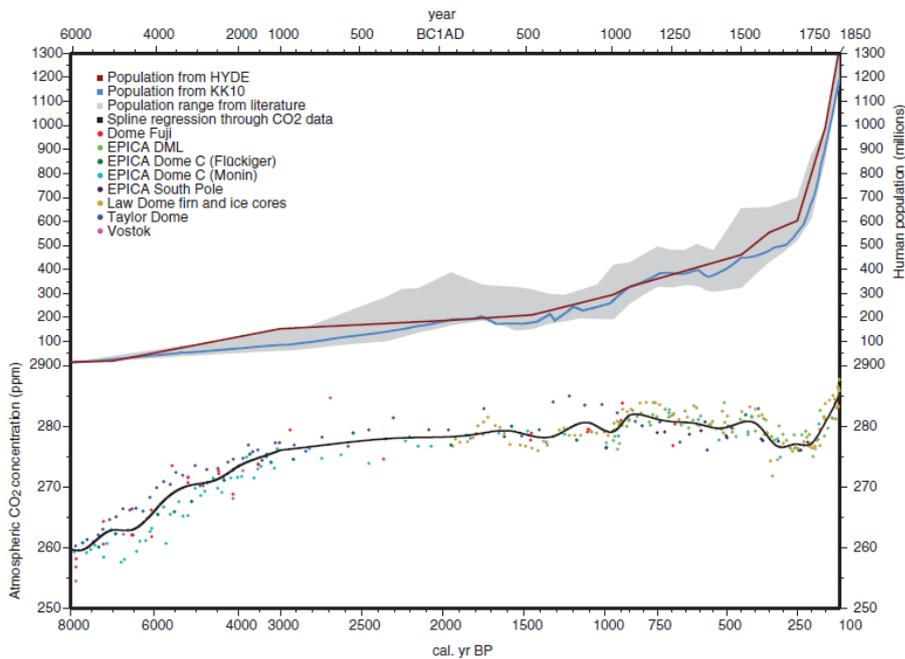


Figure 50 | Evolution de la démographie humaine planétaire (à partir des bases de données KK10 et HYDE) et de la concentration atmosphérique en CO₂ (à partir des mesures de référence sur des carottes de glaces polaires) de 8000 à 1850 années cal. BP (d'après Kaplan et al. 2011)

Parmi ces marqueurs de pollution organique les composés aromatiques polycycliques (CAP), et en particulier les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP ; Leoz-Garziandia 2000), peuvent être utilisés comme marqueurs pour retracer l'impact anthropique actuel et passé (Barbosa et al. 2006, Vane et al. 2011, Bertrand et al. 2012, Le Meur et al. 2017, Chang et al. 2018) car ils résultent directement de combustions, qui elles-mêmes sont liées aux activités humaines (Carcaillet et al. 2002, Power et al. 2010). En effet les HAP, par exemple l'anthracène ou le naphthalène, sont des composés organiques qui proviennent de la combustion incomplète (sources pyrolytiques) de matières organiques telles que le bois ou des carburants (Biache et al. 2014).

Ainsi, en lien avec les recherches réalisées sur les charbonnières et suite au constat de la récurrence de cette activité de l'échelle locale à l'échelle régionale, nous cherchons à identifier et quantifier un signal CAP/HAP propre au charbonnage. Sur les charbonnières des Vosges du Nord échantillonnées pour les analyses pédologiques présentées précédemment, ainsi que pour les échantillonnages de sols à venir dans le sud de la Meuse, des analyses moléculaires de la matière organique ont été réalisées pour quantifier les teneurs en CAP dans les charbons, les charbonnières et

les sols à proximité. Les premiers résultats indiquent que les teneurs en CAP sont peu différentes dans les sols de charbonnières et hors charbonnière. Néanmoins, les stocks de CAP sont plus élevés dans les charbonnières principalement parce que les charbonnières ont des unités organiques plus épaisses que les sols hors charbonnières. De plus, nous notons que le phénanthrène (C₁₄H₁₀) est l'HAP dominant dans les charbonnières. A ce titre il semble être un marqueur pertinent des héritages d'activités de charbonnage dans les sols. Ce type de signal HAP a d'ailleurs été identifié par Foan et al. (2010) à partir de mesures en HAP sur des mousses dans des secteurs de production historique de charbon de bois en Espagne.

Les signaux CAP/HAP, ainsi que d'autres signaux marqueurs géochimiques organiques (e.g., TOC, BC, LOI, etc.) seront également retracés depuis des enregistrements sédimentaires organiques humides, comme cela a été fait par Bertrand et al. (2012, 2013) sur des séquences organiques de mares forestières du plateau Lorrain. De telles approches seront réalisées dans le cadre de projets de recherche en cours sur ce même plateau lorrain (Projets DistMAB & DEEPSURF, cf. partie 2.3.1. Projets de recherche) et dans les Ardennes (Projet HiFoZHA, cf. partie 2.3.1. Projets de recherche). Pour ces projets, les séquences organiques carottées feront l'objet d'analyses paléobotaniques (i.e., palynologie et anthracologie sédimentaires) et donc d'analyses géochimiques de marqueurs organiques. L'objectif général étant d'évaluer s'il existe des liens de cause à effet entre ces signaux, pour une période donnée, sur les fenêtres de temps couvertes par les différentes séquences (Figure 51).

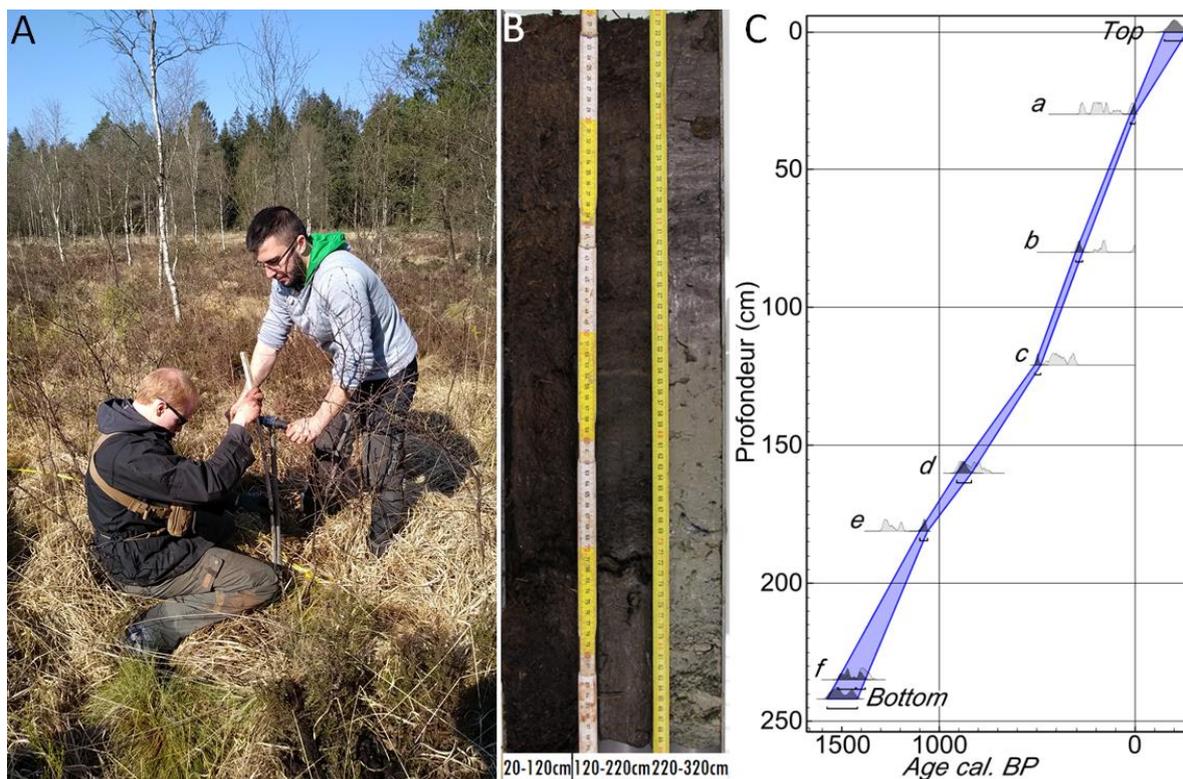


Figure 51 | Illustration des étapes initiales de travail sur des carottes de sédiments organiques ; A : Carottage d'une tourbière dans le nord des Ardennes ; B : séquence sédimentaire d'une mare forestière du plateau Lorrain ; C : Modèle age-profondeur de la séquence sédimentaire montrée en C, fait sur le logiciel Oxcal en âges calibrés avec 2sigma d'intervalle de confiance en *Before Present* (BP : avant 1950) selon la base de données de référence IntCal13 (Photos et figure ©V.Robin)

Pour ces projets les archives ciblées sont des tourbières⁸. Ce sont des archives prioritaires pour mes travaux. D'abord parce que ces milieux sont au centre de forts enjeux de conservation et de restauration face aux défis socio-environnementaux en cours et à venir, à l'échelle locale et globale (Joosten et al. 2012, Taylor et al. 2018, UNEP 2019). En effet, les tourbières sont des milieux particuliers et remarquables en raison du nombre important de services écosystémiques qu'elles assurent et qui sont non transférables à d'autres écosystèmes. Elles jouent un rôle important dans 1) la biodiversité par la présence d'habitats pour des cortèges de faune et de flore spécifiques, 2) le cycle de l'eau (services d'épuration, de réserve hydrique, de régulation des crues et soutien des étiages), 3) les cycles biogéochimiques (services de rétention/transport de sédiments, de séquestration du carbone, archive etc.), 4) la valeur patrimoniale de territoires (services culturel et récréatif). Mais la qualité et la durabilité de ces services dépend de l'état fonctionnel des tourbières. C'est pour cela

⁸Le terme de tourbière est ici utilisé au sens large pour désigner l'ensemble des zones humides qui permettent l'accumulation et la préservation dans le long terme de matière organique (e.g., tourbières haute actives, bas-marais, etc.).

qu'elles suscitent des questionnements importants notamment dans le cadre des changements d'usage des sols et du réchauffement climatique en cours. Ces questionnements sont d'autant plus importants que les tourbières sont des milieux fragiles, particulièrement sensibles, par exemple, aux polluants parce qu'elles se développent dans des bassins d'accumulation et sur des substrats imperméables où peuvent s'accumuler les contaminants (Noble et al. 2017). De plus, ce sont des milieux qui ont souvent été fortement influencés au cours de l'histoire par des activités humaines, en particulier par le drainage, le pâturage, l'exploitation de la tourbe, ou la reforestation (Payette & Rochefort 2001, Cubizolle 2019). Mais les héritages de ces changements passés (qui correspondent souvent à des perturbations écologiques) restent encore mal connus. Ces milieux sont encore, sous bien des aspects, considérés comme étant des « boîtes noires », en particulier pour ce qui est de leur fonctionnement écologique, actuel et passé, en lien avec leur biogéochimie et certains compartiments de leur biodiversité comme les micro-organismes, et notamment les bactéries méthanogènes (e.g., les archées ; Turner et al. 2019). Par conséquent les réponses que les gestionnaires peuvent apporter pour l'optimisation des stratégies de gestion des tourbières restent partielles et limitées. Ainsi, il apparaît nécessaire d'approfondir nos connaissances sur ces milieux pour mieux les comprendre, en vue d'optimiser leur gestion et la durabilité des services qu'elles assurent. C'est un champ d'application de l'approche rétro-fonctionnelle que je souhaite développer. Plus précisément, il s'agit de caractériser la dynamique et le rôle fonctionnel de la biodiversité végétale et microbienne de tourbières face à des forçages environnementaux et anthropiques, en adoptant une approche interdisciplinaire innovante (Figure 52).

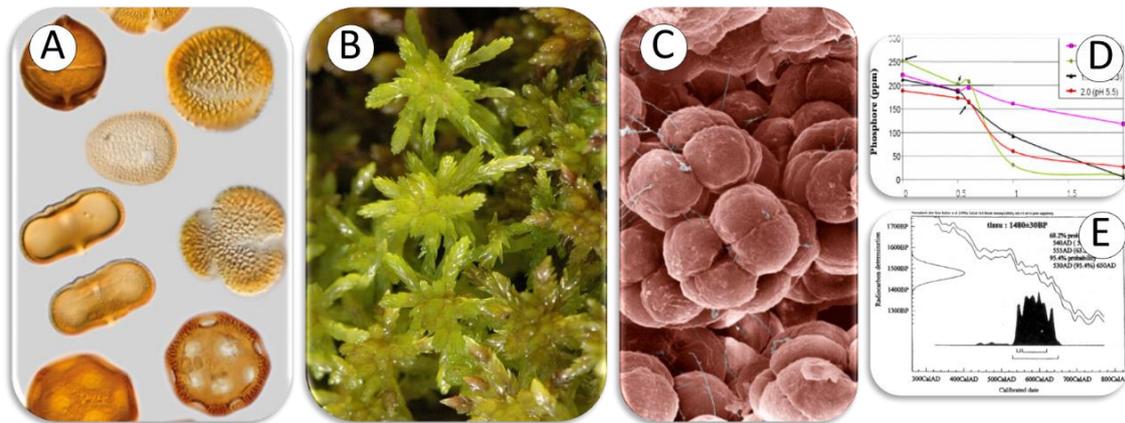


Figure 52 | Représentation de la combinaison interdisciplinaire innovante mise en place pour l'étude rétro-fonctionnelle des tourbières. A : analyses palynologiques ; B : analyses des macro-restes ; C : analyses des micro-organismes ; D : analyses géochimiques ; E : analyses chronologiques fines (radiocarbone et plomb210 ; Images internet libres de droits)

Des travaux ont été amorcés dans cette direction dans le cadre du master de Perrine Florent en 2018 (que j'ai co-encadré avec Pascale Bauda du LIEC) sur des séquences organiques de la tourbière du Katzenbruch dans le camp militaire de Bitche (Projet MéToubMi ; cf. partie 2.3.1. Projets de recherche). Dans ce projet, auquel participent également des collègues du Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques de l'université de Reims (GEGENAA ; Béatrice Marin, Benjamin Cances, Jessy Jaunat) pour les analyses géochimiques, nous cherchons à évaluer les liens potentiels entre histoire et origine (âge) de la tourbe, composition/diversité en micro-organismes, et de possibles pollutions liées à l'activité pyrotechnique militaire sur le secteur qui est une zone d'essai d'artillerie lourde depuis environ 150 ans, et dont la tourbière du Katzenbruch est aujourd'hui le réceptacle central. Les patrons chronologiques des séquences organiques carottées nous indiquent que nous avons des enregistrements sur environ 7000 ans. Les analyses palynologiques sont en cours. Les premiers résultats des analyses microbiologiques nous montrent une quantité en micro-organismes intéressante (i.e., quantité d'ADN microbiologique). Toutefois, il apparaît que les enregistrements en contaminants pyrotechniques ne sont pas évidents. Quelques traces ont été identifiées, mais uniquement en faible dose. D'autres mesures, sur le même secteur sont en cours. Grâce à ces analyses, nous tenterons de mettre en relation les différents signaux étudiés. Cette démarche pourrait représenter une approche méthodologique applicable à d'autres situations par exemple dans le cadre du projet dans les Ardennes précédemment cité, ou encore sur des tourbières remarquables dans les Hautes-

Vosges. Par exemple, je réalise actuellement des analyses palynologiques et sédimentaires sur une séquence organique de la magnifique tourbière de la réserve naturelle nationale de Machais (Figure 53), et des discussions sont en cours avec le Conservatoire d'Espaces Naturels de Lorraine pour des analyses sur d'autres sites.

Finalement, je souligne le fait que les sites de tourbières m'intéressent particulièrement pour mes recherches car ces sites sont des « archives paléoécologiques » qui, comme les « archives sol » ou les charbonnières, permettent potentiellement de travailler sur du temps long et à l'échelle locale (Figure 6, page 16). Ce type d'archive permet d'inscrire mes travaux dans une approche intégrative, ce qui correspond au deuxième axe de développement de mes recherches.



Figure 53 | Tourbière de Machais, Réserve naturelle nationale dans les Hautes-Vosges (Photo ©V.Robin 2018)

4.2 Développements intégratif

L'axe « intégratif » de mon projet vise à développer des outils qui permettront de faire le lien entre les différents niveaux de résolution analytique des outils/indicateurs que j'utilise et de leurs échelles spatiales d'applications. Il s'agit notamment d'acquérir des connaissances en lien avec les enjeux opérationnels/appliqués de gestion plutôt à l'échelle locale. Par exemple l'unité de gestion de base dans les plans d'aménagements de l'ONF est la parcelle, qui est classiquement de l'ordre de quelques centaines de m². Par ailleurs, il s'agit également de pouvoir contextualiser ces données locales dans le cadre des processus macro-écologiques et globaux qui ont influencé les dynamiques écologiques passées et qui influence les dynamiques en cours, et à venir.

L'intégration de mes données rétrospectives dans une dimension spatiale globale se fera par changement d'échelle (i.e., *up/down scaling* ; Houet & Hubert-Moy 2013) à partir de données locales, c'est-à-dire de l'ordre du peuplement forestier ou de la communauté végétale. Dans le cadre de mes recherches, ces données locales sont issues soit de traceurs *in situ* (e.g., séries de cernes de croissance radiale des arbres), soit d'indicateurs macroscopiques enregistrés localement (e.g., les fragments de charbons contenus dans les sols), soit d'indicateurs issus d'archives ne permettant d'enregistrer que, ou en majorité, des signaux locaux (e.g., pollens issus de mares forestières ; cf. partie 3.2 Outils et indicateurs rétrospectifs). Ces données locales sont intégrées à des échelles supra-locales par l'utilisation d'outils numériques qui permettent de les extrapoler/interpoler. Ce type de changement d'échelle est l'objectif spécifique du projet Up and Down en cours (cf. partie 2.3.1. Projets de recherche).

Un premier outil numérique dont j'ai initié le développement pour mes recherches depuis que je suis en poste au LIEC, est l'utilisation de moyens de télédétections et d'analyses géo-spatiales. Ces outils et analyses reposent sur l'acquisition de données sur de grandes surfaces par des prestataires, ou-bien sur des zones plus restreintes par l'utilisation d'un drone spécifiquement équipé. Il s'agit en particulier de l'acquisition de données de lidar⁹ aérien pour la localisation et l'analyse de formes micro/méso-topographiques indicatrices de processus socio-écologiques passés. On cherchera

⁹Les données lidar (pour *light/laser détection and ranging*) correspondent à un ensemble de mesures de distances à partir des « échos et propriétés » d'un faisceau de lumière (laser) entre une zone de contact et un émetteur qui est, dans le cadre de mes recherches, aéroporté.

par exemple à identifier les parcellaires agricoles antiques (Georges-Leroy et al. 2011), les processus passés d'érosion (Bechet et al. 2016), les traces de labours historiques identifiables par la présence de champ bombés (Sittler & Hauger 2013 ; Ce type d'analyse est en cours pour les Vosges dans le cadre du doctorat de Benjamin Keller à l'université de Strasbourg, encadré par Dominique Schwartz et Damien Ertlen du laboratoire LIVE, auquel je collabore – Projet Géo² Grand-Est, cf. partie Projets de recherche ; cf. annexe 4), ou encore les plateformes de charbonnage (Ludemann 2012). Pour cela les données lidar obtenues sous la forme de nuages de points contacts de coordonnées x, y, z, sont transformées en modèle numérique par un traitement numérique qui permettra d'optimiser la mise en évidence des formes ou de faire les mesures souhaitées (Figures 53 & 54 ; Hesse 2010, Stular et al. 2012). L'utilisation de cet outil lidar est extrêmement puissant pour la localisation de formes locales et leur quantification afin de les extrapoler sur de larges échelles spatiales, et ainsi pouvoir extrapoler des mécanismes qui seraient observés sur quelques unités locales, à de plus larges échelles pour les intégrer à des mécanismes supra-locaux (Robert 2013). Par exemple, dans le cadre de l'étude des charbonnières dans les Vosges du Nord, une couverture lidar a été réalisée en 2018 sur 180 km² au sud de la commune de Bitche, centrée sur la commune de Mouterhouse. A partir du modèle numérique de terrain de pentes nous avons localisé 10594 plateformes de charbonnage, soit 59/km² (Figure 55). Dans ce secteur David Gocel-Chalté a mesuré lors de son doctorat, pour 121 charbonnières, une surface moyenne de 69,2 m² et une profondeur moyenne du niveau de charbonnage dans les sols des plateformes de 28 cm, soit un volume moyen de charbonnière de 23 m³. Ainsi nous pouvons estimer que sur l'ensemble des 180 km² couverts par le lidar 0,735 km² de surface de sol et 244 000 m³ de stock de sol présentent potentiellement des propriétés et des contaminations héritées de la production de charbon de bois qui les a impactés au cours des trois derniers siècles. Mais la détection de formes, et leur quantification, peut-être très chronophage et imparfaite si elle reste dépendante de l'œil humain, même sur support digital, notamment quand il s'agit de formes discrètes dans des secteurs de faible relief. Ainsi, pour optimiser l'exploitation des modèles numériques, on peut utiliser des outils d'analyse par intelligence artificielle pour la détection automatique de formes topographiques comme par exemple pour les plateformes de charbonnage (Schneider et al. 2015). Nous travaillons actuellement avec Cédric Pradalier (laboratoire DREAM, Georgia Tech-Lorraine) et Pierre Alexis Herrault

(laboratoire LIVE, université de Strasbourg) à la mise en place d'une méthode automatique de détection de ces plateformes sur les données lidar pour des massifs forestiers dans le sud de la Meuse auxquelles nous avons pu avoir accès dans la cadre du doctorat de Claudia Oliveira (cf. Annexe 5).

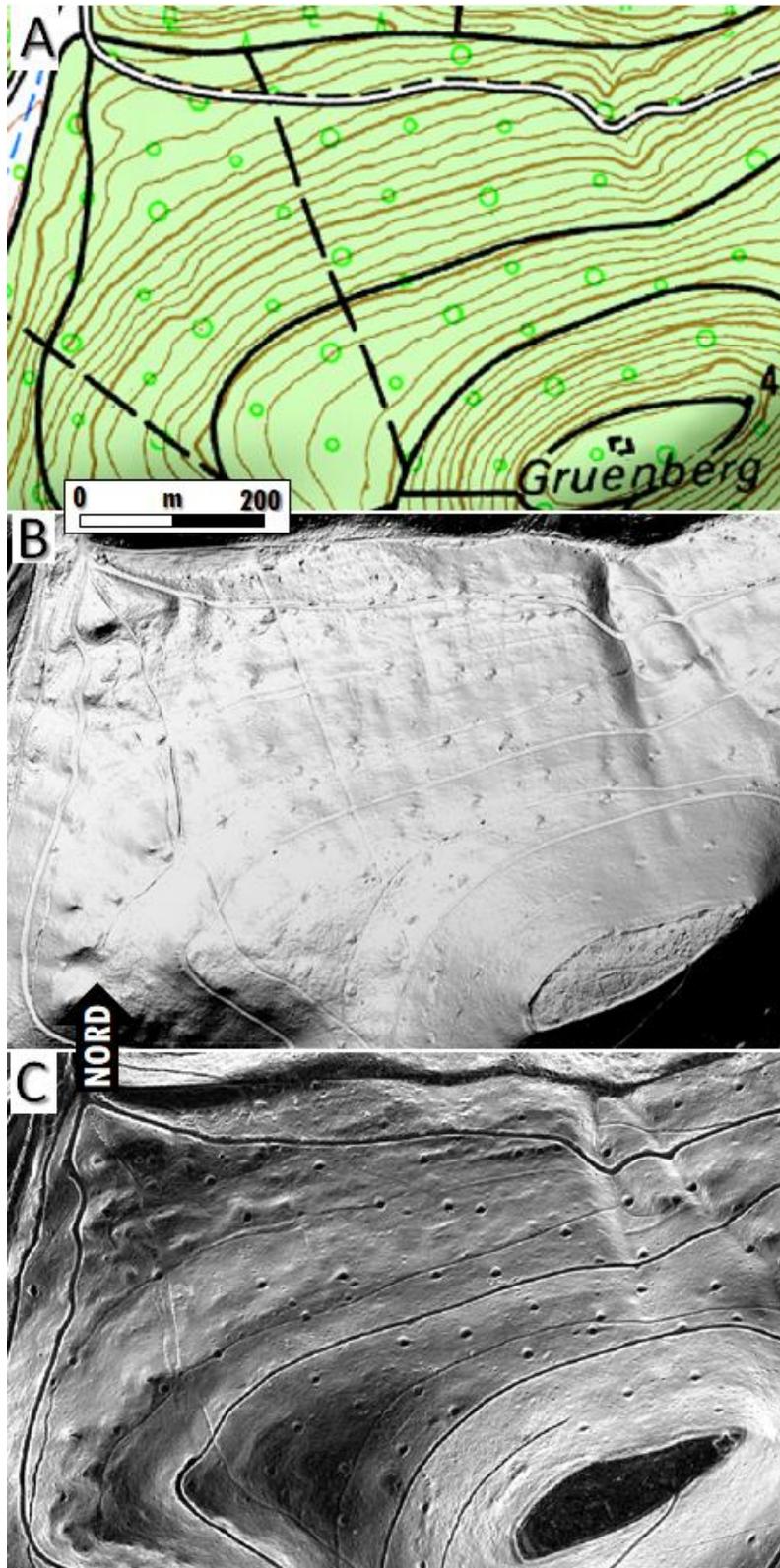


Figure 54 | Exemples de modèles numériques de terrain (MNT) obtenus à partir d'un nuage de points pour un versant du bassin versant du Bitscherthal dans les Vosges du Nord (A ; carte topographique 25000 ©IGN), MNT d'ombrages (B ; orientation de l'éclairage : 315 & altitude d'éclairage : 45) et MNT de pentes (C ; ©LIEC-Université de Lorraine)

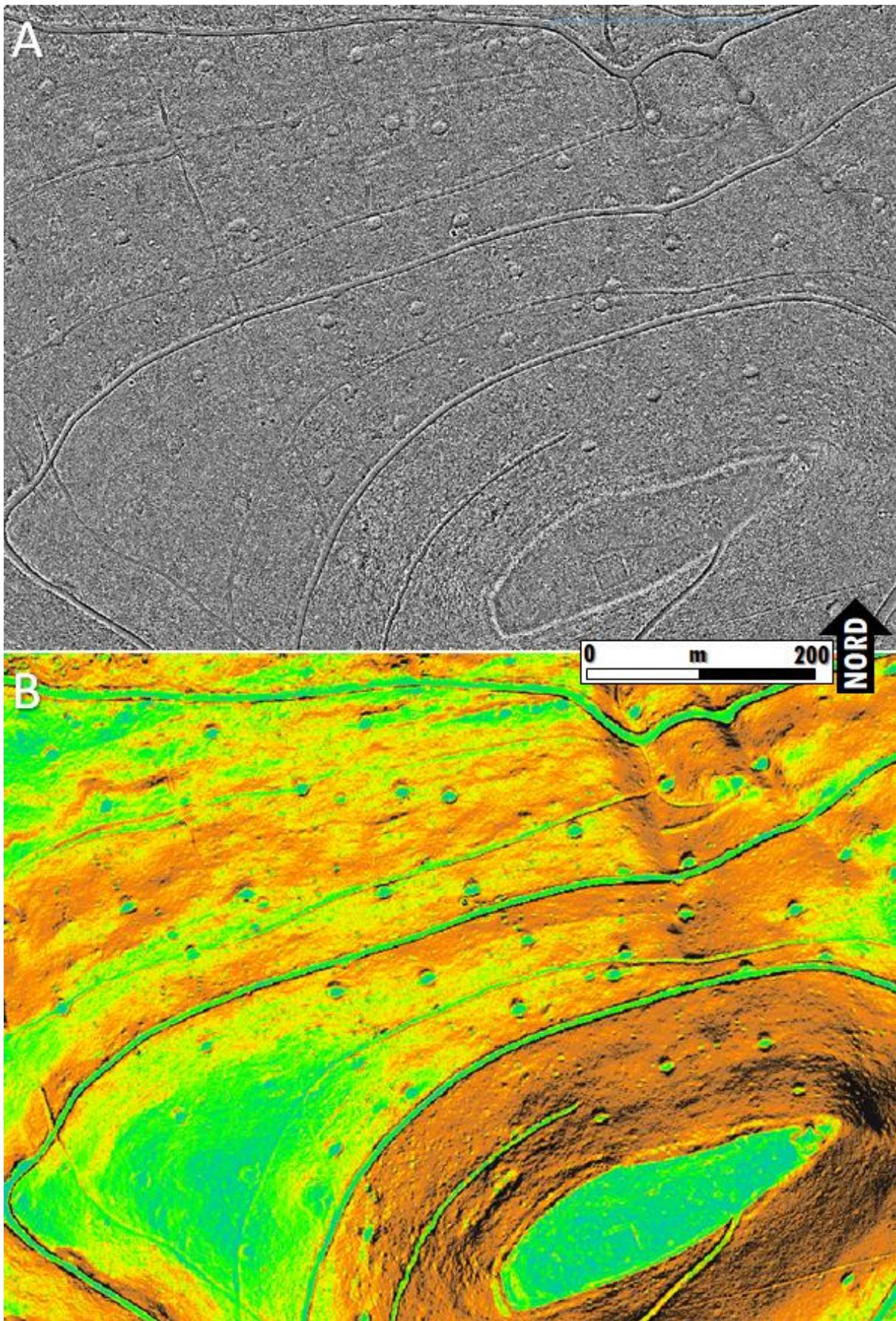


Figure 55 | Exemples de traitements des nuages de points lidar pour optimiser la détection de charbonnières ; A : Index de position topographique (TPI) ; B : MNT pentes colorisées (©LIEC-Université de Lorraine)

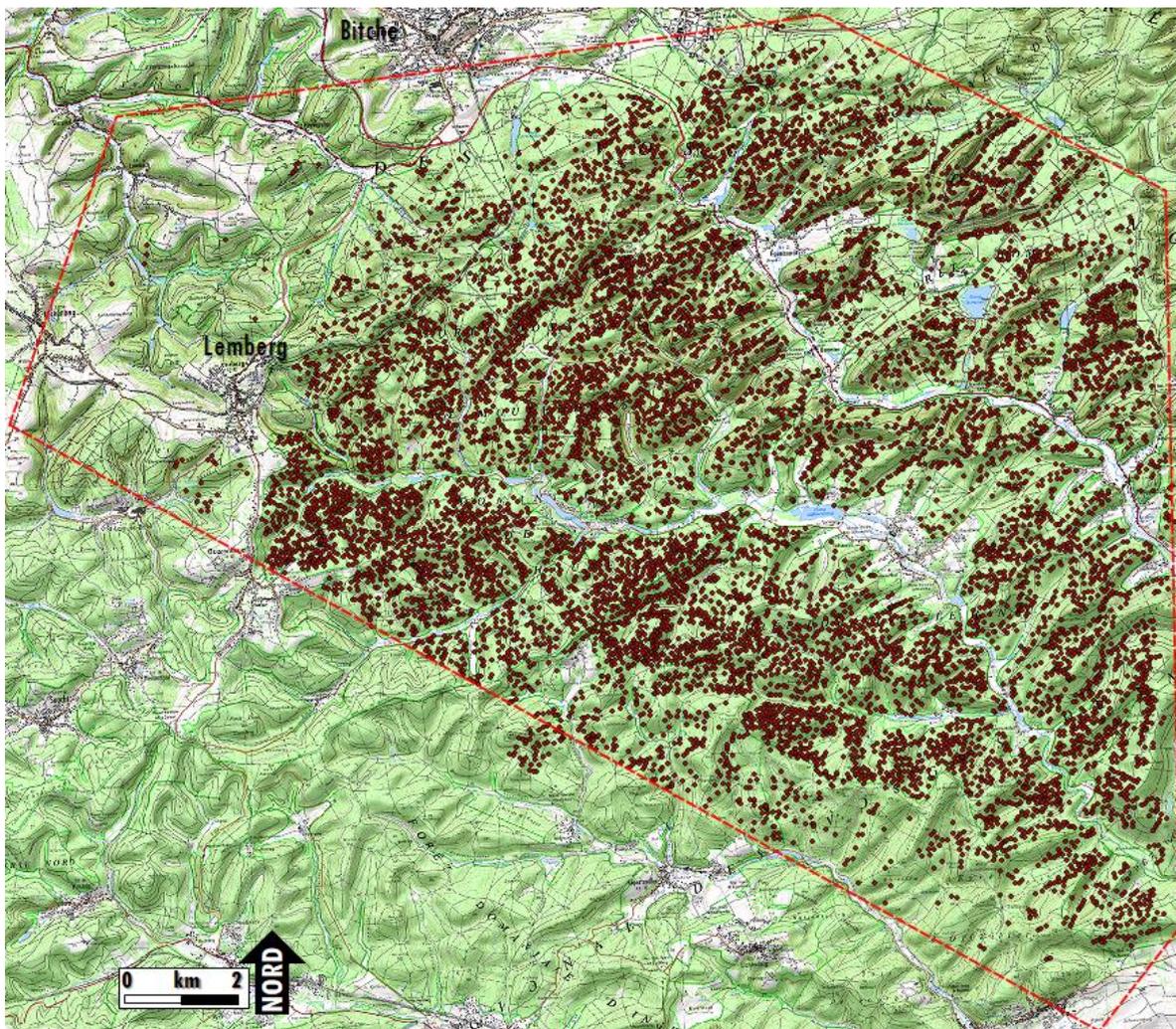


Figure 56 | Localisation des charbonnières (points rouges) selon les indications de microtopographie du lidar, sur l'emprise de 180 km² du lidar des Vosges du nord (tracé en pointillés rouge) sur fond de carte topographique 25000 ©IGN)

Par ailleurs, nous utilisons également cet outil lidar pour l'étude des mares (forestières et prairiales). Dans le cadre de son master actuellement en cours, Marianne Romain quantifie et mesure des paramètres morphométriques d'un ensemble de plus de 150 mares sur la plaine du Bischwald, en Moselle, sur laquelle nous avons fait réaliser une couverture lidar sur 130 km² (grâce au soutien de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse ; Figure 56), afin de caractériser les patrons spatio-temporels de distribution de ces mares pour mieux les comprendre et optimiser la stratégie de conservation de ces milieux particuliers (Etienne et al. 2013, Bors & Knochel 2017).

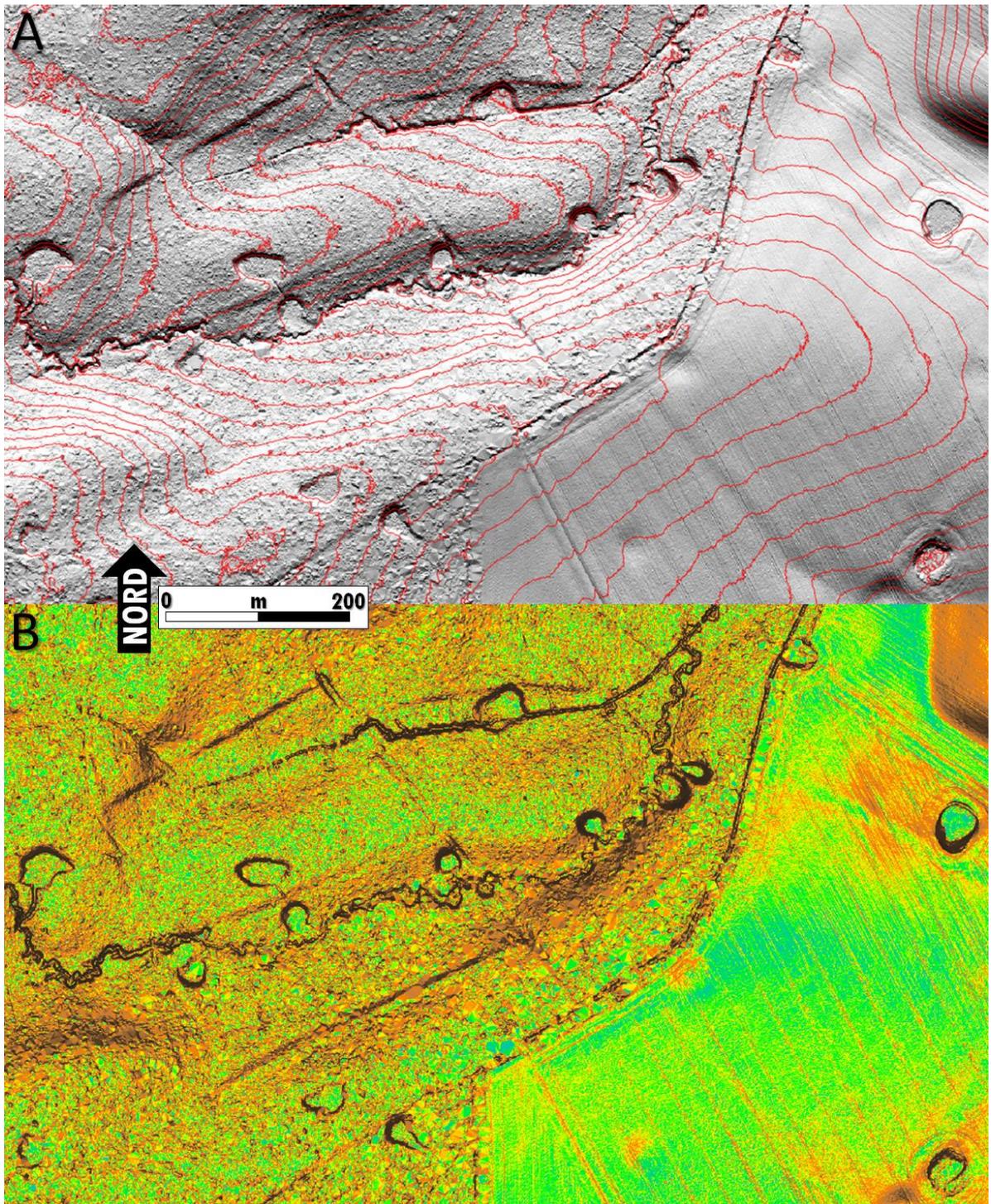


Figure 57 | Exemples de traitements des nuages de points LiDAR pour optimiser la détection des mares ; A : MNT Pentas avec les « contour-lines » ; B : MNT pentes colorisées, sur le lidar de la plaine du Bischwald (©LIEC-Université de Lorraine)

De plus, il sera intéressant d'utiliser des outils de télédétection qui permettent l'acquisition des données biochimiques par mesures multispectrales à partir de capteurs embarqués sur des drones. Cela sera réalisé à moyen terme par l'utilisation des équipements de la plateforme REFEREE en cours de mise en place dans le cadre du parcours Agriculture, Durabilité, Nouvelles Technologies, de la Licence Professionnelle Agronomie dont j'assume la responsabilité pédagogique (cf. partie 2.2.2 Responsabilités pédagogiques)

Le deuxième outil numérique que je souhaite développer consiste à mettre en place des bases de données coopératives (i.e., ouvertes à divers collaborateurs) qui permettront de collecter de données variées sur de larges échelles spatiales et temporelles.

Il s'agira, dans un premier temps, des données issues de l'analyse des charbonnières. Un grand nombre d'études existent à propos de cette archive en France (Davasse 2000, Nelle 2003, Paradis-Grenouillet 2012, Deforce et al. 2013, González-de Linares et al. 2013, Straka 2014, Dupin et al. 2019), mais quasiment toujours à l'échelle locale. En effet, encore très peu d'études traitent de ces données à de larges échelles spatiales, par exemple de manière comparative à l'échelle régionale comme cela a été fait par Thomas Ludemann qui comparait en 2010 l'histoire du charbonnage dans les Hautes-Vosges et en Forêt Noire. La mise en place d'une base de données, par exemple sur le modèle de la *Global Charcoal Database*¹⁰ (avec laquelle il serait pertinent de tisser les liens ; Power et al. 2010) permettrait de réaliser des méta-analyses, selon par exemple des paramètres taxonomiques, dendro-anthracologiques, chronologiques, biochimiques (en lien avec l'axe « d'écologie rétro-fonctionnelle » de mon projet), ou encore de type de forme lidar de charbonnière pour développer les capacités d'application de la détection automatique de celles-ci. Une telle base de données permettrait de relier les données pertinentes à l'échelle locale, avec des processus régionaux, comme par exemple le développement socio-économique, ou des processus globaux (selon l'évolution à long terme de la future base de données). Des discussions sont actuellement en cours avec Koen Deforce (Institut royal des Sciences naturelles de Belgique) pour amorcer la mise en place de cette base de données charbonnières.

¹⁰Global Charcoal Database : <https://www.paleofire.org/index.php>

A plus long terme, la mise en place d'autres bases de données, comme celle d'enregistrement des traces de contaminants organiques historiques dans des archives locales, là aussi pour des extrapolations à plus larges échelles, constitue également une piste de développement. Plus spécifiquement, il serait très intéressant de compiler des données sur les températures de combustions de la végétation lors de paléo-incendies enregistrés par les charbons de bois dans les archives naturelles (i.e., approches pédoanthracologique et d'anthracologie sédimentaire, cf. partie 3.2 Outils et indicateurs rétrospectifs). Ce type de données serait très utile pour la compréhension des enregistrements anthracologiques, et donc des interprétations, y-compris rétro-fonctionnelle, qui en découlent. Il s'agirait par exemple de déterminer si tel ou tel évènement passé de perturbation incendie résulte plutôt d'un feu de cime (i.e., température moyenne de l'ordre de 1200-1500°C) ou de surface (i.e., température moyenne de l'ordre de 600-800°C). Plusieurs méthodes apparaissant pertinentes pour ces mesures, comme l'utilisation de la spectrométrie infrarouge ou Raman (Dupin et al. 2019, Gosling et al. 2019), ou de la réflectance (McParland et al. 2010). Mais ces méthodes sont encore limitées à quelques mesures ponctuelles car elles sont soit trop chronophages, soit délicates d'un point de vue méthodologique. Ainsi, à moyen terme je vise à développer une approche méthodologique pour la mesure de températures sur un grand nombre de fragments de charbon de façon optimisée d'un point de vue méthodologique grâce à l'apport de l'analyse automatique d'images spectrales, en collaboration avec Cédric Pradalier (laboratoire DREAM, Georgia Tech-Lorraine).

5. Conclusion

Les travaux de recherche que je mène et les développements que je souhaite mettre en place, dont certains sont déjà en cours, s'inscrivent dans une large démarche interdisciplinaire. Cette démarche se structure d'une part selon la complémentarité des approches et indicateurs impliqués, et d'autre part sur des objets d'étude communs que sont les sols / charbonnières / tourbières. Ainsi ces archives sont au centre de mon activité de recherche et de la démarche interdisciplinaire en cours de développement.

De plus, ce sont des archives locales qui permettent d'obtenir des indications à des résolutions spatiales fines, en lien avec des préoccupations de gestion des espaces naturels, ce qui est une motivation importante pour mes recherches.

Ce contexte local d'application de mes travaux est également un levier fort de mes activités pédagogiques et de vulgarisation scientifique. C'est en particulier le cas pour les aspects d'écologie historique qui restent encore très peu enseignés à l'université. Dans ce cadre j'envisage d'organiser une école thématique consacrée à l'écologie historique, voire même, à long terme, un parcours de master sur cette thématique, ou du moins des unités d'enseignements dans un parcours de master.

Par ailleurs, les données d'études locales obtenues seront extrapolées / interpolées à des échelles supra-locales grâce à des travaux de comparaisons de données et des méta-analyses qui permettront de faire du changement d'échelle. Cette démarche, au-delà des cadrages scientifiques qu'elle permet, assurera une dimension globale à mes travaux de recherche. Dans cette perspective, nous travaillons actuellement au montage d'un projet international pour l'horizon 2022/2023, avec des comparaisons de données et des complémentarités d'approches à l'échelle européenne (i.e., France, Allemagne, Italie, Suisse), sur la thématique des « prélèvements historiques de biomasses et des conséquences pour les systèmes forestiers passés et actuels ». Ce projet inclurait un volet de modélisation de l'évolution des capacités de production de ressource, en particulier le bois, par les écosystèmes et des niveaux de prélèvements soutenable pour la pérennité de ces écosystèmes dans les années à venir, à partir des données passées. Il s'agit là d'une application de la finalité générale de mes travaux : contribuer à connaître le passé, comprendre le présent, anticiper l'avenir.

6. Bibliographie

- Adger WN, Brown K, 2009. Adaptation, vulnerability and resilience: ecological and social perspectives. In: Castree N, Demeritt D, Liverman D, Rhoads B (Eds), *Companion to Environmental Geography*. Blackwell, Oxford
- Agnoletti M, 2007. The degradation of traditional landscape in a mountain area of Tuscany during the 19th and 20th centuries: Implications for biodiversity and sustainable management. *Forest Ecology and Management* 249, 5-17
- Ajiboye GA, Hammed SG, Bada SB, et al. 2019. Changes in the Morphogenetic and Physicochemical Properties of an Alfisol as Affected by the Healing Period After Charcoal Production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 50, 321-332
- Anderson NJ, 1995. Using the past to predict the future: lake sediments and the modelling of limnological disturbance. *Ecological Modelling* 78, 149-172
- Anderson NJ, Bugmann H, Dearing JA, Gaillard M-J, 2006. Linking palaeoenvironmental data and models to understand the past and to predict the future. *Trends in Ecology and Evolution* 21, 696-704
- ArchaeoGLOBE Project, 2018. Archaeological assessment reveals Earth's early transformation through land use. *Science* 365, 897-902
- Badeau V, Dupouey J-L, Cluzeau C, et al., 2004. Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Rapport final, Carbofor. Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Volet D1. Programme GICC, INRA, Bordeaux
- Badeau V, Dupouey JL, Cluzeau C, et al. 2010. Climate change and the biogeography of French tree species: first results and perspectives. In: Loustau D (Ed), *Forests, Carbon cycle and climate change*. Quae, Paris
- Baeten L, Hermy M, Daele van S, Verheyen K, 2012. Unexpected understory community development after 30 years in ancient and post-agricultural forests. *Journal of Ecology* 98, 1447-1453
- Bajard M, Poulénard J, Sabatier P, et al., 2020. Pastoralism increased vulnerability of a subalpine catchment to flood hazard through changing soil properties. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 538, sous presse
- Bakker JP, Grootjans AP, Hermy M, Poschlod P, 2000. How to define targets for ecological restoration? – Introduction. *Applied Vegetation Science* 3, 3–6
- Balaguer L, Escudero A, Martín-Duque JF, et al., 2014. The historical reference in restoration ecology: Re-defining a cornerstone concept. *Biological Conservation* 176, 12-20
- Balbi S, Selomane O, Sitas N, et al. 2019. Human dependence on natural resources in rapidly urbanizing South African regions. *Environ. Res. Lett.* 14, 044008
- Balée W, Erickson C, 2006. Time, complexity, and historical ecology. In : Balée W, Erickson C (Eds), *Time and complexity in historical ecology: Studies in the neotropical lowlands*. Columbia University Press, New York, 1-20pp
- Barbault R, 2014. A propos d'Observatoires des interactions hommes-milieus : réflexions d'un écologue. In Chenorkian R and Robert S (Eds). *Les interactions hommes-milieus*. Quae, Paris, 55-66 pp
- Barbosa JM dos S, Ré-Poppi N, Santiago-Silva M, 2006. Polycyclic aromatic hydrocarbons from wood pyrolysis in charcoal production furnaces. *Environmental Research* 101, 304 – 311
- Barker G, 2009. *The Agricultural Revolution in Prehistory: Why did Foragers become Farmers?* Oxford University Press, Oxford
- Barker JR, Tingey DT, 1992. *Air Pollution Effects on Biodiversity* Paperback. Springer, NewYork

- Barna M, 2011. Natural regeneration of *Fagus sylvatica* L.: A Review. *Austrian Journal of Forest Science* 2, 71–91
- Barnosky AD, Matzke N, Tomiya S, et al., 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471, 51-57
- Baron S, Carignan J, Ploquin A, 2013. Une pollution plombière sur le Mont Lozère. L'impact d'une métallurgie médiévale. In : Galop D (Ed). *Paysages et Environnement. De la reconstitution du passé aux modèles prospectifs*. Presses universitaire de Franche-Comté, Besançon, 55-80
- Baudry J, 1992. Introduction générale. In: Auger P, Baudry J, Fournier F (Eds). *Hiérarchies et échelles en écologie*. Naturalia publications, France Quercy, Cahors
- Baumann A, Poschlod P, 2008. Did calcareous grasslands exist in prehistoric times? An archaeobotanical research on the surroundings of the prehistoric settlement above Kallmünz (Bavaria, Germany). *British Archaeological Reports International Series 1807*, 25–37
- Beaulieu J-L de, Reille M, 1983. Paléoenvironnement tardiglaciaire et holocène des lacs de Pelléautier et Siguret (Hautes-Alpes, France). *Ecologia mediterranea* 9, 19–36
- Beaulieu J-L de, Reille M, 1992. The last climatic cycle at La Grande Pile (Vosges, France). A new pollen profile. *Quaternary Science Reviews* 2, 431-438
- Bechet J, Duc J, Loye A, et al., 2016. Detection of seasonal cycles of erosion processes in a black marl gully from a time series of high-resolution digital elevation models (DEMs). *Earth Surface Dynamics* 4, 781-798
- Béchet B, Le Bissonnais Y, Ruas A, 2017. Artificialized land and land take; drivers, impacts and potential responses. Synthesis of the collective scientific expert report, Ifsttar-Inra (France)
- Behre K-E, 1988. The role of man in European vegetation history. In: Huntley B, Webb T (Eds). *Vegetation history. Handbook of vegetation science*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 633-672 pp
- Benattia A, Bal M-C, Allée P, et al., 2018. Charcoal Kilns in the Northern Apennines (Italy): Forest Exploitation by Past Societies in Mountain Areas. *Interdisciplinaria Archaeologica* 9, 169–178
- Bennett KD, Willis KJ, 2001. Pollen. In: Smol JP, Birks HJB, Last WM (Eds). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, algal, and siliceous indicators*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 5–32
- Berglund BE, 2003. Human impact and climate changes-synchronous events and a causal link? *Quaternary International* 105, 7-12
- Berglund BE, 2011. How mankind has shaped European nature. *Veget Hist Archaeobot* 20, 79-81
- Berkes F, Folke C, 1998. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press, New York
- Bertrand O, Mansuy-Huault L, Montargès-Pelletier E, et al., 2012. Molecular evidence for recent land use change from a swampy environment to a pond (Lorraine, France). *Organic Geochemistry* 50, 1–10
- Bertrand O, Mansuy-Huault L, Montargès-Pelletier E, et al., 2013. Recent vegetation history from a swampy environment to a pond based on macromolecular organic matter (lignin and fatty acids) and pollen sedimentary records. *Organic Geochemistry* 64, 47–57
- Beug HJ, 2004. *Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München
- Bílek L, Remeš J, Zahradník D, 2009. Natural regeneration of senescent even-aged beech (*Fagus sylvatica* L.) stands under the conditions of Central Bohemia. *Journal of Forest Science* 55, 145-155
- Biache C, Mansuy-Huault L, Faure P, 2014. Impact of oxidation and biodegradation on the most commonly used polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) diagnostic ratios: Implications for the source identifications. *Journal of Hazardous Materials* 267, 31-39

- Biraben JN, 2003. L'évolution du nombre des hommes. *Population & Sociétés* 394, 1-3
- Birks HJB, 2012. Ecological palaeoecology and conservation biology: controversies, challenges, and compromises. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management* 8, 292-304
- Birks HH, Birks HJB, Kaland PE, Moe D, 2004. *The Cultural Landscape: Past, Present and Future*. Cambridge university press, Cambridge
- Birks HH, Birks HJB, 2006. Multi-proxy studies in palaeolimnology. *Veget Hist Archaeobot* 15, 235-251
- Black BA, Abrams MD, 2005. Disturbance history and climate response in an old-growth hemlock-white pine forest, central Pennsylvania. *Journal of the Torrey Botanical Society* 132, 103-114
- Black BA, Abrams MD, 2003. Use of boundary-line growth patterns as a basis for dendroecological release criteria. *Ecological Applications* 13, 1733-1749
- Bond G, Showers W, Cheseby M, et al., 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science* 278, 1257-1266
- Bond G, Kromer B, Beer J, et al., 2001. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294, 2130-2136
- Bork H-R, Lang A, 2003. Quantification of past erosion and land use / land cover changes in Germany. In: Lang A, Henrich K, Dikan R (Eds). *LNES 101*. Springer, Berlin Heidelberg, 231-239pp
- Bors V, Knochel A, 2017. Les mardelles de la plaine du Bischwald : evolution, typologie et moyens d'action. *Conservatoire d'espaces naturels de Lorraine, Sarrebourg*
- Braadbaart F, Poole I, 2008. Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts. *Journal of Archaeological Science* 35, 2434-2445
- Brang P, 2001. Resistance and elasticity: promising concepts for the management of protection forests in the European Alps. *Forest Ecology and Management* 145, 107-119
- Breemen van N, Wright RF, 2004. History and prospect of catchment biogeochemistry: a European perspective based on acid rain. *Ecology* 85, 2363-2368
- Breitenlechner E, Hilber M, Lutz J, et al., 2010. The impact of mining activities on the environment reflected by pollen, charcoal and geochemical analyses. *Journal of Archaeological Science* 37, 1458-1467
- Brisset E, Guiter F, Miramont C, et al. 2017. The overlooked human influence in historic and prehistoric floods in the European Alps. *Geology* 45, 347-350
- Britton AJ, Hester AJ, Hewison RL, et al., 2017. Climate, pollution and grazing drive long-term change in moorland habitats. *Applied Vegetation Science* 20, 194-203
- Bronk Ramsey C, 1998. Probability and dating, *Radiocarbon* 40, 461-474
- Bronk Ramsey C, 2008. Deposition models for chronological records. *Quaternary Science Reviews* 27, 42-60
- Bronk Ramsey C, 2009. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51, 337-360
- Bronk Ramsey C, 2017. Methods for Summarizing Radiocarbon Datasets. *Radiocarbon* 59, 1809-1833
- Bugalho MN, Caldeira MC, Pereira JS, 2011. Mediterranean cork oak savannas require human use to sustain biodiversity and ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9, 278-286
- Bull JW, Jobstvogt N, Böhnke-Henrichs A, et al., 2016. Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats: A SWOT analysis of the ecosystem services framework. *Ecosystem Services* 17, 99-111
- Bürgi M, Ostlund L, Mladenoff DJ, 2017. Legacy Effects of Human Land Use: Ecosystems as Time-Lagged Systems. *Ecosystems* 20, 94-103

- Bush MB, 1993. An 11400 year paleoecological history of a British chalk grassland. *Journal of Vegetation Science* 4, 47–66
- Canuto MA, Estrada-Belli F, Garrison TG, et al., 2018. Ancient lowland Maya complexity as revealed by airborne laser scanning of northern Guatemala. *Science* 361, Issue 640928
- Carcaillet C, 2001. Are Holocene wood-charcoal fragments stratified in alpine and subalpine soils? Evidence from the Alps based on AMS 14C dates. *The Holocene* 11, 231-242
- Carcaillet C, Thinon M, 1996. Pedaanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data. *Review of Palaeobotany and Palynology* 91, 399-416
- Carcaillet C, Almquist H, Asnong H, et al., 2002. Holocene biomass burning and global dynamics of the carbon cycle. *Chemosphere* 49, 845-863
- Carrer M, Urbinati C, 2001. Assessing climate-growth relationships: a comparative study between linear and non-linear methods. *Dendrochronologia* 19, 57-65
- Cavailhes J, Normandin D, 1993. Déprise agricole et boisement : état des lieux, enjeux et perspectives dans le cadre de la réforme de la PAC. *Rev. For. Fr.* XLV, 465-482
- Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky AD, et al., 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances* 1, e1400253
- Centonze F, Manacorde S, 2017. Preventing and sanctioning historical pollution beyond criminal law: an introduction. In : Centonze F, Manacorde S (Eds). *Historical Pollution: Comparative Legal Responses to Environmental Crimes*. Springer, Cham, 1-19 pp
- Chalvet M, 2013. La forêt domaniale de la Sainte-Baume : un espace exceptionnel et protégé en Provence. *Les Cahiers de Framespa*. En ligne
- Chang J, Zhang E, Liu E, et al., 2018. A 60-year historical record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in lake sediment from Guangxi Province, Southern China. *Anthropocene* 24, 51-60
- Chapin III F, Zavaleta E, Eviner V, et al., 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature* 405, 234–242
- Chenorkian R, 2012. Les Observatoires Hommes-Milieux : un nouveau dispositif pour une approche intégrante des interactions environnements-sociétés et de leurs dynamiques. *Sud-Ouest européen* 33, 3-10
- Coe MD, 2011. *The Maya*. Thames & Hudson, Londres
- Coleman FC, Williams SL, 2002. Overexploiting marine ecosystem engineers: potential consequences for biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution* 17, 40-44
- Cong J, Gao C, Zhang Y, et al., 2016. Dating the period when intensive anthropogenic activity began to influence the Sanjiang Plain, Northeast China. *Sci. Rep.* 6, 22153
- Conservatoire d'Espaces Naturels Lorraine, 2012. Plan de gestion de la Réserve Naturelle Nationale du Tanet-Gazon du Faing, Conservatoire d'Espaces Naturels Lorraine
- Cook BI, Anchukaitis KJ, Kaplan JO, et al., 2012. Pre-Columbian deforestation as an amplifier of drought in Mesoamerica. *Geophysical research letters* 39, L16706
- Cooper AH, Brown TJ, Price SJ, et al., 2018. Humans are the most significant global geomorphological driving force of the 21st Century. *Anthropocene Review* 5, 1-8
- Cortés Sánchez M, Jiménez Espejo FJ, Simón Vallejo MD, et al., 2012. The Mesolithic-Neolithic transition in southern Iberia. *Quaternary Research* 77, 221-234
- Crombé F, Cruz F, De Graeve A, et al., 2018. Optically stimulated luminescence dating of an aeolian dune, occupied during the Final Palaeolithic and Neolithic, along the Upper Scheldt valley at Oudenaarde "Markt" (prov. of East Flanders, BE). *Notae Praehistoricae* 38, 49-70

- CRPF, 2006. Schéma Régional de Gestion Sylvicole de Lorraine. Centre Régional de la Propriété Forestière de Lorraine-Alsace. Forêt Privé française
- Crutzen PJ, Stoermer EF, 2000. The Anthropocene. *Global Change Newsletter* 41, 17-18
- Cubizolle H, 2019. Les tourbières et la tourbe. Lavoisier, Paris
- Culbert PD, Dorresteyn I, Loos J, et al., 2017. Legacy effects of past land use on current biodiversity in a low-intensity farming landscape in Transylvania (Romania). *Landscape Ecology* 32, 429–444
- Daily G, 1997. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington
- Dambrine E, Dupouey JL, Laut L, et al., 2007. Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture. *Ecology* 88, 1430-1439
- Darras C, Tresmontant D, Lemaire C, 2017. La forêt sacrée de la Sainte-Baume. Naturalia Publications
- Darwin C, 1881. *The Formation of Vegetable Mould, through the Action of Worms, with Observations on their Habits*. John Murray, London
- Davasse B, 2000. Forêts charbonniers et paysans dans les Pyrénées de l'est du moyen âge à nos jours. GEODE, Bordeaux
- David F, Farjanel G, Jolly MP, 2001. Palyno- and chronostratigraphy of a long sequence from Lac d'Annecy (northern outer Alps, France). *Journal of Paleolimnology* 25, 259–269
- DCE, 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, 32000L0060
- Décamps H, 2010. Événements climatiques extrêmes. Académie des sciences, EDP Sciences, Les Ulis. Rapport sur la science et la technologie 29
- DeClerck FAJ, Chazdon R, Holl KD, et al., 2010. Biodiversity conservation in human-modified landscapes of Mesoamerica: Past, present and future. *Biological Conservation* 143, 2301–2313
- Deforce K, Boeren I, Adriaenssens S, et al., 2013. Selective woodland exploitation for charcoal production. A detailed analysis of charcoal kiln remains (ca. 1300e1900 AD) from Zoersel (northern Belgium). *Journal of Archaeological Science* 40, 681-689
- Demarest A, 2007. *Les Mayas*. Tallandier, Paris
- Dendievel A-M, Dietre B, Cubizolle H, et al., 2019. Holocene paleoecological changes and agro-pastoral impact on the La Narce du Béage mire (Massif Central, France). *The Holocene* 29, 992–1010
- Diamond J, 2009. *Effondrement : comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*. Gallimard, Mesnil-sur-l'Estrée
- Díaz S, Settele J, Brondízio ES, et al., 2019. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science* 366, Issue 6471
- Dietz S, Adger WN, 2003. Economic growth, biodiversity loss and conservation effort. *Journal of Environmental Management* 68, 23-35
- Dion J, 1970. Les forêts de la France et du Nord-Est. *Revue Géographique de l'Est* 12, 1–277
- Dotterweich M, 2008. The history of soil erosion and fluvial deposits in small catchments of central Europe: Deciphering the long-term interaction between humans and the environment - A review. *Geomorphology* 101, 192-208
- Douglas PMJ, Demarest AA, Brenner M, Canuto MA, 2016. Impacts of Climate Change on the Collapse of Lowland Maya Civilization. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 44, 613–45
- Douglas PMJ, Pagani M, Eglinton TI, et al., 2018. A long-term decrease in the persistence of soil carbon caused by ancient Maya land use. *Nature Geoscience* 11, 645–649
- Dreibrodt S, Lomax J, Nelle O, et al., 2010. Are mid-latitude slopes sensitive to climatic oscillations? Implications from an Early Holocene sequence of slope deposits and buried soils from eastern Germany. *Geomorphology* 122, 351-369

- Dreibrodt S, Wiethold J, 2014. Lake Belau and its catchment (northern Germany): A key archive of environmental history in northern central Europe since the onset of agriculture. *The Holocene* 25, 296–322
- DSF, 2018. Augmentation des attaques de scolytes en pessières. Note du Département de la santé des forêts. En ligne
- DSF, 2019. La lettre du DSF : Spéciale sécheresses. Département de la santé des forêts 54, 1-8
- Dufraisse A, Garcia-Martinez MS, 2011. Mesurer les diamètres du bois de feu en anthracologie. Outils dendrométriques et interprétation des données, *Anthropobotanica* 2, 1-18
- Dupin A, Girardclos O, Fruchart C, et al., 2017. Anthracology of charcoal kilns in the forest of Chailluz (France) as a tool to understand Franche-Comte forestry from the mid-15th to the early 20th century AD. *Quaternary International* 458, 200–213
- Dupouey J-L, Dambrine E, Laffite JD, Moares C, 2002a. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology* 83, 2978–2984
- Dupouey J-L, Sciama D, Koerner W, et al., 2002b. La végétation des forêts anciennes. *Rev. for. fra.*, t. LIV 6, 521-532
- Dutoit T, Buisson E, Roche P, et al., 2003. Land use history and botanical changes in the calcareous hillsides of Upper-Normandy (North-Western France): New implications for their conservation management. *Biological Conservation* 115, 1–19
- Dutoit T, Thinon M, Talon B, et al. 2009. Sampling soil wood charcoals at a high spatial resolution: a new methodology to investigate the origin of grassland plant communities. *Journal of Vegetation Science* 20, 349-358
- Eckstein D, 2007. Human time in tree rings. *Dendrochronologia* 24, 53-60
- Eckstein D, Schweingruber F, 2009. *Dendrochronologia*-A mirror for 25 years of tree-ring research and a sensor for promising topics. *Dendrochronologia* 27, 7-13
- Emadodin I, Reiss S, Bork HR, 2011. Colluviation and soil formation as geoindicators to study long-term environmental changes. *Journal of Environmental Earth Sciences* 62, 1695-1706
- Etienne D, Ruffaldi P, Dupouey J-L, et al., 2013. Searching for ancient forests: A 2000 year history of land use in northeastern French forests deduced from the pollen compositions of closed depressions. *The Holocene* 23, 678–691
- Etienne D, Ruffaldi P, Goepp S, et al., 2011. The origin of closed depressions in Northeastern France: A new assessment. *Geomorphology* 126, 121 – 131
- Etienne D, Ruffaldi P, Ritz F, et al., 2010. Etude des variations de la végétation d'un massif forestier de la plaine Lorraine (Moselle, France) depuis le moyen âge. *Quaternaire* 21, 317-323
- Fægri K, Iversen J, 1989. *Textbook of pollen analysis*. 4th ed. John Wiley & Sons, Chichester
- Fahrig L, 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 34, 487-515
- FAO, 2019. Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. *Services Écosystémiques & Biodiversité*. En ligne
- Farrell EP, Fuèhrer E, Ryan D, et al., 2000. European forest ecosystems: building the future on the legacy of the past. *Forest Ecology and Management* 132, 5-20
- Fath BD, Dean CA, Katzmair H. 2015. Navigating the adaptive cycle: an approach to managing the resilience of social systems. *Ecology and Society* 20, 24 (En ligne)
- Feurdean A, Willis KJ, 2008. The usefulness of a long-term perspective in assessing current forest conservation management in the Apuseni Natural Park, Romania. *Forest Ecology and Management* 256, 421-430
- Fesenmyer KA, Christensen NL, 2010. Reconstructing Holocene fire history in a southern Appalachian forest using soil charcoal. *Ecology* 91, 662-670

- Fischer J, Lindenmayer DB, 2007. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global Ecol. Biogeogr.* 16, 265-280
- Fischer A, Lindner M, Abs C, Lasch P, 2002. Vegetation dynamics in central european forest ecosystems (near-natural as well as managed) after storm events. *Folia Geobotanica* 37, 17–32
- Foan L, Sablayrolles C, Simon V, et al., 2010. Reconstructing historical trends of polycyclic aromatic hydrocarbon deposition in a remote area of Spain using herbarium moss material. *Atmospheric Environment* 44, 3207-3214
- Förster F, Großmann R, Hinz M, et al. 2013. Towards mutual understanding within interdisciplinary palaeoenvironmental research: An exemplary analysis of the term landscape. *Quaternary International* 312, 4-11
- Foster DR, 2002a. Insights from historical geography to ecology and conservation: lessons from the New England landscape. *Journal of Biogeography* 29, 1269-1275
- Foster DR, 2002b. Conservation issues and approaches for dynamic cultural landscapes. *Journal of Biogeography* 29, 1533-1535
- Foster DR, Orwig DA, McLachlan JS, 1996. Ecological and conservation insights from reconstructive studies of temperate old-growth forests. *TRENDS in Ecology and Evolution* 2, 409-423
- Foster DR, Schoonmaker PK, Pickett STA, 1990. Insights from Paleoecology to Community Ecology. *TREE* 5, 119-122
- Fritts HC, 1971. Dendroclimatology and Dendroecology. *Quaternary Research* 1, 419-449
- Gaillard JC, 2010. Vulnerability, capacity, and resilience: Perspectives for climate and development policy. *Journal of International Development* 22, 218-232
- Gaillard MJ, Dutoit T, Hjelle K, et al., 2009. European cultural landscape - insights into origins and development. In: Krywinski K, O'Connell M, Küster H (Eds). *Cultural landscapes in Europe*. Aschenbeck media
- Garnier E, 2019. Lessons learned from the past for a better resilience to contemporary risks. *Disaster Prevention and Management* 28, 778-795
- Gavin DG, 2003 Forest soil disturbance intervals inferred from soil charcoal radiocarbon dates. *Can. J. For. Res.* 33, 2514-2518
- Gimmi U, Poulter B, Wolf A, et al., 2013. Soil carbon pools in Swiss forests show legacy effects from historic forest litter raking, *Landscape Ecology* 28, 835-846
- Girel J, 2006. Quand le passé éclaire le présent : écologie et histoire du paysage. *Géocarrefour* 81/4 (En ligne)
- Georges-Leroy M, Bock J, Dambrine E, Dupouey J-L, 2009. Le massif forestier, objet pertinent pour la recherche archéologique. L'exemple du massif forestier de Haye (Meurthe-et-Moselle). *Revue Géographique de l'Est* 49, en ligne
- Georges-Leroy M, Bock J, Dambrine E, Dupouey J-L, 2011. Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. *Archéosciences* 35, 117-129
- Gewin V, 2020. How peat could protect the planet. *Nature* 578, 204-208
- Glatzel G, 1991. The impact of historic land-use and modern forestry on nutrient relations of central-european forest ecosystems. *Fertilizer Research* 27, 1-8
- Goepp S, 2007. Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien – Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg
- Gocel-Chalté D, Guerold F, Knapp H, Robin V, 2020. Anthracological analyses of charcoal production sites at a high spatial resolution: the role of topographical parameters in historical tree taxa distribution in Northern Vosges Mountains (France). *Vegetation History and Archaeobotany*, in press

- Goldammer JG, Brunn E, Hoffmann G, et al. 2009. The use of prescribed fire for maintaining open Calluna Heathlands in North Rhine-Westphalia, Germany. *International Forest Fire News* 38, 75-80
- Gómez-Luna BE, Rivera-Mosqueda MC, Dendooven L, et al., 2009. Charcoal production at kiln sites affects C and N dynamics and associated soil microorganisms in *Quercus* spp. temperate forests of central Mexico. *Appl Soil Ecol* 41, 50–58
- González-De Linares V, García-Viñas J, Carrero Díez L, et al., 2013. Effects on vegetation of historical charcoal making in central Spain: The “Montes de Toledo” case. In *Proceedings of the International Conference of the European Rural History Organisation (EURHO)*, Bern
- Gouriveau E, Ruffaldi P, Duchamp L, et al., 2020. Holocene vegetation history in the Northern Vosges Mountains (NE France): palynological, geochemical and sedimentological data. *The Holocene*, Sous presse
- Gosling WD, Cornelissen H, McMichael CNH, 2019. Reconstructing past fire temperatures from ancient charcoal material. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 520, 128-137
- Guérol F, Boudot JP, Jacquemin G, Vein D, Merlet D, Rouiller J, 2000. Macroinvertebrate community loss as a result of headwater stream acidification in the Vosges Mountains (NE France). *Biodiversity & Conservation* 9, 767-783
- Guiot J, Hély C, Wu H, Gaucherel C, 2008. Interactions between vegetation and climate variability: what are the lessons of models and paleovegetation data. *C R Geoscience* 340, 595-601
- Gunderson LH, 2000. Ecological resilience - in theory and application. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 31, 425-439
- Gunderson LH, Holling CS, 2002. *Panarchy: Understanding Transformations in Systems of Humans and Nature*. Island Press, Washington
- Gustavsson E, Lennartsson T, Marie Emanuelsson M, 2007. Land use more than 200 years ago explains current grassland plant diversity in a Swedish agricultural landscape. *Biological Conservation* 138, 47-59
- Habel JC, Dengler J, Janišova M, et al., 2013. European grassland ecosystems: Threatened hotspots of biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 22, 2131–2138
- Habron G, 2003. Role of Adaptive Management for Watershed Councils. *Environmental Management* 31, 29-41
- Haneca K, Cufar K, H Beeckman, 2009. Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36, 1-11
- Hardy B, Cornelis J-T, Houben D, et al., 2016. The effect of preindustrial charcoal kilns on chemical properties of forest soil of Wallonia, Belgium. *European Journal of Soil Science* 67, 206–216
- Head L, 2008. Is the concept of human impacts past its use-by date? *The Holocene* 18, 373-377
- Hegerl GC, Russon T, 2011. Using the Past to Predict the Future? *Science* 334, 1360-1361
- Heiri C, 2009. Stand dynamics in Swiss forest reserves. An analysis based on long-term forest reserve data and dynamic modeling. *Thèse de doctorat*. ETH, Zurich
- Henderso G, Collins M, Hall I, et al., 2009. Improving future climate prediction using palaeoclimate data. *The Leverhulme Climate Symposium 2008 - Earth's Climate: Past, Present and Future*, Elderfield H, Bickle M, Allen G, Shuckburgh E (Eds). University of Cambridge and the Royal Society, London
- Hermly M, Honnay O, Firbank L, et al. 1999. An ecological comparison between ancient and other forest plant species of Europe, and the implications for forest conservation. *Biological Conservation* 91, 9-22
- Hermly M, Verheyen K, 2007. Legacies of the past in the present-day forest biodiversity: a review of past land-use effects on forest plant species composition and diversity. *Ecol Res* 22, 361-371

- Hesse R, 2010. LiDAR-derived Local Relief Models: a new tool for archaeological prospection. *Archaeol Prospect* 17, 67-72
- Higuera P, 2009. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis - User's Guide. Montana State University, University of Illinois
- Hirsch F, Raab T, Ouimet W, et al. 2017. Soils on Historic Charcoal Hearths: Terminology and Chemical Properties. *Soil Science Society of America Journal* 81, 1427-1435
- Holling CS, 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, 1-23
- Holling CS, Gunderson L, Ludwig D, 2002. In Quest of a Theory of Adaptive Change. In: Gunderson LH, Holling CS (Eds). *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press, Washington, 3-24pp
- Holt AR, Alix A, Thompson A, Maltby L, 2016. Food production, ecosystem services and biodiversity: We can't have it all everywhere. *Science of The Total Environment* 573, 1422-1429
- Houet T, Hubert-Moy L, 2013. La géoprospective : approche méthodologique pour la modélisation prospective spatialisée à une échelle fine des changements d'usages des sols. In : Galop D (Ed). *Paysages et Environnement. De la reconstitution du passé aux modèles prospectifs*. Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, 469-489
- Hughes JB, Daily GC, Ehrlich PR, 1997. Population Diversity: Its Extent and Extinction. *Science* 278, 689-692
- Hunter ML, 1999. *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field CB, Barros V, Stocker TF, et al. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (Eds). Geneva, Switzerland
- IPCC, 2019. *Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Shukla PR, Skea J, Buendia CB, et al., (Eds). Geneva, Switzerland
- IPBES, 2019. *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Díaz S, Settele J, Brondízio ES, et al. (Eds). IPBES secretariat. Germany, Bonn
- Imbert D, 2018. Hurricane disturbance and forest dynamics in east Caribbean mangroves. *Ecosphere* 9, e02231
- Jackson ST, Hobbs RJ, 2009. Ecological restoration in the light of ecological history. *Science* 325, 567-569
- Jacquot C, Trenard Y, Dirol D, 1973. *Atlas d'anatomie des bois d'Angiospermes*. Centre Technique du Bois et Fond Forestier National, Paris
- Jakoby O, Wermelinger B, Stadelmann G, Lischke H, 2015. Borkenkäfer im Klimawandel - Modellierung des künftigen Befallsrisikos durch den Buchdrucker (*Ips typographus*). Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf
- Jégou D, Cluzeau D, Balesdent J, Tréhen P, 1998. Effects of four ecological categories of earthworms on carbon transfer in soil. *Applied Soil Ecology* 9, 249-255
- Johst K, Schöps K, 2003. Persistence and conservation of a consumer–resource metapopulation with local overexploitation of resources. *Biological Conservation* 109, 57-65

- Joosten H, Klerk P de, 2002. What's in a name? Some thoughts on pollen classification, identification, and nomenclature in Quaternary palynology. *Review of Palaeobotany and Palynology* 122, 29-45
- Joosten H, Tapio-Biström M-L, Tol S, 2012. Peatlands - guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Wetlands International
- Kahmen S, Poschlod P, 2004. Plant functional trait responses to grassland succession over 25 years. *Journal of Vegetation Science* 15, 21–32
- Kalis AJ, Merkt J, Wunderlich J, 2003. Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe - human impact and natural causes. *Quaternary Science Reviews* 22, 33-79
- Kaplan JO, Krumhardt KM, Ellis EC, et al., 2011. Holocene carbon emissions as a result of anthropogenic land cover change. *The Holocene* 21, 775-791
- Kéfi S, 2012. Ecosystèmes et transitions catastrophiques. Regards et débats sur la biodiversité, R37 SFE². En ligne
- Klimek S, Kemmermann AR, Hofmann M, Isselstein J, 2007. Plant species richness and composition in managed grasslands: The relative importance of field management and environmental factors. *Biological Conservation* 134, 559-570
- Knapp H, Robin V, Kirleis W, Nelle O, 2013. Woodland history in the upper Harz Mountains revealed by kiln site, soil sediment and peat charcoal analyses. *Quaternary International* 289, 88-100
- Kremer A, 2015. Did early human populations facilitate the dispersion of oaks? *International Oaks* 26, 19–28
- Kuneš P, Svobodova-Svitask H, Kolar J, et al., 2015. The origin of grasslands in the temperate forest zone of east-central Europe: Long-term legacy of climate and human impact. *Quaternary Science Reviews* 116, 15–27
- Lade SJ, Norberg J, Anderies JM, et al., 2019. Potential feedbacks between loss of biosphere integrity and climate change. *Global Sustainability* 2, 1–15
- Lagadeuc Y, Chenorkian R, 2009. Les systèmes socio-écologiques : vers une approche spatiale et temporelle. *Natures Sciences Sociétés* 17, 194-196
- Landmann G, Dupouey J-L, Badeau V, et al. 2008. Le hêtre face aux changements climatiques I. Le hêtre en France en 2100 : la portion congrue? *Forêt-entreprise* 180, 28-33
- Laperrière L, Pienitz R, Fallu M-A, 2009. Impacts de l'activité minière et des eaux usées sur la santé du lac Dauriat à Schefferville : données paléolimnologiques. *La naturaliste canadien* 133, 83-95
- Lebourgeois F, Bréda N, Ulrich E, Granier A, 2005 Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees* 19, 385-401
- Leblanc M, Morales JA, Borrego J, Elbaz-Poulichet F, 2000. 4,500-year-old mining pollution in southwestern Spain: long-term implications for modern mining pollution. *Economic Geology* 2000, 655–662
- Lee A, Slak M-F, 2007. Les paysages français changent entre 1992 et 2002 : artificialisation et fermeture des paysages aux dépens du mitage ou de la déprise des zones agricoles. *AGRESTE CAHIERS* 3, 19-40
- Lee S-W, Hwang S-J, Lee S-B, et al., 2009. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning* 92, 80-89
- Le Meur M, Mansuy-Huault L, Lorgeoux C, et al., 2017. Spatial and temporal variations of particulate organic matter from Moselle River and tributaries: A multimolecular investigation *Organic Geochemistry* 110, 45-56
- Leopold M, Völkel J, 2007. Colluvium: Definition, differentiation, and possible suitability for reconstructing Holocene climate data. *Quaternary International* 162-163, 133-140

- Leoz-Garziandia E, 2000. Hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant (HAP). INERIS
- Lévieux J, Lieutier F, Delplanque A, 1985. Les scolytes ravageurs de l'épicéa. RFF 37, 347-358
- Levin SA, 1992. The problem of pattern and scale in ecology. Ecology 73, 1943-1967
- Lewis SL, Maslin MA, 2015. Defining the Anthropocene. Nature 519, 171-180
- Ligot G, Balandier P, Fayolle A, et al., 2013. Height competition between *Quercus petraea* and *Fagus sylvatica* natural regeneration in mixed and uneven-aged stands. Forest Ecology and Management 304, 391–398
- Ludemann T, 2010. Past fuel wood exploitation and natural forest vegetation in the Black Forest, the Vosges and neighbouring regions in western Central Europe. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 291, 154-165
- Ludemann T, 2012. Airborne laser scanning of historical wood charcoal production sites—a new tool of kiln site anthropology at the landscape level. Wood charcoal Evid Hum Nat Hist 13, 247–252
- Ludemann T, Nelle O, 2002. Die Wälder am Schauinsland und ihre Nutzung durch Bergbau und Köhlerei. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Botanik und Standortkunde, 15, Freiburg
- Lumley H de, Midant-Reynes B, 2006. Climats - Cultures - Sociétés aux temps préhistoriques. De l'apparition des Hominidés jusqu'au Néolithique un regard d'ensemble. C. R. Palevol 5, 3-11
- Lotter AF, Birks HJB, 2003. The Holocene palaeolimnology of Sagistalsee and its environmental history—a synthesis. J Paleolimnol 30, 333–342
- Lynch JJ, Ferrier A, Ford AJ, et al., 2019. Rainforest, woodland or swampland? Integrating time, space and culture to manage an endangered ecosystem complex in the Australian Wet Tropics. Landscape Ecology 35, 83–99
- Madesclaire A (coordinatrice), 2016. Les milieux forestiers de la Plaine lorraine. Guide pour l'identification des stations et le choix des essences. CNPF, AgroParisTech, Region Grand-Est
- Maguire KC, Nieto-Lugilde D, Fitzpatrick MC, 2015. Modeling Species and Community Responses to Past, Present, and Future Episodes of Climatic and Ecological Change. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 46, 343-368
- Manenti R, De Bernardi F, Ficetola GF, 2013. Pastures vs forests: do traditional pastoral activities negatively affect biodiversity? The case of amphibians communities. North-Western journal of zoology 9, 284-292
- Mansourian S, Rossi M, Vallauri D, 2013. Ancient Forests in the Northern Mediterranean: Neglected High Conservation Value Areas. WWF France, Marseille
- Marguerie D, Hunot J-Y, 2007. Charcoal analysis and dendrology: Data from archaeological sites in western France. Journal of Archaeological Sciences 34, 1417-1433
- Marlon JR, Carcaillet C, Gavin DG, et al., 2008. Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. Nature Geoscience 1, 697-702
- Marlon JR, Cui Q, Gaillard M-J, et al., 2010. Humans and fire: Consequences of anthropogenic burning during the past 2 ka. PAGES news 18, 80-82
- Maresca B, Mordret X, Ughetto A-L, Blancher P, 2011. Évaluation des services rendus par les écosystèmes en France, Développement durable et territoires 2. En ligne
- Mariet A-L, De Vaufleury A, Bégeot C, et al. 2016. Palaeo-pollution from mining activities in the Vosges Mountains: 1000 years and still bioavailable. Environmental Pollution 214, 575-584
- Mariet A-L, Monna F, Gimbert F, 2018. Tracking past mining activity using trace metals, lead isotopes and compositional data analysis of a sediment core from Longemer Lake, Vosges Mountains, France. Journal of Paleolimnology 60, 399–412

- Martínez-Sánchez JJ, Marín A, Herranz JM, et al. 1995. Effects of high temperatures on germination of *Pinus halepensis* Mill. and *P. pinaster* Aiton subsp. *pinaster* seeds in southeast Spain. *Vegetatio* 116, 69–72
- Matter J-F, Schütz J-P, 2002. *Écologie forestière - 3ème semestre*. Chaire de sylviculture, EPF Zurich
- May RM, 1977. Thresholds and breakpoints in ecosystems with a multiplicity of stable states. *Nature* 269, 471-477
- McCallum ML, 2015. Vertebrate biodiversity losses point to a sixth mass extinction, *Biodiversity and Conservation* 24, 2497–2519
- McParland LC, Collinson ME, Scott AC, et al., 2010. Is vitrification in charcoal a result of high temperature burning of wood? *Journal of Archaeological Science* 37, 2679-2687
- McParland LC, Collinson ME, Scott AC, Campbell G, 2009. The use of reflectance values for the interpretation of natural and anthropogenic charcoal assemblages. *Archaeol Anthropol Sci* 1, 249-261
- MEA, 2005. *Current state and trends assessment*. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington
- Mélières MA, Riou-Nivert P, 2019. Scolytes, chablis, canicules et changement climatique – un mélange explosif. *Forêt-Entreprise* 248, 54-60
- Messerli B, Grosjean M, Hofer T, et al., 2000. From nature-dominated to human-dominated environmental changes. *Quaternary Science Reviews* 19, 459-479
- Miramont C, Guibal F, Kaiser K-F, et al., 2010. L'apport des séries dendrochronologiques françaises au prolongement de la chronologie européenne absolue et à la calibration du radiocarbone. *Cahiers de Géographie* 11, Collection EDYTEM, 189-198
- Miramont C, Sivan O, Guibal F, et al., 2011. L'étalonnage du temps du radiocarbone par les cernes d'arbres. L'apport des séries dendrochronologiques du gisement de bois subfossiles du torrent des Barbiers (Alpes françaises du sud). *Quaternaire* 22, 261-271
- Mitchell FJG, 2005. How open were European primeval forests? Hypothesis testing using palaeoecological data. *Journal of Ecology* 93, 168-177
- Mitchell MGE, Suarez-Castro AF, Martinez-Harms M, et al., 2005. Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution* 30, 190-198
- Monna F, Hamer K, Lévêque J, Sauer M, 2000. Pb isotopes as a reliable marker of early mining and smelting in the Northern Harz province (Lower Saxony, Germany). *Journal of Geochemical Exploration* 68, 201-210
- Monsarrat S, Jarvie S, Svenning J-C, 2019. Anthropocene refugia: integrating history and predictive modelling to assess the space available for biodiversity in a human-dominated world. *Phil. Trans. R. Soc. B* 374: 20190222
- Mooney SD, Black M, 2003. A simple and fast method for calculating the area of macroscopic charcoal isolated from sediments. *Quaternary Australasia* 21, 18-21
- Mooney SD, Tinner W, 2011. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires and Peat* 7, 1-18
- Moore M-L, Westley FR, Tjornbo O, Holroyd C, 2011. The Loop, the Lens, and the Lesson: Using Resilience Theory to Examine Public Policy and Social Innovation. IN: Nicholls A, Murdock A. *Social Innovation*, Springer, 89-113pp
- Moore PD, Webb JA, Collinson ME, 1991. *Pollen Analysis* (2nd edition). Blackwell Scientific Publications, Oxford
- Müller UC, Pross J, Bib E, 2003. Vegetation response to rapid climate change in Central Europe during the past 140,000 yr based on evidence from the Fùramoos pollen record. *Quaternary Research* 59, 235–245

- Nagel TA, Levanic T, Diaci J, 2007. A dendroecological reconstruction of disturbance in an old-growth Fagus-Abies forest in Slovenia. *Ann. For. Sci.* 64, 891-897
- Nageleisen J-L, 2020. Scolytes dans le Massif vosgien : une situation inédite. *Groupe Tétrás Vosges, Brèves* 1, 6-9
- Nelle O, 2003. Woodland history of the last 500 years revealed by anthracological studies of charcoal kiln sites in the Bavarian Forest, Germany. *Phytocoenologia* 33, 667-682
- Nelle O, Dörfler W, 2008. A summary of the late- and post-glacial vegetation history of the Schleswig-Holstein. *Mitt. Arbeitsgem. Geobot. Schleswig-Holstein Hamburg* 65, 45-68
- Nelle O, Guggenbichler E, Robin V, et al., 2014. K653 im Galgendobel – ein Kohlenmeilerplatz bei Wittnau im süddlichen schwarzwald. In *Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2013*, Theiss, Darmstadt, 319-320
- Nelle O, Robin V, Talon B, 2013. Pedoanthracology: Analysing soil charcoal to study Holocene palaeoenvironments. *Quaternary International* 289, 1-4
- Nielsen AB, Giesecke T, Theuerkauf M, et al., 2012. Quantitative reconstructions of changes in regional openness in north-central Europe reveal new insights into old questions. *Quaternary Science Reviews* 47, 131-149
- Noble A, Palmer SM, Graves DJ, et al. 2017. Prescribed burning, atmospheric pollution and grazing effects on peatland vegetation composition. *Journal of Applied Ecology* 55, 559-569
- Nölken W, 2005. Holzkohleanalytische Untersuchungen zur Waldgeschichte der Vogesen. Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Fakultät für Biologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Núñez MR, Calvo I, 2000. Effect of high temperatures on seed germination of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis*. *Forest Ecology and Management* 131, 183-190
- Nussbaum R, 2006. Coût des inondations et financement des dommages. *Frontiers in Flood Research / Le point de la recherche sur les crues* 305, 173-186
- Oglesby RJ, Sever TL, Saturno W, et al., 2010. Collapse of the Maya: Could deforestation have contributed? *Journal of Geophysical Research*, 115, D12106
- Olsson F, Gaillard M-J, Lemdahl G, et al., 2010. A continuous record of fire covering the last 10,500 calendar years from southern Sweden - The role of climate and human activities. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 291, 128-141
- Paradis-Grenouillet S, 2012. Etudier les forêts métallurgiques: analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. L'exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin. Thèse de doctorat, Université de Limoges
- Parish F, Sirin A, Charman D, et al., 2008. Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 99-117pp
- Payette S, Rochefort L, 2001. *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presse de l'Université Laval, Québec
- Perrette Y, Poulenard J, Saber A-I, et al., 2008. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in stalagmites: Occurrence and use for analyzing past environments. *Chemical Geology* 251, 67-76
- Peterken GF, 2018. Ancient woodland in concept and practice. In: Çolak AH, Kirca S, Rotherham ID (Eds). *Ancient Woodlands and Trees: A Guide for Landscape Planners and Forest Managers*. IUFRO, World series 37. Turkish Academy of Sciences, 16-24pp
- Pickett STA, White PS, 1985. *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, Orlando
- Pierce JL, Meyer GA, Jull AJT, 2004. Fire-induced erosion and millennial-scale climate change in northern ponderosa pine forests. *Nature* 432, 87-90
- Plaisance G, 1950. La chasse au hêtre dans le passé. *Revue forestière française* 9, 458-461

- Podlaski R, 2008. Dynamics in Central European near-natural *Abies-Fagus* forests: Does the mosaic-cycle approach provide an appropriate model? *Journal of Vegetation Science* 19, 173-182
- Powell KI, Chase JM, Knight TM, 2011. A synthesis of plant invasion effects on biodiversity across spatial scales. *American journal of botany* 98, 539-548
- Power MJ, Coddling BF, Taylor AH, et al., 2018. Human Fire Legacies on Ecological Landscapes. *Front. Earth Sci.* 6:151
- Power MJ, Marlon JR, Bartlein PJ, Harrison SP, 2010. Fire history and the Global Charcoal Database: A new tool for hypothesis testing and data exploration. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 291, 52-59
- PSIE, 2014. Programme de suivi de l'intégrité écologique. Réseau Parcs Québec. Rapport 2003-2012. Société des établissements de plein air du Québec, Québec
- Ralston BE, Sarr DA, 2017, Case studies of riparian and watershed restoration in the southwestern United States—Principles, challenges, and successes: U.S. Geological Survey Open-File Report 2017-1091
- Rameau JC, Mansion D, Dumé G, 1989. Flore forestière française – guide écologique illustré – tome 1 : plaines et collines. Institut pour le Développement Forestier, Paris
- Rasmussen KK, 2007. Dendroecological analysis of a rare sub-canopy tree: Effects of climate, latitude, habitat conditions and forest history. *Dendrochronologia* 25, 3-17
- Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, et al., 2013. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nat. Geosci.* 6, 597–607
- Reidsma P, Tekelenburg T, van den Berg M, Alkemade R, 2006. Impacts of land-use change on biodiversity: An assessment of agricultural biodiversity in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114, 86-102
- Reiss S, Dreibrodt S, Lubos CCM, Bork H-R, 2009. Land use history and historical soil erosion at Albersdorf (northern Germany) - Ceased agricultural land use after the pre-historical period. *Catena* 77, 107-118
- Riddiford NG, Branch NP, Green CP, et al., 2012. Holocene palaeoenvironmental change and the impact of prehistoric salt production in the Seille Valley, eastern France. *The Holocene* 22, 1 –15
- Rinn F, 2003. TSAP-WinTM - Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications - User Reference. Heidelberg
- Robert S, 2013. Des outils pour l'analyse de la transmission des trames et réseaux planimétriques : approches multiscalaires et traitements sur SIG. In : Galop D (Ed). *Paysages et Environnement. De la reconstitution du passé aux modèles prospectifs*. Presses universitaire de Franche-Comté, Besançon, 25-37
- Robin V, 2018. Reconstruire l'histoire des forêts par l'étude de la production de charbon de bois. *Planet-Vie, En ligne*
- Robin V, 2019. Au charbon ! L'analyse anthracologique. *Groupe Tétrás Vosges Brèves* 2
- Robin V, Bork HR, Nadeau M-J, Nelle O, 2012. Assessing Holocene vegetation and fire history by a multiproxy approach: The case of Stodthagen Forest (Northern Germany). *The Holocene* 22, 337-346
- Robin V, Bork H-R, Nadeau M-J, Nelle O, 2014. Fire and forest history of central European low mountain forest sites based on soil charcoal analysis: The case of the eastern Harz. *The Holocene* 24, 35-47
- Robin V, Knapp H, Bork H-R, Nelle O, 2013b. Fire history assessment at the local scale: complementary usage of pedoanthracology and macro-charcoal analysis – illustration from Central Germany. *Quaternary International* 289, 78-87

- Robin V, Knapp H, Rickert B-H, Talon B, Nelle O, 2013a. Comparaison de signaux anthracologiques Holocènes issus de différents types d'archives en Allemagne : vers une reconstitution plus précise de l'histoire des incendies ? *Quaternaire* 24, 167-177
- Robin V, Nelle O, 2014. Contribution to the reconstruction of central European fire history, based on the soil charcoal analysis of study sites in northern and central Germany. *Veget Hist Archaeobot* 23, 51-65
- Robin V, Nelle O, Talon B, et al., 2018. A comparative review of soil charcoal data: Spatiotemporal patterns of origin and long-term dynamics of Western European nutrient-poor grasslands. *The Holocene* 28, 1313-1324
- Robin V, Talon B, Nelle O, 2013c. Pedoanthracological contribution to forest naturalness assessment. *Quaternary International* 289, 10-15
- Robin V, Talon B, Nelle O, 2015. Charcoal: resource and ubiquitous proxy". *Quaternary International* 366, 1-2
- Robin V, Touflan P, Botta L, Talon B, 2007. Histoire de la dynamique végétale passée des forêts anciennes du Queyras. *Annales Scientifiques du massif du Mont Viso* 4, 27-45
- Rochel X, 2013. Sources d'archives et histoire de l'environnement. L'origine des hêtraies Vosgiennes d'après les registres de martelages du XVIIIe siècle. In : Galop D (Ed). *Paysages et Environnement. De la reconstitution du passé aux modèles prospectifs*. Presses universitaire de Franche-Comté, Besançon, 15-24pp
- Rochel X, 2016. *Paysages naturels, paysages construits Géographie historique et usage des archives dans l'étude de paysages dits naturels (forêts, saltus)*. HDR, Université de Lorraine
- Ruffaldi P, Ritz F, Richard H, et al., 2007. Analyse pollinique de la mardelle d'Assenoncourt (Moselle, France) : impact des pratiques agricoles sur la biodiversité végétale en milieu forestier. *La mémoire des forêts : Actes du colloque Forêt, archéologie & environnement*, Lavoisier Editions, Paris
- Ruffaldi P, 1999. Premières traces polliniques de néolithisation des zones de basse altitude de Lorraine (France). *Quaternaire* 10, 263-270
- Rubino DL, McCarthy BC, 2004. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbances events. *Dendrochronologia* 21, 97-115
- Rull V, 2018. Strong Fuzzy EHLFS: A General Conceptual Framework to Address Past Records of Environmental, Ecological and Cultural Change. *Quaternary* 1, 10 (En ligne)
- Rotolo G, 2017. Historical Pollution: In Search of a Legal Definition. *Historical Pollution*. In : Centonze F, Manacorde S (Eds). *Historical Pollution: Comparative Legal Responses to Environmental Crimes*. Springer, Cham, 57-89pp
- Sadovnik M, Robin V, Nadeau M-J, et al., 2014. Neolithic human impact on landscapes related to megalithic structures: palaeoecological evidence from the Krähenberg, northern Germany. *Journal of Archaeological Science* 51, 164-173
- Saintonge F-X, 2018. Crise scolytes sur épicéas - Bilan fin 2019. Département de la santé des forêts. En ligne
- Salomon J-N, 2009. Le déclin de la civilisation classique Maya : explications. *Les Cahiers d'Outre Mer*, 246, 143-173
- Šamonil P, Král K, Hort L, 2010. The role of tree uprooting in soil formation: A critical literature review. *Geoderma* 157, 65-79
- Scheel-Ybert R, 2016. Charcoal collections of the world. *IAWA Journal* 37, 489–505
- Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, et al., 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* volume 413, 591–596
- Schneider A, Takla M, Nicolay A, et al., 2015. A Template-matching Approach Combining Morphometric Variables for Automated Mapping of Charcoal Kiln Sites. *Archaeological Prospection* 22, 45–62

- Schoon M, van der Leeuw S, 2015. The shift toward social-ecological systems perspectives: insights into the human-nature relationship. *Natures Sciences Sociétés* 23, 166-174
- Schrautzer J, Jansen D, Breuer M, et al., 2009. Succession and management of calcareous dry grasslands in the Northern Franconian Jura, Germany. *Tuexenia* 29, 339–351
- Schwartz D, Goepp S, Ertlen D, et al., 2014. Les défrichements anciens dans les massifs du Hohneck et du Rossberg. Une histoire revisitée des Hautes-Chaumes vosgiennes. In: Rothiot J-P, Husson J-P (Eds), *La Bresse et ses vallées*. Epinal: Editions de la Fédération des Sociétés Savantes des Vosges, Racines Bressanes, Maison des Loisirs et de la Culture, 61–76
- Schwartz D, Thinon M, Goepp S, et al., 2005. Premières datations directes de défrichements protohistoriques sur les chaumes secondaires des Vosges (Rossberg, Haut-Rhin). *Approche pédoanthracologique*. *Comptes Rendus de Geoscience* 337: 1250–1256
- Schweingruber F-H, 1990. Anatomie microscopique du bois. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, 3e édition. WSL, Birmensdorf
- Seddon AWR, Froyd CA, Leng MJ, et al., 2011. Ecosystem Resilience and Threshold Response in the Galapagos Coastal Zone. *PLoS ONE* 6: e22376
- Severinghaus JP, Beaudette R, Headly MA, et al., 2009. Oxygen-18 of O₂ Records the Impact of Abrupt Climate Change on the Terrestrial Biosphere. *Science* 324, 1431-1434
- Sevrin E, 1997. Les chênes sessile et pédonculé. Institut de développement forestier, les guides du sylviculteur, Paris
- Shakesby RA, Doerr SH, 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews* 74, 269– 307
- Sharer RJ, Traxler LP, 2006. *The Ancient Maya*, 6e éd. Stanford University Press, Palo Alto
- Silva DE, 2010. Ecologie du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) en marge sud-ouest de son aire de distribution. PhD thesis, Nancy University, France
- Sittler B, Hauger K, 2013. Le laser aéroporté comme nouvelle technique pour restituer le paysage ancien. In : Galop D (Ed). *Paysages et Environnement. De la reconstitution du passé aux modèles prospectifs*. Presses universitaire de Franche-Comté, Besançon, 39-43
- Smith KT, 2008. An organismal view of dendrochronology. *Dendrochronologia* 26, 185-193
- Spiecker H, 2003. Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe - temperate zone. *Journal of Environmental Management* 67, 55-65
- Sprugel DG, 1991. Disturbance, Equilibrium, and Environmental Variability: What is 'Natural' Vegetation in a Changing Environment? *Biological Conservation* 58, 1-18
- Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, et al., 2015. The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *The Anthropocene Review* 2, 81-98
- Steffen W, Crutzen PJ, McNeill JR, 2007. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature. *Ambio* 36, 614–621
- Steffen W, Grinevald J, Crutzen P, McNeill J, 2011. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 369, 842–867
- Steier P, Rom W, 2000. The use of Bayesian statistics for C-14 dates of chronologically ordered samples: A critical analysis. *Radiocarbon* 42, 183-198
- Steinhoff G, 2012. Naturalness and biodiversity: Why natural conditions should be maintained within protected areas. *William and Mary Environmental Law and Policy Review* 1, 77-127
- Stocker BD, Yu Z, Massa C, Joos F, 2017. Holocene peatland and ice-core data constraints on the timing and magnitude of CO₂ emissions from past land use *PNAS* 114, 1492-1497
- Straka TJ, 2014. Historic Charcoal Production in the US and Forest Depletion: Development of Production Parameters. *Advances in Historical Studies*, 3, 104-114

- Stular B, Kokalj Z, Ostir K, Nuninger L, 2012. Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features. *Journal of Archaeological Science* 39, 3354-3360
- Summerhayes C, Zalsiewicz J, 2018. Global warming and the Anthropocene. *Geology Today* 34, 194-200
- Svenning J-C, Skov F, 2007. Ice age legacies in the geographical distribution of tree species richness in Europe. *Global Ecology and Biogeography* 16, 234-245
- Tainter JA, 2013. *L'effondrement des sociétés complexes*. Editions Retour aux Sources, La Fenderie
- Talon B, Carcaillet C, Thion M, 1998. Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Géographie physique et Quaternaire* 52, 1-14
- Taylor AR, Chen HYH, VanDamme L, 2009. A Review of Forest Succession Models and Their Suitability for Forest Management Planning. *Forest Science* 55, 23-36
- Taylor NG, Grillas P, Sutherland WJ, 2018. Peatland Conservation: Global Evidence for the Effects of Interventions to Conserve Peatland Vegetation. *Synopses of Conservation Evidence Series*. University of Cambridge, Cambridge
- Théry-Parisot I, 2001. *Economie des combustibles au Paléolithique*. CNRS, Paris
- Thomas KD, 1989. Vegetation of the British chalklands in the Flandrian period: A response to Bush. *Journal of Archaeological Science* 16, 549–553
- Tilman D, 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. *PNAS* 96, 5995-6000
- Tilman D, May R, Lehman CL, Nowak MA, 1994. Habitat destruction and the extinction debt. *Nature* 371, 65–66
- Tinner W, Lotter AF, 2001. Central European vegetation response to abrupt climate change at 8.2 ka. *Geology* 29, 551-554
- Tollefson T, 2019. One million species face extinction. *Nature* 569, 171
- Touflan P, Talon B, Walsh K, 2010. Soil charcoal analysis: a reliable tool for spatially precise studies of past forest dynamics: a case study in the French southern Alps. *The Holocene* 20, 45-52
- Turner BL, Zemunik G, Laliberté E, 2019. Contrasting patterns of plant and microbial diversity during long-term ecosystem development. *Journal of Ecology* 107, 606–621
- Tzedakis PC, McManus JF, Hooghiemstra H, et al. 2003. Comparison of changes in vegetation in northeast Greece with records of climate variability on orbital and suborbital frequencies over the last 450 000 years. *Earth and Planetary Science Letters* 212, 197-212
- UNEP, 2019. Conservation et gestion durable des tourbières. Assemblée des Nations Unies pour l'environnement du Programme des Nations Unies pour l'environnement. UNEP/EA.4/L.19
- Vanbergen AJ, and the Insect Pollinators Initiative, 2013. Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators. *Front Ecol Environ* 11, 251–259
- Van Der Wal R, Truscott A-M, Pearce ISK, et al., 2008 Multiple anthropogenic changes cause. *Global Change Biology* 14, 1428-1436
- Vane CH, Chenery SR, Harrison I, et al. 2011. Chemical signatures of the Anthropocene in the Clyde estuary, UK: sediment-hosted Pb, 207/206Pb, total petroleum hydrocarbon, polyaromatic hydrocarbon and polychlorinated biphenyl pollution records. *Phil. Trans. R. Soc. A* 369, 1085–1111
- Vera FWM, 2000. *Grazing Ecology and Forest History*. CABI Publishing, Oxford
- Vera FWM, Bakker ES, Olff H, 2006. Large herbivores: missing partners of western European light-demanding tree and shrub species? In : Danell K, Bergström R, Duncan P, Pastor J. *Large Herbivore Ecology, Ecosystem Dynamics and Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, 203-231pp

- Verheyen K, Bossuyt B, Honnay O, Hermy M, 2003. Herbaceous plant community structure of ancient and recent forests in two contrasting forest types. *Basic and Applied Ecology* 4, 537-546
- Wake DB, Vredenburg VT, 2008. Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, 11466–11473
- WallisDeVries MF, Poschlod P, Willems JH, 2002. Challenges for the conservation of calcareous grasslands in northwestern Europe: Integrating the requirements of flora and fauna. *Biological Conservation* 104, 265–273
- Walker M, Head MJ, Berkelhammer M, et al., 2018. Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/ Epoch (Quaternary System/Period): Two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/ subseries. *Episodes* 41, 213-223
- Wanner H, Solomina O, Grosjean M, et al., 2011. Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Reviews* 30, 3109-3123
- Whittaker RJ, Willis KJ, Field R, 2001. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity. *Journal of Biogeography* 28, 453-470
- Wieckowska M, Dörfler W, Kirleis W, 2012. Vegetation and settlement history of the past 9000 years as recorded by lake deposits from Großer Eutiner See (Northern Germany). *Review of Palaeobotany and Palynology* 174, 79-90
- Willis KJ, Araujo MB, Bennett KD, et al., 2007. How can a knowledge of the past help to conserve the future? Biodiversity conservation and the relevance of long-term ecological studies. *Phil. Trans. R. Soc. B* 362, 175-186
- Willis KJ, Bailey RM, Bhagwat SA, Birks HJB, 2010. Special Issue: Long-term ecological research Biodiversity baselines, thresholds and resilience: testing predictions and assumptions using palaeoecological data. *Trends in Ecology and Evolution* 25, 583-591
- Willis KJ, Bhagwat SA, 2009. Biodiversity and Climate Change. *Science* 326, 806-807
- Willis KJ, Birks HJB, 2006. What is natural? The need for a long-term perspective in biodiversity conservation. *Science* 314, 1261-1265
- Wilmans O, 1997. On the history of Central European dry grassland communities since the Late-Glacial: Methods, facts, hypotheses. *Phytocoenologia* 27, 213–233
- Winter S, Fischer HS, Fischer A, 2010. Relative Quantitative Reference Approach for Naturalness Assessments of forests. *Forest Ecology and Management* 259, 1624-1632
- Woodcock TS, Huryn AD, 2007. The response of macroinvertebrate production to a pollution gradient in a headwater stream. *Freshwater biology* 52, 177-196
- Worm B, Barbier EB, Beaumont N, et al., 2006. Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science* 314, 787-790
- Zalasiewicz J, Waters CN, 2018. Arguments for an official Global Stratotype Section and Point for the Anthropocene. In: DellaSala DA, Goldstein MI (Eds). *The Encyclopedia of the Anthropocene* 1, Elsevier, Oxford, 29-34 pp
- Zalasiewicz J, Waters CN, Wolfe AP, et al., 2017. Making the case for a formal Anthropocene Epoch: an analysis of ongoing critiques. *Newsletters on Stratigraphy* 50, 205-226
- Zalasiewicz J, Waters C, Summerhayes C, et al., 2018. The Anthropocene. *Geology Today* 34, 177-181
- Zohary D, Hopf M, Weiss E, 2012. *Domestication of plants in the Old World: the origin and spread of domesticated plants in Southwest Asia, Europe, and the Mediterranean Basin*. Oxford University Press, Oxford
- Zolitschka B, Behre K-E, Schneider J, 2003. Human and climatic impact on the environment as derived from colluvial, fluvial and lacustrine archives-examples from the Bronze Age to the Migration period, Germany. *Quaternary Science Reviews* 22, 81-100

7. Annexes

Annexe 1a :

Poster EPPC 2014 - 9th European Paleobotany Palynology
Conference (Padoue, août 2014). Robin et al. ----- 118

Annexe 1b :

Poster EGU - European Geosciences Union general assembly 2018
(Vienne, avril 2018). Robin & Nelle -----119

Annexe 2 :

Poster Anthraco2015 – Local to global significance of charcoal
science (Fribourg-en-Brigau, Septembre 2015). Robin et al. -----120

Annexe 3 :

Poster ECOVEG 10 - Congrès francophone d'écologie des
communautés végétales (Lyon, avril 2014). Robin et al. ----- 121

Annexe 4 :

Poster Anthraco2019 - Charcoal Science in Archaeology and
Palaeoecology (Liverpool, September 2019). Keller et al. -----122

Annexe 5 :

Poster Anthraco2019 - Charcoal Science in Archaeology and
Palaeoecology (Liverpool, September 2019). Oliveira et al. ----- 123

Multi-proxy reconstruction of past fire regime of northern central Europe: an innovative approach for a detailed assessment of fire history and ecosystem response

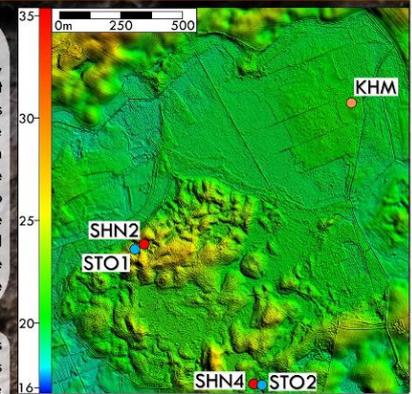
Vincent Robin^a, Marie-Josée Nadeau^a, Oliver Nelle^b



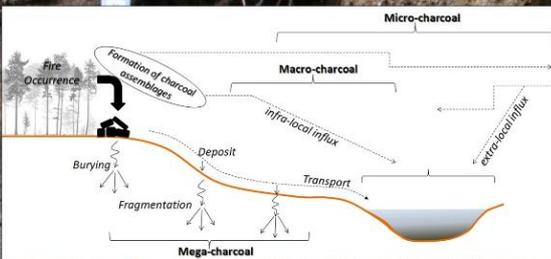
Palaeofires had and, on some areas, still have a key influence on vegetation establishment and change as disturbance event of the ecosystem, over millennial scale. While this is well known for Mediterranean and Boreal areas, the role of past fire occurrences in the dynamics of central European ecosystems is less understood, and appears even poorly documented in term of fire signal inferred from natural archives, such as lake sediment and peat sequences. Such lack constitutes a considerable gap in the long time perspective of ecological mechanics involved in the Quaternary vegetation history of central Europe. Indeed, even if ecosystems central Europe are less "fire sensible" than those of others biomes, it appeared that fire activity, related to phases of drought or / and to human activities, might have significant "event-based" impact on their dynamics, inducing non-linear response of the ecosystems. Thus, to better reconstruct and understand the dynamics of central European ecosystems it is necessary to consider the role of past fire regimes. Moreover, because of the influences of human activities on the past fire regime and on the landscape structure, it is expected that a significant part of the influences of past fire occurrences happened on a fine spatial level, with also variations of temporal patterns in high temporal resolution. Therefore, to contribute to fill the gap about fire history in central Europe, we developed an innovative research project to reconstruct past fire regime from local to regional scales.

The approach we apply is based on the analysis of various types of fossil charcoal records, gathered from various types of natural archives, form a same ecological unit, permitting to assess by comparison the past fire regime at various spatial levels, and in different, independent, chronological frame. The study area is localized in northern central Europe (Schleswig-Holstein, Northern Germany), in the domain of temperate broadleaf forests, under oceanic climate.

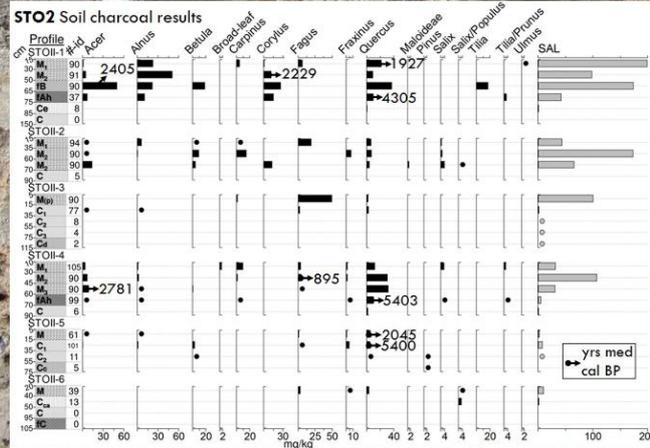
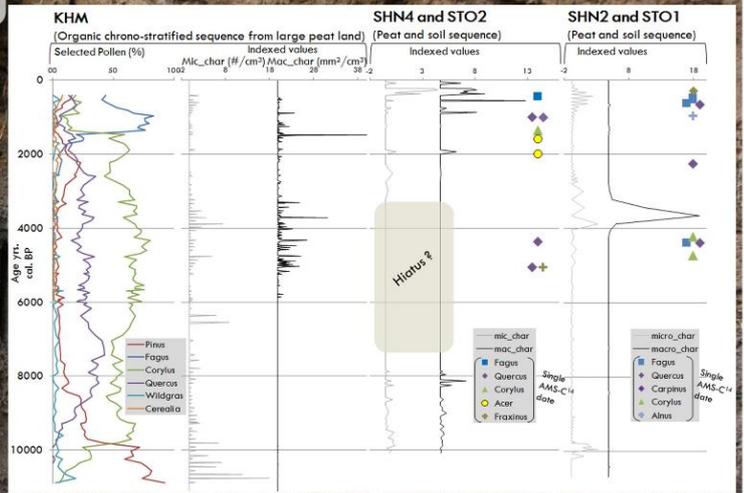
Micro- and macro-charcoal signals have been extracted from peat and lake sediment archives, with large and small catchment areas. Mega-charcoals assemblages were extracted from soils samples taken from the surroundings of the cored mires and lakes.



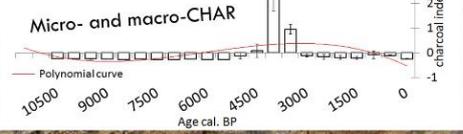
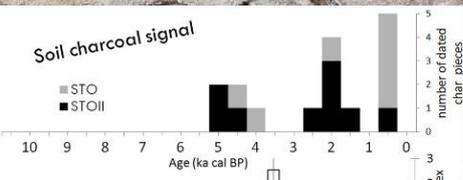
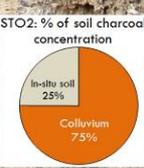
Archive types:
 ● Organic chrono-stratified sequence from small forest hollow
 ● Organic chrono-stratified sequence from large peat land
 ● Soil sediment sequence



The micro-charcoal records were quantified by counting on pollen-slides. The macro-charcoal records were quantified according to sieving-methods (at 200µm mesh size) and digital measurement. The mega-charcoal assemblages were quantified by sieving at 1mm mesh size and calculation of soil charcoal concentration according to the pedoanthracological method. Moreover, the mega-charcoal assemblages have been matter of taxonomical analysis. All the quantified charcoal records were also related to their chronological frames according to AMS radiocarbon dating, and the construction of age-depth models for the chrono-stratified sequences. In addition, on the same sampled archives, to observed change in vegetation related to potentially detected fire events, pollen analyses were done.



The three sampled chrono-stratified sequences indicate various period of high fire activity, either based on micro- and macro-charcoal. The radiocarbon dating of some mega-charcoal pieces from soil samples provides additive information about fire events, in terms of age, spatial scale, and type of fuel. The later is supported by pollen record indicating vegetation composition before and after the fire. Thus, the integrated analysis of the various paleo-signals investigated on the study area permits to identify the general trends of fire activity increasing from 5000 yrs. cal. BP, into a broad-leaf dominated forest, and with a variation of spatial magnification in high resolution (about few tens meters). This later point permits to postulate the probable heterogeneous forest structure inducing fire disjunctions, and/or the role of human activities probably integrating fire as a tool to manage landscapes. This role of human activities is supported by the fact that most of the soil charcoal record is contained in colluvial layers.

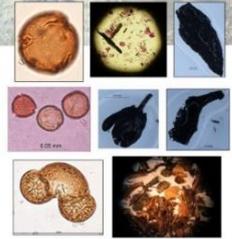


The gathered data and the insights they provide allows to stress: 1) the great complementary of the applied "multi-assemblages and multi-archive" charcoal analysis, which permits to reconstruct in details several parameters of the past fire regime (i.e. fire frequency, type of fuel, magnitude, etc.); 2) the identification of regional synchronicities of fire disturbance occurrences and of the ecosystems responses; 3) the local asynchronicities probably related to local human activities.

Comparative assessment of various charcoal records on a same site: a way to better tackle past fire regime?

Vincent Robin¹ & Oliver Nelle²

In central Europe fire activity, related to phases of drought or / and to human activities, might have significant "event-based" impact on the ecosystem dynamics. Thus, to better reconstruct and understand the dynamics of central European ecosystems it is necessary to consider the role of past fire regimes. But because of the influences of human activities on the past fire regime and on the landscape structure, it is expected that a significant part of the influences of past fire occurrences happened on a fine spatial level, with also variations of temporal patterns in high temporal resolution. Therefore, to contribute to fill the gap about fire history in central Europe, we developed an innovative research project to reconstruct past fire regime from local to regional scales. We analyzed various types of botanical fossils (charcoal and pollen; Table), gathered from various types of natural archives, from a same ecological unit, permitting to assess by comparison the past fire regime at various spatial levels, and in different, independent, chronological frame. The study area is localized in northern central Europe (Fig. 1).



Area	Archive type	Soil_char	Macro_char	Micro_char	Pollen
Stodthagen-Kaltenhofen					
STO 1 to 6	Soil sediment	■	■	■	■
SHN2	Peat	■	■	■	■
SHN5	Peat / Lake	■	■	■	■
KHM	Peat / Lake	■	■	■	■
Belau					
BWIII, IV, V	Soil sediment	■	■	■	■
BLS40		■	■	■	■
BLS140		■	■	■	■
BLS200	Peat / Lake	■	■	■	■
VIE		■	■	■	■
BEM		■	■	■	■

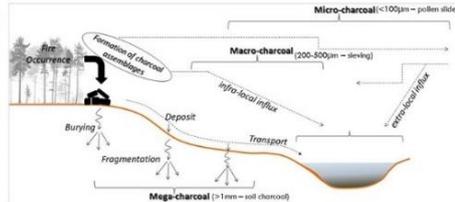
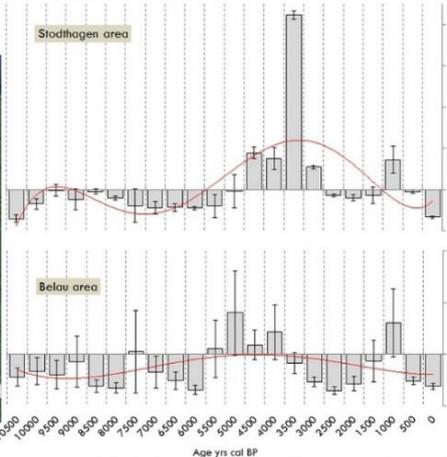


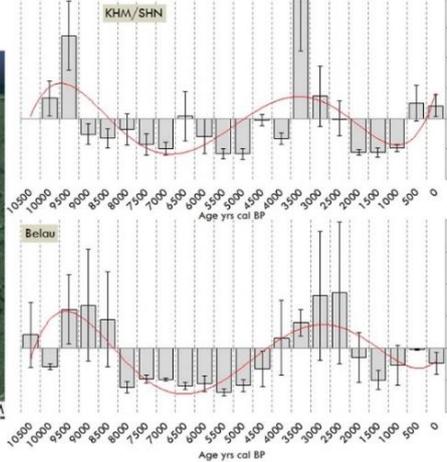
Fig. 1: Study areas Stodthagen-Kaltenhofen and Belauer See in Schleswig-Holstein, Northern Germany.

Fire signals from the various archives sampled have been combined by normalization, standardization on time windows of 500 yrs.

Fire signal inferred from macro-charcoal data



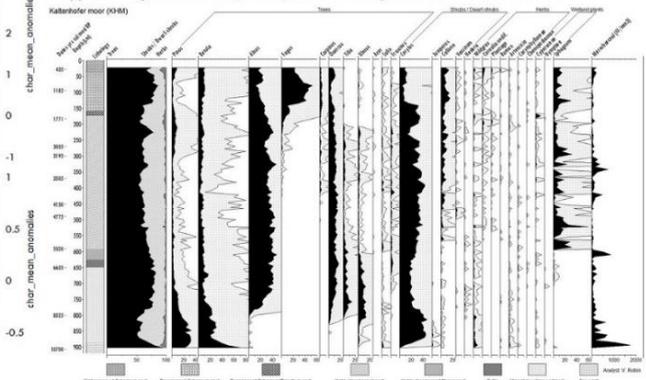
Fire signal inferred from micro-charcoal data



The integrated analysis of the various paleo-signals permits to identify the general trends of fire activity increasing from 5000 yrs. cal. BP, into a broad-leaf dominated forest, and with a variation of spatial magnification in high resolution. We can also postulate the heterogeneous forest structure inducing fire disjunctions, and/or the role of human activities probably integrating fire as a tool to manage landscapes.

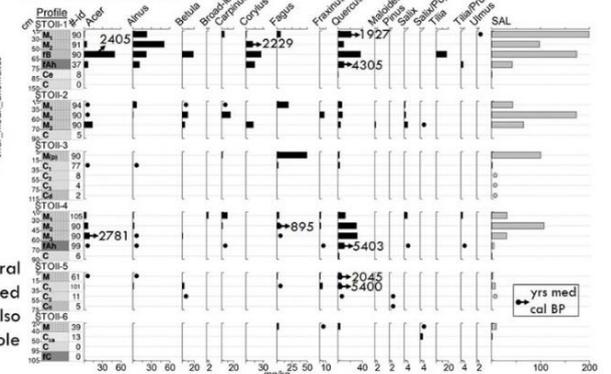
This role of human activities is supported by the fact that most of the soil charcoal record is contained in colluvial layers. The gathered data and the insights they provide allows to stress: 1) the great complementary of the applied "multi-assemblages and multi-archive" charcoal analysis, which permits to reconstruct in details several parameters of the past fire regime (i.e. fire frequency, type of fuel, magnitude, etc.); 2) the identification of regional synchronicities of fire disturbance occurrences and of the ecosystems responses; 3) the local asynchronicities probably related to local human activities.

Pollen data and soil charcoal identification provide information about what type of vegetation burnt, when, and the adaptation of the communities



The calculation of a combine fire signal permits to identify regional trends of fire activity, with some heterogeneities according to the scale of the signals. In addition it was observed that the three sampled chronostratified sequences indicate various period of high fire activity, either based on micro- and macro-charcoal. The radiocarbon dating of some soil mega-charcoal pieces provides additive information about the ages of local. The pollen data indicates the vegetation composition before and after the fire.

STO2 Soil charcoal results



Soil charcoal analysis of a Mediterranean old-growth: historical relict or anomaly?

Vincent Robin¹, Stefan Dreibröd², and Brigitte Talon³

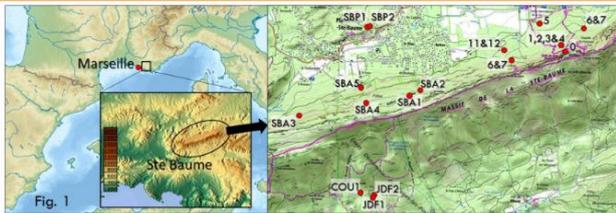


Fig. 3 Drawing of the Dominican Abbey of the Sainte Baume forest from the XVI century. Scan of the book *Provence mystérieuse*, Clébert, 1986)

Introduction

Old-growth forests are rare in the Mediterranean biogeographic context. When existing they are isolated on restricted areas. And thus often the discussion remains open about their origin, and the reason why they are today in such isolated and restricted location. This is the case of the Sainte Baume forest, in the south-East of France (Fig. 1). This forest is highly specific since it is, for a large part, a **beech (*Fagus sylvatica*) dominated forest, isolated in the surrounding of garrigue landscape**. This is a relatively small forest, localized from 700 to 900 m a.s.l., at the northern bottom of a calcareous cliff (Fig. 2). This specific location provides suitable meso-climatic conditions for the presence and growth of trees such as beech and yew (*Taxus baccata*). Such **particular conditions might be the main explication for the subsistence of this particular broad-leaf forest** after its natural establishment, before the strong human impact and the related soil degradation, when this forest might have had a larger geographical distribution at landscapes and even at regional scale. However, one can stress the low plausibility of such previous scenario, due to the **antagonism existing between the beech and yew auto-ecologies and the Mediterranean climate**. Thus, to explain the presence of this forest it is also postulated the possible role of Human. Indeed, into the forest there is a monastery dating back to the 12th century (Fig. 3). This monastery is related to a holly-statute to the forest, which greatly contributes to its subsistence until recent times. It was postulated the possibility that monks planted beech and yew into the area. Thus, the question is still open about (1) **the origin of the Sainte Baume forest, and especially about the beech community**, (2) **its history in terms of forest dynamic**, and (3) **its past distribution**.

Here are presented the results from soil charcoal investigations that have been done to assess the origin and the history of this forest and its surroundings. The soil charcoal analysis has been selected as a key approach because it provides paleoecological insights at the scale of the forest stand, about both fire and forest history.



Sampling

It was sampled a total of 16 into the forest area, more or less near the cliff, and a long east-west gradient (Fig. 1). Moreover, it was sampled 5 soil profiles out of the current distribution of the Sainte Baume forest (2 on the plateau north of the forest, in a pine forest, and 3 on the southern exposure of the cliff, in a garrigue). Each profile of sampling was described in terms of soil stratigraphy to have the context of the soil charcoal assemblages extracted from them.

Results & Discussion

The quantification of the assemblages in macroscopic charcoals in the soil samples indicates a **highly heterogeneous charcoal concentrations**, from low to high quantities (Fig. 4). Such variation of charcoal concentrations does not seem to change depending on whether the samples are from inside or outside the forest area. It seems that such variation of charcoal concentrations depends more on the profile location related to the erosion history on the catchment area. Such **erosion history is related to the fire & deforestation history, probably related to past human activities**. Also, it is observed a important variation of charcoal concentration in the sampled profiles, according to the stratigraphic units. In most of the cases the colluvial layers present higher charcoal concentration than the soil horizons (Figs 5, 6, & 7). This observation supports the important relation between soil erosion fire/deforestation (i.e., forest cover changes).

The taxonomical identification of the charcoal assemblages provides a large range of species depending on the location of the assemblages. From the samples of the forest area, it is find a **significant presence of broad-leaf species, including deciduous oak (*Quercus* spp.) and beech**. In the assemblages from samples out of the forest area it is find a **majority of evergreen specie** (e.g., *Arbutus* spp., *Phillyrea* spp., *Pistacia* spp., etc.). These distribution of tree species types fits to the current distribution of the forest versus garrigue. However, it is interesting to note that in the assemblages from the samples of the southern exposure few charcoal pieces of deciduous oak.

First radiocarbon dates, from the forest area, indicate that **beech is present in the forest since at least several centuries before the establishment of the monastery**, with notably a date from 1706-1562 yrs cal BP. Additional 27 single charcoal pieces, including 19 from the forest area, 2 from the northern plateau, and 6 from the southern exposure of the Sainte Baume, have been selected and sent for radiocarbon dating. **We are hoping exciting results!!**

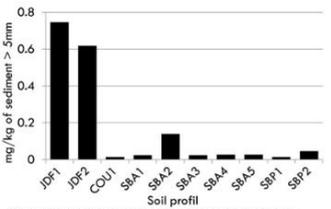


Fig. 4: total soil charcoal concentration per sampled soil profile.

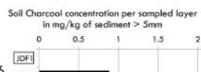
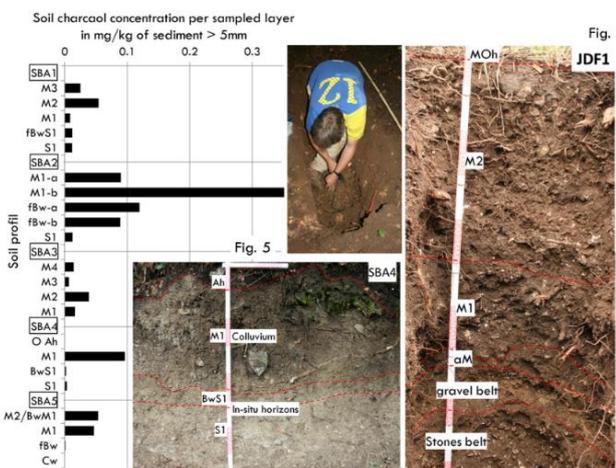


Fig. 6: Soil charcoal concentration per sampled layer in mg/kg of sediment > 5mm for profiles JDF1 and JDF2.



Fig. 7: Soil charcoal concentration per sampled layer in mg/kg of sediment > 5mm for profiles SBA1 and SBA2.

Conclusions

The results show that the beech are isolated in the surrounding landscape on a very long time scale, so it is highly probable that the Sainte Baume forest is from a natural origin. Later one, the presence of the monastery has probably a key role by giving to the area a "holly statute" and thus protecting it. Nevertheless, the evidences for erosion, and evergreen vegetation, in and around the forest, show the **occurrences of disturbances of the dynamic at forest and landscape scales**. However, probably these disturbances were not under a regime that induces a degradation of the vegetation community inside the forest, in contrary than its surroundings. Due to the small number of profiles out of the forest area, the question remains open about the past extension of the broad-leaf forest, and the way and period of colorization of beech and yew on the area. This might be the next steps of the research in this area.

¹Dept. TESAF, Padova University, Italy and University of Lorraine, France
robin_vinc@yahoo.fr
http://vincentrobin.com



²University of Kiel, Germany



³IMBE, Aix-Marseille University, France



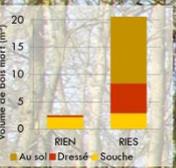
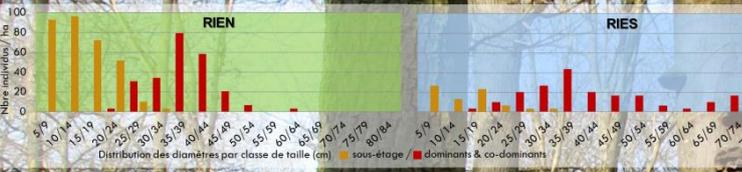
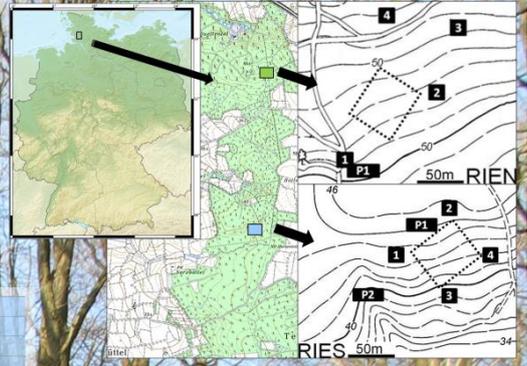
Evaluation interdisciplinaire de la naturalité forestière: le cas d'étude de la forêt de Riesewohld (Schleswig-Holstein, Allemagne)



Vincent Robin^a, Jean-Louis Edouard^b, Hans-Rudolf Bork^a, Oliver Nelle^a

Introduction La notion de naturalité, complémentaire de la notion de biodiversité, consiste à identifier le niveau de contrôle et/ou d'influence des activités humaines, versus dynamique naturelle, sur l'état des communautés. Connaître le niveau de naturalité d'un système écologique contribue à orienter sa gestion raisonnée, que ce soit dans une perspective de gestion durable, de restauration et/ou de conservation. L'empreinte humaine sur l'état des systèmes écologiques concerne une large gamme de composantes et de processus, et s'exprime à différents niveaux spatio-temporels. L'évaluation de la naturalité se base donc sur différents indicateurs, complémentaires, permettant de prendre en compte la dimension rétrospective (historique) des systèmes. De plus, pour une évaluation pertinente de la naturalité, celle-ci doit être faite à l'échelle de la communauté et/ou de la population. Evaluer la naturalité à cette échelle spatiale permet de prendre en compte les occurrences locales de l'influence humaine, et d'identifier la naturalité à une échelle cohérente pour la planification de la gestion. Ainsi, nous présentons ici une approche pour évaluer la naturalité forestière, qui repose sur l'utilisation d'indicateurs complémentaires et pertinents du millénaire à la décennie, et à l'échelle de la population forestière.

Sites d'étude et méthodes Deux sites d'étude ont été sélectionnés dans la forêt de Riesewohld dans le nord de l'Allemagne. Des études archéobotaniques et palynologiques indiquent la présence de ce massif forestier depuis au moins 500 ans, ce qui justifie son statut actuel de conservation biologique. A l'échelle de la région les forêts représentent à peine ~10 % de la surface des terres, et seulement ~2 % de la surface forestière de la région sont sous un statut de protection. Il y a donc de forts enjeux de conservation forestière, au niveau régional et local, pour le site de Riesewohld. Sur chacun des sites, RIEN et RIES, nous avons analysé (1) l'état forestier actuel, (2) les séries de cernes de croissance de 20 arbres dominants, et (3) les assemblages pédoanthracologiques.



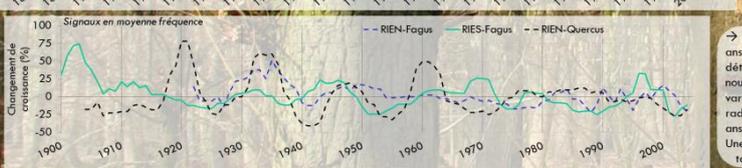
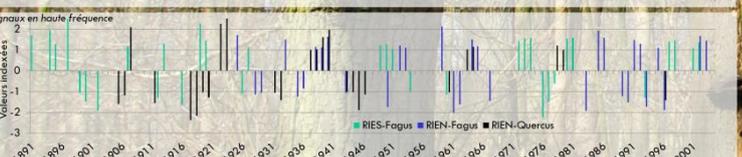
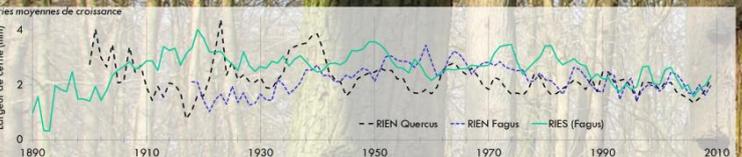
(1) A propos de l'état forestier
Sur la base d'indicateurs de structure tels que la distribution des diamètres des arbres, la densité, la surface tarière, et selon la variabilité de la composition forestière en place et de la régénération, on observe que le site RIEN est bien plus hétérogène (complexe) que le site RIEN. De plus, le site de RIES présente de niveaux de bois mort bien plus importants, dans l'ensemble du type de pièces inventoriées, que le site de RIEN, ce qui est une indication directe d'un niveau de naturalité plus élevé. Ainsi, l'état forestier actuel du site de RIES, présente des caractéristiques directes de maturité forestière naturelle (ex. arbres de large dimension, bois mort), alors que le site RIEN présente des caractéristiques d'état plus juvénile de la dynamique forestière (phase biostatique jeune).

Espèces	Densité (n/ha)	Densité relative (%)	Surface tarière (m²/ha)		Densité de régénération (n/ha)
			totale	sous-étage (%)	
RIEN					
<i>Acer platanoides</i>	3	1	0.01	100	134000 (Acer sp.)
<i>Alnus glutinosa</i>	76	13	2.88	21	
<i>Betula pendula</i>	17	3	0.98	6	
<i>Carpinus betulus</i>	62	11	2.35	23	12000
<i>Fagus sylvatica</i>	162	29	3.67	17	8000
<i>Fraxinus excelsior</i>	117	21	12.58	6	2000
<i>Quercus spp.</i>	34	6	3.70	6	4000
<i>Tilia cordata</i>	93	16	1.03	100	
Totals	564	100	13.51	17	160000
RIES					
<i>Acer platanoides</i>	27	10	0.30	100	203800 (Acer sp.)
<i>Alnus glutinosa</i>	3	1	0.36		
<i>Betula pendula</i>	3	1	0.19		
<i>Carpinus betulus</i>	23	8	1.34	10	6200
<i>Fagus sylvatica</i>	140	50	5.97	3	600
<i>Fraxinus excelsior</i>	67	24	10.19		53400
<i>Quercus spp.</i>	17	6	2.04		200
Totals	280	100	30.43	2	62400

(2) A propos des patrons de croissance radiale des arbres
Sur RIES il a été obtenu une série moyenne de croissance radiale de 124 années, avec un cerne moyen de 2,52 mm (cerne minimum : 0,23 mm ; cerne maximum : 4,02). Sur RIEN il a été obtenu deux séries moyennes de croissance radiale. Une série de hêtres, de 92 années, avec un cerne moyen de 2,23 mm (cerne minimum : 0,76 mm ; cerne maximum : 4,37). Une série de chênes, de 110 années, avec un cerne moyen de 2,21 mm (cerne minimum : 1,03 mm ; cerne maximum : 3,45).

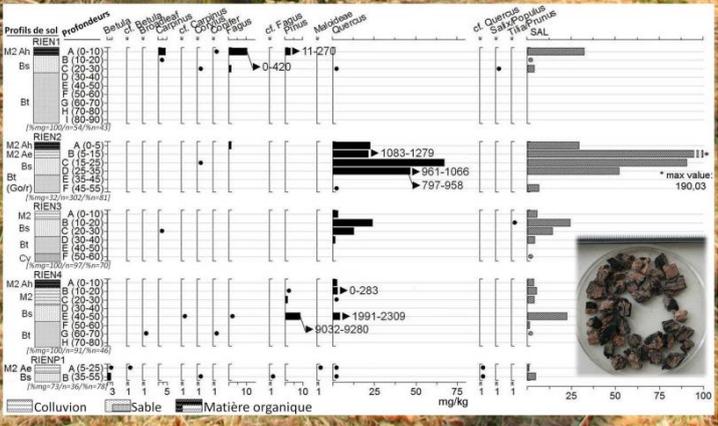
→ La standardisation en haute fréquence (variation annuelle de la largeur des cernes) des trois séries moyennes de croissance radiale (RIES-Fagus, RIEN-Fagus, RIEN-Quercus) permet d'identifier des années caractéristiques de croissance significative. La comparaison des années caractéristiques permet d'identifier de patrons de croissance largement différents entre RIES et RIEN. Seulement trois années présentent une synchronicité de croissance. Les deux séries moyennes de RIEN présentent beaucoup plus d'années caractéristiques synchrones. La croissance radiale des populations forestières de deux sites d'étude apparaît donc contrôlée par des processus locaux.

→ La standardisation en moyenne fréquence (variation de la largeur des cernes sur des fenêtres de 5 ans) des trois séries moyennes de croissance radiale (RIES-Fagus, RIEN-Fagus, RIEN-Quercus) permet de déterminer les patrons et l'amplitude des changements de croissance. Entre RIES et RIEN on observe de nouveau une asynchronicité des changements de croissance, qui de plus, présentent des amplitudes variables. Ces observations confirment l'importance des processus locaux sur les patrons de croissance radiale des populations forestières de Riesewohld. De plus on observe une certaine cyclité, sur ~20 ans, de croissance/saturation/croissance, relativement marquée sur RIES, et nettement marquée sur RIEN. Une telle cyclité peut indiquer des prélèvements réguliers de bois par l'homme, selon une gestion en taillis, comme le laissent supposer des souches en cèpée sur place.



(3) A propos des charbons de bois enfouis dans le sol
Au total, il a été identifié taxonomiquement 460 fragments de charbons de bois issus de 6 profils de sol sur RIES, et 617 fragments issus de 5 profils de sols de RIES. Pour chaque profil de sol un échantillonnage par niveau stratigraphique a permis une quantification de la concentration en charbons de bois. De plus sur les deux sites les profils de sols échantillonnés ont été décrits.
Les principales observations sont :
- les espèces identifiées dans les assemblages fossiles sont toutes présentes aujourd'hui au niveau du massif forestier de Riesewohld, mais on observe quelques différences au niveau des sites d'étude. A l'inverse, le frêne, aujourd'hui largement présent sur les deux sites, n'a pas été identifié dans les assemblages fossiles. Le chêne, puis le hêtre, sont les espèces dominantes des assemblages fossiles, et de la dynamique forestière in-situ, depuis, respectivement ~2000 et ~500 ans.
- La richesse en charbon de bois est, en général, plus importante dans les niveaux stratigraphiques de colluvionnement. Ceci est une indication directe pour un possible usage du feu par l'homme, ouvrant le couvert forestier, ce qui permet au processus de colluvionnement d'avoir lieu.
- D'après les 14 datations radiocarbones obtenues pour les deux sites, le double processus, feu-colluvionnement, semble débuter au cours de l'Age du fer, ce qui est cohérent avec des évidences archéologiques de développement humain au niveau régional pour cette période.

Conclusion La dynamique forestière est influencée par les activités humaines depuis au moins 2000 ans, et jusqu'à il y a 30-40 ans. Les activités humaines au cours des deux derniers millénaires semblent avoir favorisé la présence du chêne, puis du hêtre, comme essences forestières dominantes. Pendant le siècle dernier, l'utilisation de la ressource forestière en taillis, de plus en plus modérée, jusqu'à cesser il y a environ trois décennies, a permis l'installation naturelle d'une végétation forestière "secondaire" (ex. frêne, aune). Le développement hétérogène de cette végétation secondaire, en parallèle à une influence humaine localement hétérogène, et ainsi des populations de hêtre et de chêne laissées progressivement à elles-mêmes, induisent des variations locales de dynamique et d'état forestier. Ainsi RIES présente un niveau de naturalité aujourd'hui plus élevé que RIEN. Toutefois, cette différence ne semble être due qu'à un décalage de maturité forestière. De façon générale, on observe des niveaux de naturalité qui ont été faibles au cours des deux derniers millénaires mais qui sont clairement en phase d'amélioration. Ainsi, la naturalité du massif forestier de Riesewohld ne semble pas nécessiter d'intervention de restauration, mais justifie le statut de conservation biologique de la zone, qui par l'augmentation de la maturité forestière devrait encore voir son niveau de naturalité augmenter.





A CHARCOAL STUDY TO BETTER UNDERSTAND LYNCHET CONSTRUCTION AND LYNCHET LANDSCAPE HISTORY.



Keller Benjamin¹; Robin Vincent²; Herrault Pierre-Alexis¹; Ertlen Damien¹; Magar François³ and Schwartz Dominique¹

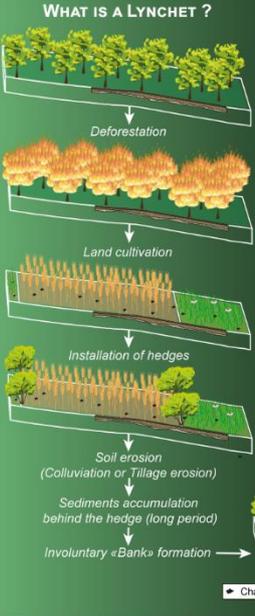









WHAT IS A LYNCHET ?



WHY STUDY LYNCHETS ?
- The lynchet forms in hedge landscapes since the ancient times. The charcoals stored in the bank helps us to define the woodlands composition before clearing of the forest or the composition of the hedge itself. It also allows us to date agrarian forms, thus helping us defining the cycles of cultivation, hedge and landscape history.

STUDY LOCATION

- The study sites are located in Grand Est region (France) and Obergaillbach is part of Regional Natural Park of the Northern Vosges. One site is located at Obergaillbach (Moselle 57) and one site is located at Saales (Bas-Rhin 67).

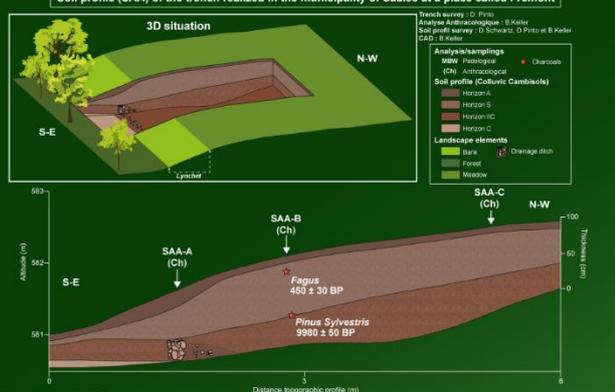
STUDY CONTEXT

- Obergaillbach site (MBW) is located under forest in a gentle slope (9%) with an altitude of 352m.
- Saales site (SAA) is located on meadow in a slope (14%) with an altitude of 582m.

LANDSCAPE CONTEXT

- Lynchets have been conserved in the both sites. Perhaps, some of these forms have been destroyed or disappeared because of reparation, development, erosion...
- According maps, aerial photograph, forestry datas... MBW site has been under forest since 18e century.
- 4 km from MBW site there is a Gallo-Roman site (European Archaeological Park Bliesbruck-Reinheim)
- According from maps and aerial photograph, MBW site has been cultivated since the 19^e century.
- At proximity SAA site there is a mine site dating 16^e century.

Soil profile (SAA) of the trench realized in the municipality of Saales at a place called Frémont



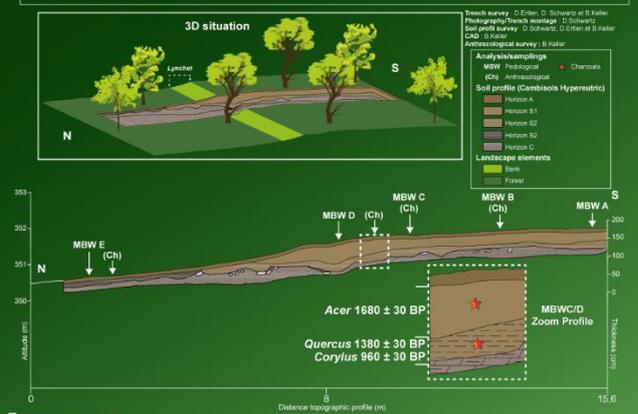
TRENCH ANALYSE
- Trench profiles show raising of the soil horizon (S). Proof of sediments accumulation behind a hedge. This "bank" is not a voluntary construction like a terrace.
- In SAA profile there is a drainage ditch probably contemporary at the cultivation of landscape. Probably the ditch limited the run-off and soil erosion or the stagnation water.

DISCUSSION ABOUT SAA-B PROFILE
- *Pinus Sylvestris* (9980 ± 50 BP) doesn't correspond to the first period of cultivation (first european cultivation 5500-4900 cal BC). However, this "old" charcoal allow to show probably the charcoal remobilisation by colluviation and the storage in the lynchet.
- *Fagus* (450 ± 30 BP) correspond to mine site exploitation period. Two possibilities : this charcoal correspond to the first cultivation or one of recultivation phase due to mine site exploitation, or the site was already in culture and the charcoal has been remobilisat by erosion due to the déforestation engender by the mine exploitation.
- The total Anthracomass (ATM) and species nombre are higher in the S horizon. The species are heterogeneous but some are mature forest species

SAA-B Specific Anthracomass

Horizon	Species	Age (BP)
Horizon A	No sampling	
Horizon S1	<i>Fagus</i>	450 ± 30 BP
Horizon S2	No sampling	
Horizon S3	No sampling	
Horizon S4	No sampling	
Horizon S5	No sampling	
Horizon S6	No sampling	
Horizon S7	No sampling	
Horizon S8	No sampling	
Horizon S9	No sampling	
Horizon S10	No sampling	
Horizon S11	No sampling	
Horizon S12	No sampling	
Horizon S13	No sampling	
Horizon S14	No sampling	
Horizon S15	No sampling	
Horizon S16	No sampling	
Horizon S17	No sampling	
Horizon S18	No sampling	
Horizon S19	No sampling	
Horizon S20	No sampling	
Horizon S21	No sampling	
Horizon S22	No sampling	
Horizon S23	No sampling	
Horizon S24	No sampling	
Horizon S25	No sampling	
Horizon S26	No sampling	
Horizon S27	No sampling	
Horizon S28	No sampling	
Horizon S29	No sampling	
Horizon S30	No sampling	
Horizon S31	No sampling	
Horizon S32	No sampling	
Horizon S33	No sampling	
Horizon S34	No sampling	
Horizon S35	No sampling	
Horizon S36	No sampling	
Horizon S37	No sampling	
Horizon S38	No sampling	
Horizon S39	No sampling	
Horizon S40	No sampling	
Horizon S41	No sampling	
Horizon S42	No sampling	
Horizon S43	No sampling	
Horizon S44	No sampling	
Horizon S45	No sampling	
Horizon S46	No sampling	
Horizon S47	No sampling	
Horizon S48	No sampling	
Horizon S49	No sampling	
Horizon S50	No sampling	
Horizon S51	No sampling	
Horizon S52	No sampling	
Horizon S53	No sampling	
Horizon S54	No sampling	
Horizon S55	No sampling	
Horizon S56	No sampling	
Horizon S57	No sampling	
Horizon S58	No sampling	
Horizon S59	No sampling	
Horizon S60	No sampling	
Horizon S61	No sampling	
Horizon S62	No sampling	
Horizon S63	No sampling	
Horizon S64	No sampling	
Horizon S65	No sampling	
Horizon S66	No sampling	
Horizon S67	No sampling	
Horizon S68	No sampling	
Horizon S69	No sampling	
Horizon S70	No sampling	
Horizon S71	No sampling	
Horizon S72	No sampling	
Horizon S73	No sampling	
Horizon S74	No sampling	
Horizon S75	No sampling	
Horizon S76	No sampling	
Horizon S77	No sampling	
Horizon S78	No sampling	
Horizon S79	No sampling	
Horizon S80	No sampling	
Horizon S81	No sampling	
Horizon S82	No sampling	
Horizon S83	No sampling	
Horizon S84	No sampling	
Horizon S85	No sampling	
Horizon S86	No sampling	
Horizon S87	No sampling	
Horizon S88	No sampling	
Horizon S89	No sampling	
Horizon S90	No sampling	
Horizon S91	No sampling	
Horizon S92	No sampling	
Horizon S93	No sampling	
Horizon S94	No sampling	
Horizon S95	No sampling	
Horizon S96	No sampling	
Horizon S97	No sampling	
Horizon S98	No sampling	
Horizon S99	No sampling	
Horizon S100	No sampling	

Soil profile (MBW) of the trench realized in the municipality of Obergaillbach at a place called Mittelbruckerwald



TRENCH ANALYSE
- Trench profiles show raising of the soil horizon (S). Proof of sediments accumulation behind a hedge. This "bank" is not a voluntary construction like a terrace.
- In MBW profile there is two S horizon. The S1 horizon is more loamy and probably a colluvic horizon. Moreover, this horizon disappeared after the "bank".

DISCUSSION ABOUT MBWC/D PROFILE
- *Acer* (1680 ± 30 BP) could correspond to the first cultivation in this area at the end of the Roman empire, probably due to the Gallo-roman site presence.
- *Quercus* (1380 ± 30 BP) correspond to probably a new deforestation. A polynic study do to Moselle department shows a landscape dominated by forest (mostly *Quercus*) during the High Middle Ages, nevertheless there is a raising of cereal values almost at the same period [Ruffaldi et al., 2007].
- *Corylus* (960 ± 30 BP) correspond an opened of landscape during the central Middle Age, the same study confirm a high anthropisation during the late Middle Age [Ruffaldi et al., 2007].
- The total Anthracomass (ATM) and species nombre are higher in the S horizon. The species are mostly heliophilous.

MBWC/D Specific Anthracomass

Horizon	Species	Age (BP)
Horizon A	No sampling	
Horizon S1	<i>Acer</i>	1680 ± 30 BP
Horizon S2	<i>Quercus</i>	1380 ± 30 BP
Horizon S3	<i>Corylus</i>	960 ± 30 BP
Horizon S4	No sampling	
Horizon S5	No sampling	
Horizon S6	No sampling	
Horizon S7	No sampling	
Horizon S8	No sampling	
Horizon S9	No sampling	
Horizon S10	No sampling	
Horizon S11	No sampling	
Horizon S12	No sampling	
Horizon S13	No sampling	
Horizon S14	No sampling	
Horizon S15	No sampling	
Horizon S16	No sampling	
Horizon S17	No sampling	
Horizon S18	No sampling	
Horizon S19	No sampling	
Horizon S20	No sampling	
Horizon S21	No sampling	
Horizon S22	No sampling	
Horizon S23	No sampling	
Horizon S24	No sampling	
Horizon S25	No sampling	
Horizon S26	No sampling	
Horizon S27	No sampling	
Horizon S28	No sampling	
Horizon S29	No sampling	
Horizon S30	No sampling	
Horizon S31	No sampling	
Horizon S32	No sampling	
Horizon S33	No sampling	
Horizon S34	No sampling	
Horizon S35	No sampling	
Horizon S36	No sampling	
Horizon S37	No sampling	
Horizon S38	No sampling	
Horizon S39	No sampling	
Horizon S40	No sampling	
Horizon S41	No sampling	
Horizon S42	No sampling	
Horizon S43	No sampling	
Horizon S44	No sampling	
Horizon S45	No sampling	
Horizon S46	No sampling	
Horizon S47	No sampling	
Horizon S48	No sampling	
Horizon S49	No sampling	
Horizon S50	No sampling	
Horizon S51	No sampling	
Horizon S52	No sampling	
Horizon S53	No sampling	
Horizon S54	No sampling	
Horizon S55	No sampling	
Horizon S56	No sampling	
Horizon S57	No sampling	
Horizon S58	No sampling	
Horizon S59	No sampling	
Horizon S60	No sampling	
Horizon S61	No sampling	
Horizon S62	No sampling	
Horizon S63	No sampling	
Horizon S64	No sampling	
Horizon S65	No sampling	
Horizon S66	No sampling	
Horizon S67	No sampling	
Horizon S68	No sampling	
Horizon S69	No sampling	
Horizon S70	No sampling	
Horizon S71	No sampling	
Horizon S72	No sampling	
Horizon S73	No sampling	
Horizon S74	No sampling	
Horizon S75	No sampling	
Horizon S76	No sampling	
Horizon S77	No sampling	
Horizon S78	No sampling	
Horizon S79	No sampling	
Horizon S80	No sampling	
Horizon S81	No sampling	
Horizon S82	No sampling	
Horizon S83	No sampling	
Horizon S84	No sampling	
Horizon S85	No sampling	
Horizon S86	No sampling	
Horizon S87	No sampling	
Horizon S88	No sampling	
Horizon S89	No sampling	
Horizon S90	No sampling	
Horizon S91	No sampling	
Horizon S92	No sampling	
Horizon S93	No sampling	
Horizon S94	No sampling	
Horizon S95	No sampling	
Horizon S96	No sampling	
Horizon S97	No sampling	
Horizon S98	No sampling	
Horizon S99	No sampling	
Horizon S100	No sampling	

GENERAL DISCUSSION

In France some of lynchets have been dated during :

- The Iron Age (2710±200BP) and the High Middle Age (1370±100BP) in Habsheim (Haut-Rhin) by OSL dating [Froehlicher, 2016].
- The Central Middle Age (around 900 AD) and with a new deforestation during the Renaissance (between 1650 and 1780 AD) in Goldbach and Altenbach (Haut-Rhin) by pedoanthracology study [Schwartz et al., 2017].
- The Central Middle Age (1120 AD) in Massif Central [Bernard-Allée et Valadas, 1992]

Some of this dates correspond of periods determined to SAA and MBW allowing a better comprehension of landscapes temporal trajectory in the large scale.

PERSPECTIVE

- In the future we would like to demonstrated the lynchets are true reservoir for charcoal. The comparison of anthracomass and the species nombre between several profiles in the colluvic horizon will affirm or not this hypothesis.
- Dated more charcoals and on several soil profiles for a better comprehension of the landscape dynamic. Combine other pedological analyses (Near Infrared Spectrometry, micromorphological analyse, organic matter datation...) To study the links between the occurrence of lynchets and the historical development of the territory.

REFERENCES

- BERNARD-ALLÉE P. ET VALADAS B. 1992. L'état des recherches sur l'archéologie agraire en Limousin, Norois, n° 156, pp. 508-518.

- FROEHLICHER L. 2016. Les lynchets, une alternative à l'openfield dans les zones loessiques d'Alsace ? Perspectives historiques, systèmes agraires du futur, érosion, effets sur le colluvionnement et le stockage du carbone, Université de Strasbourg, Strasbourg, 47 p.

- LEYDOLD D. 1986. Les grands traits de l'histoire minière de la vallée de la Bruche. In Pierres et Terre, spécial Val de Bruche, N° 31/32 (p. 73-77). Fédération du Patrimoine Minier.

- RUFFALDI P. ET AL., 2007. Analyse polynic de la maraîche d'Assoncourt (Moselle, France) : Impact des pratiques agricoles sur la biodiversité végétale en milieu forestier, in « La mémoire des forêts », pp. 49-56.

- SCHWARTZ D. ET AL., 2017. Two historical forest clearing phases under an isotypic linear lynchet landscape (Goldbach, Haut-Rhin, France), in « Colloque international de pédoanthracologie », Limoges.

THANKS

This work was (co)funded by the Labex DRIHM, French programme "Investissements d'Avenir" (ANR-11-LABX-0010) which is managed by the ANR



LABORATOIRE INTERDISCIPLINAIRE DES ENVIRONNEMENTS CONTINENTAUX

AUTOMATIC DETECTION OF ANCIENT CHARCOAL PRODUCTION PLATFORMS THROUGH LIDAR OBSERVATIONS: IS IT AN EFFECTIVE METHOD?

OLIVEIRA, Cláudia^{1*}; HERRAULT, Pierre-Alexis²; ROBIN, Vincent¹ & DEVIN, Simon¹

¹ LIEC - Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, Université de Lorraine - CNRS UMR 7360 (France)

² LIVE – Laboratoire Image, Ville, Environnement, Faculty of Geography and Planning, 3 rue de l'Argonne 67000 Strasbourg (France)

* claudia.oliveira@univ-lorraine.fr

INTRODUCTION

Airborne laser scanning (LiDAR) is a useful tool to detect charcoal production platforms and other structures or even landforms. On large study scale, this tool appears more powerful than, e.g. field survey, to assess the density of platforms per surface area. Indeed, the characteristic shape of these platforms allow a more or less easy distinction (Fig. 1) from its surroundings. However, the efficiency of the automatic detection remains to evaluate according 1) the quality of the LiDAR data, 2) the relief of the study area, and 3) the method of detection.

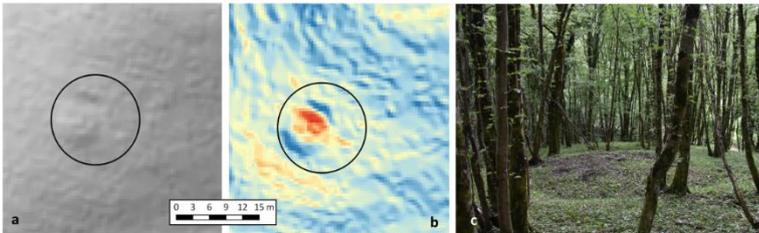


Fig 1 | a) example of a platform barely visible in the hillshaded image; b) the same platform in a LiDAR-derived slope representation and c) the platform observed in the field (as seen from the northeast)

STUDY AREA

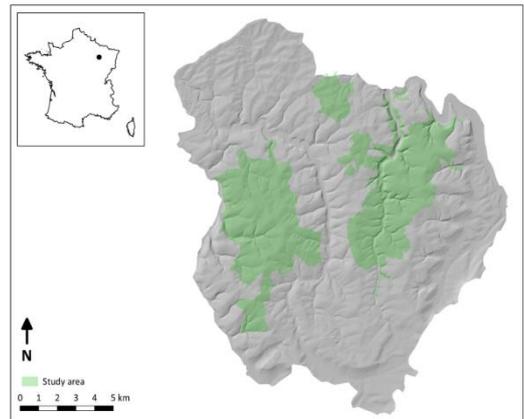


Fig 2 | Study area in Meuse Department, Northeastern France (in grey, the original extent of the LiDAR image)

PRELIMINARY DETECTION

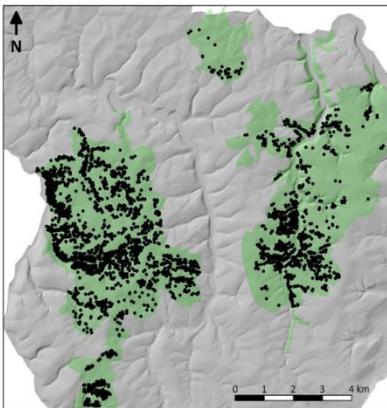


Fig 3 | Possible platforms detected by visual inspection of the LiDAR images within the study area (n=2596)

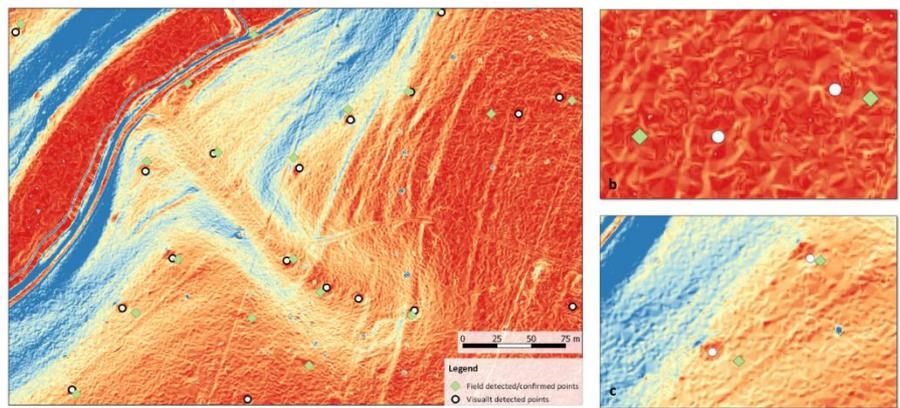


Fig 4 | a) Detail of the detection by both visual and field determination or confirmation superimposed to a LiDAR-derived slope image b) magnification of a flat zone and c) magnification in a hill zone (note: red to orange correspond to flat areas and yellow and blue to steepest reliefs)

- The study area (in green in Figs. 2 and 3) comprises around **5730 ha**;
- Around **2600** potential platforms were identified by visual detection (Fig. 3);
- In Fig. 4 (with ~28 ha), from the **18 initially detected** platforms, **15 (83%) were correctly found**, opposite to **three not found** and **four only detected during survey**.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was partly supported by the french PIA project "Lorraine Université d'Excellence", reference ANR-15-IDEX-04-LUE.

FIRST IMPRESSIONS, CHALLENGES AND PERSPECTIVES

- Visual detection works best in slope areas since the interruption of the relief by the flat platform is easily visible on the images;
- Do the differences of detection between flat and steep areas are due to defects on the method or absence of platforms in these areas?
- Do the lack of visible platforms in the visual detection could be complemented with automatic analysis?

We hope, in a short time, to be able to routinely use automatic algorithm-based detection together with visual and field surveys to maximize the data that we can retrieve from LiDAR images.



Résumé

L'utilisation croissante des ressources naturelles pour répondre aux besoins socio-économiques résulte en une dégradation de plus en plus forte de la biodiversité et de l'intégrité des écosystèmes, ce qui hypothèque de plus en plus la durabilité de ces ressources pourtant indispensables pour l'avenir.

Pour appréhender ces interactions Homme-Environnement, et anticiper les dynamiques socio-environnementales qui en résultent, il convient de prendre en compte la dimension temporelle des socio-écosystèmes, possiblement sur du temps long, notamment pour évaluer les capacités de résistance et résilience de ces systèmes face aux perturbations.

C'est ce à quoi je travaille à travers l'étude des trajectoires écosystémiques, en particulier pour l'identification d'états de références et d'héritages des activités humaines passées sur les systèmes actuels. J'utilise pour ces travaux des indicateurs phyto-historiques comme les pollens et les charbons. J'aborde également ces notions, entre autres sujets, dans le cadre de mes enseignements en licence et en master de l'Unité de Formation et de Recherche en Sciences Fondamentales et Appliquées de l'université de Lorraine, à Metz.

J'oriente actuellement mes recherches vers l'analyse rétrospective du fonctionnement des écosystèmes, ce qui reste encore peu évalué, par une approche interdisciplinaire innovante. Et je travaille à intégrer ces travaux interdisciplinaires par des « changements d'échelles » sur un axe d'organisation spatial des systèmes écologiques qui va de l'échelle globale à l'échelle locale. Cette dernière étant classiquement l'échelle de gestion, elle est le focus prioritaire de mes recherches qui visent notamment à apporter des éléments de réponses aux acteurs de la gestion de l'environnement face aux mutations socio-environnementales en cours et à venir.

Abstract

The increasing use of natural resources to meet socio-economic needs results in an increasing loss of biodiversity and degradation of ecosystems' integrity. This causal chain challenges the sustainability of the natural resources more and more, although they remain crucial for the future.

To tackle these human-environmental interactions and to anticipate the resulting socio-environmental dynamics, it is necessary to consider the temporal dimension of the socio-ecosystems, possibly on long temporal scales. This is especially important in order to evaluate the resistance and resilience capacities of the ecological systems, facing disturbances.

This is what I am attempting to by analyzing the trajectories of ecosystems and identifying past references stages and the legacy of past human activities on contemporaneous ecosystems. To conduct such investigations I am using indicators of vegetation history, such as pollen of charcoal. I am also dealing with these topics, among others, in the bachelor and master lectures that I give at the *Unité de Formation et de Recherche en Sciences Fondamentales et Appliquées de l'université de Lorraine*, in Metz.

Currently, based on an innovating interdisciplinary approach, I am moving my research toward a retrospective analysis of ecosystem functioning, which remains poorly documented today. Moreover, using up and / or down scaling, I am working on integrating this previous innovating interdisciplinary approach to a spatial axis of ecological systems, from global to local scales. This latter local scale is generally the scale that is used in environmental management. It is the priority spatial level of my research which seeks to provide management-related insights to environmental stakeholders who face on-going and future socio-environmental changes.