
**ÉTUDE COMPARATIVE DE LA CROISSANCE ET DES PROPRIÉTÉS
PHYSIQUES ET CHIMIQUES D'ARBRES ISSUS DE SYSTÈMES
AGROFORESTIERS ET FORESTIERS POUR UNE VALORISATION
DANS LA FILIÈRE BOIS : CAS DU PEUPLIER, DU NOYER ET DU ROBINIER**

Thèse de Lucie **HEIM**¹

Analysée par Christian **DUPRAZ**²

Directeur de thèse : Louis **DENAUD**, Professeur des universités, Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés (LaBoMap) - Campus de Cluny, Arts et Métiers

Co-encadrement : Éric **BADEL**, Chargé de recherche (HDR), PIAF, INRAE, Kévin **CANDELIER**, Chargé de recherche, BioWooEB Cirad, et Rémy **MARCHAL**, Professeur émérite, LaBoMap, Arts et Métiers

Parmi les réticences fortes à l'encontre des systèmes agroforestiers, et en particulier parmi les spécialistes des arbres, on rencontre fréquemment un doute sérieux sur la valorisation des arbres agroforestiers sous forme de bois d'œuvre. Ce doute trouve pleinement sa justification lorsqu'on observe des arbres hors forêt fortement maltraités par des générations d'agriculteurs ou d'usagers : élagages approximatifs, mauvaise conformation, forte conicité des tiges, inclinaison sous l'effet du vent, blessures nombreuses dues aux engins agricoles, aux clôtures ou aux dégâts des animaux. Même dans des plantations expérimentales agroforestières conduites par l'INRAE, on observe ainsi beaucoup d'arbres sans avenir, faute de soins appropriés ou par suite d'une gestion inadaptée. C'est notamment le cas sur le domaine de Restinclières, dans l'Hérault, pourtant vitrine emblématique des recherches en agroforesterie méditerranéenne. Une explication parfois mise en avant est la mauvaise adaptation des essences d'arbres utilisées aux conditions pédoclimatiques, les rendant particulièrement vulnérables aux accidents climatiques ou aux agressions biotiques. Mais il est une critique plus fondamentale qui est souvent évoquée : les arbres en croissance libre, fortement exposés aux contraintes mécaniques du vent, fortement sollicités par les flux de chaleur advective qui stimulent leurs besoins en eau et aggravent leur sensibilité aux stress abiotiques (fortes températures, sécheresse) peuvent-ils donner du bois d'œuvre de qualité ? La croissance en forêt, dans un environnement au microclimat bien différent, donne du bois de qualité. Une comparaison du bois d'arbres ayant cru dans ces deux environnements contrastés était donc nécessaire. Cela n'avait jamais été fait.

¹ Thèse de doctorat HESAM Université, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Spécialité : Sciences pour l'ingénieur, spécialité Matériaux, École doctorale Sciences des Métiers de l'Ingénieur, présentée et soutenue le 14 juin 2023.

² Membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France, section 2 « Forêts et filière bois ».

C'est toute la force de la thèse de Lucie Heim que d'avoir abordé cette question de la valorisation du bois des arbres agroforestiers, et de l'avoir abordée dans toute sa transversalité. Le sujet n'était pas facile : où trouver des arbres adultes représentatifs avec un historique suffisamment documenté ? Comment prendre en compte la variabilité individuelle des arbres dans un tel protocole ? Comment éliminer les effets parasites de la variabilité des conditions pédoclimatiques ou de la variabilité génétique intraspécifique ?

Cette thèse intitulée « Étude comparative de la croissance et des propriétés physiques et chimiques d'arbres issus de systèmes agroforestiers et forestiers pour une valorisation dans la filière bois : cas du peuplier, du noyer et du robinier » a été financée par la Fondation de France et s'est déroulée au sein de trois laboratoires : L'équipe MUB du LaBoMap (Cluny), l'UPR BioWooEB du Cirad (Montpellier) et l'UMR PIAF (Clermont-Ferrand).

Je ne reviendrai pas ici sur sa validation scientifique : trois articles ont été publiés et un quatrième soumis. Ils couvrent un large spectre thématique et prouvent une maîtrise, à la fois de la recherche effectuée et de la rédaction scientifique. Cela a été également souligné par le jury de thèse qui a unanimement salué la qualité iconographique et la clarté de la présentation. Pour réussir, il a d'abord fallu une belle agilité pour trouver les ressources expérimentales adaptées à cette étude. Lucie Heim a choisi différents dispositifs expérimentaux, qui lui ont permis de disposer de parcelles de robiniers, de peupliers Koster et de noyers hybrides, afin de réaliser l'ensemble des expérimentations menées durant la thèse. Les parcelles de peuplier et de noyer ont permis de réaliser des études sur l'influence des conditions de croissance agroforestière sur les propriétés du bois, et un dispositif plus récent, la plateforme agroforestière DIAMs de l'INRAE de Montpellier, a permis d'étudier l'influence du vent sur les robiniers agroforestiers. Ces travaux résonnent avec les avancées récentes de la thigmomorphogenèse et de ses découvertes fascinantes sur le rôle des flexions sur les régulations hormonales des allocations de carbone dans les tissus primaires et secondaires des arbres.

Les premiers résultats ont concerné la croissance des arbres en condition agroforestière. Il a fallu éliminer astucieusement les effets perturbateurs dus à la variabilité des sols pour les noyers, la différence d'âge pour les peupliers et les différences de taille des houppiers des robiniers. Lucie Heim montre que la croissance radiale est plus importante pour les arbres agroforestiers. Elle montre également que leur croissance en hauteur est peu impactée si on les compare aux pratiques sylvicoles classiques, ce qui est un résultat majeur. Lucie Heim n'a pas pu publier ces résultats, basés sur des bases de données encore inédites, mais sera associée aux publications à venir sur ce sujet.

C'est dans l'étude des propriétés chimiques et physiques du bois des arbres agroforestiers que Lucie Heim impressionne. L'analyse chimique du bois de noyer par NIRS et LC-MS est décrite dans le premier article publié. Des différences ont été observées à la fois avec l'analyse chimique après extraction et avec les mesures NIRS (*Near Infra-Red Spectroscopy*). Chez le peuplier, un taux de lignine plus faible a été observé dans les bois agroforestiers, en lien avec une présence plus importante de bois de flexion. Le deuxième article publié présente les résultats d'analyses radiales du tronc de noyers issus des deux pratiques sylvicoles. Si peu de différences dans la répartition radiale des composés extractibles ont été observées, des différences ont été constatées avec le NIRS entre les échantillons de bois de noyers agroforestiers et les échantillons de noyers issus de sylviculture classique. L'article soumis présente les résultats obtenus par spectroscopie proche infra-rouge hyper spectrale, qui a permis de mettre en évidence les différences entre les bois de peuplier issus des deux systèmes de culture des arbres.

Les bois agroforestiers s'avèrent plus riches en cellulose que ceux provenant d'une sylviculture classique. L'analyse de l'humidité des « faux-cœur » du peuplier est particulièrement intrigante. Des différences d'humidité de ce faux-cœur sont mises en

évidence entre les échantillons issus des deux pratiques sylvicoles. Les peupliers agroforestiers présentent des taux d'humidité et une proportion d'aubier et de bois de faux-cœur plus faibles que les peupliers forestiers. Les densités moyennes du bois des peupliers sont comparables entre les deux pratiques sylvicoles, mais des différences sont observées, notamment pour la densité du bois final qui est plus importante chez les arbres agroforestiers.

Peut-on valoriser par déroulage le bois des arbres agro forestiers ? Dans un article à paraître dans un journal international réputé, Lucie Heim présente une analyse mécanique des échantillons de bois de placage stratifié (*Laminated Veneer Lumber*) par flexion quatre points qui montrent pour la première fois une performance mécanique des placages issus d'arbres agroforestiers plus élevée que pour ceux d'arbres issus de peuplements forestiers plus denses. Les flexions répétées des arbres agroforestiers dues au vent semblent donc ne pas avoir que des inconvénients. Enfin, Lucie Heim montre que le bois des arbres agroforestiers a une meilleure capacité d'ondulation des placages.

Voilà un travail fort bien mené. Cela faisait plus de dix ans que nous étions plusieurs à souhaiter que l'on aborde ces questions technologiques sur du bois produit en agroforesterie. Il fallait maîtriser de nombreuses méthodologies, et pendant longtemps, nous n'avons trouvé ni les financements, ni une candidature suffisamment volontaire pour aborder cette question, et les risques qu'elle comprenait. La Fondation de France a apporté son soutien financier, et c'est tout le mérite de Lucie Heim que d'avoir ouvert la porte de ce domaine d'activité très important pour l'avenir de l'agroforesterie.

Car planter des arbres sans espérer en tirer de revenu restera une activité marginale, et nécessairement subventionnée, donc fragile. Planter des arbres valorisables économiquement change la donne. Aujourd'hui, les arbres agroforestiers prennent de plus en plus de valeur, notamment par les certificats de séquestration de carbone désormais monnayables sur les marchés volontaires du Carbone par les agriculteurs, mais aussi, espérons-le, par la valeur du bois ainsi produit. Le travail de Lucie Heim aura donc non seulement contribué à améliorer nos connaissances de manière significative, mais aussi permettra de consolider les fondations d'une filière agroforestière pleinement insérée dans le tissu économique et social.

Il s'agit donc d'un bel exemple de travail qui allie rigueur méthodologique, éclectisme scientifique et production de résultats ayant une applicabilité directe par les opérateurs.

L'analyse des travaux de cette thèse, dont la portée scientifique et sociétale pour la filière agroforestière a été soulignée par le jury, a toute sa place sur le site de l'Académie d'agriculture de France et dans le Mensuel pour valorisation.

Liste des publications issues de cette thèse

Heim, L., *et al.*, *NIR-hyperspectral camera analyses for differencing agroforestry and forestry poplar woods*. *Agroforestry Systems*, 2023. **97**(8): p. 1557-1569. 10.1007/s10457-023-00877-5.

Heim, L., *et al.*, *Variation analyses of extractive contents by NIR-spectroscopy bring out the differences between agroforestry and forestry walnut (*Juglans regia* x *Juglans nigra*) trees*. *Holzforchung*, 2022. **76**(9): p. 781-790. doi:10.1515/hf-2022-0055.

Heim, L., *et al.*, *Comparison of extractive chemical signatures among branch, knot and bark wood fractions from forestry and agroforestry walnut trees (*Juglans regia* x *Juglans nigra*) by NIR spectroscopy and LC-MS analyses*. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2022. **15**(1): p. 56-62. 10.3832/ifor3973-014.

Heim, L., Marchal, R., Viguier, J., Marcon, B., Ruelle, J., Candelier, K., Badel, E., & Denaud, L. *Mechanical characterisation of LVL panels from the peeling of agroforestry poplars*. (2024, soumis pour publication).