

Les molécules extractibles des bois tropicaux

Activités et potentiel de valorisation pour améliorer les propriétés des matériaux

Résumé Pour assurer leur longévité, plusieurs espèces d'arbres sont capables de protéger leur bois grâce à un processus de transformation chimique : à un certain stade de leur développement, des molécules aux fonctionnalités variées, comme celles ayant des activités biocides ou répulsives contre les agressions biologiques, sont synthétisées et imprègnent les différentes cellules du bois. Les métabolites alors produits, dont la nature et la quantité varient largement d'une espèce à l'autre, mais également au sein d'une même espèce selon les conditions de croissance des individus, peuvent être extraits par différents procédés. Ces composés chimiques trouvent différentes voies de valorisation, notamment pour le développement d'additifs et de moyens de protection pour fonctionnaliser les matériaux afin d'améliorer leurs propriétés technologiques. Ces procédés d'extraction pourraient permettre une substitution progressive des produits conventionnels pétrosourcés. L'étude de la biodiversité végétale unique de la forêt tropicale pourrait permettre l'identification de nouvelles molécules d'intérêt dans le cadre d'une telle valorisation. L'étude des espèces forestières de Guyane représente en cela un champ de recherche riche pour explorer les fonctionnalités des extractibles des bois amazoniens. Cet article dresse un bilan non exhaustif des travaux développés sur cette thématique et des innovations récentes qui ont émergées des activités menées autour de la valorisation des extractibles pour améliorer la mise en forme et les propriétés des matériaux bio- et géo-sourcés destinés à la construction en milieu tropical.

Mots-clés Bois tropicaux, extractibles, fonctionnalités, valorisation, propriétés des matériaux, Guyane française.

Abstract Extractive compounds from tropical wood species: activities and value-added potential to improve material properties

To ensure their longevity, many tree species are able to protect their wood through a process of chemical transformation: at a given developmental stage, molecules with various functionalities, such as those with biocidal or repellent activities against biological aggressions, are synthesized and impregnate the various cells of their wood. The produced metabolites, whose nature and quantity vary widely from one species to another, but also within the same species depending on the growth conditions of the individuals, can be extracted by various processes. These chemical compounds can be used in a variety of ways, notably in the development of additives and protective agents for functionalizing materials and improve their technological properties. These extraction processes could gradually replace conventional petroleum products. The study of the unique biodiversity of the tropical forest could enable the identification of new molecules of interest in the context of such valorization. In this respect, the study of Guiana's forest species represents a rich field of research for exploring the functionalities of Amazonian wood extractives. This article provides a non-exhaustive overview of the work carried out in this field research units and the recent innovations that have emerged from the activities carried out around the valorization of extractives to improve the shaping and properties of bio- and geo-sourced materials intended for construction in tropical environments.

Keywords Tropical woods, extractives, functionalities, valorization, material properties, French Guiana.

Explorer la chimie des substances naturelles contenues dans les bois

Les défenses chimiques du bois pour assurer les fonctions physiologiques de l'arbre

Le bois, matériau lignocellulosique, est un tissu produit tout au long de la vie de l'arbre qui est naturellement optimisé pour assurer des fonctions mécaniques, physiologiques et de défense contre les agents pathogènes exceptionnelles. Il constitue une ressource abondante et renouvelable, dont l'homme peut faire usage pour produire des matériaux de construction qualitatifs et durables.

Au cours de sa vie, l'arbre fait face à l'attaque de divers agents de dégradation, principalement biotiques tels que les champignons et insectes xylophages. En cas d'attaque, il est capable de se défendre activement grâce à la production de latex, résines et autres exsudats, mais peut aussi se protéger de manière préventive, en modifiant les propriétés chimiques

de son bois. Cette stratégie est rendue possible grâce au processus de « duraminisation » du bois, qui se traduit notamment par la synthèse de métabolites spécialisés afin de le rendre moins perméable, répulsif, voire toxique contre les pathogènes [1]. La duraminisation permet ainsi à l'arbre d'augmenter naturellement la durabilité de son bois de cœur (ou duramen, la zone interne colorée) en comparaison à son aubier (bois blanc périphérique encore vivant d'un point de vue physiologique, appétent et peu durable), et ainsi de maintenir l'intégrité fonctionnelle de sa tige (support et conduction de la sève) pour une plus longue durée de vie.

Au cœur de l'arbre, aux plus petites échelles, une diversité de substances à haute valeur ajoutée

Les extractibles synthétisés lors de la duraminisation du bois, métabolites spécialisés aux fonctions variées, constituent ainsi une diversité de substances chimiques naturelles d'intérêt qui peut être valorisée pour différentes applications.

Présents à la fois dans le bois, l'écorce et les nœuds, et de faible poids moléculaire, ils peuvent être extraits selon différentes méthodes (macération, infusion, décoction, distillation à la vapeur, hydrodistillation, CO₂ supercritique, eau supercritique, nanofiltration, micro-ondes, ultrasons), nécessitant pour certaines l'emploi de solvants organiques ou aqueux. Présents en quantité plus ou moins variable selon les espèces, ils peuvent représenter une très faible part jusqu'à plusieurs pour cent de la masse du bois. D'un point de vue qualitatif, la nature des extractibles varie selon les espèces et couvre principalement les différentes familles chimiques suivantes : acides gras, terpènes, alcaloïdes et polyphénols, qui peuvent à la fois jouer le rôle de défenses chimiques, mais aussi d'antioxydants, de photo-protecteurs, ou enfin de résistance aux métaux lourds et aux stress hydriques pour la plante [2]. La nature des extractibles synthétisés par l'arbre peut être spécifique d'une famille ou d'une espèce : on parle alors de « chimiotoxons » (signature chimique).

La richesse chimique des extractibles à l'échelle mondiale fait aujourd'hui l'objet de nombreux travaux de recherche. Ils visent une meilleure connaissance des fonctionnalités de ces substances naturelles et le développement de procédés à faible impact environnemental pour permettre leur valorisation au sein de diverses filières, comme additifs dans l'élaboration de matériaux biosourcés durables (colles, vernis, moyens de protection, stabilisateurs...) ou molécules actives pour la cosmétique, la santé humaine et l'agroalimentaire, etc.

Explorer la diversité chimique des bois tropicaux : un potentiel de découverte unique

Les forêts tropicales constituent un objet d'étude idéal pour accéder à une large diversité de molécules et de fonctionnalités associées. En Guyane, les recherches sur le potentiel des extractibles issus des bois locaux se sont intensifiées au cours des dernières années.

Les espèces forestières tropicales se caractérisent par la présence d'une diversité chimique inégalable d'extractibles. Outre leur nature diverse, ils peuvent également être présents dans le bois en très grande quantité en milieu tropical : 13 % pour le teck asiatique (*Tectona grandis*), 28 % pour les wapas amazoniens (*Eperua falcata* et *Eperua grandiflora*) [3]. Parmi les espèces tropicales, les espèces d'Amérique du Sud possèdent le taux moyen d'extractibles le plus fort (figure 1), avec environ 7 % uniquement pour les espèces de Guyane [4] contre environ 5 % en milieu tempéré (taux compris entre 2 à 5 % pour les résineux, et 3 à 8 % pour les feuillus).

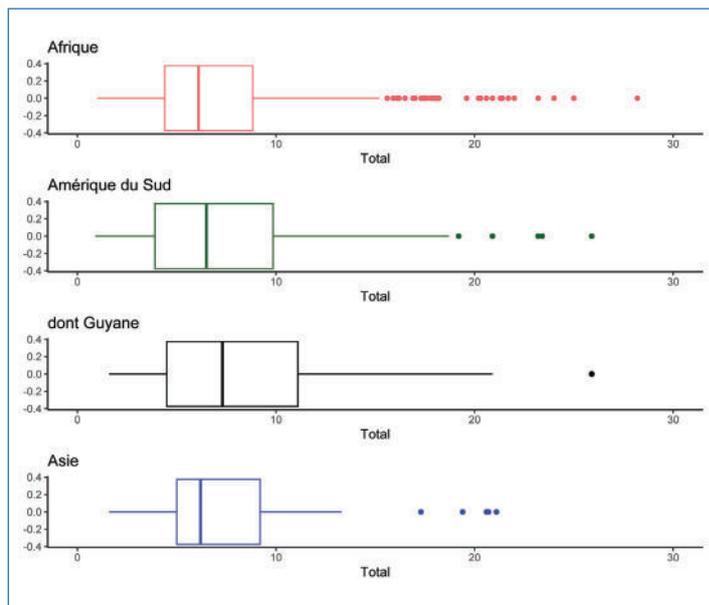


Figure 1 - Comparaison de la variabilité des taux d'extractibles observés au sein des bois tropicaux (analyse réalisée à partir des données de [4]).

La Guyane compte plus de 1 800 espèces d'arbres, contre environ 450 en Europe continentale. Les duramens (bois de cœur) des espèces gyanaises se caractérisent par une palette de couleurs très variée, résultat de la diversité des composés chimiques produits par l'arbre selon l'espèce (figure 2), parfois associés à des niveaux de durabilité naturelle exceptionnels. Plusieurs travaux menés en Guyane ont permis de mettre en évidence les activités antifongiques et anti-termite des composés extractibles provenant de plusieurs espèces comme les wapas (genre *Eperua*), la bagasse (*Bagassa guianensis*), l'angélique (*Dicorynia guianensis*), le wacapou (*Vouacapoua americana*) et le grignon (*Sextonia rubra*) [5-6]. En s'appuyant sur ces premiers résultats très encourageants, l'industrie forestière gyanaise pourrait, grâce à l'appui de la recherche, s'engager vers de nouvelles solutions innovantes pour mettre en valeur ces biomolécules. Ces modèles de valorisation peuvent par ailleurs être extrapolables à d'autres types de couverts forestiers. Deux stratégies peuvent être considérées à cet effet :

- Chercher à identifier, au sein de la diversité, des molécules spécifiques à haute valeur ajoutée pour développer des produits destinés à des marchés de niche. Cette démarche nécessite un effort de caractérisation intense, mais peut



Figure 2 - Illustration de la diversité des duramens observés parmi les espèces forestières gyanaises. Certaines essences comme le simarouba ne produisent pas de bois de cœur coloré.

permettre par une approche chimiotaxonomique (soit la classification des espèces, ou taxons, selon leur composition chimique) de mettre en évidence des familles et genres botaniques clés pour des usages ciblés à favoriser dans les schémas de gestion sylvicoles.

- Définir les voies de valorisation chimique les mieux adaptées aux grands volumes de connexes générés par la filière bois à différentes échelles de la transformation (rémanents forestiers sur les parcelles exploitées, coproduits du sciage dont écorces, copeaux, sciures, défriche agricole).

Transfert de propriétés - Biotraitements à base d'extractibles de bois pour améliorer la durabilité des bois

Améliorer la durabilité des bois naturellement sensibles en milieu tropical

La durabilité naturelle d'un bois, ou sa faculté à résister aux attaques biologiques, conditionne la pérennité de sa structure et le maintien de ses performances mécaniques dans le temps. Seules les espèces durables ou ayant subi un traitement ou autre moyen de protection au préalable peuvent être mises en œuvre en construction. Cette condition est d'autant plus stricte en milieu tropical, où les agents de dégradation sont à la fois plus diversifiés, plus nombreux et plus virulents. La classe de durabilité d'un bois aux champignons lignivores et aux insectes, dont les termites (NF EN 350, 2016), définit les potentiels d'usage des bois mis en œuvre. De récents travaux ont mis en évidence la perte d'une classe de durabilité pour des bois exposés à des souches de champignons lignivores et des termites guyanais, en comparaison à des microorganismes tempérés similaires [7]. L'utilisation des bois en Guyane a donc été traditionnellement guidée par le niveau de durabilité des espèces, et un faible nombre d'espèces très durables soutient l'ensemble de la production de bois d'œuvre. En regard de la diversité disponible, le système actuel n'exploite donc qu'une faible part du potentiel de la ressource. Notamment, de nombreuses espèces sans duramen différencié (appelées plus communément « bois blanc ») restent inutilisées en raison de leur faible durabilité malgré leur potentiel pour une utilisation en structure. On peut, sur la base des connaissances acquises sur la qualité technologique des bois de Guyane [8], identifier un certain nombre d'espèces qui allient plusieurs propriétés technologiques majeures, telles qu'un module d'élasticité élevé (paramètre lié à la rigidité mécanique du matériau) et une densité acceptable pour un usage en charpente (figure 3). C'est le cas de l'angélique (*Dicorynia guianensis*, Amshoff 1939), l'essence la plus exploitée, qui est aussi classée « durable ». D'autres essences particulièrement intéressantes sont celles dont les propriétés mécaniques sont comparables à l'angélique mais qui sont plus légères, facilitant leur mise en œuvre. Elles présentent néanmoins un niveau de durabilité faible, comme le yayamadou (*Virola* spp.). Pour ce type d'espèces, le développement de solutions de préservation représente un fort enjeu.

Les traitements chimiques, thermiques et thermochimiques permettent d'améliorer la durabilité des bois, à la fois par l'apport de molécules biocides et/ou répulsives et par la modification de leur composition et structure macromoléculaire pour rendre le bois plus hydrophobe et moins appétant pour les microorganismes [9]. Toutefois, il est nécessaire de trouver de nouveaux moyens de protection du bois plus « naturels » qui puissent substituer les produits chimiques

d'origine fossile souvent toxiques et impactant pour l'environnement. Les terpènes, les flavonoïdes, les thiophènes provenant d'extraits de bois et d'huiles essentielles se sont avérés actifs contre les termites et les champignons lignivores [10]. La formulation de systèmes aqueux ou d'émulsions associés à des biocides organiques serait une solution prometteuse pour développer de nouveaux moyens de protection du bois [11]. Des études antérieures ont montré que certains composés extraits du bois peuvent atteindre, en fonction de la concentration testée, une efficacité comparable à celle des matières actives synthétiques [12]. Ces moyens de protection naturels, efficaces et peu coûteux pourraient permettre de traiter les espèces de « bois blanc » en vue de leur réintégration au sein de chaîne industrielle de la filière bois guyanaise.

Recherche des molécules dotées d'activités antifongiques et anti-termites

Les espèces d'intérêt sont celles qui produisent des extractibles dont l'activité répulsive ou biocide est avérée et dont les molécules responsables de telles fonctionnalités peuvent être isolées et utilisées pour la formulation. Parmi les différentes espèces d'arbres, deux stratégies de défense antifongique par les extractibles peuvent être observées :

- une durabilité naturelle conférée par une molécule présente en petite quantité dans le bois mais très active. C'est le cas de l'angélique (*Dicorynia guianensis* Amsh.), l'espèce la plus utilisée en Guyane, caractérisée par une faible quantité d'extractibles (3,4 %) mais une activité antifongique très marquée grâce à ses composés phénoliques antioxydants et alcaloïdes [13] ;

- une durabilité naturelle conférée par une grande proportion relative d'extractibles dans le bois, mélange de métabolites qui ne présentent aucune activité biologique prédominante une fois isolés : les propriétés antifongiques résultent ici d'un effet de synergie. C'est le cas du wapa (*Eperua falcata*), dont les extractibles extraits à l'éthanol peuvent représenter jusqu'à 28,5 % de la masse, avec l'identification de six composés différents [3].

Pour un grand nombre d'espèces, le type de stratégie de défense et la nature exacte des composés synthétisés par l'arbre ne sont pas ou très peu connus, et complexifient le choix des espèces cibles. Il existe néanmoins en Guyane une

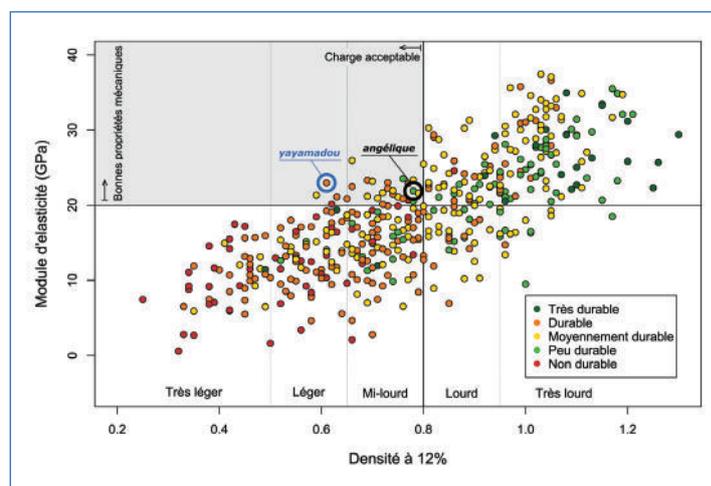


Figure 3 - Identification des espèces qui associent bonnes propriétés mécaniques et niveaux de densité adaptés à un usage en charpente, à partir des bases de données existantes sur la qualité technologique des bois de Guyane [8]. Le gradient de couleur illustre la variabilité de la durabilité naturelle des bois des espèces représentées.

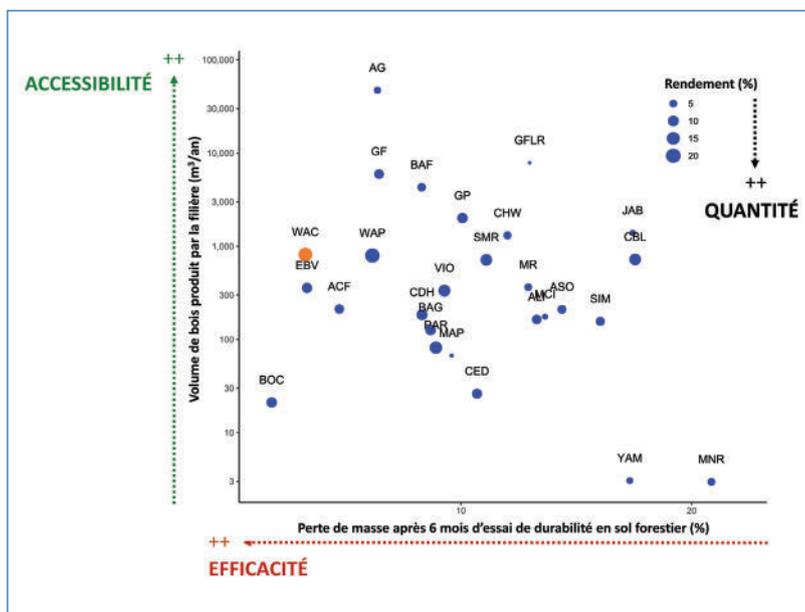


Figure 4 - Identification des espèces de bois guyanais associant de larges volumes disponibles (données issues du Centre technique des bois et de la forêt de Guyane), une bonne durabilité et un taux d'extraits important (données issues des bases de données CIRAD sur les propriétés technologiques des bois tropicaux [8]). Le wacapou (*Vouacapoua americana*, noté « WAC », en orange) se distingue comme espèce d'intérêt selon ces trois critères.

base de données acquise par le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) qui rend compte, pour 235 espèces sur les 1 800 présentes, de la dégradation massive moyenne des bois après six mois d'exposition aux sols forestiers (norme XP CEN/TS 15083-2, 2006), qui peut représenter un bon marqueur de l'efficacité des extractibles, et de la fraction massive totale des extractibles dans le bois, un autre paramètre-clé pour garantir de bons rendements d'extraction et participer à la viabilité économique de leur valorisation. Finalement, les volumes annuels produits localement sont aussi à considérer pour assurer l'accessibilité des ressources et le développement de procédés de bio-imprégnation transférables aux filières bois. Il est donc possible d'identifier des espèces de bois communes en Guyane prometteuses pour l'extraction, en s'appuyant sur l'évaluation de ces trois critères (figure 4). Le wacapou (*Vouacapoua americana*, noté « WAC ») ressort comme espèce-clé avec près de 1 000 m³ transformés par la filière chaque année, une perte de masse inférieure à 5 % après six mois en contact avec le sol et une fraction massive totale d'extractibles de 17,8 %.

Extraction/imprégnation des composés actifs : identification des paramètres-clés

• Choix des paramètres d'extraction

Les extractibles du bois peuvent être aisément extraits du duramen du bois à l'aide de solvants organiques ou aqueux, sans procéder à des traitements sévères tels que ceux qui en modifient chimiquement les constituants structuraux (cellulose, hémicelluloses, lignine). L'identification de méthodes d'extraction appropriées est une étape critique pour augmenter le rendement d'extraction des composés bioactifs contenus dans le bois. Les procédés les plus largement appliqués, en laboratoire comme dans le secteur industriel, sont ceux de l'extraction solide/liquide à partir de broyats de bois [14]. Après une étape de mélange des fibres avec les solvants pendant une durée variable, avec ou sans agitation et/ou

élévation de la température, les fibres extraites sont filtrées et le mélange solvant-extractibles est ensuite évaporé pour isoler les extractibles. Parmi les méthodes les plus couramment employées, on trouve la macération, l'infusion, la distillation à la vapeur, l'hydrodistillation et l'extraction par Soxhlet. L'extraction des composés cibles dépend de leur affinité avec le solvant utilisé lors du procédé d'extraction. Le type de molécules extraites, ainsi que le rendement d'extraction, sont alors impactés par le choix du solvant ou de la séquence de solvants employés [15]. Il est donc crucial d'utiliser les produits appropriés aux types de molécules visées par l'extraction. L'éthanol, le méthanol, l'acétone et le dichlorométhane, souvent employés purs ou en solution aqueuse, sont les solvants les plus couramment utilisés. La granulométrie des broyats de fibres de bois est aussi un paramètre du procédé qu'il est important de maîtriser. En effet, la finesse des particules extraites permet un meilleur accès du solvant aux extractibles et augmente le rendement d'extraction [16], mais le broyage – ou fractionnement – des fibres représente un coût non négligeable. L'objectif est d'identifier la granulométrie permettant de trouver un compromis acceptable entre coûts liés à l'intensité du fractionnement et amélioration du rendement de production. Les autres facteurs qui influencent également les méthodes classiques sont les caractéristiques de la matrice, le rapport solide/liquide, la température, la pression et le temps d'extraction [15].

• Choix des paramètres d'imprégnation

Une fois le procédé d'extraction finalisé et le solvant évaporé, les extractibles sont sous une forme concentrée. Afin de permettre la formulation de solutions pour imprégner les bois sensibles, les molécules extraites doivent être solubilisées. Pour développer des produits de bio-imprégnation naturels, il est préférable d'employer des solvants organiques biosourcés et non nocifs pour l'environnement et la santé humaine. Néanmoins, en fonction de leur composition chimique, les extractibles ne sont pas toujours solubles dans l'eau ou l'éthanol. Le développement d'émulsions composées d'eau, d'huile et d'ajout de tensioactifs peut alors être une alternative intéressante. La stabilité, la viscosité, ainsi que le pH des solutions développées sont autant de paramètres qui influencent la mise en œuvre du traitement, et doivent par conséquent être adaptés en fonction de l'usage souhaité. Par exemple, pour une imprégnation à cœur dans le matériau, une solution à faible viscosité est préférable, alors qu'un mélange plus visqueux sera favorisé pour un traitement de surface.

L'imprégnation sous vide, méthode par laquelle le mouvement du liquide est induit par pression capillaire dans les pores du matériau, est un processus de diffusion complexe dont l'efficacité dépend du niveau de pénétration, de distribution et de fixation des composés actifs dans la structure poreuse du bois. On observe une grande variabilité de taux de rétention des produits de traitement dans les bois blancs de Guyane. Les variations microstructurales du bois liées à son anatomie (nature et organisation des cellules qui le composent) influencent l'imprégnabilité [17] mais ne permettent pas à elles seules d'expliquer les différences observées. Les travaux actuels portent sur l'effet combiné de la microstructure et la composition chimique des bois sur leur imprégnabilité.

Cas d'étude : analyse et valorisation des extractibles du wacapou (*Vouacapoua americana*) pour la formulation de traitements des bois blancs par bio-imprégnation [6]

• Choix du solvant pour isoler les molécules cibles

Le wacapou (*Vouacapoua americana*, Aublet, 1775) est une espèce abondante sur le plateau des Guyanes. Exploitée par la filière pour les qualités exceptionnelles de son bois (densité élevée, excellente durabilité naturelle, esthétique, bonne usinabilité), cette espèce génère un large volume de connexes industriels en raison de la morphologie singulière de sa tige qui en complexifie la transformation. Plusieurs molécules présentes dans les extractibles du wacapou ont pu être isolées et identifiées : des diterpénoïdes furaniques de la famille des cassanes tels que le vouacapénate de méthyle et le vouacapénol [18-19] (figure A), qui possèdent des activités antibactériennes, antioxydantes et fongicides [20].

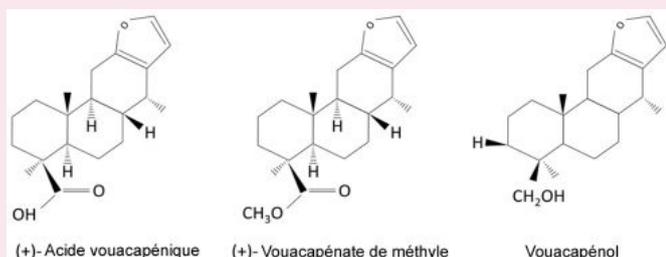


Figure A - Molécules d'intérêt identifiées parmi les extractibles du wacapou.

Des échantillons de bois de wacapou sont broyés (granulométrie 0,5 mm), puis mis à macérer (ratio solvant/matière 1/2) pendant trois jours avant filtration et évaporation du solvant. Plusieurs solvants d'extraction sont testés pour chercher à extraire ces molécules cibles. Si l'extrait hydroalcoolique de wacapou (avec un rendement de 2 % en masse) a été rapporté comme d'intérêt pour un usage en cosmétique grâce à son activité antioxydante marquée (projet ValorExtract, données non publiées), il ne contient toutefois pas les molécules cibles pour l'activité antifongique. À l'inverse, l'emploi de l'acétate d'éthyle permet à la fois d'obtenir un meilleur rendement (5 % en masse) et d'extraire des composés cibles, comme l'illustre la comparaison des chromatogrammes couplés à la spectrométrie de masse (LC-MS) (figure B).

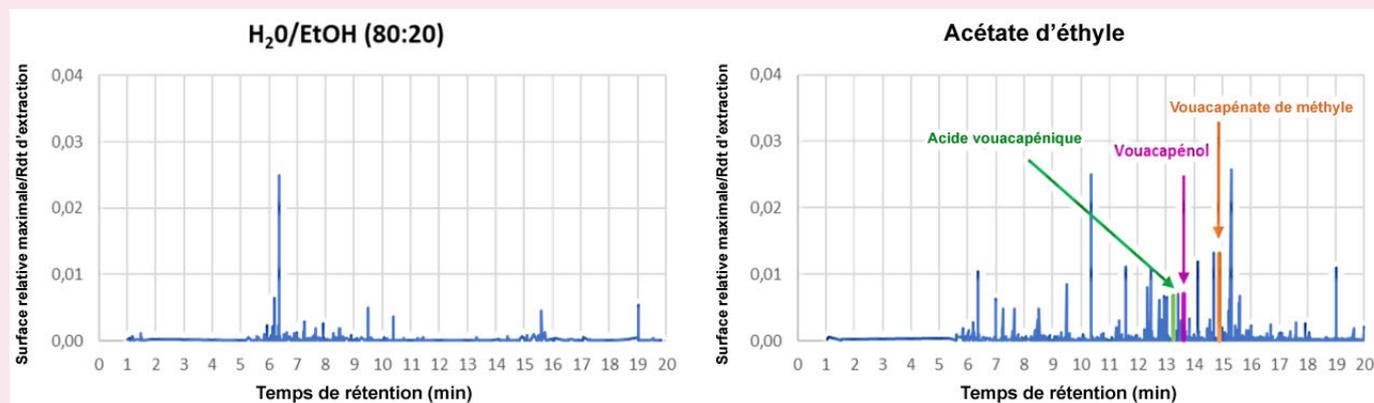


Figure B - Comparaison des différentes molécules contenues dans les fractions d'extractibles obtenues par macération avec différents solvants (eau/éthanol et acétate d'éthyle), analysées par chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse (LC-MS).

Ces résultats permettent de valider l'intérêt de l'acétate d'éthyle pour extraire les composés recherchés. Ce solvant, malgré un caractère volatil qui peut en complexifier l'utilisation, présente l'avantage de rentrer dans la catégorie des solvants « verts », c'est-à-dire dérivés de matières premières renouvelables, qui ne génère pas de produits dangereux lors de sa préparation ou de son traitement, et qui ne présente pas de risques pour la santé humaine [21]. L'acétate d'éthyle peut par ailleurs être recyclé entre chaque cycle d'extraction (macération, filtration, évaporation, condensation) et peut être purifié par distillation si besoin après plusieurs cycles. Il est toutefois à noter que le volume initial d'acétate d'éthyle n'est jamais totalement récupéré entre chaque cycle, notamment parce qu'une part reste imprégnée dans les fibres.

• Validation de l'activité des extraits obtenus

Les extractibles de wacapou obtenus en utilisant l'acétate d'éthyle comme solvant d'extraction sont ensuite testés purs pour valider leur activité. Un essai d'inhibition de croissance fongique est tout d'abord réalisé pour tester l'activité fongicide ou fongistatique des molécules extraites : 1 200 μ l d'une solution d'extraits dilués dans l'acétone de concentration croissante (de 1 à 10 %) sont mélangés à un milieu de culture (10 ml de mélange malt-agar) et disposés en boîte de Pétri. Chaque dispositif est mis en contact avec le champignon de pourriture blanche tropicale *Pycnoporus sanguineus* et l'aire de propagation du champignon est mesurée régulièrement pendant 21 jours (figure C). Le contrôle sur le milieu imprégné d'acétone valide que le solvant n'influence pas la croissance fongique. Selon la concentration en extraits de wacapou, on peut observer une diminution notable de la vitesse de propagation du mycélium, avec une colonisation complète au bout de 21 jours contre 9,5 jours pour le contrôle.

Un essai dit « de screening » de résistance aux attaques de termites est mis en place dans un second temps pour tester l'activité répulsive et/ou termiticide des molécules extraites : des disques de cellulose de 42,5 mm de diamètre sont imprégnés de 80 μ l des mêmes solutions d'extraits de concentration croissante et mis au contact de termites de bois secs tropicaux, du genre *Cryptoterms* sp. Après 17 jours, l'état de

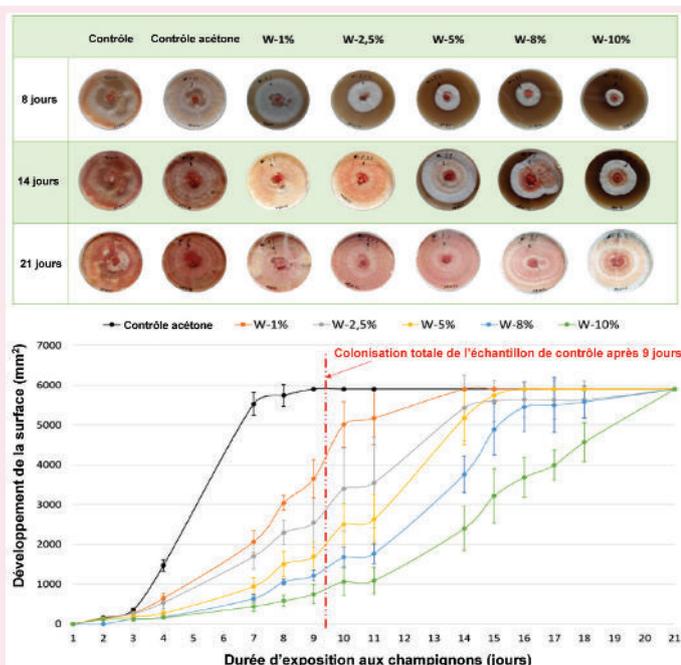


Figure C - Cinétique du développement mycélien de pourriture blanche (*Pycnoporus sanguineus*) sur un milieu de culture (eau, malt, agar) contenant ou non une solution à base d'extraits de wacapou de concentration croissante.

dégradation des disques de cellulose est évalué par analyse d'images et les termites ayant survécu sont comptés (figure D). Les témoins « cellulose » et « cellulose + solvant » valident que les termites peuvent s'alimenter des papiers de cellulose imprégnés et que le solvant utilisé pour la dilution des extraits n'a aucun impact sur les termites. Les témoins

« diète » valident que les termites peuvent survivre à 17 jours sans alimentation et que leur mort sur les autres dispositifs résulte de la toxicité ou de la répulsivité des extraits testés.

Les résultats obtenus montrent qu'une concentration croissante d'extraits diminue nettement la portion des disques de cellulose imprégnés dégradée par les termites. Cet essai démontre aussi une augmentation marquée du taux de mortalité des termites, avec 75 % de survivants en moyenne pour les témoins, contre 48 % pour les papiers imprégnés de la solution à 8 % d'extraits de wacapou. Des essais complémentaires sur des termites souterrains tempérés (*Reticulitermes flavipes*) ont par ailleurs démontré un taux de survie nul à partir d'une concentration de 2,5 %.

Ces résultats valident que les molécules cibles, obtenues par l'extraction du bois de wacapou par procédé de macération à l'acétate d'éthyle, présentent une activité fongistatique et termiticide d'intérêt pour le développement de produits de traitement afin de conférer au bois une meilleure durabilité.

• Efficacité du traitement formulé à partir des extractibles du wacapou : durabilité conférée

Un moyen de protection peut finalement être formulé à partir de la dilution d'extractibles de wacapou extraits à l'acétate d'éthyle (8 % en masse) dans une solution organique (mélange éthanol, eau, acétate d'éthyle, acétone), qui permet d'obtenir une bonne solubilisation des composés. Des éprouvettes de yayamadou (*Virola spp.*), bois témoin sélectionné en raison de sa forte sensibilité aux attaques biologiques, sont imprégnées sous vide (pression de 100 mbar) pendant 48 h, puis mis à stabiliser dans une ambiance à 25 °C et 50 % d'humidité relative (figure E).

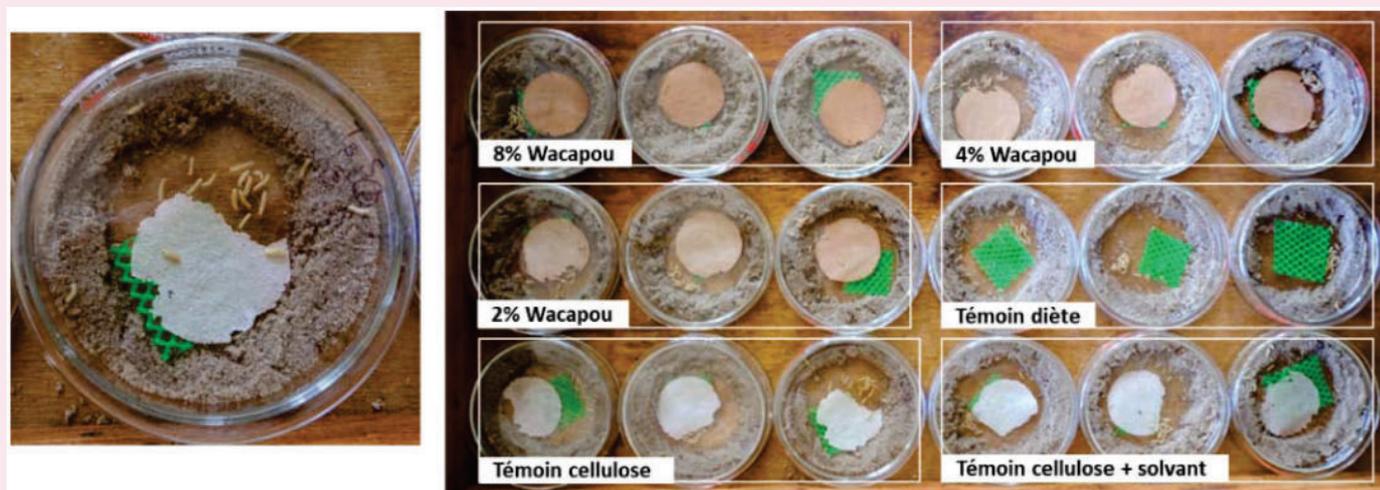


Figure D - Comparaison, après 17 jours de mise en contact avec les termites tropicaux du genre *Cryptotermes* sp., de la surface dégradée des disques de cellulose imprégnés de solutions d'extraits de wacapou de concentration croissante.



Figure E - Aspect des extraits issus des fibres de wacapou (*Vouacapou americana*), de la solution de traitement formulée à partir de ces extraits et du bois de yayamadou (*Virola michelii*) avant et après imprégnation.

Plusieurs tests de durabilité sont ensuite réalisés sur les éprouvettes de yayamadou brutes et imprégnées : un essai contrôlé de résistance à une souche fongique spécifique (8 semaines en contact avec le champignon de pourriture blanche tropical *Pycnoporus sanguineus* ; tests adaptés de la norme NF EN 113-1, 2020) ; un essai non contrôlé d'enfouissement des échantillons en sol forestier (6 mois ; tests adaptés de la norme XP ENV 807, 2001) ; deux essais contrôlés de résistance sur des espèces de termites témoins : une espèce souterraine tempérée (*Reticulitermes flavipes*) et une espèce de bois sec tropical (*Cryptotermes* sp.) (4 semaines ; tests adaptés de la norme NF EN 117, 2023). La figure F compare les pertes de masse totales observées en fin d'essai pour les échantillons témoins non imprégnés, les échantillons imprégnés avec une solution de traitement commerciale (xylophène, AXTON) et les échantillons imprégnés avec la solution de wacapou. D'un point de vue général, le traitement améliore de façon significative la durabilité naturelle du yayamadou face aux attaques de champignons et de termites. La perte de masse des échantillons traités est largement diminuée dans chacun des cas, avec des résultats qui s'approchent de ceux obtenus avec le traitement commercial.

Cette analyse démontre l'efficacité du biotraitement formulé à partir des extractibles de wacapou et confirme le fort potentiel de cette voie de valorisation. Des essais sont en cours pour étudier le caractère lessivable ou non des formulations, ainsi que leur écotoxicité, pour valider leur intérêt dans l'élaboration de nouveaux matériaux bois, durables et à faible impact environnemental.

Autres fonctionnalités des extractibles des bois tropicaux pour les matériaux

Explorer d'autres types de transfert de propriétés - Les extractibles comme agents de stabilisation

Comme détaillé précédemment, la présence des extractibles apporte au bois un gain de durabilité face aux agents de dégradation biotique. Mais ces substances modifient également d'autres propriétés physico-chimiques d'intérêt, comme par exemple la densité du bois, son comportement thermique, ou encore son affinité à l'eau [22-23].

L'effet des extractibles sur l'hygroscopicité du bois est particulièrement intéressante. Certains extractibles peuvent rendre la paroi des fibres de bois plus ou moins hydrophobes. Des essais menés sur des fibres issues de deux espèces communes de Guyane (bagasse, *Bagassa guianensis* ; wapa, *Eperua falcata*) permettent de comparer leur prise de masse lors d'une augmentation de l'humidité relative de l'air, à l'aide d'un outil de sorption vapeur dynamique (DVS). Pour les deux essences, il est possible d'observer que les fibres d'aubier (bois blanc dépourvu d'extractibles) absorbent une plus large quantité d'eau entre un état sec et humide, soit ici entre deux paliers d'humidité relative stabilisés à 30 % et 75 % (à 25 °C), en comparaison aux fibres de duramen (figure 5).

Dans le cas de ces deux espèces, l'affinité réduite des fibres à l'eau en présence des extractibles est à l'origine d'un gain important de stabilité dimensionnelle du matériau bois à

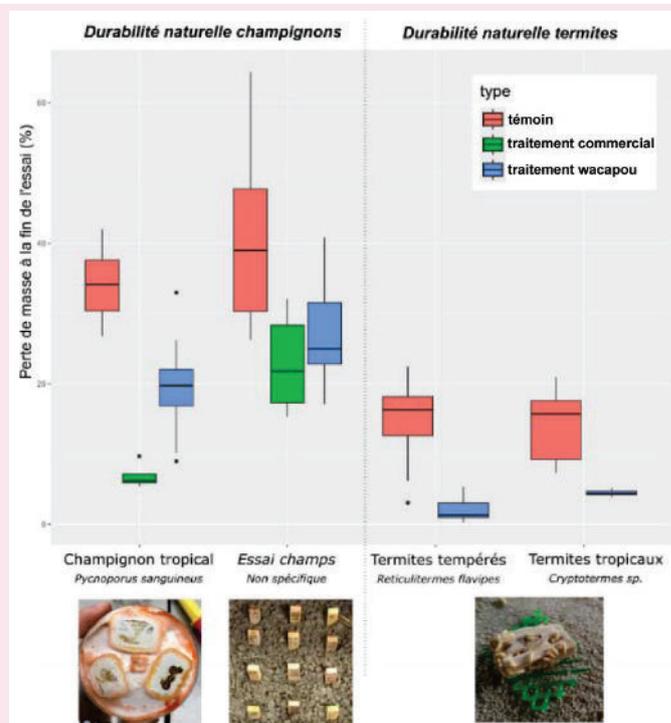


Figure F - Essais de durabilité face aux attaques de champignons de pourriture blanche et de pourriture molles, et de termites sur éprouvettes, menés en laboratoire. Comparaison de la durabilité des témoins (en rouge) et de celle des échantillons imprégnés avec un traitement commercial conventionnel (en vert) ou avec la solution à base d'extraits de wacapou (en bleu).

cosmétique, puis une seconde à l'acétate d'éthyle pour isoler les molécules pour le développement de solutions de préservation. Enfin, les fibres extraites pourraient être valorisées en centrale biomasse pour la production d'énergie, et les cendres pour enrichir les sols.

l'échelle macroscopique : l'amplitude des phénomènes de retrait/gonflement du matériau, observables lorsque le matériau sèche ou se charge en eau en s'équilibrant avec son environnement extérieur, est réduit dans le duramen, améliorant sa qualité technologique globale [23]. Il est alors envisageable d'imaginer le développement de traitements des bois instables par des solutions d'extractibles stabilisants, comme cela a pu être démontré pour le wapa en Guyane [24]. Étendre le champ d'application du transfert de propriétés par les extractibles pour améliorer la qualité des bois à toute une diversité de propriétés cibles telles que la durabilité, la stabilité dimensionnelle, la résistance thermique, ou encore le comportement mécanique et le comportement au feu, représente une perspective prometteuse afin de mieux valoriser la diversité d'espèces forestières disponible.

Valorisation des tanins issus de wapa (*Eperua falcata*) pour le développement d'additifs

Les tanins sont des polyphénols naturels complexes contenus dans le bois de plusieurs espèces, dont la structure et la composition sont variés. On les trouve sous deux formes : les tanins condensés et les tanins hydrolysables, extractibles à l'eau. Ils sont largement employés pour la production de résines et colles à bois, grâce à leur structure phénolique qui réagit très bien avec les formaldéhydes. Cette affinité permet une substitution partielle importante des phénols présents dans les formulations conventionnelles, jusqu'à 80 % dans le

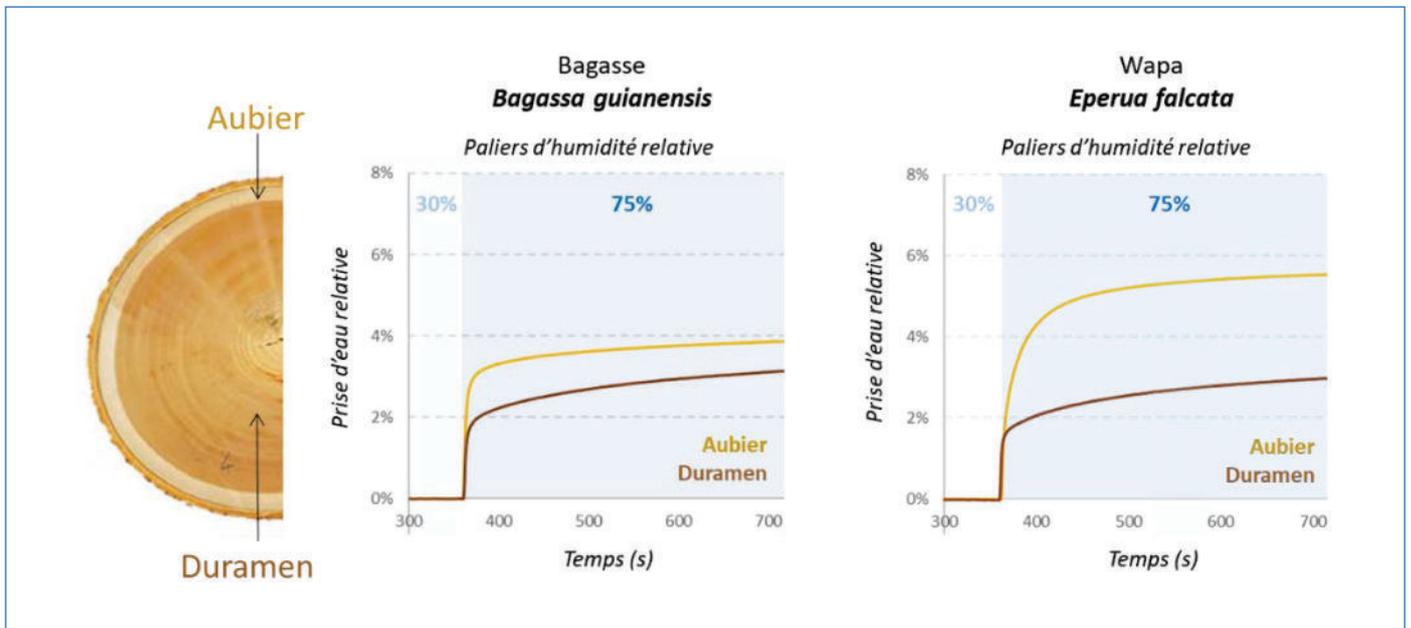


Figure 5 - Évolution temporelle de la prise d'eau relative de fibres de bagasse (gauche) et de wapa (droite) à 75 % d'humidité relative par rapport à leur masse à l'équilibre à 30 % d'humidité relative (essais conduits à 25 °C).

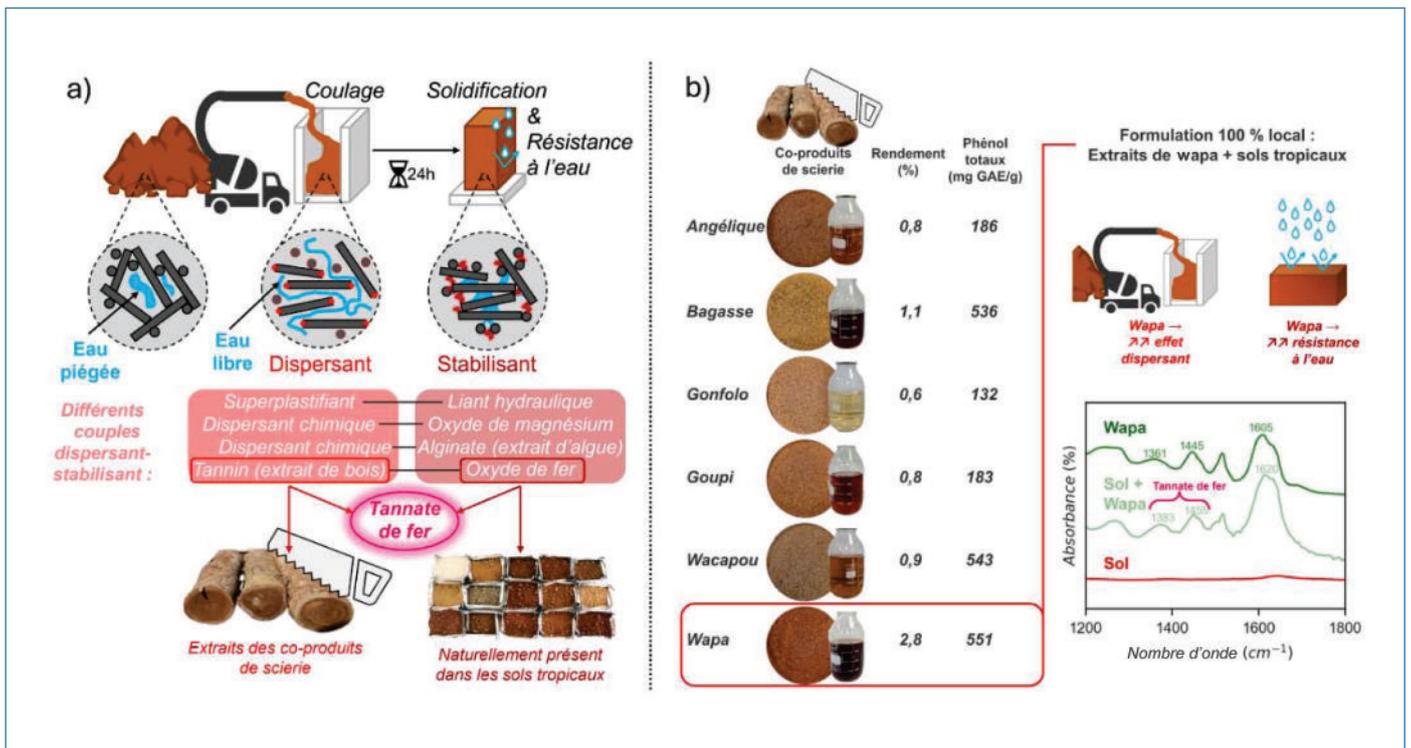


Figure 6 - a) Schématisation des mécanismes à l'origine des effets dispersant et stabilisant des terres coulées grâce à la synergie des tanins avec les oxydes de fer. b) Variabilité des rendements d'extraction en tanins pour plusieurs espèces guyanaises et observation de la formation de tannates de fer dans les cas des tanins de wapa (*Eperua falcata*).

cas des tanins de châtaignier [25], réduisant largement l'empreinte écologique des produits adhésifs. En milieu tropical, les tanins peuvent atteindre des taux supérieurs à 10 % en masse dans le bois [26] et représentent ainsi une ressource d'intérêt pour le développement d'additifs pour les matériaux. En parallèle des forts rendements, la diversité des bois guyanais pourrait aussi permettre l'identification de tanins aux structures et activités singulières, à plus forte valeur ajoutée. De premiers travaux en Guyane émergent pour la valorisation de ces composés.

• Les tanins de wapa comme dispersants et stabilisants pour les matériaux en terre crue

Ils peuvent tout d'abord être employés comme bio-dispersant pour la réalisation de terre coulée, une technique de construction en terre crue façonnée comme du béton de ciment qui nécessite l'utilisation d'un dispersant pour permettre le coulage et d'un stabilisant pour permettre une solidification rapide et une forte résistance à l'eau (figure 6a). Différents couples dispersant/stabilisant se sont montrés efficaces pour fabriquer de la terre coulée, mais nécessitent l'utilisation de

dispersants chimiques et de liants hydrauliques ayant pour effet d'augmenter les coûts environnementaux et économiques du matériau. Une récente étude a montré le haut potentiel de l'utilisation de tanins, associés à la soude, comme dispersants des particules d'argile en combinant des forces de répulsion stérique et des forces de répulsion électrostatique. En réagissant avec les oxydes de fer naturellement présents dans les sols tropicaux, les tanins agissent dans un second temps comme stabilisant [27], permettant une solidification rapide et une amélioration de la résistance à l'eau du matériau.

Des études réalisées en Guyane démontrent que les tanins de châtaignier peuvent fluidifier différents types de sols tropicaux et induire une solidification rapide, ainsi qu'une augmentation de leur résistance à l'eau [28]. Les tanins issus des coproduits de plusieurs essences de bois guyanais (angélique, bagasse, gonfalo, goupé, wacapou et wapa) sont testés pour comparer leur potentiel dans la formulation de terre coulée avec les sols tropicaux. L'extrait à l'eau de wapa présente le meilleur rendement et une plus forte concentration en composés phénoliques (figure 6b). L'activité dispersante la plus intéressante est également observée pour les extraits de wapa, supérieure à celle rapportée pour les tanins de châtaignier. Des analyses infrarouges des mélanges sol-extraits de wapa (figure 6b) permettent de valider la formation de tannate de fer, à l'origine de l'amélioration de la résistance à l'eau des matériaux en terre coulée [29]. Ces résultats engagent à étudier davantage les tanins guyanais comme alternative écologique aux produits industriels pour les matériaux en terre.

• **Les tanins de wapa comme tensioactifs pour la formulation d'émulsions de bio-imprégnation**

Les tanins sont également connus pour être des agents moussants. Grâce à leurs bonnes propriétés thermiques et mécaniques, les mousses tannin/furanique constituent par exemple une alternative très intéressante aux mousses phénoliques et aux polyuréthanes dans diverses applications. La structure des tanins (cycles aromatiques hydrophobes, groupes hydroxyles hydrophiles) suggère aussi que certains pourraient avoir des propriétés tensioactives, et donc stabiliser les émulsions. Bien qu'il existe déjà de nombreux agents tensioactifs naturels, l'intérêt d'utiliser les tanins comme stabilisants réside dans le fait qu'ils possèdent également d'importantes capacités antioxydantes. En testant l'activité antioxydante et le pouvoir stabilisant de tanins issus de pépins de raisins et de pommes, des chercheurs ont pu démontrer un effet similaire à celui de tensioactifs synthétiques [30]. Cependant, en raison de leur grande réactivité chimique, ils subissent de nombreuses réactions lorsqu'ils sont en solution, ce qui conduit à la formation de nouveaux composés qui possèdent des propriétés différentes de celles des tanins natifs. Cela peut complexifier leur mise en œuvre.

Des travaux de recherche émergents en Guyane étudient le comportement moussant (indicateur de la présence de molécules à caractère tensioactif) des tanins hydrolysables de wapa (*Eperua falcata*) obtenus par simple macération à l'eau. Pour la formulation de biotraitements à base d'extractibles comme ceux du wacapou, l'étape de solubilisation pose problème, car l'ensemble des molécules ne peut être solubilisé dans un même solvant organique. À l'inverse, il est observé que l'huile permet la solubilisation d'un très grand nombre de ces composés. Pour permettre la mise en œuvre de solutions de traitement moins visqueuses, des émulsions

d'huile dans l'eau sont réalisées avec des concentrations variables d'extraits à l'acétate d'éthyle de wacapou, et d'extraits à l'eau de wapa comme agent tensioactif. Les premiers résultats démontrent l'obtention d'émulsions fines, moins stables qu'avec un tensioactif commercial, mais avec un meilleur taux de rétention dans le bois lors de l'imprégnation. Pour le développement d'une solution de bio-imprégnation pour la protection des bois, cet additif présente aussi l'intérêt d'améliorer l'efficacité globale du traitement grâce à l'activité fongicide propre des tanins de wapa [3].

Fronts de science et enjeux pour la valorisation des extractibles du bois

Dans cette branche particulière qu'est la chimie des substances naturelles, une accélération des recherches est aujourd'hui nécessaire afin, d'une part, d'améliorer les connaissances axées sur la diversité structurale et chimique des extractibles au sein d'un large éventail d'espèces de bois, et, d'autre part, de mieux comprendre leur variabilité en lien avec le développement de l'arbre, qui conditionne la recherche de molécules d'intérêt et leur valorisation. La nature et les facteurs qui influencent la stabilité des interactions entre les extractibles et les macromolécules du bois sont aussi un domaine à explorer dans l'objectif d'extraire un maximum de composés et aussi, dans le cas de l'élaboration de nouveaux moyens de protection des bois, d'améliorer l'efficacité d'imprégnation, ainsi que la rétention des produits au sein des matériaux. Par ailleurs, une attention particulière doit être portée sur le caractère lessivable et la potentielle écotoxicité de ces formulations, bien qu'elles soient à base de substances naturelles.

La biodiversité unique des forêts guyanaises reste à ce jour sous-valorisée et représente une véritable opportunité pour étudier les relations entre biodiversité et composition chimique des bois par une approche taxonomique. Le développement local d'une nouvelle chaîne de valeur orientée vers la conception d'écomatériaux innovants d'origine locale et naturelle, tout en assurant un haut niveau de conservation de la biodiversité, constitue une perspective en adéquation avec les ambitions des acteurs de la filière bois, désireux de diversifier des usages de la ressource forestière. La caractérisation fine de leur composition chimique et des activités associées permettrait l'identification de composés chimiques d'intérêt afin de sélectionner les essences et sous-produits les plus adaptés pour assurer la performance des matériaux élaborés en fonction de l'application visée : propriétés structurales, durabilité, résistance à l'humidité et pouvoir isolant sont les principales propriétés concernées pour des usages en zone méditerranéenne ou tropicale. Ces questions de recherche font l'objet d'un sujet de thèse porté par Emma Kieny et cofinancé par le CIRAD et l'ADEME.

Remerciements

Ces travaux ont pu être menés dans le cadre des projets suivants :
- PANTHER²-Guyane, financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR-22-CE43-0019) ;
- PROTEXTWOOD, financé par le LabEx AGRO ANR-10-LABX-0001-01 (ID 2202-102) ;
- ECOVALOBOIS, financé par les Fonds européens de développement régional (GY0015430) ;
- GUYATERRE, financé par l'Université de Guyane, l'Agence de la transition écologique (ADEME) et le Campus des métiers et des qualifications d'excellence du bois (19 GYC0030) ;
- GUYAVALOFIBRES, financé par le CNRS (PEPS Ingénierie verte).

Par ailleurs, ils ont bénéficié d'une bourse dans le cadre d'un Programme d'investissement d'avenir géré par l'ANR (Labex CEBA, réf. ANR-10-LABX-25-01).

Les auteurs sont également reconnaissants du soutien apporté par les scieries locales, pour la mise à disposition de sciures de bois permettant la réalisation des essais.

- [1] A.M. Taylor, B.L. Gartner, J.J. Morrell, Heartwood formation and natural durability: a review, *Wood & Fiber Sci.*, **2002**, *34*, p. 587-611.
- [2] D. Treutter, Significance of flavonoids in plant resistance: a review, *Environ. Chem. Lett.*, **2006**, *4*, p. 147-57, <https://doi.org/10.1007/s10311-006-0068-8>
- [3] N. Amusant *et al.*, Chemical compounds from *Eperua falcata* and *Eperua grandiflora* heartwood and their biological activities against wood destroying fungus (*Coriolus versicolor*), *Holz Roh Werkst.*, **2007**, *65*, p. 23-28, <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0120-1>
- [4] J. Gérard, S. Paradis, B. Thibaut, Suivi de la composition chimique de plusieurs espèces de bois tropicaux, *Bois & Forêts des Tropiques*, **2019**, *342*, p. 79-91, <https://doi.org/10.19182/bft2019.342.a31809>
- [5] A.M.S. Rodrigues *et al.*, The wood preservative potential of long-lasting Amazonian wood extracts, *Int. Biodeter. Biodegrad.*, **2012**, *75*, p. 146-9, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.03.014>
- [6] E. Kiény *et al.*, The potential of Wacapou (*Vouacapoua americana*) extracts to develop new biobased protective solutions for low durability wood species, *J. Renew. Mater.*, **2025**, *13(1)*, p. 79-100, <https://doi.org/10.32604/jrm.2024.056731>
- [7] M. Leroy *et al.*, Durabilité naturelle de 8 essences tropicales utilisables en bois rond pour la construction : tests rapides en laboratoire de leur résistance aux champignons et aux termites, *Bois & Forêts des Tropiques*, **2023**, *358*, p. 15-29, <https://doi.org/10.19182/bft2023.358.a37217>
- [8] J. Beauchêne, B. Thibaut, N. Amusant, J. Cigna, Database of wood properties from specimens of the French Guiana wood collection, *CIRAD Dataverse*, **2021**, <https://doi.org/10.18167/dvn1/r4g7bc>
- [9] P. Gérardin, New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood – a review, *Ann. For. Sci.*, **2016**, *73*, p. 559-70, <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0531-4>
- [10] W.F. Bédounguindzi *et al.*, Anti-termite and anti-fungal bio-sourced wood preservation ingredients from *Dacryodes edulis* (G. Don) H.J. Lam resin, *Holzforchung*, **2020**, *74(8)*, p. 745-53, <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0106>
- [11] M. Verma, S. Sharma, R. Prasad, Biological alternatives for termite control: a review, *Int. Biodeter. Biodegrad.*, **2009**, *63(8)*, p. 959-72, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.05.009>
- [12] M.B. Isman, C.M. Machial, Chapter 2 Pesticides based on plant essential oils: from traditional practice to commercialization, in *Advances in Phytomedicine vol.3*, **2006**, Elsevier, p. 29-44, [https://doi.org/10.1016/s1572-557x\(06\)03002-9](https://doi.org/10.1016/s1572-557x(06)03002-9)
- [13] J.B.S. Anouhe *et al.*, The role of extractives in the natural durability of the heartwood of *Dicorynia guianensis* Amsh.: new insights in antioxidant and antifungal properties, *Ann. For. Sci.*, **2018**, *75*, art. 15, <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0691-0>
- [14] M.B. Santos, L. Sillero, D.A. Gatto, J. Labidi, Bioactive molecules in wood extractives: methods of extraction and separation, a review, *Ind. Crop. Prod.*, **2022**, *186*, 115231, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115231>
- [15] M. Pinelo, M. Rubilar, M. Jerez, J. Sineiro, M.J. Núñez, Effect of solvent, temperature, and solvent-to-solid ratio on the total phenolic content and antiradical activity of extracts from different components of grape pomace, *J. Agric. Food Chem.*, **2005**, *53(6)*, p. 2111-7, <https://doi.org/10.1021/jf0488110>
- [16] I. Miranda, J. Gominho, I. Mirra, H. Pereira, Chemical characterization of barks from *Picea abies* and *Pinus sylvestris* after fractioning into different particle sizes, *Ind. Crop. Prod.*, **2012**, *36*, p. 395-400, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.035>
- [17] G. Tondi *et al.*, Impregnation of Scots pine and beech with tannin solutions: effect of viscosity and wood anatomy in wood infiltration, *Wood Sci. Technol.*, **2013**, *47*, p. 615-26, <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0524-5>
- [18] F.E. King, D.H. Godson, T.J. King, The chemistry of extractives from hardwoods. Part XXII. The structure of diterpenes from *Vouacapoua* species, *J. Chem. Soc.*, **1955**, p. 1117-25, <https://doi.org/10.1039/jr9550001117>
- [19] T. Kido, M. Taniguchi, K. Baba, Diterpenoids from Amazonian crude drug of Fabaceae, *Chem. Pharm. Bull.*, **2003**, *51*, p. 207-8, <https://doi.org/10.1248/cpb.51.207>
- [20] R.A. Dickson, P.J. Houghton, P.J. Hylands, Antibacterial and antioxidant cassane diterpenoids from *Caesalpinia benthamiana*, *Phytochemistry*, **2007**, *68(10)*, p. 1436-41, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.03.008>
- [21] W. Prasad, A.D. Wani, K. Khamrui, S.A. Hussain, Y. Khetra, Green solvents, potential alternatives for petroleum based products in food processing industries, *Cleaner Chem. Eng.*, **2022**, *3*, 100052, <https://doi.org/10.1016/j.cce.2022.100052>
- [22] R. Lehnebach *et al.*, Wood density variations of legume trees in French Guiana along the shade tolerance continuum: heartwood effects on radial patterns and gradients, *Forests*, **2019**, *10(2)*, 80, <https://doi.org/10.3390/f10020080>
- [23] J. Bossu, J. Beauchêne, Y. Estevez, C. Duplais, B. Clair, New insights on wood dimensional stability influenced by secondary metabolites: the case of a fast-growing tropical species *Bagassa guianensis* Aubl., *PLoS One*, **2016**, *11*, e0150777, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150777>
- [24] M. Royer *et al.*, Extractives of the tropical wood wallaba (*Eperua falcata* Aubl.) as natural anti-swelling agents, *Holzforchung*, **2010**, *64*, p. 211-5, <https://doi.org/10.1515/hf.2010.034>
- [25] S. Spina *et al.*, Phenolic resin adhesives based on chestnut (*Castanea sativa*) hydrolysable tannins, *J. Adhes. Sci. Technol.*, **2013**, *27*, p. 2103-11, <https://doi.org/10.1080/01694243.2012.697673>
- [26] C. Antwi-Boasiako, S. Animapau, Tannin extraction from the barks of three tropical hardwoods for the production of adhesives, *J. Appl. Sci. Res.*, **2012**, *8*, p. 2959-65.
- [27] Y. Du, G. Habert, C. Brumaud, Design of tannin-based poured earth material via deflocculation-coagulation control: additive selection and tannin variation, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2022**, *10*, p. 14495-502, <https://doi.org/10.1021/acsschemeng.2c04078>
- [28] L. Walter *et al.*, Influence of eco-friendly dispersants on the properties of a lateritic soil-based mortar, *Constr. Build. Mater.*, **2024**, *411*, 134307, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134307>
- [29] L. Walter *et al.*, Sustainable poured earth construction using tropical soil and local wood residue extracts, *Second RILEM international conference on earthen construction*, **2024**, p. 142-51, https://doi.org/10.1007/978-3-031-62690-6_15
- [30] M.C. Figueroa-Espinoza, A. Zafimahova, P.G.M. Alvarado, E. Dubreucq, C. Poncet-Légrand, Grape seed and apple tannins: emulsifying and antioxidant properties, *Food Chem.*, **2015**, *178*, p. 38-44, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.056>

Julie BOSSU^{*1}, chercheuse au CNRS, **Emma KIENY**^{2,3,4}, doctorante, **Jérémie DAMAY**^{2,3,4}, chercheur, **Yannick ESTEVEZ**¹, ingénieur de recherche, **Daniela FLOREZ**², chercheuse, **Lily WALTER**⁵, docteure, **Marie-France THÉVENON**^{3,4}, chercheuse, **Romain LEHNEBACH**², chercheur, et **Kevin CANDELIER**^{3,4}, chercheur.

¹CNRS, UMR Écologie de Forêts de Guyane (EcoFoG), AgroParisTech, CIRAD, INRAE, Univ. Antilles, Univ. Guyane, Kourou, Guyane Française, France.

²CIRAD, UMR Écologie de Forêts de Guyane (EcoFoG), AgroParisTech, CNRS, INRAE, Univ. Antilles, Univ. Guyane, Kourou, Guyane Française, France.

³CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France.

⁴BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, F-34398, France.

⁵UMR Écologie de Forêts de Guyane (EcoFoG), Univ. Guyane, AgroParisTech, CIRAD, INRAE, Univ. Antilles, Kourou, Guyane Française, France.

*julie.bossu@cnrs.fr