Reconstruire l'histoire des forêts par l'étude de la production de charbon de bois

Publié le 17.05.18 | Par Vincent Robin

La production passée de charbon de bois a laissé des traces encore visibles aujourd'hui dans les écosystèmes forestiers. L'analyse des morceaux de charbon retrouvés au niveau des zones de production, les charbonnières, permet ainsi de reconstituer la dynamique passée des forêts et d'en comprendre l'état actuel.

1. Introduction

Le corollaire indissociable du développement historique des technologies dans les sociétés humaines a été la demande croissante en énergie (ADEME 2014, Percebois *et al.*, 2012). Cette observation est d'ailleurs toujours d'actualité comme le montre la problématique de la transition énergétique (Percebois *et al.*, 2012). Aux xixe et xxe siècles, l'avènement des énergies fossiles, de type gaz, houille, pétrole, a permis la révolution industrielle des systèmes de production (Verley 1997). Pour autant, avant cela des systèmes de production industriels (ou préindustriels) existaient déjà. Le bois ou le charbon de bois étaient alors utilisés comme principales sources d'énergie, en fonction de considérations techniques du besoin énergétique (vitesse de la montée en température, pouvoir calorifique, etc.). Ces ressources ligneuses sont utilisées pour des usages domestiques (principalement pour le chauffage et la cuisine), depuis des siècles, voire des millénaires (Robin *et al.*, 2015). Selon l'intensité et la fréquence des prélèvements de biomasse, la consommation passée de ces ressources a pu avoir des effets encore visibles aujourd'hui sur l'état des systèmes écologiques concernés.

Nous présentons ici une vue d'ensemble de l'analyse anthracologique qui repose sur l'étude des fragments de charbons de bois issus des vestiges de places de production historique : les charbonnières. Cette approche permet d'étudier rétrospectivement les modes de consommation de la ressource ligneuse pour la production de charbon de bois, les patrons spatio-temporels de cette activité, et les conséquences sur les milieux.

En Europe, l'histoire de la consommation en charbon de bois est particulièrement liée à la capacité technique de transformation des métaux depuis l'antiquité, et même depuis l'âge du Bronze pour la fusion des alliages de cuivre et d'étain. En effet, contrairement au bois, le charbon de bois permet d'atteindre de fortes températures, sans flammes, que l'on peut maintenir plus longtemps, ce qui est nécessaire pour le travail des métaux, mais aussi très apprécié pour l'usage domestique en cuisine. Au cours de l'histoire, les systèmes de production se sont structurés et intensifiés et avec eux la consommation en charbon de bois. Pour répondre au besoin croissant, la production a donc elle-même évolué techniquement et quantitativement depuis l'âge du Bronze et l'antiquité (Ludemann 2010). De ponctuelle et modérée, elle est devenue généralisée et intense, jusqu'à la révolution industrielle. Cette production de charbon de bois a eu des conséquences importantes sur les forêts des sites exploités. À force de « récolte » de la ressource ligneuse la dynamique forestière est impactée localement, parfois sur de grandes surfaces. La production de charbon de bois agit ainsi comme une perturbation écologique, ayant un impact variable sur l'écosystème en fonction de son régime.

Perturbation écologique

Une perturbation, au sens écologique du terme, est un mécanisme de fonctionnement des systèmes écologiques qui induit leurs dynamiques par une destruction totale ou partielle d'une ou plusieurs composantes biotiques du système. Une perturbation écologique se caractérise par son régime, c'est-à-dire un ensemble de paramètres variables selon le type de perturbation ou selon l'épisode de perturbation : intensité, magnitude, fréquence, etc. (Pickett and White 1985, Pickett et al. 1989, Roxburgh et al. 2004).

Les charbonnières présentent en leur sein, même des siècles après leur abandon, de nombreux fragments de charbon de bois, comme autant de « rebuts » de la production. Ces fragments sont des indicateurs phyto-historiques qui peuvent nous permettre de comprendre certaines pratiques anciennes (modes de consommation en bois, durée et fréquence de charbonnage, etc.) et leurs conséquences sur les systèmes forestiers du passé, ainsi que les héritages de ces pratiques sur l'état actuel des systèmes écologiques. À ce titre les charbonnières sont des archives archéologiques et paléo-environnementales, à l'interface entre une pratique humaine disparue et un environnement passé et actuel.

2. La production du charbon de bois et ses vestiges



Figure 1 - Illustration de l'activité de charbonnage dans le Harz (Allemagne) au 18e siècle

Auteur(s)/Autrice(s) : E.C.H. Dannenberg, édité par Verlag Victorinus à Göttingen en 1781 – Licence : Domaine public

Le bois est la matière première de la production de charbon de bois. Une fois récolté et séché, il est façonné à dimension adéquate pour la carbonisation. Pour cela, depuis le Moyen Âge, le bois est empilé pour former une meule à proximité de la zone de récolte du bois (Figure 1).

Une fois confectionnée, cette meule est recouverte par des couches de feuillages, de mousses, de boue, etc. pour l'isoler de l'oxygène atmosphérique et ainsi en limiter la disponibilité. Une colonne centrale de circulation de l'air permet de contrôler la température et le flux d'air lors de la combustion (Figure 2A). En effet, la production de charbon de bois nécessite une combustion incomplète du bois grâce au manque d'oxygène dû à la technique de contrôle des conditions de carbonisation (carbonisation du xylème par pyrolyse, entre environ 250 °C et 500 °C ; Braadbaart & Poole 2008). Cette technique permet d'extraire les éléments du bois autres que le carbone. On considère empiriquement que le rendement en volume entre une pièce de bois et la même pièce carbonisée est de 60 %. En fonction de la taille de la meule et du type de bois utilisé, la carbonisation peut durer de quelques heures à quelques jours, voire plusieurs semaines. Une fois celle-ci terminée, le charbon produit est récolté, conditionné et transporté vers les lieux de consommation (en général à l'échelle locale d'une ou quelques vallées). À partir du xxe siècle les meules sont remplacées par des fours à combustion en métal (Figure 2B), puis par des centrales de production de charbon de bois industrielles à grande échelle, dont certaines sont encore en activité aujourd'hui. Avant l'utilisation de la technique de la meule pour contrôler les conditions d'oxygène lors de la carbonisation du bois, le charbon de bois était produit dans des fosses à même le sol. Cette technique ne permettait de produire qu'un volume limité de charbon de bois, et elle était, en général, locale et ponctuelle. Les vestiges en sont donc aujourd'hui rarement retrouvables. Ainsi, les principales traces de la production historique de charbon de bois qui subsistent sont les plateformes utilisées dans ce but, les charbonnières, et les fragments de charbon que l'on peut y retrouver.

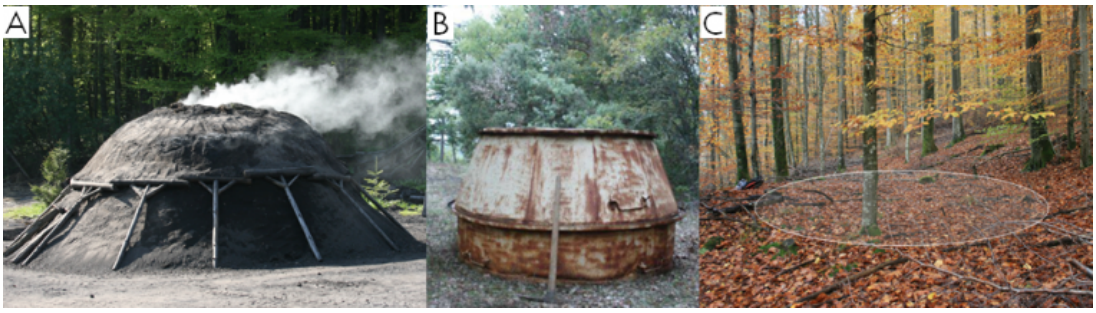

Figure 2 - Les charbonnières
A : Échappement des fumées par la colonne centrale de la meule lors de la carbonisation. B : Four de combustion en métal. C : Matérialisation d'une plateforme de charbonnière en forêt des Vosges du Nord.

Auteur(s)/Autrice(s) : Vincent Robin – Licence : CC-BY-NC

En effet pour le montage d'une meule (ou d'une succession de meules) il fallait pouvoir disposer d'un espace complètement plat d'une centaine de mètres carrés, à proximité de la ressource ligneuse, c'est-à-dire le plus souvent directement en forêt. Dans les zones géographiques avec du relief, si ce type d'espace n'existait pas localement comme cela peut être naturellement le cas sur les dalles de roches, dans des fonds de vallons ou sur des plateaux, il était créé par les charbonniers, avant que ceux-ci n'y réalisent la meule. Cette ingénierie impliquait des travaux plus ou moins importants, avec même parfois la construction d'un mur de soutènement à l'aval de la pente afin de maintenir le sédiment déposé en amont pour constituer la plateforme. Ces plateformes sont aujourd'hui encore visibles, en particulier dans les zones géographiques avec du relief. Elles se démarquent de l'inclinaison de la pente en constituant une cassure topographique plane de surface variable (Figure 2C). Dans les plaines et les plateaux, les charbonnières sont beaucoup plus difficiles à localiser. Elles peuvent toutefois être repérables par des prospections aléatoires, à la faveur de « tâches » sombres dans les champs fraîchement labourés, ou lorsqu'un chablis (chute d'arbre) révèle un sol contenant des fragments de charbon de bois. Pour une étude anthracologique de charbonnières à l'échelle d'un bassin versant ou d'un paysage, il sera mis en place un inventaire systématique des charbonnières.

3. La méthode d'analyse

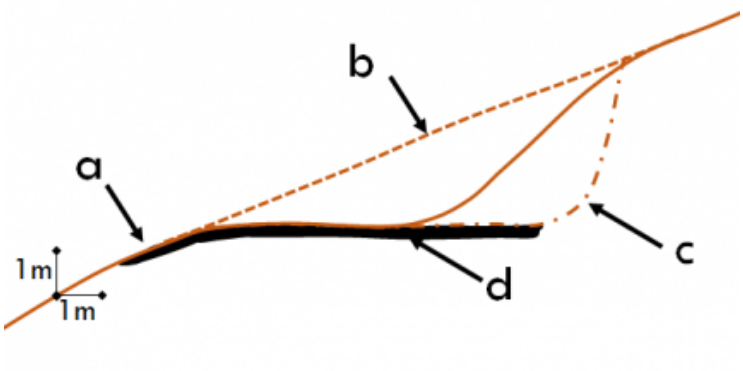

Figure 3 - Représentation schématique de l'évolution topographique avant, pendant et après l'utilisation de la plateforme pour la production de charbon de bois
a : surface actuelle, b : surface pré-utilisation, c : surface durant l'utilisation, d : niveau/horizon de charbon.

Auteur(s)/Autrice(s) : Vincent Robin – Licence : CC-BY-NC

L'analyse des charbonnières concerne les restes (ou déchets) de la production de charbon de bois. Ces fragments de charbon de bois s'accumulent *in situ* pendant l'exploitation du site, et y restent, à l'exception d'une part aléatoire transportée par le ruissellement ou l'érosion (Hannes et al. 2013). La succession de carbonisations et l'accumulation des « déchets » forme un niveau (ou horizon) de charbon (Figure 3), 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 dans une pente, la partie amont peut être recouverte par une épaisseur variable de sédiment accumulé depuis la pente supérieure après l'arrêt de l'utilisation de la plateforme. Souvent la pente aval de la charbonnière, immédiatement en contrebas, est particulièrement riche en fragments de charbon de bois car c'est depuis cette zone de la charbonnière que s'effectuait le chargement du charbon de bois pour le transport, puis l'évacuation de la plateforme des déchets de la production pour préparer l'espace pour la meule suivante.

L'échantillonnage d'une charbonnière consiste à prélever dans ce « niveau de charbon » un certain nombre de fragments (Figure 4A), individuellement ou bien par un 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 et ne pas risquer que les résultats soient biaisés par une anomalie, l'échantillonnage doit inclure un total d'au moins 100 fragments, prélevés en différents points de la charbonnière, au centre et sur la pente en contrebas immédiat de la charbonnière.

Un cas particulier de charbonnière est la présence de plusieurs niveaux de charbons superposés et séparés par des horizons de sol, ou des niveaux de sédiments (Figure 4B). Ce type de structure s'avère en général particulièrement intéressant de par la succession chronologique que peuvent présenter ces différents niveaux de charbons. Dans ce cas, chacun sera considéré comme une charbonnière individuelle.

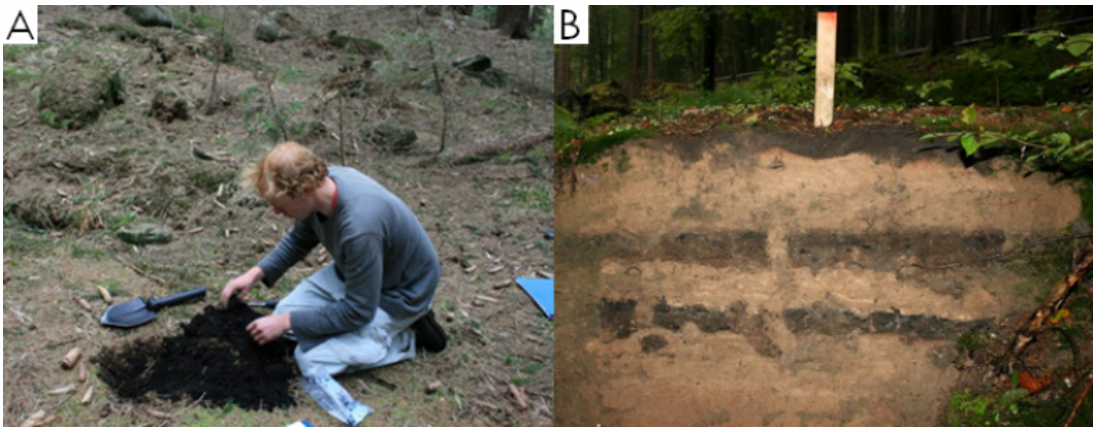

Figure 4 - Les charbonnières
A : Échantillonnage d'une charbonnière. B : Charbonnière avec trois niveaux de charbon.

Auteur(s)/Autrice(s) : Vincent Robin – Licence : CC-BY-NC

Après échantillonnage sur le terrain, les charbons de bois extraits sont susceptibles de faire l'objet de trois types d'analyses complémentaires : taxonomique, dendroanthracologique et radiocarbone.

3.1. L'analyse taxonomique

Il s'agit de l'observation microscopique de chacun des 100 fragments prélevés, au minimum, sur la charbonnière pour en réaliser l'identification taxonomique. En effet, le bois possède des structures cellulaires microscopiques différentes selon certains groupes taxonomiques allant du genre à l'espèce, et qui permet donc de les distinguer. La carbonisation du bois fixe l'anatomie interne qui est observable sur un fragment de charbon comme sur du bois, hormis quelques déformations et rétrécissements (Théry-Parisot 2001, Braadbaart & Poole 2008). Les critères anatomiques sont observables en routine sur des fragments d'au moins 800 µm à 1 mm. La plupart du temps les fragments de charbon de bois de charbonnière font au minimum quelques millimètres. Ils sont donc assez gros pour être identifiables, sauf dans quelques cas de fragments qui sont dits vitrifiés ou trop sales pour y distinguer des éléments anatomiques (McParland et al. 2010).

L'identification repose sur la consultation de clés d'identification et d'atlas d'anatomie xylologiques (ex. Jacquiot et al. 1973 ; Schweingruber 1990) et de collections de référence (Scheel-Ybert 2016).

Les résultats de l'identification sont exprimés en fréquence d'apparition relative de tel ou tel taxon dans l'ensemble des 100 fragments prélevés et identifiés par charbonnière.

3.2. L'analyse dendroanthracologique

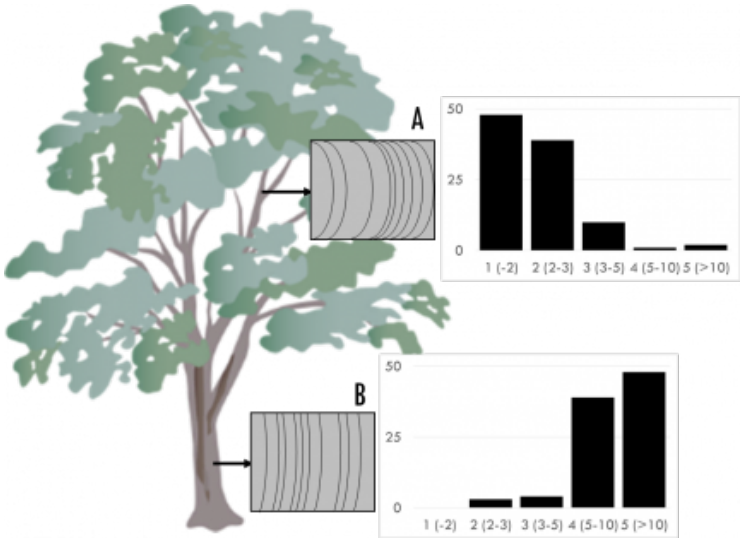

Figure 5 - L'analyse dendroanthracologique
Origine des pièces de bois carbonisées et identifiées par mesures dendrométriques de 100 fragments de charbon de bois de deux charbonnières selon cinq classes de taille : 0 – 2 cm, 2 – 3 cm, 3 – 5 cm, 5 – 10 cm, > 10 cm (Ludemann et Nelle, 2002) ; A : histogramme dendroanthracologique d'une charbonnière majoritairement riche en petits bois ; B : histogramme dendroanthracologique d'une charbonnière majoritairement riche en gros bois.

Auteur(s)/Autrice(s) : Vincent Robin – Licence : CC-BY-NC

Certains fragments de charbon de bois peuvent être assez gros pour présenter des séries de cernes de bois bien visibles. Des mesures du degré de courbure de ces cernes peuvent être réalisées pour identifier le type de bois brûlé et par extension le type de structure du peuplement forestier d'où est originaire le combustible ligneux (Haneca et al. 2005).

On interprétera la proportion de fragments dans des classes de courbure fortement marquée comme des fragments issus de bois de branches et de tiges de faible dimension (Figure 5A) et la proportion de fragments dans des classes à courbure faiblement marquée comme des fragments issus de bois de troncs ou de branches de fort diamètre (Figure 5B ; Nelle 2003).

3.3. Les datations radiocarbones

Les mesures d'âges radiocarbones de certains fragments de charbons de bois permettent de dater l'utilisation des charbonnières. Le nombre de datations radiocarbones effectué est fonction de la superficie géographique concernée par l'étude, du nombre de charbonnières qui s'y trouvent, des moyens dont on dispose, et bien-sûr des résultats des analyses taxonomiques et dendroanthracologiques. Certaines charbonnières peuvent faire l'objet de plusieurs datations, par exemple pour en évaluer l'âge selon les différentes espèces que l'on a identifiées en son sein, ou si on observe la présence de multiples niveaux stratigraphiques de charbonnière sur un même site (Figure 4B).

Pour dater une charbonnière, un ou plusieurs fragments de charbon de bois sont sélectionnés pour être envoyés à un laboratoire de datation. Au sein d'une même charbonnière, le choix du, ou des, fragments à dater doit s'opérer selon 1) les objectifs de l'étude, 2) le spectre taxonomique de la charbonnière, et 3) les spectres taxonomiques des charbonnières de la zone d'étude.

L'évaluation de l'âge radiocarbone consiste à mesurer la quantité d'isotope 14 du carbone par spectrométrie de masse par accélérateur (machinerie qui permet de distinguer les atomes selon leur masse atomique). Il est alors mesuré la quantité de carbone 14 résiduel depuis la mort de l'organisme d'où est extrait l'échantillon fossile analysé. En effet, à partir de l'instant où un organisme meurt, la quantité de radiocarbone qu'il contient décroît au cours du temps selon un taux connu. L'âge calculé présente une certaine incertitude due à la mesure, par exemple de plus ou moins 30 ans.

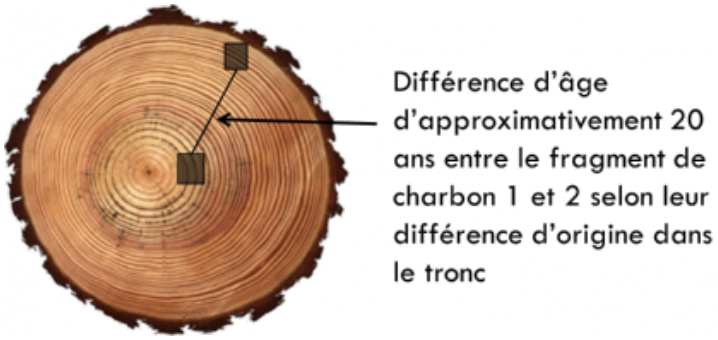

Figure 6 - Sélection du charbon pour datation radiocarbone

Auteur(s)/Autrice(s) : Vincent Robin – Licence : CC-BY-NC

De plus, il est important de veiller à dater l'âge de la charbonnière et non pas l'âge de l'arbre carbonisé dont provient le fragment de charbon daté. En effet cet arbre pouvait avoir déjà plus de cent ans au moment de son utilisation comme matière première pour faire du charbon. Ainsi pour minimiser ces possibles biais des datations de charbonnières on va préférentiellement choisir

les fragments d'espèce d'arbre de faible longévité comme le bouleau (*Betulasp.*), l'aulne (*Alnus sp.*), etc., contrairement au chêne (*Quercus sp.*) ou au hêtre (*Fagus sylvatica*). De même, on va choisir pour datation, si possible, des fragments avec un degré de courbure des cernes bien marqué, ou présentant le dernier cerne extérieur (i.e. donc le plus récent avant la coupe de l'arbre) souvent remarquable à la présence d'écorce carbonisée encore fixée sur le fragment de charbon (Figure 6).

4. L'interprétation des résultats

Selon les problématiques d'étude, les informations issues des analyses taxonomiques et dendroanthracologiques, ainsi que des datations radiocarbones, peuvent être contextualisées à l'échelle d'un paysage, d'un bassin versant, d'un massif forestier, etc. On pourra alors chercher à identifier des patrons de distribution spatiale (position topographique, distance à une habitation ou à un site industriel, etc.), des variations dans la taille des charbonnières (surface des plateformes), variation de la densité des charbonnières par unité de surface (par exemple par hectare) pour différentes phases chronologiques, ou pour différentes espèces, par exemple en fonction de l'histoire socio-économique d'un territoire.

En parallèle des analyses de charbonnières, les archives écrites sont utiles pour trouver des informations sur l'utilisation locale des ressources naturelles, et en particulier des ressources en bois ou charbon. En effet, depuis le Moyen Âge l'inscription sur différents support écrits (cartes et plans anciens, aménagements forestiers, registres de martelages – marquage des arbres à abattre ou à conserver –, registres de ventes de bois, etc.) permet d'avoir aujourd'hui des indications, parfois très précises, sur les besoins ou l'utilisation de ces ressources naturelles et sur leur gestion (Vallauri *et al.*, 2012, Rochel 2010, 2015). Ces documents sont susceptibles d'éclairer l'évolution historique de la végétation et des peuplements forestiers dans l'environnement immédiat des sites étudiés, et ainsi de contribuer à leur contextualisation historique et actuelle (Rochel 2009). Ainsi, l'utilisation combinée de l'analyse des assemblages anthracologiques de charbonnières et d'archives écrites est une approche interdisciplinaire solide entre les domaines biologiques/écologiques et humains/historiques qui permet une optimisation réciproque des informations obtenues.

5. Les conséquences de la production du charbon de bois sur les systèmes forestiers

La production de charbon de bois repose sur la consommation de ressource ligneuse. Cette production se traduit par un prélèvement de biomasse qui constitue une perturbation d'origine anthropique. Celle-ci peut impacter la composition, la structure et le fonctionnement des systèmes forestiers, de façon plus ou moins directe, intense et durable dans le temps, selon les capacités de résistance et de résilience des systèmes concernés face à la perturbation et selon son régime.

De nombreux travaux scientifiques ont montré l'importance des déboisements au cours de l'histoire pour la production de charbon de bois (ex. Nelle 2003, Ludemann 2010). Les conséquences de ces déboisements sont multiples.

D'une part, par le déboisement les terrains sont mis à nu, c'est-à-dire sans couverture végétale significativement efficace pour protéger la surface du sol de l'action physique des précipitations et du ruissellement qui induisent son érosion par exemple par colluvionnement (Leopold & Völkel 2007). Si la période de mise à nu du sol est longue ou fréquente, ou qu'un évènement climatique extrême se produit (Severinghaus 2009), l'érosion forte du sol peut induire sa dégradation à long terme. Par exemple on peut observer un amincissement marqué des sols. Ceci se matérialise par le déplacement abrupt ou progressif du sol qui peut aller jusqu'à la mise à nu de la roche mère. Cela réduit considérablement l'épaisseur de sol utilisable par la végétation pour s'enraciner et puiser l'eau et les nutriments nécessaires à sa croissance. On peut également observer l'appauvrissement des sols par la dégradation des humus due au départ de la matière organique par érosion et l'absence d'apport dû au manque de couvert végétal. Ceci peut limiter fortement le pouvoir nutritif d'un sol pour la végétation. Ainsi, on voit que l'extraction significative de la biomasse d'un système forestier pour la production de charbon de bois peut induire une perturbation des cycles biogéochimiques du sol, qui sera d'autant plus forte et marquée que cette perturbation est intense et fréquente.

Mais les charbonnières pourraient également avoir un rôle bénéfique pour la végétation car elles forment des niveaux de sol très particuliers, riches en charbons et cendres. Leur composition chimique et leur porosité pourraient améliorer significativement la rétention d'éléments nutritifs, et donc leur mise à disposition, par augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols. Cette propriété « améliorante » des sols par la présence de niveaux de charbonnière s'avérerait particulièrement intéressante à évaluer dans le cas de sols naturellement pauvres comme les sols gréseux, acides, des Vosges du Nord, où un programme de recherche de l'université de Lorraine et de l'observatoire hommes-milieux du pays de Bitche (Labex DRIIHM) est en cours pour 2018-2019.

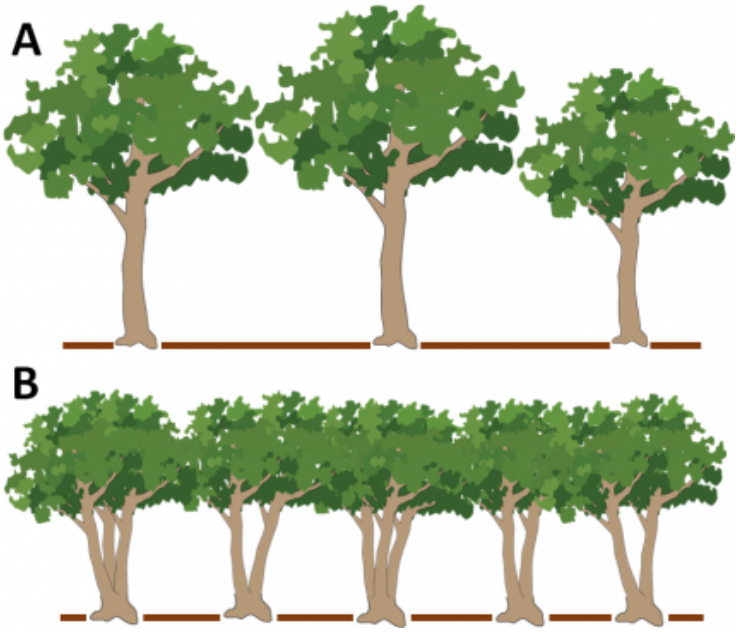

Figure 7 - Deux structures de peuplement forestier
A : futaie (troncs de francs pieds) ; B : taillis (troncs de cépées)

Auteur(s)/Autrice(s) : Vincent Robin – Licence : CC-BY-NC

D'autre part, suite aux déboisements pour la production de charbon de bois la végétation forestière qui se redéveloppe correspond à une succession secondaire qui diffère plus ou moins de l'état initial (succession primaire) en fonction du régime de la perturbation. Un prélèvement de biomasse modéré et ponctuel pourra n'avoir que de faibles conséquences sur l'état du système. Celui-ci pourra rester proche de son état initial par sa capacité de résistance et retrouver les mêmes caractéristiques générales de composition, structure, et fonctionnement, grâce à ses capacités de résilience qui ne seront pas altérées par la perturbation. Dans le cas de prélèvements de biomasse importants ou fréquents dans le temps, il s'exerce alors une pression de sélection qui va favoriser des espèces adaptées aux conditions qu'impose la perturbation anthropique. Typiquement, les espèces qui présentent un bon rendement à la carbonisation et un pouvoir calorifique post-carbonisation élevé (espèces dites de bois dur) seront privilégiées pour la production de charbon. L'homme va donc favoriser leur présence dans le milieu forestier pour assurer le renouvellement de la ressource ligneuse. Il recherchera également le meilleur ratio possible entre le coût énergétique de la production du charbon et le gain énergétique par le charbon produit. Pour cela il sera privilégié une structure de peuplement forestier dite de taillis. Dans ce type de peuplement, les arbres sont régulièrement coupés. De multiples rejets émergent alors des souches et forment de nouveaux troncs qui sont récoltés à des dimensions modestes (10 à 30 cm de diamètre par exemple) permettant une préparation et une transformation plus facile qu'avec des arbres de futaie qui présentent des dimensions plus grosses (Figure 7).

De plus, la gestion en taillis permet des temps de révolution assez courts (souvent de 20 à 40 ans) pour arriver beaucoup plus rapidement à des volumes de bois comparables à ce que pourrait fournir une futaie avec un travail de façonnage plus important. En termes de milieu forestier, une structure forestière en taillis va proposer des habitats pour la flore et la faune significativement différents de ce que propose une structure en futaie. En particulier les courtes révolutions entre deux prélèvements de biomasse ne laissent pas la population forestière suffisamment vieillir pour atteindre des stades de forêt mature ayant des niveaux de biodiversité bien différents des stades de forêt jeune. Pour les taillis, la pression de sélection anthropique favorisera des espèces qui rejettent bien des souches comme le chêne ou le charme (*Carpinus betulus*), au détriment d'espèces forestières moins performantes dans ce type de gestion comme le hêtre. Suite à des déboisements fréquents ou intenses pour la production de charbon de bois, la succession forestière secondaire ne va en général pas retrouver la même trajectoire écologique qu'avant l'émergence de la perturbation. On comprend ici l'importance d'étudier l'histoire de la production de charbon de bois afin notamment d'évaluer l'origine des peuplements forestiers actuels, d'en connaître les trajectoires écosystémiques et d'en comprendre les capacités de résistance et de résilience.

6. Conclusions

L'étude de charbonnières peut apporter des informations utiles à la compréhension de la mise en place des trajectoires écologiques des socio-écosystèmes qui constituent les paysages actuels.

Ces connaissances peuvent servir non seulement pour la compréhension et l'évaluation du patrimoine paysager, mais aussi à l'anticipation des trajectoires écologiques à venir. Ce dernier point est un enjeu considérable pour la gestion des ressources

naturelles à long terme en particulier dans le cadre de la transition énergétique en question en Europe depuis quelques années, et plus spécifiquement en France depuis le Grenelle de l'environnement en 2007. La part de la biomasse dans la production énergétique est amenée à grandir significativement d'ici à quelques années ou dizaines d'années. Le développement actuel du nombre de centrales électriques à biomasse montre que cette évolution est déjà en cours. Or si une partie de la biomasse utilisée provient des déchets verts domestiques et industriels, l'autre vient de la filière forestière, par la consommation de bois dit d'industrie. Un enjeu majeur est de gérer durablement cette ressource, ainsi que son support, le sol. Il est ainsi nécessaire d'éviter une trop grande pression de consommation sur la forêt et ses ressources ligneuses. Il apparaît pour cela important de tirer les enseignements de l'analyse historique de l'utilisation passée des ressources naturelles, dont l'utilisation du bois pour la production de charbon, afin d'en raisonner la consommation en cours et à venir.

7. Références

- ADEME, 2014. Perspectives énergétiques mondiales. Brochures ADEME & World Energy Council
- 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
- Dufraisse A, Coubray S, Girardclos O, et al., 2018. Anthraco-typology as a key approach to past firewood exploitation and woodland management reconstructions. Dendrological reference dataset modelling with dendro-anthracological tools. Quaternary International 463, 232-249
- 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
- Frankenstein C, Eckstein D, Schmitt U, 2005. The onset of cambium activity - A matter of agreement? Dendrochronologia 23, 57-62
- Haneca K, Van Acker J, Beeckman H, 2005. Growth trends reveal the forest structure during Roman and Medieval times in Western Europe: a comparison between archaeological and actual oak ring series (*Quercus robur* and *Quercus petraea*). Ann For Sci 62, 797-805
- Jacquiot C, Trenard Y, Dirol D, 1973. Atlas d'anatomie des bois d'Angiospermes. Centre Technique du Bois et Fond Forestier National, Paris
- Knapp H, Robin V, Kirlies W, 2013. Woodland history in the upper Harz Mountains revealed by kiln site, soil sediment and peat charcoal analyses. Quaternary International 289, 88-100
- Leopold M, Völkel J, 2007. Colluvium: Definition, differentiation, and possible suitability for reconstructing Holocene climate data. Quaternary International 162-163, 133-140
- Ludemann T, 2012. Airborne laser scanning of historical wood charcoal production sites – a new tool of kiln site anthracology at the landscape level. SAGVNTVM EXTRA, 247-252
- Ludemann T, 2008. Experimental charcoal-burning with special regard to anthracological wood diameter analysis. – BAR (British Archaeological Reports) Int. Series 1807, 147–157
- 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, Nelle O, 2002. Die Wälder am Schauinsland und ihre Nutzung durch Bergbau und Köhlerei. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Botanik und Standortskunde, 15, Freiburg
- Marguerie D, Hunot J-Y, 2007. Charcoal analysis and dendrology: Data from archaeological sites in western France. Journal of Archaeological Sciences 34, 1417-1433
- 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
- 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
- Paradis S, Dufraisse A, Allée P, 2013. Tree ring curvature measures and wood diameter: comparison of different imaging techniques. In: Damblon F (ed.), IVe International Meeting of Anthracology (Bruxelles, septembre 2008), BAR International Series 2486, 173-182

- Percebois J, Mandil C, et al., 2012. Energies 2050. Centre d'analyse stratégique, Rapports & documents, Paris.
- Pickett STA, Kolasa J, Armesto JJ, et al., 1989. The ecological concept of disturbance hierarchical levels and its expression at various. Oikos 54, 129-136
- Pickett STA, White PS, 1985. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. London: Academic press
- Robin V, Talon B, Nelle O, 2015. Charcoal: resource and ubiquitous proxy. Quaternary International 366, 1-2
- Rochel X, 2015. Forest management and species composition. An historical approach in Lorraine, France. In: Watkins KYK (ed.), Europe's Changing Woods and Forests: from wildwood to cultural landscapes, 362-375
- Rochel X, 2009. Doit-on réhabiliter les milieux ouverts dans les massifs forestiers vosgiens ? Un enjeu écologique et paysager revu par la biogéographie historique. Revue géographie de l'Est 49: 2-3
- Rochel X, 2010. Les sylviculteurs des Lumières face à la diversité des hêtraies-chênaies en Lorraine ». In: Galochet M, Glon E, Des milieux aux territoires forestiers. Arras : Artois Presse Université, 51-65
- Roxburgh SH, Shea K, Wilson JB, 2004. The intermediate disturbance hypothesis: patcg dynamics and mechanisms of species coexistence. Ecology 85, 359-371
- Scheel-Ybert R, 2016. Charcoal collections of the world. IAWA Journal 37, 489–505
- Schweingruber F-H, 1990. Anatomie microscopique du bois. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, 3e édition, Birmensdorf
- 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
- Théry-Parisot I, 2001. Economie des combustibles au Paléolithique. CNRS, Paris
- Vallauri D, Grel A, Granier E, et al., 2012. Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles. Rapport WWF/INRA, Marseille
- Verley P, 1997 La Révolution industrielle. Collection Folio histoire (n° 77), Gallimard, Paris

CRÉDITS

AUTEUR(S)/AUTRICE(S)

Vincent Robin

Maître de conférences à l'université de Lorraine. Il enseigne la biologie et les sciences de l'environnement. Ses recherches portent sur l'histoire des écosystèmes et de la végétation, l'écologie des perturbations et l'impact anthropique historique sur les écosystèmes.

MISE EN LIGNE

Pascal Combemorel

Agrégé de SVT, il est le responsable éditorial du site Planet-Vie depuis septembre 2016.

LICENCE DU TEXTE DE L'ARTICLE

Creative Commons - Attribution - Pas d'utilisation commerciale