



HAL
open science

Étude et développement de nouveaux matériaux à partir de déchets industriels upcyclés : à la croisée des approches en physico-chimie, ingénierie, design couleur et sensoriel.

Léa Diaz

► To cite this version:

Léa Diaz. Étude et développement de nouveaux matériaux à partir de déchets industriels upcyclés : à la croisée des approches en physico-chimie, ingénierie, design couleur et sensoriel.. Génie des procédés. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2025. Français. <NNT : 2025PAUU0008>. <tel-05612965>

HAL Id: tel-05612965

<https://theses.hal.science/tel-05612965v1>

Submitted on 5 May 2026

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

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



HAL Authorization

THÈSE DE L'UNIVERSITÉ DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR

SPÉCIALITÉ : GÉNIE DES PROCÉDÉS

**ÉTUDE ET DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX MATÉRIAUX
À PARTIR DE DÉCHETS INDUSTRIELS UP-CYCLÉS**

À la croisée des domaines en physico-chimie, ingénierie, design-couleur et sensoriel

Pour obtenir le grade de Docteur

De l'Université de Pau et des Pays de l'Adour

École doctorale des Sciences Exactes et leurs applications

LÉA DIAZ

Soutenue le 18 Février 2025

DIRECTEURS DE THÈSE :

- Bertrand CHARRIER, Professeur des Universités, IUT des Pays de l'Adour, Xylomat IPREM UMR CNRS 5254, Mont de Marsan
- Céline CAUMON, Professeure des Universités, Laboratoire de Recherche en Audiovisuel – Savoirs, Praxis et Poïétiques en Art, PI-CDM, Université de Toulouse-Jean Jaurès

RAPPORTEURS :

- Iris BREMAUD, Chargée de recherches HDR, laboratoire LMGC, CNRS UMR5508, équipe bois, Montpellier (Présidente du jury)
- Kévin CANDELIER, Chercheur HDR, CIRAD Montpellier

EXAMINATEURS :

- Hélène GARAY, Enseignante chercheuse, IMT Mines Alès, Pau
- Noël RICHARD, Maître de conférences, Laboratoire XLIM UMR CNRS 7252, équipe images couleur mouvement relief et surface, Poitiers

INVITÉ : Léo Leroyer, Ingénieur recherche et développement, BIOLANDES



RESEARCH AND DEVELOPMENT OF NEW MATERIALS FROM UPCYCLED INDUSTRIAL WASTE

Physicochemical, engineering, color design and sensory

« La couleur est par excellence la partie de l'art qui détient le don magique. Alors que le sujet, la forme, la ligne s'adressent d'abord à la pensée, la couleur n'a aucun sens pour l'intelligence, mais elle a tous les pouvoirs sur la sensibilité ».

Eugène Delacroix

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	7
Introduction	1
Qu'est-ce que l'upcycling ?	1
Enjeux et problématiques de matériaux privilégiés	4
Théories de la couleur	6
Les systèmes de représentation	12
La mesure de couleur	15
La dénomination des couleurs	22
Contexte et objectifs de la thèse	29
Chapitre 1 : Développement d'un nouveau matériau À partir de déchets de cuir	35
1.1 Étude Bibliographique	35
1.1.1 Le matériau cuir	35
1.1.2 La composition chimique du cuir	40
1.1.3 La valorisation des déchets cuirs	43
1.1.5 Cahier des charges de la valorisation des déchets de cuir	45
1.2 Dispositif expérimental	46
1.2.1 Matières premières	46
1.2.2 Tri couleur des cuirs	47
1.2.3 Broyage des cuirs	48
1.2.4 Préparation et mélange du cuir broyé	49
1.2.5 Pressage des panneaux cuir	51
1.2.6 Séchage des panneaux de cuir	54
1.2.7 Recyclabilité des panneaux de cuir	55
1.3 Caractérisation des panneaux de cuir « acoustiques »	55
1.3.1 Mesures physiques des fibres de cuir	55
1.3.2 Essais mécaniques des panneaux de cuir	56
1.3.3 Essais acoustiques	58
1.3.4 Analyses visuelle des panneaux de cuir	59
1.4 Résultats et discussion sur les panneaux de cuir « acoustiques »	61
1.4.1 Tri couleur et Nuanciers cuir	61
1.4.2 Développement des panneaux de cuir « Granispher »	65
1.4.3 Influence des caractéristiques physico-mécaniques	68
1.4.4 Recherches et optimisation des mélanges de couleurs	71
1.4.5 Mesures de couleur	75
1.4.6 Mesures de brillance	77
1.4.7 Influence du recyclage	79
1.5 Dispositif expérimental des panneaux cuir « rigides »	81
1.5.1 Conditions expérimentales des essais de « liège de cuir »	81
1.5.2 Conditions expérimentales d'ajout de fibres longues	81
1.6 Résultats et discussion sur les panneaux cuir « rigides »	83
1.6.1 Caractéristiques physico-mécaniques des panneaux cuir rigide	83
1.6.2 Influence de la granulométrie	89
1.6.4 Influence de la température	90
1.6.5 Influence du taux de colle	91
1.6.6 Influence des fibres	91

1.6.7 Influence de l'aspect esthétique	94
1.7 Conclusion sur l'étude et le développement de panneaux de cuir	95
1.7.1 Conclusion sur les panneaux de cuir « acoustiques »	95
1.7.2 Conclusion sur les panneaux de cuir « rigides »	96
Chapitre 2 : Développement d'un nouveau matériau À partir de déchets textiles	100
2.1 Étude Bibliographique	100
2.1.1 Les différentes typologies de textiles utilisés	100
2.1.2 Les types de déchets générés	105
2.1.3 La valorisation des déchets textiles	106
2.1.4 Cahier des charges	107
2.2 Dispositif expérimental	109
2.2.1 Matières premières	109
2.2.2 Tri couleurs des textiles	111
2.2.3 Pressage des panneaux textiles	111
2.2.4 Cardage des fibres	112
2.2.5 Optimisation du procédé	113
2.2.6 Usinage des panneaux textiles	115
2.2.7 Moulage des panneaux textiles	115
2.2.8 Cintrage des panneaux textiles	116
2.3 Caractérisation	117
2.3.1 Mesures physiques des fibres textiles	117
2.3.2 Essais mécaniques des panneaux textiles	117
2.3.4 Analyse visuelles des panneaux textiles	119
2.4 Résultats et discussion sur les panneaux textiles	120
2.4.1 Nuanciers textiles	120
2.4.2 Optimisation des paramètres de fabrication	123
2.4.3 Influence du cardage des fibres	125
2.4.5 Influence des caractéristiques physico-mécaniques	126
2.4.6 Incidence de la répartition de la chaleur lors du pressage	129
2.4.7 Incidence du moulage	130
2.4.8 Incidence du ceintrage	131
2.4.9 Incidence de l'usinage	131
2.4.10 Influence de la température sur la couleur des textiles	132
2.4.11 Mesure de couleur	133
2.4.12 Mesures de brillance	135
2.4.13 Création d'un nouveau mobilier	136
2.5 Conclusion sur l'étude et le développement des panneaux de textile	139
Chapitre 3 : Développement d'une teinture naturelle pour le bois	141
3.1 étude Bibliographique	141
3.1.1 Les plantes tinctoriales	141
3.1.2 Les principales molécules colorantes	143
3.1.3 Méthodes d'extraction	149
3.1.4 Mordants et mordantage	151
3.1.5 Le savoir-faire tinctorial : Teindre comme un artisan-designer	152
3.1.6 La teinture sur bois	153
3.1.6 Le matériau bois	157
3.1.7 Bois et santé	173
3.1.8 Couleur et santé	179
3.2 Dispositif expérimental	184
3.2.1 Matières premières	184
3.2.2 Préparation des solutions	187

3.2.3 Comparaison des procédés d'extraction	188
3.2.4 Application	188
3.2.5 Dosage des phénols	188
3.2.6 Dosage des sucres	189
3.2.7 Nuançage	190
3.2.8 Vie en pot et décantation	191
3.2.9 Mesures de couleur	192
3.2.10 Vieillessement À la lumière	193
3.2.11 Essais sur panneaux de cuir	195
3.3 Résultats et discussion	196
3.3.1 Analyse chromatique du pin maritime	196
3.3.2 Influence du procédé d'extraction	198
3.3.3 Influence des extraits végétaux	199
3.3.4 Influence de l'application	202
3.3.5 Influence de la décantation	202
3.3.6 Influence des sucres	208
3.3.7 Influence des phénols	209
3.3.8 Influence du nuançage	211
3.3.9 Influence du vieillissement lumière	214
3.3.11 Influence du support	218
3.4 Conclusion sur l'étude et le développement d'une teinture végétale	220
Chapitre 4 : Actualisation de la Posture du designer chercheur en R&D	224
4.1 Du design couleur aux sciences de l'ingénieur	224
4.1.1 Portrait général du designer couleur	224
4.1.2 Des qualités visuelles expérimentées	226
4.1.3 Des qualités sensorielles de la couleur-matière	227
4.1.4 Des qualités fonctionnelles, qualités perçues et imaginaires	230
4.2. Du design au laboratoire, de l'atelier à l'entreprise : transfert et complémentarité	232
4.2.1 Les étapes du projet design	232
4.2.2 Modèle de travail de l'ingénieur au designer	234
4.2.3 l'interdisciplinarité comme nouveau modèle	236
4.3 Favoriser une approche esthétique et matériologique	241
4.3.1 Outils du designer chercheur : l'atlas comme modèle général	242
4.3.2 Les outils du designer de terrain : la palette comme territoire	244
4.3.3 Les outils du designer couleur intermédiaire : la cartographie comme partage entre sciences usages	247
4.4 Perceptive d'un designer couleur pour l'upcycling	250
4.4.1 L'anti cliché des couleurs du recyclage	250
4.4.2 Créer avec les couleurs du recyclage	255
4.4.3 Valoriser la posture de designer couleur dans le domaine de l'upcycling	258
4.5 Conclusion sur la posture du designer chercheur	264
Conclusion générale	267
Valorisation des travaux	273
Articles	273
Posters et conférences	273
Formations	274
Enseignements et encadrement	274
Références bibliographiques	275

<i>Table des figures</i>	285
<i>Table des tableaux</i>	288
<i>Table des Annexes</i>	290
Annexe n°1 : Brevet déposé par Api'up	291
Annexe n° 2: Exposition galerie via, Paris	293
Annexe n° 3 : Évolution du Nuancier Sokoa	294
Annexe n° 4 : Fiches techniques des extraits végétaux	296
Annexe n° 5 : Articles publiés	299
Annexe n° 6 : Posters présentés lors des GDR	320
<i>Résumé</i>	323
<i>Abstract</i>	325

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de thèse, ces années de recherche ont été jalonnées de réflexions, d'échanges, de remises en question, de doutes mais aussi de soutiens précieux, d'encouragements et de rencontres marquantes. Il est essentiel pour moi de remercier celles et ceux qui ont accompagné ce parcours, tant sur le plan scientifique que personnel.

Dans un premier lieu je tiens à remercier **Valérie Affner**, directrice d'Api'Up, pour m'avoir accueilli au sein de sa structure lors d'un stage en novembre 2018, au cours duquel ont eu lieu les balbutiements de ce projet de thèse. Merci à elle pour sa disponibilité et sa réactivité lors de nos échanges, ainsi que pour sa bienveillance et son expertise professionnelle. Un très grand merci également à l'ensemble de l'équipe d'Api'Up pour leur accueil toujours souriant et nos échanges enrichissants tout au long du projet.

Je tiens particulièrement à remercier mes co-directeurs de thèse pour m'avoir accordé toute leur confiance en me proposant ce travail de recherche. **Bertrand Charrier** pour sa confiance, son expertise et pour m'avoir laissé l'opportunité de réaliser un travail inter- et transdisciplinaire. Ainsi que **Céline Caumon** de m'avoir encouragée tout au long de ce parcours depuis le Master, en ayant joué un rôle fondamental dans cette initiative à réaliser un doctorat et d'avoir toujours cru en moi. Je la remercie pour sa capacité d'écoute et ses précieux conseils.

Mes profonds remerciements à l'ensemble des membres du jury : au Professeur **Iris Bremaud** et au Docteur **Kevin Candelier**, mes rapporteurs, ainsi qu'à **Hélène Garay** et **Noël Richard** mes examinateurs, pour avoir accepté de juger ce travail et pour leurs échanges très constructifs et bienveillants.

Merci à toute l'équipe du laboratoire Xylomat, dont **Léo Leroyer** pour la collaboration sur ce projet durant les premières années et tous nos échanges instructifs. Et un immense merci plus particulièrement à **Jérémy, Hugues, Quentin, Loïc, Youness, Wadah, Alexandre, Bastien, Eduardo, Nidal, Luanna, Alix, Elsa**, et **Sandra** pour votre gentillesse, votre proximité et l'ambiance chaleureuse du laboratoire. Les moments de convivialité partagés, au travail, autour d'un jeu de société ou d'un verre. Merci pour vos encouragements dans les moments difficiles, pour votre soutien, vos conseils et avis qui m'ont permis d'avancer tout au long de cette thèse.

Une pensée également aux différents stagiaires avec qui j'ai pu collaborer : **Antoine** Dameron étudiant en DSAA design éco-responsable à La Souterraine, **Clémence** Soulat, **Léo** Sans et **Hugo** Fournet étudiants en Licence Professionnelle métiers du bois à l'IUT des Pays de l'Adour, **Gabrielle** Desmis étudiante en Licence Professionnelle métiers du design à l'IUT des Pays de l'Adour en alternance avec l'entreprise Api'Up, **Corentin** Humez et **Baptiste** Merleau étudiants en Licence Professionnelle Métiers du Bois à l'IUT des Pays de l'Adour, **Adelle** Sarradin et **Julie** Boyer étudiantes à Polytech Lille, **Chloé** Popovic étudiante en Master Design à l'École des mines de Nancy et **Bastien** Ferrier étudiant à Polytech Montpellier, **Claire** Catheloux étudiante en Master du bois à Montpellier et **Quentin** Marinier étudiant en Licence Professionnelle métiers du design à l'IUT des Pays de l'Adour en alternance avec l'entreprise Api'Up. Merci à eux pour leur investissement à différentes étapes de ce projet et pour leur sympathie et leur dynamisme.

Merci aux confrères du **bureau des doctorants** en biologie et réseaux télécom de l'IUT de Mont de Marsan pour les discussions, le soutien entre doctorants et les moments partagés avec une mention particulière pour **Charlotte** et **Timothée** pour leur soutien qui a été si précieux.

Merci à l'ensemble du **personnel de l'IUT** de Mont de Marsan pour leur sympathie et leur professionnalisme. Notamment **Jean Luc Douziech**, ancien professeur devenu collègue, pour son soutien et pour m'avoir donné l'opportunité d'enseigner et d'encadrer des projets.

Un grand merci à **Elodie Becheras** et **les doctorantes de l'équipe SEPPIA** du laboratoire de Toulouse pour avoir suivi mes travaux et pour le partage de leur passion du travail de la couleur.

Un immense merci à **mes proches**, **mes amis** et tout particulièrement à **mes parents** bien sûr, pour leur soutien infaillible durant toutes ces longues années d'études et cette aventure qu'est le doctorat.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation et l'aboutissement de ce travail, aussi bien sur le plan professionnel que personnel.

Merci

INTRODUCTION

QU'EST-CE QUE L'UPCYCLING ?

Aujourd'hui, notre société française produit environ 10 tonnes de plastiques par seconde dont seulement 20% sont recyclées d'après les chiffres de l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Cette production et cette utilisation massive du plastique à grande échelle datent des années 1950. Grâce à leurs multiples usages, ces matériaux sont devenus incontournables. Au niveau mondial, leur production est passée de 1,5 million de tonnes en 1950 à presque 370 millions de tonnes en 2019 comme le montre la figure 1. [1]

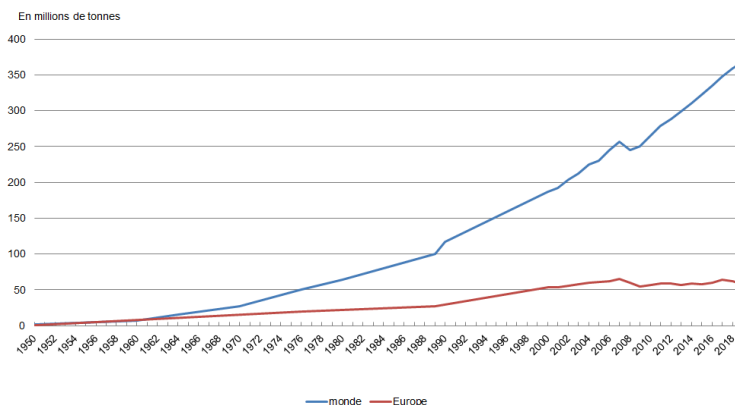


Figure 1 : Évolution mondiale de la production de déchets plastiques en millions de tonnes [1]

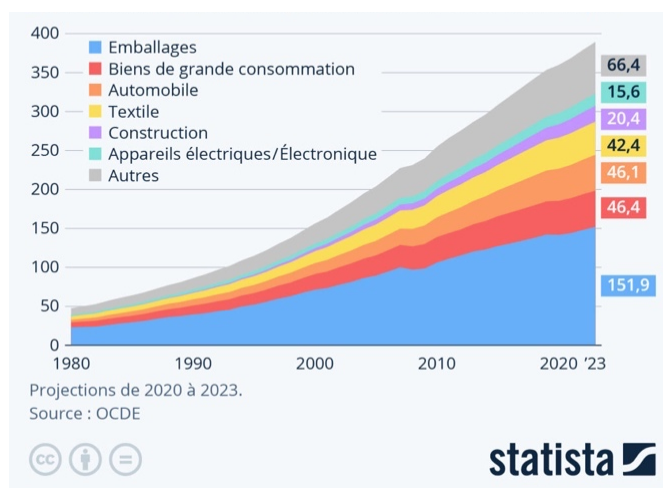


Figure 2 : Production mondiale de déchets plastiques selon le domaine d'utilisation, en millions de tonnes métriques [2]

Ces déchets envahissent et détériorent les écosystèmes et en grande partie nos océans. Ce problème mondial représente un enjeu majeur. La gestion des déchets, et notamment des plastiques doit être mieux maîtrisée afin de limiter la dégradation de notre environnement. Il est également essentiel de développer un travail pédagogique afin de responsabiliser chacun en faisant évoluer les manières de penser et sensibiliser les nouvelles générations. Les déchets sont aujourd'hui une ressource abondante et souvent « gratuite » qui peut être transformée en étant la source d'un nouveau cycle de production, soit dans une fabrication en petites séries, soit en pièces uniques. La production en série peut également être rendue possible par une démarche de standardisation afin d'homogénéiser la matière première ainsi récupérée. Il existe différentes catégories de déchets comme les déchets ménagers, les déchets agricoles ou les déchets industriels. La plupart sont réutilisables. Certains de ces déchets ont même l'avantage d'être esthétiques « il faut donc juste en faire quelque chose d'encore plus beau en leur donnant une deuxième vie plus belle que la précédente ». [3]

L'upcycling est un anglicisme du verbe « to upcycle » signifiant réutiliser. En français il pourrait être traduit par « sur-cyclage » c'est à dire le recyclage par le haut. Ce processus qui consiste à transformer un déchet matériel ou un produit, en apparence inutile, auquel on donne une valeur ajoutée en l'utilisant pour créer une nouvelle matière, un nouvel objet. Lorsque l'on « upcycle », c'est-à-dire qu'on réutilise une matière première, la première étape consiste à accepter l'idée de s'approprier la matière pour lui donner une nouvelle vie parfois très éloignée de sa fonction première. L'enjeu est en effet de transformer et d'ennoblir la matière récupérée pour en faire un produit avec une valeur ajoutée, de qualité et/ou d'utilité supérieure. La valeur ajoutée signifie une augmentation de la valeur pécuniaire et esthétique tout en modifiant l'utilité finale du produit ou de la matière. A l'inverse, le recyclage vise à obtenir du neuf avec du vieux mais à qualité égale, en conservant la même utilité de la matière, la même fonction d'origine du produit. Il existe une troisième catégorie appelée le réemploi. Ce procédé rejoint les pratiques du « *do it yourself* ». Il repose sur un travail de collecte, d'artisanat et d'assemblage de pièces pour réemployer la matière sans la modifier et donner lieu à un nouvel objet en conservant ou non sa fonction d'origine. L'upcycling fait écho au « processus inverse », c'est-à-dire que la matière nous dicte le processus de fabrication, c'est notre nouveau point de départ. La couleur occupe alors une place importante dans ce procédé de « sur-cyclage » car certains matériaux auront déjà subi des colorations, certains seront bruts et d'autres seront abîmés ou usés par le temps. Il est primordial de mettre en valeur cette nouvelle matière première, le but n'étant pas de la camoufler.[3]

Mais l'upcycling est victime de préjugés, notamment sur l'aspect esthétique ou le confort du produit final. Beaucoup pensent qu'il s'agit de « bricolage » en référence au « *Do It Yourself* » (DIY)

qui signifie “ faire soi-même ”. Il est vrai que le « déchet » est aujourd’hui un objet de mode dans la mesure où de nombreux médias prônent l’écologie et l’économie de ressources. Néanmoins, la pratique professionnelle de la filière n’est pas comparable à une pratique individuelle faite à domicile. Le DIY a trouvé sa place pour une approche très basique de l’up-cycling transposée dans un processus de réutilisation et non de transformation ou d’ennoblissement. La mode et les tendances s’en sont également emparées, profitant des nouvelles éthiques plus écoresponsables au risque de faire du “ *greenwashing* ”. Les entreprises se tournent de plus en plus vers l’éco-conception et le développement durable afin de modifier leur processus de fabrication, leurs matériaux mais également leur manière de penser. Le “développement durable” est une notion relativement complexe, apparue dans le début des années 90 qui est aujourd’hui complètement vulgarisée auprès du grand public. Le terme “ éco-conception ” est apparu dans les années 2000, formé de la fusion des mots “ écologie ” et “ conception ”, il ajoute une dimension environnementale au référentiel de développement des produits. Un ensemble de normes, de labels, d’outils et de guides ont vu le jour afin de permettre à chaque acteur d’appliquer les principes du développement durable en fonction de son contexte d’action. Le but, est de concevoir des produits plus respectueux de l’environnement.

[4-6]

Depuis toujours l’homme vit dans un décor coloré et s’est construit une culture autour de la couleur avec des significations symboliques. De nos jours, certains symboles historiques perdurent et restent ancrés dans les cultures et les civilisations. Quelles sont les couleurs du recyclage ? Existente-elles réellement ? Il existe de nombreux clichés autour de cet univers chromatique dit « de recyclage » qui subit de nombreuses idées reçues. En effet, penser recyclage, c’est quelque part, pour l’imaginaire collectif, penser déchet. Or les teintes passées, celles usées, abimées, etc. forment le registre de couleurs que l’on pourrait considérer comme des déchets car ayant déjà eu un premier usage. Qu’il s’agisse alors de la tonalité ou de la matière colorante (support de la couleur), cet univers chromatique du recyclage est dévalorisé par le collectif et souvent dénigrés face à la vivacité des couleurs chimiques de première main. Le domaine de l’upcycling et celui du recyclage sont intimement liés, partageant la même problématique en matière de couleurs. Une observation attentive de ces secteurs révèle que les tendances, qu’il s’agisse de couleurs ou de motifs, y sont peu présentes, voire absentes. Quelle que soit la mode du moment, elle se reflète rarement dans les objets recyclés, comme si ces derniers étaient contraints de montrer leur nature recyclée, confinés à une catégorie où dominant des teintes dites "naturelles". Sur le cercle chromatique, les couleurs associées à cette palette se regroupent dans une seule zone, allant du vert au brun en passant par le vert-jaune, avec une prédominance marquée des teintes brunes. Des couleurs dévalorisées et dénigrées malgré elles.

Pourtant, le principe même de l'upcycling est justement d'apporter une valeur ajoutée à cette nouvelle matière première qui a déjà eu un vécu. Ce principe d'ennoblissement et de revalorisation des matériaux est un exercice stimulant pour les concepteurs qui s'interrogent sur les excès de production. Cette orientation de la réinvention de l'objet diffère par les moyens de la mise en œuvre et les discours qui le portent. La citation attribuée à Antoine Lavoisier (inspirée du philosophe grec *Anaxagore*) « *rien ne se crée, rien ne se jette, tout se transforme* » prend tout son sens ici.

ENJEUX ET PROBLÉMATIQUES DE MATÉRIAUX PRIVILÉGIÉS

L'ensemble des procédés de « re-création » matérialisent différentes approches. Fernando et Humberto Campana, les frères designers brésiliens, ont été les pionniers du genre dans les années 1980 en proposant un design basé sur le principe de récupération de déchets ou de chutes industrielles. [7-8] Quelle que soit sa forme, l'exercice contraignant de la réutilisation est toujours abordé comme un défi positif. Mais il est compliqué de ne pas repenser le processus dès le début afin de l'adapter aux matériaux. Il faut changer de manière de penser et recourir au « processus inverse », c'est le matériau qui dicte le procédé. Gaetano Pesce, grand designer italien l'a bien compris et ce depuis les années 70. Il casse les codes en expliquant que « *la matière n'est pas notre esclave mais qu'elle est savante, elle nous aide à nous libérer du conformisme si on sait l'écouter* ». Il faut savoir évoluer avec son temps, la citation « *la forme suit la fonction* » est-elle toujours valable ? Il faut laisser la matière nous surprendre... [9]

Les pratiques de « re- » sont des descendantes de l'idée de « ready-made », anglicisme qui peut être traduit par « prêt à l'emploi ». Dans l'upcycling, il est possible de parler de « *ready made color* », c'est-à-dire de couleur importée [10], utilisant ainsi un matériau usagé ayant déjà sa couleur d'origine. Dans cet état d'esprit, il faut tenir compte de cette première existence dans le procédé. Cette base permet en effet au designer, d'avoir une approche matériologique forte à travers le travail de la couleur. En effet, la couleur ne peut être indépendante de son support dans une pratique de l'upcycling. Des entreprises ont donc mis en place une pensée différente de la standardisation (on standardise généralement pour rendre homogène. Or ici, difficile d'homogénéiser à partir de données recyclées hétéroclites). L'upcycling invite donc à requestionner la production en série. En cherchant des processus reproductibles et en s'adressant à un plus large public, l'écoconception, par la transformation de matière, s'avère plus pragmatique dans sa conception. [11] Le designer coloriste a un rôle à jouer afin d'apporter une revalorisation chromatique dans l'upcycling, où l'empreinte visible des origines ajoute un cachet au produit final en racontant une histoire.

Dans ce sens, le rôle du designer est de faire prendre conscience de la valeur de certains déchets ou matières usagées afin de leur donner une seconde vie, ce qui permettrait d'utiliser moins de matière première « neuve » et de redimensionner la notion esthétique. [3] Il est aussi là pour montrer sa pensée agile à concevoir différemment les artefacts.

THÉORIES DE LA COULEUR

La sensation chromatique est un phénomène psychophysique complexe résultant de l'action d'un stimulus extérieur (la lumière) sur le récepteur sensoriel (l'œil). L'œil est une interface vers le traitement cérébral (cortex occipital), siège du traitement élémentaire des images visuelles et siège de la sensation chromatique. Ainsi, la couleur est une sensation, et non pas une matière ou encore une fraction de lumière. [12] Lors de l'expérience du prisme du physicien Isaac Newton en 1666, qui consiste à le faire traverser par un faisceau de lumière blanche, on observe que ce faisceau se transforme en spectre des couleurs de l'arc en ciel allant du violet au rouge en passant par le bleu, le vert, le jaune et l'orange. Ce chiffre arbitraire a pour objet de signifier que la lumière blanche, non seulement le blanc (comme synthèse de toutes les couleurs) mais surtout une richesse de nuances (qui seront par la suite mesurées en longueurs d'ondes) et que le prisme a permis de la décomposer pour pouvoir observer le spectre.

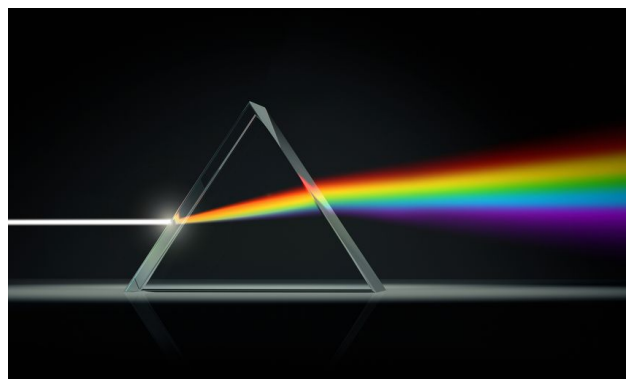


Figure 3 : Expérience du prisme de Newton © Getty - artpartner-images

Cet ensemble de couleurs forme la gamme des radiations auxquelles nos yeux sont sensibles, elles sont classées sur une échelle appelée le spectre visible. Ce qui nous donne finalement une première définition de la lumière. Cette lumière correspond à celle émise par le soleil au zénith qui se situe à environ 6000 Kelvin.

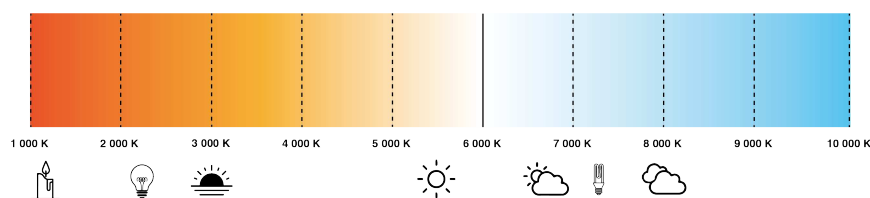


Figure 4 : Échelle de température de la lumière en kelvin

Ce rayonnement décomposé à travers le prisme dans l'expérience de Newton est découpé selon les différentes longueurs d'ondes qui sont désignées par des termes de couleurs conventionnels. [12]

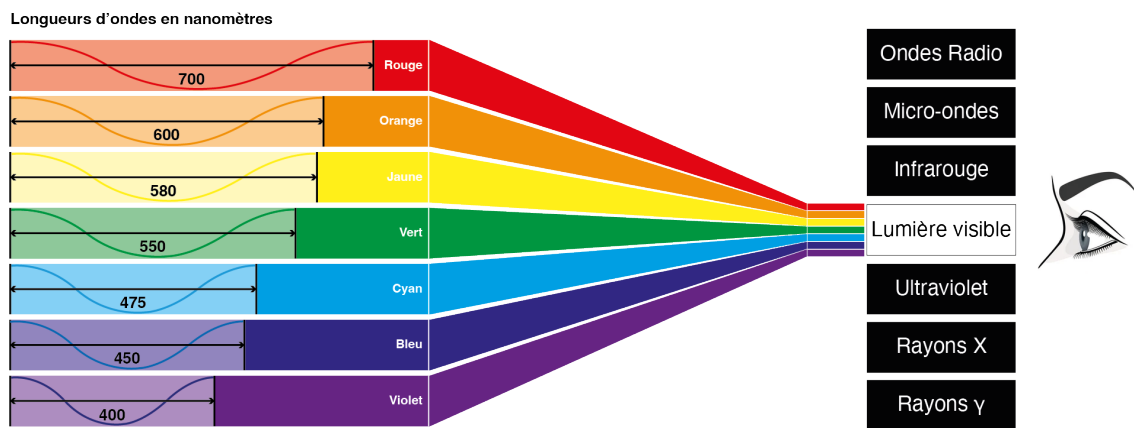


Figure 5 : Schéma du spectre visible (Léa Diaz d'après 123RF)

Les termes colorés désignés correspondent à des lumières colorées. Si l'expérience du prisme est réalisée dans une chambre noire, le spectre ne sera pas visible. En effet pour obtenir la sensation de couleur, il faut recevoir la lumière incidente sur une surface qui renvoie également la lumière et plus précisément toutes les radiations reçues, c'est-à-dire une surface blanche. Cette observation permet de définir la couleur comme sensation reçue, par l'intermédiaire de l'œil.

La vision est un phénomène d'une grande complexité. L'information des sensations que nous recevons arrive au cerveau par l'intermédiaire de la rétine. La vie de l'être humain est guidée par sa vue et sa vision des couleurs. Organe complexe de la vision, l'œil est doté d'une sensibilité visuelle trichromatique, il perçoit toutes les couleurs en ajustant l'intensité des trois sources de lumières colorées superposées (bleu, vert, rouge). Mais malgré sa technicité, l'œil ne sait pas distinguer une couleur pure d'une couleur obtenue par un mélange. Cependant il est capable de différencier de faibles nuances de couleurs. [12-13]

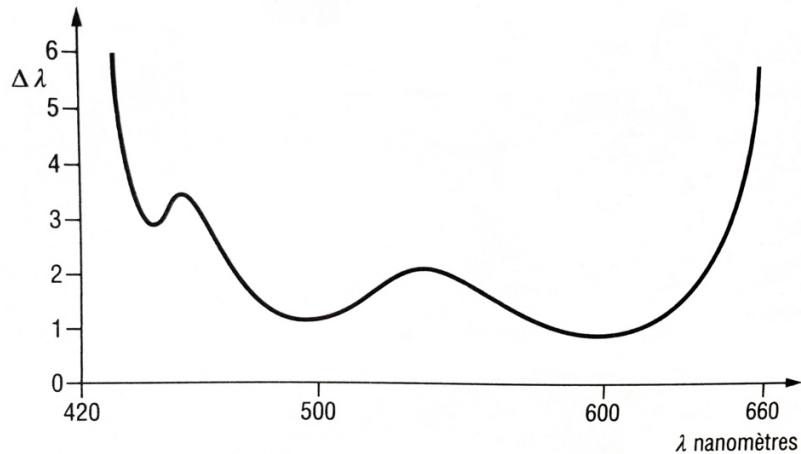


Figure 6 : Différenciation des couleurs selon la longueur d'onde [12]

La courbe de la figure 6 est une moyenne, selon les individus et les conditions d'éclairément elle est susceptible de subir des variations. On observe que l'œil est capable de faire plus de distinctions dans les teintes violettes et rouges mais il fera plus difficilement la différence dans les teintes jaunes. Leur saturation sera plus facile à évaluer ainsi que pour les teintes vertes contrairement aux teintes rouges et violettes. Un très grand nombre de couleurs peut être distingué par notre œil mais il n'existe pas autant de récepteurs dans notre rétine malgré les 800 000 fibres du nerf optique. C'est en se basant sur ce constat que Young formula sa célèbre théorie trichromatique en 1801. [14]

Cette loi reste aujourd'hui la base des théories les plus modernes. Selon la théorie de Young, la rétine doit posséder des éléments de trois types différents, sensibles au bleu, au vert-jaune et au rouge afin de pouvoir faire la synthèse de la vision totale des couleurs. Les cellules visuelles sont constituées par les cônes et les bâtonnets qui ont des rôles différents. Situés en périphérie, les bâtonnets fonctionnent surtout lorsque la lumière est faible pour assurer la vision nocturne dite « vision scotopique », pratiquement dénuée de la perception des couleurs. Ce qui explique l'expression « la nuit, tous les chats sont gris ». Les cônes, quant à eux, sont situés dans une cavité appelée fovea, avec un angle d'ouverture de 2° . Ils assurent la vision dite normale et sont à l'origine de la vision des couleurs. Les meilleures images se trouvant sur la partie centrale de la rétine. Une bonne acuité est croissante avec l'éclairément, ce qui permet une bonne perception des couleurs pour un œil normal.

La complexité du processus exact de la vision des couleurs n'est pas encore entièrement expliqué. [12]

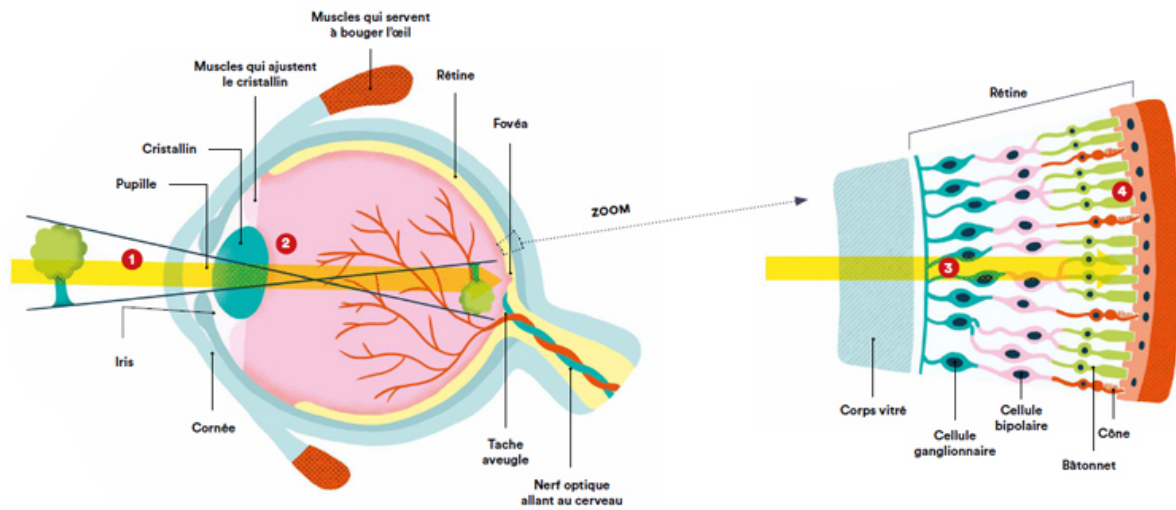


Figure 7 : Schéma de l'œil et de la vision humaine [13]

La figure ci-dessus décrit les 5 étapes de fonctionnement de l'œil humain :

- 1- La lumière entre dans l'œil par la pupille en passant à travers la cornée puis l'iris après avoir rebondi sur l'objet. Elle passe à travers la cornée, qui la dirige vers la pupille et l'iris.
- 2- La lumière passe dans le cristallin en se renversant et va transmettre à la rétine une image inversée mais qui sera corrigée pour être perçue « à l'endroit » par le cerveau.
- 3- L'image vient se projeter sur la rétine et la lumière la traverse jusqu'aux cônes et bâtonnets qui sont les photorécepteurs.
- 4- A partir de la lumière reçue, les cônes et les bâtonnets permettent de générer un signal. Les bâtonnets permettent la vision scotopique (luminosité faible), les cônes agissent dans l'acuité visuelle et la distinction des couleurs.
- 5- Le flux électro-magnétique de la lumière est ainsi transformé par les cônes et les bâtonnets en un influx nerveux, transmis aux cellules ganglionnaires, puis via le nerf optique, envoyé au cortex visuel, à l'arrière du cerveau pour décoder et interpréter les signaux. [13]

En 1885, Maxwell confirme la théorie de Young par ses études expérimentales sur la perception des couleurs en utilisant des disques colorés rotatifs de façon à pouvoir associer les impressions visuelles entre elles. Il observa qu'en faisant varier la surface réglable des disques exposés, rouge, jaune, vert, bleu, noir et blanc, il était possible d'obtenir n'importe quelle couleur.

C'est donc sur ces bases que sont apparues les trois couleurs primaires des imprimeurs. Cette notion des couleurs primaires est basée sur le fait que le mélange de ces trois couleurs permet d'obtenir pratiquement toutes les autres couleurs, mais cela reste arbitraire et subjectif.

Ainsi, du côté de la lumière, si trois cercles de lumière rouge, vert et bleu sont projetés sur une surface blanche, la superposition des trois donne du blanc qui est le résultat de la synthèse additive. A l'inverse, on obtient du noir en résultat de la synthèse soustractive lorsque l'on superpose trois filtres colorés magenta, cyan et jaune car chacun des filtres absorbent leur part de rayons colorés provenant de la lumière blanche. La synthèse additive est celle utilisée par les écrans par exemple, tandis que les peintres et les imprimeurs eux utilisent la synthèse soustractive. [12]

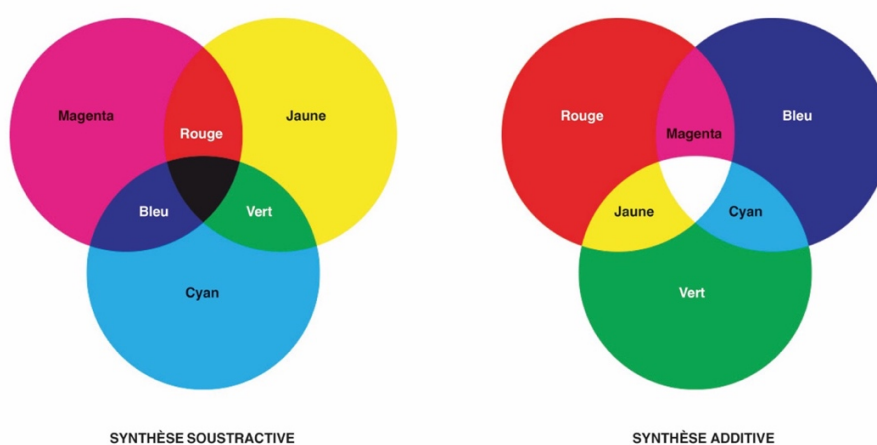


Figure 8 : Principes des mélanges additifs et soustractifs

Une couleur est définie par trois facteurs : la teinte, la clarté et la saturation. La teinte correspond à la catégorisation chromatique d'un stimulus (violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge etc..). La clarté est le niveau de luminosité allant du clair, moyen au foncé (échelle des gris). La saturation correspond au degré de pureté chromatique d'une couleur. Le travail du designer ou du coloriste se fonde souvent sur ces trois paramètres. En effet, en jouant avec la teinte ou tonalité, la clarté ou luminosité et la saturation, les concepteurs inventent des artefacts, des gammes (de couleurs et de produits), des collections en recherchant l'idée d'harmonie et en considérant le contexte socioéconomique et la question de l'usage. Leur approche diffère de celle du physicien qui s'intéressera à la qualité des illuminants (RVB) ou du peintre (CMJN) qui travaillera les mélanges pigmentaires.

Finalement, on peut dire que la couleur n'existe pas sans la lumière et que cette dernière peut, outre par la mesure ou l'esthétique visuelle, être aussi pensée comme temporalité (couleur

météorologique, couleur mouvante). Prenons l'exemple de la nature où les paysages changent de nuances au cours de la journée, en fonction de l'éclairement du soleil et autres phénomènes de diffraction ou de diffusion. Selon la nature de la source d'éclairage, l'aspect d'un objet coloré peut paraître très différent. Et inversement, deux objets colorés distincts peuvent paraître identiques sous une même lumière. Ce phénomène s'appelle le métamérisme.

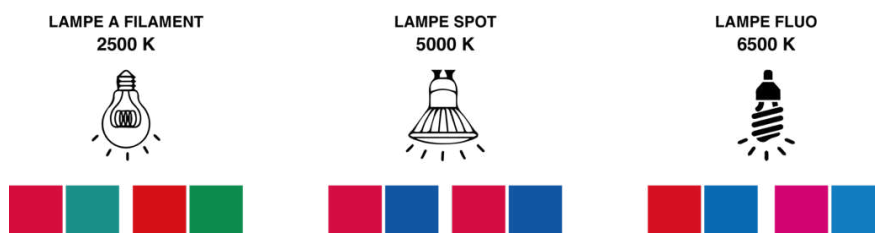


Figure 9 : Exemple du phénomène de métamérisme

Une autre expérience permet de préciser la perception colorée en plaçant un objet coloré sous différentes lumières. Si par exemple un citron jaune est placé sous une lumière blanche il apparaîtra jaune alors que sous une lumière rouge il paraîtra rouge, une lumière verte va lui donner un aspect vert et sous une lumière bleue il sera perçu noir. Le citron est donc jaune lorsqu'il est exposé sous une lumière blanche pour un œil humain dit « normal ».[12]

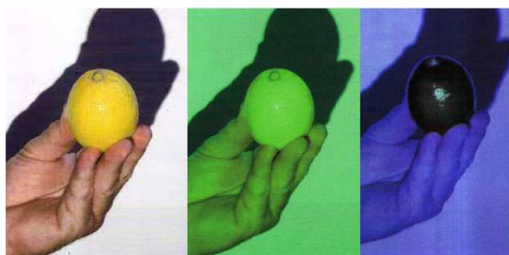


Figure 10 : Expérience du citron sous différents éclairages colorés

Deux couleurs identiques peuvent paraître différentes en fonction des couleurs qui les entourent. C'est le phénomène du contraste simultané, qui modifie l'apparence d'une couleur de surface lorsqu'elle est juxtaposée à une autre couleur, ce qui rend leurs différences plus sensibles. Une même couleur est perçue différemment par notre œil en fonction de la lumière et du contexte coloré dans lequel elle se trouve. Ce phénomène optique modifie les différences de clarté et de tonalité entre les éléments. Par exemple si deux couleurs complémentaires sont juxtaposées, leur saturation sera accentuée. [15-16]



Figure 11 : Exemple de contraste simultané [16]

Ces observations permettent de dire que la couleur, sensation physiologique, est impérativement liée aux trois dimensions suivantes : la nature de l'objet, la lumière qui l'éclaire et l'œil qui la perçoit. Le lien entre ces 3 facteurs est primordial lorsqu'un problème de couleur est à examiner.

LES SYSTÈMES DE REPRÉSENTATION

Du point de vue du designer coloriste, les systèmes de représentations permettent une meilleure visualisation des différents espaces chromatiques basés sur notre perception des sensations colorés. Une des représentations graphiques les plus connu est le cercle chromatique du chimiste Michel Eugène Chevreul en 1839. Il a apporté une solution simple à la problématique des mélanges de couleur en transposant sur un cercle les couleurs du spectre avec des graduations à intervalles réguliers représentant les longueurs d'ondes visibles. Mais cette représentation reste empirique car un système à trois coordonnées ne peut être véritablement représenté que dans un espace tridimensionnel. [12-17]

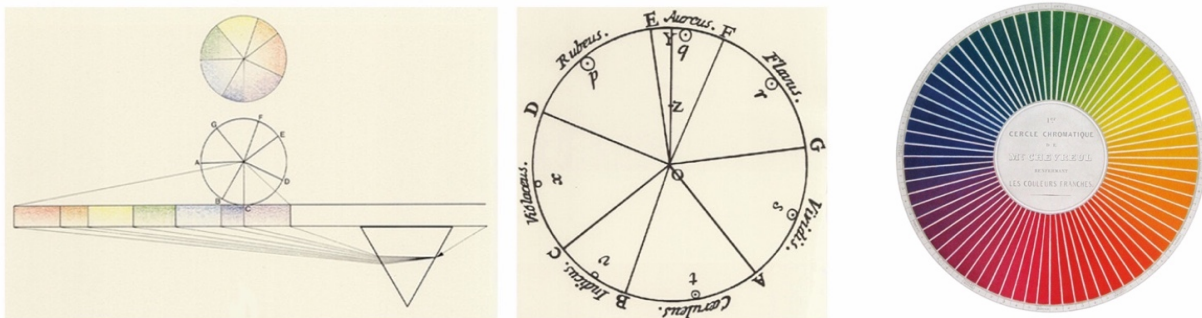


Figure 12 : Travaux de Michel Eugène Chevreul, 1839 [17-18]

Le système chromatique créé par Albert Henry Munsell en 1905 est l'une des représentations des couleurs les plus abouties. Il se base sur trois variables : teinte (Hue), clarté (Value) et saturation (Chroma), organisées selon « l'égalité de distanciation correspondant à la sensation ». Munsell a initialement conçu un cercle de 10 parties égales avec des couleurs fondamentales (rouge, jaune, vert, bleu, pourpre) et des mélanges intermédiaires. Après avoir

abandonné une première version sphérique, il a présenté en 1915 une version améliorée appelée « Color Atlas », avec un axe de gris central, utilisé notamment en géologie et en archéologie. [17-19]

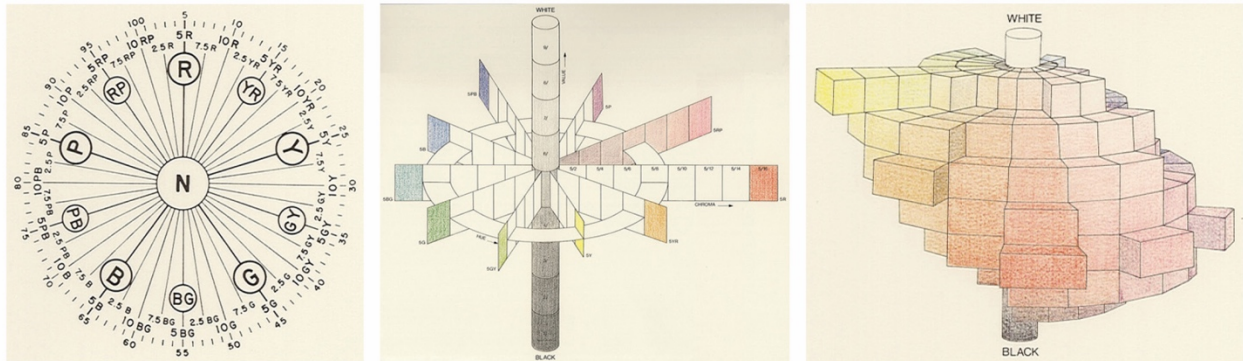


Figure 13 : Travaux d'Albert Henry Munsell en 1915 [17]

Le besoin d'objectivité dans la détermination des couleurs, sans dépendre d'étalons chromatiques de référence, a conduit à la création du « Diagramme chromatique de la C.I.E. » par la Commission Internationale d'Éclairage (C.I.E) en 1931. Ce diagramme a été conçu pour répondre aux besoins des spécialistes de la colorimétrie en offrant plus de précision et d'objectivité que les systèmes précédents. Avant cela, des étalons chromatiques étaient utilisés pour comparer les couleurs, mais le processus de comparaison restait subjectif et sujet à l'aléatoire, d'autant plus avec un risque de dégradation dans le temps. La C.I.E a défini des conditions d'éclairage spécifiques pour un examen des échantillons plus fiable, notamment l'éclairage de référence d'un jour moyen (c), une source lumineuse artificielle (a) à 2854 Kelvin, et la lumière du soleil à midi (b) à 4870 Kelvin. Ces lettres sont présentes dans le diagramme de la figure 14.

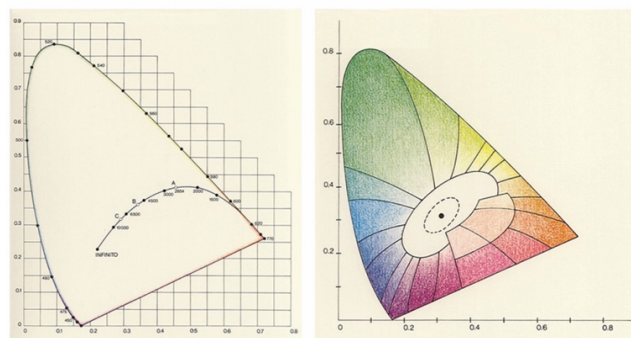


Figure 14 : Travaux de la C.I.E [17]

Le diagramme de la C.I.E. repose sur la variation des températures de couleur des trois sources lumineuses (a, b, c), basées sur la variation de la couleur en fonction de la température. La

C.I.E a ajusté les « colour matching functions » pour ne montrer que des valeurs spectrales positives, simplifiant les calculs mais rendant les résultats difficiles à comprendre. Pour représenter les couleurs de manière pratique, la C.I.E. a introduit trois nouvelles variables, x, y et z, de sorte que la somme de ces variables soit toujours égale à 1. Cela permet de représenter les couleurs dans un tableau à deux dimensions, similaire à une carte géographique, avec les valeurs x en abscisse et les valeurs y en ordonnée. Le diagramme standard est obtenu en reliant les points représentant les « tristimulus values » pour différentes longueurs d'ondes allant de 700 nm à 400 nm, formant ainsi une ligne spectrale. Cette représentation, basée sur la perception humaine des couleurs, est obtenue mathématiquement et permet de déterminer la position de chaque couleur par rapport aux couleurs primaires, indépendamment de l'éclairage spécifique. Il peut servir à la nomenclature des couleurs, mais sa représentation inhabituelle est critiquée pour son manque de correspondance avec les noms de couleurs traditionnelles. Il permet de déterminer des couleurs complémentaires pour le mélange additif du blanc ou du gris, ainsi que de prédire les couleurs résultant du mélange de lumières. Depuis sa création en 1931, les colorimétriciens continuent de l'utiliser. [17]

SYSTEME L*A*B*

Les applications industrielles ont besoin de pouvoir déterminer avec précision les différences entre les couleurs, notamment pour le contrôle qualité. Mais le diagramme C.I.E ne permet pas aux colorimétriciens de déterminer les différences de perception de faibles écarts. Ce diagramme a toujours été critiqué pour cet inconvénient et le fait que le vert est surreprésenté, alors que les tons rouges, violets et bleus sont regroupés dans les coins.

Depuis les années soixante, des formules avec plus ou moins de succès pour résoudre des problématiques de couleur se multiplient, jusqu'à l'apparition d'un nouveau système en 1976 développé de nouveau par la C.I.E sous le nom de « C.I.E.L.A.B ». Ce nouveau système permet de traiter les couleurs couvrantes, le textile et les objets de plastique et semble répondre aux exigences industrielles. Développer en parallèle, le système « C.I.E.L.U.V » est spécifique pour la photographie et les écrans. [17]

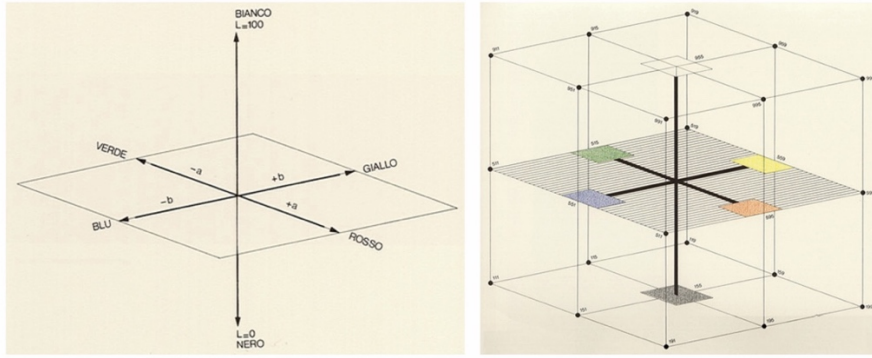


Figure 15 : Travaux du système Lab (1976) [17]

Les trois coordonnées colorimétriques X, Y et Z ont été reprises du tableau des normes C.I.E. et transformées en L, a et b (X et Y deviennent a, Y et Z donnent b et Y est transposé en L). L (lightness) indique une « luminosité psychométrique » définie en fonction d'une ou valeur chromatique choisie de façon à rendre compte d'intervalles égaux entre les couleurs liés à cette luminosité. Les valeurs de L s'échelonnent sur 100 degrés (entre 0 pour le noir et 100 pour le blanc).

Il est souvent nommé « diagramme chromatique psychométrique » car les couleurs sont définies selon deux axes de coordonnées à angle droit. Le plan défini est lui-même perpendiculaire à l'axe achromatique. « L'espace unifié de couleurs » est naturellement construit sur les quatre couleurs psychologiques fondamentales (rouge, vert, bleu et jaune) que le physiologiste autrichien Ewald Hering a décrites comme « primaires » dans sa théorie des complémentaires en 1878 et dont nous savons aujourd'hui qu'elles sont directement transmises au cerveau. [17]

LA MESURE DE COULEUR

La théorie et la technique de la colorimétrie quantitative consistent à transformer les impressions sensorielles colorées en nombres en les mesurant et en les chiffrant. C'est une science physique pure, qui s'appuie sur des lois linéaires et des calculs mathématiques, le tout rapporté à trois grandeurs. Ces chiffres peuvent alors être traités comme des données objectives et des informations concernant les couleurs étudiées. Cette science relativement récente comparée à d'autres, est nommé la colorimétrie. Notre œil, appareil complexe et très sensible, nous permet de voir et de distinguer un grand nombre de teintes et de nuances de couleurs. Mais la colorimétrie permet de chiffrer et de déterminer ces facteurs sans ambiguïté, en s'affranchissant des différents phénomènes de la perception des couleurs. Dans le cas ici présent, la mesure de couleur est un outil au service de l'élaboration de nouveaux matériaux.

Pour comparer l'apparence chromatique d'un champ d'observation visuelle et déterminer son identité, il est nécessaire d'utiliser des appareils appropriés. Les colorimètres sont des appareils qui imitent la perception humaine de la couleur. L'appareil éclaire la surface de l'échantillon, et par réflexion, cette lumière passe à travers trois filtres (rouge, vert, bleu) qui correspondent à la manière dont nous yeux percevons la couleur. Ce sont des instruments destinés à étalonner des écrans d'ordinateur ou mesurer l'intensité de coloration des liquides pour évaluer leur composition chimique. Ils peuvent également être utilisés par les designers en déplacement. Cependant les colorimètres ne prennent pas en compte le phénomène du métamérisme, ils ont donc des capacités limitées et ne se prêtent pas à toutes les applications, notamment à la formulation. [20]

Un spectrophotomètre (colorimètre photoélectrique) permettra de déterminer davantage de caractéristiques colorimétriques, et des couleurs plus sophistiquées de la surface d'un matériau. A la place d'utiliser les trois filtres RVB, ces appareils possèdent généralement 31 filtres pour pouvoir mesurer l'ensemble du spectre des couleurs. La lumière réfléchi par la surface de l'échantillon passe dans tous les filtres afin de déterminer la couleur de l'échantillon.

Il en existe de multiples formes et tailles comme des appareils portables compacts allant jusqu'à des appareils imposants dit de paillasse ou encore des dispositifs en ligne. Contrairement au colorimètre, il détecte le métamérisme en évaluant les couleurs sous différentes sources lumineuses. Ces appareils sont capables de mesurer quasiment n'importe quel matériau, qu'il soit plastique, métallique, papier, textile ou liquide.

Il en existe trois types principaux :

- **Les spectrophotomètres à angle fixe de 0°/45°** : ils dirigent la lumière pour reproduire de manière fidèle la perception de la couleur par l'œil humain et peuvent exclure la brillance. Leur utilisation se fait sur des surfaces lisses ou mates.
- **Les spectrophotomètres à sphère** : leur lumière est diffuse et ils peuvent exclure ou inclure la brillance. Leur utilisation se fait sur des surfaces texturées mais également très brillantes ou miroitantes.
- **Les spectrophotomètres à angles multiples** : ils mesurent l'échantillon sous plusieurs angles comme si on l'inclinait à la lumière. Leur utilisation se fait essentiellement pour des revêtements spéciaux, des matières nacrées comme celles des vernis à ongles ou du domaine automobile.

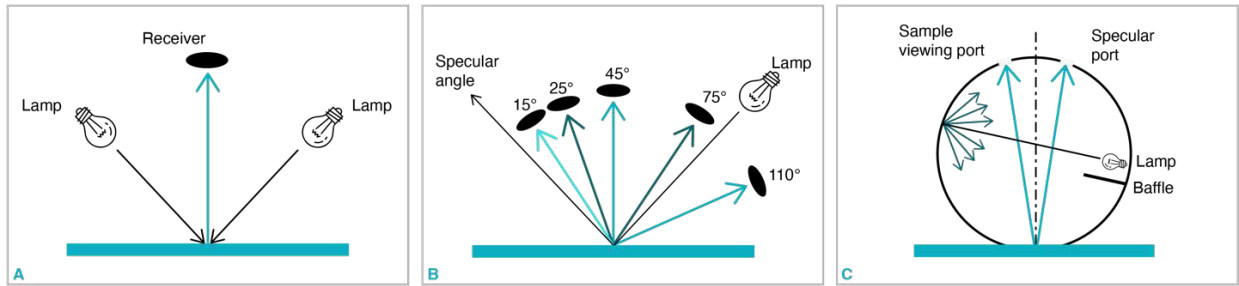


Figure 16 : Schéma des différents fonctionnements des spectrophotomètres à angle fixe (A), à angle variable (B) et à sphère (C) [21]

Les spectrophotomètres sont des appareils de précision réalisant des mesures fiables et répétables quel que soit le lieu ou l'opérateur. Ils offrent un large éventail d'applications, allant de la recherche au développement en passant par la formulation des couleurs et au contrôle qualité. [20] Pour les travaux de cette thèse, c'est un spectrophotomètre à sphère portable de la marque X-Rite Pantone modèle Ci62 avec une ouverture de 8mm qui a été utilisé.



Figure 17 : spectrophotomètre portable X-Rite Pantone Ci62 [22]

LES ILLUMINANTS

Le principal obstacle pour les applications colorimétriques est la variabilité et la complexité des répartitions spectrales de la lumière naturelle. Il est possible de mesurer la surface des matériaux vis-à-vis du rayonnement avec des spectrophotomètres ayant une source lumineuse quelconque et convertir le résultat pour voir ce qui aurait été obtenu avec une autre source lumineuse. Une fois les répartitions spectrales connues, des calculs sont utilisés en les substituant aux répartitions spectrales des sources lumineuses réelles qui représentent des sources lumineuses fictives appelées « illuminants ». Chaque illuminant provient d'une source lumineuse et contient une distribution d'énergie particulière le long du spectre de longueurs d'ondes dans la région visible comprise entre 400 et 700 nm, ainsi qu'une température de couleur exprimée en Kelvin.

L'illuminant est donc le rayonnement lumineux émis par l'appareil de mesure lors d'une évaluation colorimétrique. C'est une répartition spectrale relative qui simule une source lumineuse réelle, artificielle ou naturelle. La CIE a établi un certain nombre d'illuminants normalisés à utiliser en colorimétrie :

- **illuminant A** : il correspond à la lumière diffusée par la lampe à filament de tungstène, qui correspond à une température de 2855 K. La majeure partie de son énergie se situe dans la partie rouge de son spectre, au-dessus de 550 nm, ce qui représente une source à incandescence typique.
- **illuminant C** : Il a un faible niveau d'énergie dans le bleu, il correspond presque à la lumière du jour mais avec une température de 6770 K. De nos jours il est plus rarement utilisé.
- **illuminant D** : la lettre D signifie « day » (jour en français) Il est donc l'illuminant correspondant à la lumière du jour, c'est le plus couramment utilisé. Il existe plusieurs variantes de cet illuminant avec différentes longueurs d'ondes : D_{50} , D_{55} , D_{65} , D_{75}
- **illuminant F** : la lettre F fait référence aux lampes fluos, ce groupe d'illuminants en contient quatre F_2 , F_7 , F_{11} et F_{12} .

Une référence énergétique pour chacun des illuminants est enregistrée à 560 nm afin de comparer leur répartition énergétique. Dans une échelle comparative d'énergie relative, sa valeur à ce point est considérée comme 100 sur la courbe de répartition énergétique. Il est ainsi facile de comparer la distribution d'énergie pour n'importe quel illuminant.

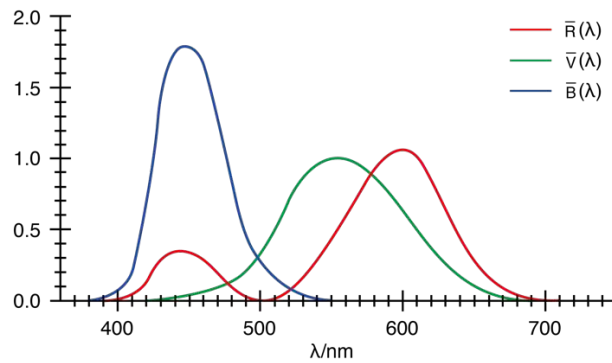


Figure 18 : Courbes de sensibilité des observateurs standards CIE de référence [23]

Les courbes de sensibilité de l'œil humain le long de la longueur d'onde du spectre visible ont été établies pour 2° et 10° . Ces angles correspondent à ceux de la vision sur la fovéa centrale de la rétine avec une expérimentation portant sur trois couleurs primaires de trois sources lumineuses différentes. Pour une détermination précise de la teinte c'est l'angle de 2° qui sera utilisé (angle de teinte sur le cercle chromatique), et pour une détermination quantitative des coordonnées chromatiques il sera préférable d'utiliser l'angle 10° .

Dans le cadre de cette thèse, les résultats présentés ont été mesurés avec l'illuminant D65, qui correspond au rayonnement de la lumière du jour moyenne à une température de 6500 K, et un angle de 2° .

L'utilisation de la colorimétrie objective et quantitative permet de travailler avec les « coordonnées chromatiques numériques » des couleurs pour décrire la couleur de surface des échantillons observés. Les valeurs numériques quantitatives et objectives sont $L^*a^*b^*$ ou $L^*C h$. [23–24]

CALCULS ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Afin d'avoir un résultat plus intuitif et plus proche de notre perception, à partir des données a^* et b^* deux paramètres peuvent être calculés :

- C^* représente la Chromaticité, il correspond à la saturation et exprime donc l'intensité de la couleur.
- h° est l'angle de teinte qui décrit, de façon circulaire, la teinte sur le cercle chromatique et il est exprimé en degrés (0° = magenta, 90° = jaune, 180° = vert et 270° = bleu).

C'est à partir des coordonnées CIE Lab que sont calculées les coordonnées CIE LCh et suivant des formules simples : $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ et $h^\circ = \arctan(b^*/a)$

Les espaces de couleurs sont souvent représentés comme des sphères alors que leur forme est plutôt irrégulière (CIELab, CIELCh). Dans ces espaces, ΔE correspond au calcul de la différence de couleur globale entre deux points mesurés. (Figure 19 gauche)

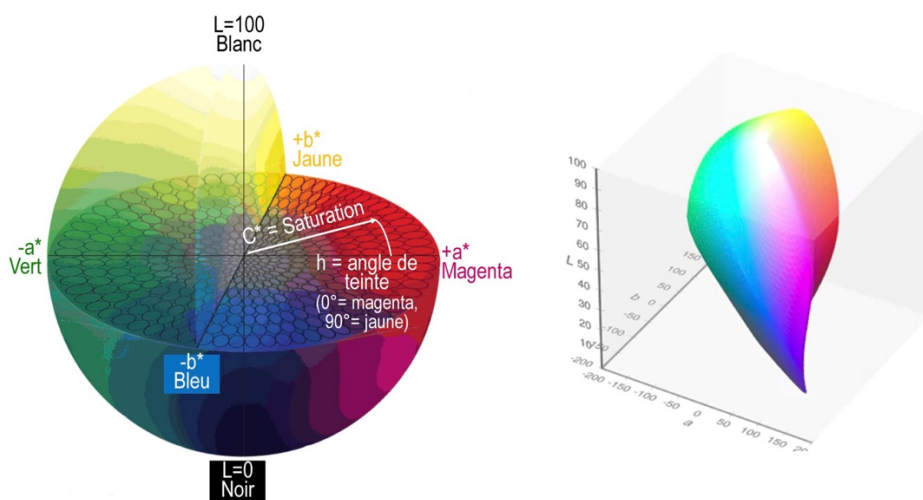


Figure 19 : Espace CIELab © X-Rite Incorporated www.xrite.com (à gauche)
et forme réelle de l'espace des couleurs visibles © Wikimedia Commons (à droite)

ΔE CIE76 est la formule la plus connue et la plus simple, c'est une simple distance géométrique selon les trois axes. Mais suite au développement de l'espace CIELab ce calcul s'est avéré ne pas être assez homogène en termes de perception pour des différences de +/- 1 point qui sont invisibles dans le jaune-vert alors qu'elles sont nettement visibles dans le bleu-violet (Figure 19 droite). [25]

Plus récemment, d'autres formules de différences de couleur ont été développées comme celle du ΔE 2000, elle semble résoudre ce problème d'inhomogénéité. Elles sont calculées par des équations très complexes [26], mais correspondent mieux à la perception, y compris pour le bois [27]. L'objectif est de pouvoir interpréter le résultat, quelle que soit la plage de coloris ou les valeurs de différences de couleurs. [28-29]

Pour évaluer les différences chromatiques, différents calculs sont utilisés en fonction de la caractéristique mise en avant. On retrouve l'utilisation de ces différents Deltas :

DL^* : différence de valeur entre la clarté et l'obscurité (+ = plus clair - = plus foncé)

Da* : différence sur l'axe rouge/vert (+ = plus rouge - = plus vert)

Db* : différence sur l'axe jaune/bleu (+ = plus jaune - = plus bleu)

DC* : différence de chroma (+ = plus clair - = plus terne) $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$

DH* : différence de teinte

DE* : valeur de la différence de couleur totale

Ci-dessous la méthode de calcul du Delta C* et du Delta E* :

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2}$$

On considère que :

- $0 < \Delta E < 1$: est une différence non perceptible, ou un seuil de perception par un observateur expert.
- $1 < \Delta E < 2$: est une différence presque invisible, perceptible seulement par un observateur expert.
- $2 < \Delta E < 4$: est une différence perceptible et visible, même par un observateur inexpérimenté.
- $4 < \Delta E < 5$: est une différence notable, ou limite d'acceptation comme « une même couleur ».
- $\Delta E > 5$: est évaluée comme une autre couleur, les observateurs voient deux couleurs distinctes. [25]

LA DÉNOMINATION DES COULEURS

La désignation des couleurs par des mots est un vaste domaine complexe qui regroupe l'origine, la signification et le symbolisme du vocabulaire. Les aspects liés à une pratique en sciences humaines et littéraires se distinguent des travaux d'une pratique scientifique.

Les couleurs doivent avoir des noms et les dénominations elles-mêmes peuvent établir une sorte de classification. De 1955 à 1976, les Américains K. L. Kelly et Deane B. Judd ont réalisé un travail de division des zones colorées en unités de plus en plus petites afin de gagner en précision de nomination. Les adjectifs : vif (*vivid*), brillant (*brilliant*), puissant (*strong*), profond (*deep*), clair (*light*), foncé (*dark*) et pâle (*pale*) sont les mêmes pour toutes les couleurs. Étonnamment, le «clair» et le «foncé» se trouvent uniquement très proches de l'axe neutre « noir-blanc ». (Figure 20)

Kelly et Judd ont défini les zones de couleur à l'aide des trois paramètres (teinte, luminosité, saturation) établis par Munsell au début du XX^{ème} siècle. En revanche, les noms des couleurs ont été choisis indépendamment du « Code Munsell ». Les qualificatifs descriptifs choisis pour les différents segments montrent la subjectivité des appellations. Par exemple le rouge R4/14 de Munsell est nommé « vif ». La vivacité a souvent été privilégiée face à la profondeur et la puissance des nuances. Les essais de classification des couleurs par nomination doivent être examinés avec précaution dans la mesure où il faut apprécier aussi bien les conditions extérieures de l'observation que l'expérience de l'observateur. Il n'est donc pas surprenant que ce système générique ait été si peu et si mal accepté.

Le lien entre langue et couleur a suscité l'intérêt des colorimétriciens, l'attention des linguistes et autres sémanticiens. L'une de leurs interrogations fondamentales est la suivante : est-ce la pensée qui détermine le langage ou le langage qui détermine la pensée ? Cette question les a préoccupé depuis les années cinquante mais ils s'accordent aujourd'hui pour dire que c'est bien notre perception qui structure le spectre, et non notre langue car la reconnaissance d'une couleur ne dépend pas du fait que nous disposions ou non d'un mot pour la nommer. [17]

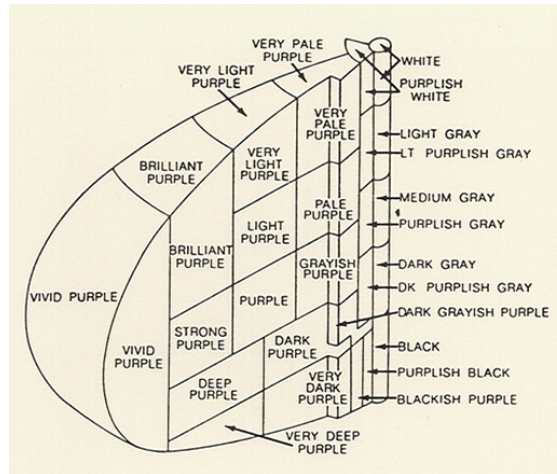


Figure 20 : Travaux de K. L. Kelly et D. B. Judd pour la dénomination des couleurs [17]

Définir ce qu'est une couleur semble un exercice facile du fait que les couleurs sont omniprésentes dans notre quotidien. En réalité il en est autrement car la couleur du physicien n'est pas celle du peintre, la couleur numérique ne correspond pas à celle du biologiste. Une couleur se voit, se touche, et se nomme mais il est également possible de la mesurer via les longueurs d'ondes, de décomposer ses pigments, pour la classer dans un système chromatique ou tout simplement la ressentir. Que ce soit dans la symbolique, l'histoire, la culture, les savoir-faire, les sciences, la zoologie ou l'économie, la couleur a son importance quel que soit le domaine. Une approche pluridisciplinaire permet de définir et de décoder notre relation au monde de la couleur. [30]

La sensation visuelle ne limite pas à elle seule la perception de la couleur qui éveille tous nos sens. Une couleur n'est pas seulement vue, elle est ressentie entièrement et les mots qui la désignent sont des témoignages de sensations particulières, d'une culture ou d'un vécu lié à la société. Passages d'un sens à un autre, des glissements du corps à l'esprit ou de l'esprit au corps, la couleur mouvement ou encore la couleur émotions et plaisir en sont des témoins. C'est d'ailleurs grâce à eux que la communication est possible. [31]

On s'interroge souvent comment nommer les couleurs, comment parler de couleur ou comment rendre une couleur intelligible et familière. Le terme nommer signifie ce qui permet de distinguer quelque chose par voie orale. Il s'agit donc d'une action au cours d'un processus de distinction, de repérage ou de reconnaissance. Les mots, l'action de nommer, est donc indispensable à notre communication, notamment dans le domaine des couleurs où il existe une multitude de coloris d'une même teinte. Par exemple les coloris rouges sont multiples dans notre vie quotidienne : le rouge épais du sang, le rouge sauvage d'une terre d'ocre, le rouge de la rose ou du coquelicot

fraichement éclot, le rouge du coucher de soleil flamboyant. Y a-t-il un rapport du mot à la couleur, et au matériau ? D'un point de vue anthropologique, le recueil et l'analyse de la terminologie des couleurs est extrêmement diversifié. Le sens des mots désignant la couleur peut diverger par rapport à une culture et un contexte particulier. [32]

Un coloriste est attendu sur ses capacités d'observation et cela ne concerne pas seulement le fait de voir et de comprendre ce que l'on voit, mais de faire voir. Lorsque l'on voit, lorsque l'on regarde, et lorsque l'on cherche à montrer aux autres ce que l'on a vu, c'est avec des mots. La perception n'est donc pas dissociable de la nomination. Nommer une couleur est également un moyen de se l'approprier, de traduire une émotion et de formuler une expérience du sensible, d'un ressenti. Cela permet d'exprimer, ou du moins de tenter d'exprimer, l'aspect physique, physiologique et psychologique de la couleur à travers son aspect profondément culturel. Les symboliques dans notre civilisation présentent une spécificité culturelle au niveau des termes de couleur. Pour désigner les différentes couleurs, les noms et adjectifs utilisés sont en relation directe avec les langues et les contextes culturels. Ils sont véhiculés au sein de notre société et peuvent renvoyer soit directement à l'expérience perceptive, soit faire référence à une matière ou un objet qui exhibe ladite couleur. La description chromatique est donc extrêmement riche avec une multitude de possibilités et d'usages divers. [32]

C'est sémiologiquement, sous la forme du verbal que la couleur se manifeste d'abord. Le verbal prend en charge directement la dimension descriptive. « Parfois, les dénominations de couleur sont données par analogie avec des référents, évoquant une certaine chromaticité ou par un phénomène de correspondance entre une couleur et une idée, sans qu'il existe un lien manifeste avec une couleur réelle » [31]

La description des couleurs nécessite des compléments nominaux et textuels. La méthode descriptive, s'appuyant sur la nomination, est fondée sur une profusion sémantique et précision lexicologique, car « l'activité de la perception n'est guère séparable d'une activité de nomination ». [33] Cependant « la description ainsi obtenue n'est rien de plus qu'une manière de nom propre » ; « Elle est pure et simple désignation ». [34]

La symbolisation est avant tout une fonction linguistique, où la terminologie des couleurs disponible joue un rôle crucial dans la création de tout langage relatif aux symboles de la couleur. Cette terminologie, souvent imprécise, pose des problèmes significatifs pour l'interprétation des textes historiques et la compréhension entre personnes parlant des langues différentes. Étymologiquement, « décrire » signifie écrire en se basant sur un modèle. Ce qui implique une

démarche de construction et d'analyse. En effet, distinguer deux teintes en tant que couleurs distinctes ou comme des variantes d'une même couleur est essentiellement une question de langage. [32]

Les mots de couleur, issus du vécu, du concret, des matériaux, de l'histoire de l'homme et de ses mentalités, entraînent ainsi de la science et de la technique au symbolique et à la poésie. Ces dénominations sont en perpétuelle évolution puisqu'elles sont issues de l'espace des hommes, de leurs actions, de leurs goûts et de leurs choix. Elles sont un véritable reflet d'une société, d'une époque et sont liées à une temporalité.

Les dénominations des couleurs permettent de retracer l'histoire des techniques, l'histoire des arts et des métiers artisanaux, mais aussi l'histoire des teintures ou celle de la société. Les mots des couleurs permettent d'identifier l'histoire des pigments et matières colorantes ainsi que leurs emplois. Parmi la multitude des dénominations et expressions de couleur, beaucoup font référence à une réalité technique, elles rendent compte des progrès de la chimie et de la physique, permettent de retracer l'histoire des matières colorantes et de leurs utilisations. [32]

Comme l'explique Céline Caumon dans son ouvrage « Usages et pratiques prospectives en cosmétiques » ; dans les années 60, la culture et la consommation de masse (à travers les médias) ont orienté l'attention des consommateurs vers des questions liées au bien-être et aux loisirs. De là, de nouveaux métiers, comme ceux liés aux tendances, ont émergé, diffusant des thèmes reconnaissables saison après saison à travers des messages visuels ou des produits. L'environnement visuel, chromatique et linguistique reflète des influences stylistiques du passé, créant des archétypes auxquels les consommateurs peuvent s'identifier.

L'industrie de masse influence les tendances sur l'évolution des termes de couleurs utilisés. La nomination des couleurs dans certains domaines illustre des univers thématiques ciblant des consommateurs spécifiques en fonction de critères tels que l'âge, le sexe, la culture et les produits à consommer. Les termes du marketing jouent un rôle évident dans la mise en scène de la couleur, la création de sens et la revitalisation de l'industrie visuelle. Le marketing suggère que ces termes reflètent l'histoire de la langue et de la mode, tout en montrant comment une collection saisonnière cosmétique est élaborée à partir des tendances actuelles. L'analyse démontre que les termes de couleurs véhiculent des représentations d'époques, qui sont interprétées différemment en fonction des cultures, des normes sociales et des symboliques collectives. [35]

Il est complexe de classer les couleurs par leur dénomination. Par exemple le terme rouge vient du latin *rubens* qui signifie littéralement rouge, alors que pour le terme vert, *viridis* en latin, signifie printanier et c'est également le cas pour les termes jaune et bleu. Les « familles chromatiques » et linguistiques, que l'on découvre dans l'évolution et l'histoire de la langue, sont présentes dans la plupart des cultures et définissent des termes hyponymes ou génériques qui sont, en Occident : Blanc, noir, gris, brun ou marron, jaune, orange ou orangé, rose, rouge, vert, violet et bleu. Les couleurs sont classées différemment, selon leurs propres modes de catégorisation dans chaque culture. La majorité compte onze champs de couleurs, comme le montrent de nombreuses études, mais certaines cultures ont un nombre de champs totalement différent. [35-36] Résultat de l'évolution d'un langage et d'un contexte culturel, les mots désignent des couleurs de perceptions reconnues comme collectives par la société. Ces termes dits « génériques » viennent s'ajouter d'autres termes qui désignent une simple nuance comme le beige, le glauque, etc. Ce sont des dénominations directes qui fondent une liste close, qui toutefois peut être emmenée à accueillir certaines créations de dérivés (adjectifs, substantifs, verbes et adverbes). [35-37]

Les difficultés de dénomination des couleurs sont en partie dues à ce qu'il n'existe pas une seule et unique méthode à laquelle on puisse se référer. Étant donné que des raisons nombreuses, en partie liées à la culture, aux habitudes, au commerce, conduisent à former un ensemble de termes quasi illimité, il est inévitable que les mêmes mots ne représentent pas toujours les mêmes couleurs. Sans s'étendre davantage sur ce sujet inépuisable, nous pouvons nous reporter à la norme de l'association française de normalisation (Afnor) X 08-010 intitulée « classification méthodologique des couleurs ». Elle a été réalisée par le Groupe Permanent d'Études des Marchés de Peintures, Vernis et produits connexes (GPEM/PV) au cours des années 1960 à 1977. [19-24]

A partir de la classification Afnor, quelques règles permettent de faire correspondre des noms de couleurs aux champs chromatiques qui sont comptés au nombre de 18 :

- Violet, bleu, vert, jaune, orangé, rouge, pourpre (pour les 7 teintes principales)
- Ivoire, crème, beige, rose, kaki, brun, marron, bordeaux (pour les 8 teintes désaturées)
- Blanc, gris, noir (pour les 3 teintes neutres)

Pour représenter les teintes intermédiaires, les noms des teintes peuvent également être associés entre eux comme par exemple : bleu-vert, rouge-orangé, beige-rose, vert-jaune etc...

Ces termes de couleurs peuvent être modifiés par des adjectifs (pâle, grisé, sombre, clair, moyen, foncé, vif, intense, profond), indiquant la tendance. [19-24-38]

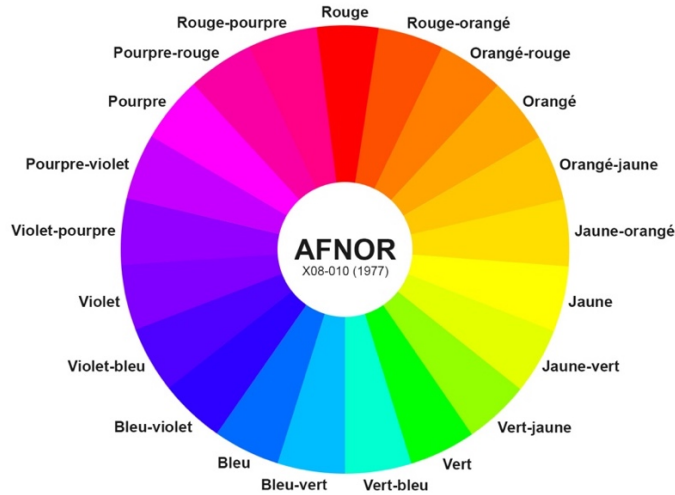


Figure 21 : Norme Afnor X08-010 « classification méthodologique des couleurs »

La méthode Afnor exposée ici s'écarte des représentations faites à partir des 6 teintes antagonistes (bleu, jaune, vert, rouge, blanc, noir) ou des 11 champs chromatiques définis dans les dictionnaires (violet, bleu, vert, jaune, orangé, rouge, brun, rose, blanc, gris, noir) mais elle a le mérite de donner une couverture de tout l'espace chromatique usuel des couleurs. [19–24]

Les termes principaux de couleur sont généralement associés à 9 qualificatifs usuels permettant de préciser l'aspect perceptif du champ chromatique en fonction de la luminosité et de la saturation comme présenté dans la figure 22. [19–24]

		Saturation		
		Faible	Moyenne	Élevée
Luminosité	Faible $L^* < 38,7$	Sombre	foncé	profond
	Moyenne $38,7 \leq L^* < 76,3$	grisé	moyen	intense
	Élevée $L^* \leq 67,3$	pâle	clair	vif

		Saturation		
		Faible	Moyenne	Élevée
Luminosité	Faible			
	Moyenne			
	Élevée			

Figure 22 : Correspondance des qualificatifs des noms de couleurs

Une couleur peut également se nommer par un terme indirect ou référentiel. Cette nomination fait référence à la représentation de quelque chose dans un environnement collectif et culturel, comme les dénominations analogiques concrètes (jaune poussin, noir ébène, vert sapin) ou figuré (rouge passion, vert printemps, bleu outremer) qui renvoient à différents niveaux de lexicalisation. Il existe également des termes étrangers importés (black, pink, rose shocking, vantablack). Reflet d'une autre section du lexique des couleurs, ces emprunts sont à la fois compris par les professionnels et les consommateurs en fonction de leur utilisation dans la société et les médias.

Les dénominations chromatiques dans la société de consommation sont influencées par divers facteurs tels que l'environnement, l'époque et les médias. Il est donc crucial d'explorer pourquoi des groupements culturels et temporels associent des mots aux couleurs. La sensation colorée est un phénomène psychophysique résultant de la combinaison de paramètres, notamment la lumière en tant que stimulus extérieur et l'œil en tant que récepteur sensoriel. Ce dernier joue un rôle clé en transmettant l'information au cortex occipital pour créer la sensation chromatique.

Dans des conditions de perception normales, ces trois facteurs doivent être réunis pour générer une sensation chromatique. Cependant, que se passe-t-il une fois que l'information visuelle (objet et couleur) est captée par l'œil à travers la lumière directe ou indirecte et traitée par le système visuel ? Un processus d'interprétation se met en place, permettant la communication interindividuelle de la sensation chromatique par le biais d'un filtre d'exégèse. En conséquence, la sensation de couleur (qui est définie par les trois caractéristiques teinte, luminosité et saturation) est en partie subjective, ce qui entraîne des variations dans la manière dont les gens la perçoivent.

De même, la nomination des couleurs est une fonction psychologique vécue de manière différente. Bien que nommer les couleurs soit essentiel pour identifier, repérer, mémoriser et hiérarchiser les sensations visuelles courantes, l'attribution des noms de couleurs est une expérience principalement individuelle, souvent reconnue comme collective dans la mesure où elle repose sur des interprétations référentielles partagées, en relation avec la culture et la perception d'un grand nombre de personnes. En d'autres termes, attribuer un nom à une couleur se fait en référence à un ensemble de valeurs culturellement partagées qui permettent de créer une signification commune. [35]

Le « langage des dénominations » de couleurs est ainsi fait de richesse et de complexité. Cependant, pour être plus précis, il existe des référentiels de codification qui font référence à une teinte unique, tels que RAL, NCS, Pantone, etc. utilisés par les designers.

CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE

Ce projet de thèse s'inscrit dans la suite du mémoire de Master 2 réalisé au sein de l'Institut Supérieur Couleur Image Design (ISCID) à Montauban, de l'université Toulouse Jean Jaurès et intitulé « Upcycling : Enjeux et posture du designer couleur et matière ». Après une investigation portée aux objets issus de la pratique dite de recyclage en questionnant plus particulièrement le rapport existant entre clichés et couleurs à travers les principes de cycle de vie et de tendances du marché, le doctorat a eu pour enjeux de positionner les pratiques industrialisées de l'upcycling comme moteurs d'une autre-manière de mener une activité scientifique dans le champ de la production des objets.

Cette thèse est co-dirigée par Bertrand Charrier, directeur de l'IUT des Pays de l'Adour, Professeur des universités du département Sciences et Génie des Matériaux, et membre de l'Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux (IPREM) à Pau et directeur du réseau Xylomat. Ainsi que de Céline Caumon, Professeure des universités du laboratoire de recherche en audiovisuel, savoirs, praxis et poïétiques en art (LARA-SEPPIA) à Toulouse et co-responsable du Master «Création recherche et Innovation en Couleur et Matière» de l'institut supérieur image couleur design (ISCID) à Montauban. Cette thèse fait l'objet d'une collaboration étroite avec l'entreprise Api'Up située à Capbreton et la plateforme Xylomat IPREM à Mont de Marsan qui se situe sur un des 5 sites de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.



Figure 23 : logos des acteurs de la thèse

Le département Science et Génie des Matériaux est orienté autour du bois et des éco matériaux. L'équipe de recherche (Xylomat IPREM/UMR CNRS N°5254) s'intéresse depuis 2017 aux travaux de recyclage et à l'upcycling de matériaux industriels via une étroite collaboration mise en place avec Api'Up. L'étude de nouvelles générations de mélanges collants bio-sourcés rentre également dans le champ thématique de l'équipe de recherche depuis plus de dix ans. La société API'UP a été créée en 2012 à l'initiative de huit personnes spécialisées dans le développement durable, le design et l'insertion par l'activité économique, API'UP a pour objet de développer des activités durables et porteuses d'emplois autour de l'économie circulaire. En janvier 2014 a été lancé l'Atelier « du DÉCHET au DESIGN », qui produit en série des objets neufs à partir de déchets collectés sur le territoire. Cette activité est associée à une mission d'insertion par l'activité économique. En parallèle, l'équipe poursuit la mise en œuvre de sa démarche MA.DE.VA. [MATières DElaissées VALorisées], dont l'objectif est de traiter toujours plus de matières sur le territoire, dans une démarche d'économie circulaire et collaborative. Les études, actuellement menées avec plusieurs partenaires, ont pour objectif de développer de nouvelles activités porteuses d'emplois ou de formation. C'est dans ce cadre que la société a développé un partenariat étroit avec la plateforme Xylomat depuis 2017.

L'entreprise propose une gamme de mobiliers qui s'appuie sur un concept original et global de gestion des déchets depuis la collecte jusqu'à la valorisation écoresponsable et d'un processus d'upcycling industriel qui permet de concevoir et de fabriquer des mobiliers neufs à partir de matières récupérées. Ces mobiliers sont écoconçus et s'inscrivent dans une démarche d'économie circulaire. Actuellement les applications commerciales pour Api'Up sont essentiellement menées dans le domaine de l'ameublement et de l'objet mais d'autres applications sont déjà à l'étude (secteur de l'équipement professionnel, du BTP, du second œuvre et décoratif). Ces perspectives s'appuient sur les recherches en innovation, la recherche et le développement (R&D) et en design industriel. L'entreprise a développé le projet « MATERIA 4.0. » qui est un programme d'innovation matière & design produits éco-responsables intégrant les travaux d'études et de recherches en termes de R&D matières, de design produit et de stratégie marketing, nécessaires pour créer et lancer une nouvelle marque. Ce projet s'appuie sur un écosystème d'expertise design et de recherche universitaire. L'objectif est de créer de nouvelles matières dites « belles et visibles pour le haut de gamme ». Ce projet nécessite de mettre en œuvre un programme d'innovation pour lever les problèmes techniques. Le caractère innovant du projet de lancement de la nouvelle marque de mobilier professionnel écoresponsable d'Api'Up (au regard du marché, de l'offre et de la demande actuelle), se situe dans son positionnement unique qui combine 4 principes à la fois :

- Une économie circulaire et respectueuse de l'environnement,

- La vocation d'accompagner les professionnels dans leur ouverture à une démarche collaborative et circulaire,
 - Une offre sur le long terme afin d'industrialiser là où certaines initiatives restent au stade de la pièce unique,
 - Des matériaux durables qui garantissent un mobilier conçu en France à partir d'au moins 99% de matériaux recyclés et dont l'objectif de recyclabilité vise lui aussi 100%,
- Pour répondre aux besoins du marché sur ces applications, seront privilégiées les recherches sur les matières récupérées actuellement disponibles, à savoir différentes typologies de cuir, du textile d'ameublement professionnel polyester ou polypropylène, ainsi que les rebuts de bois massif issus de l'atelier d'Api'Up. La figure 24 montre que la quantité de déchets accessibles par API UP varie en fonction des années. La baisse des gisements constatés est liée à l'amélioration des processus de découpe (numérique) qui génèrent moins de rebuts. Ceci, tout particulièrement avec les déchets de cuir.

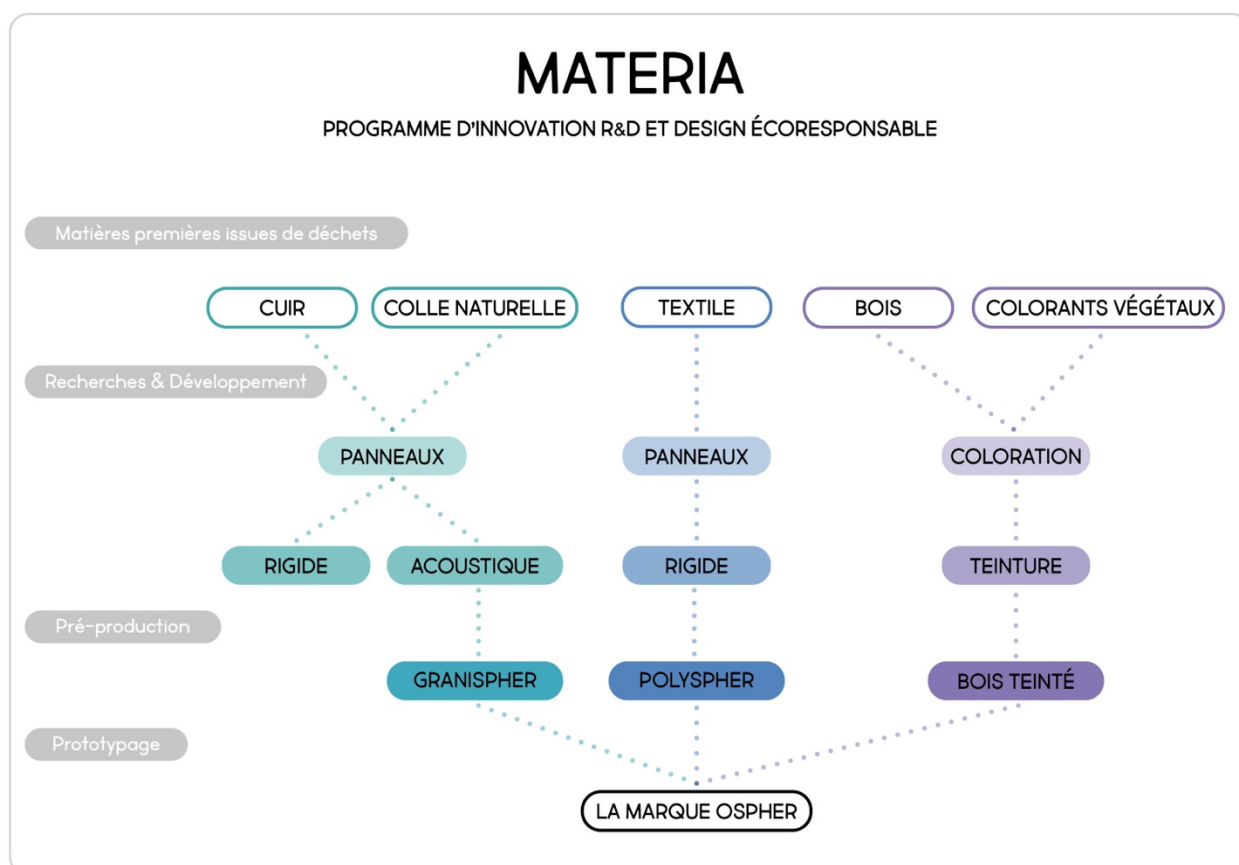


Figure 24 : Schéma des axes de recherches du projet Materia

Les déchets sont une ressource abondante générée par une consommation quotidienne croissante. Souvent pensés comme « gratuits » car très abondants, ils peuvent aujourd'hui être

transformés et repensés comme le point de départ d'un nouveau cycle de production. Dans une production en petite série, par le biais de pièces uniques ou dans une production rendue possible par une démarche de standardisation et d'homogénéisation de la matière première récupérée, la pratique de l'upcycling est aujourd'hui moteur de nombreux marchés. Les différentes catégories de déchets sont produites en grande quantité et apparaissent parfois tout autant inévitables qu'inutilisables. Néanmoins, certains de ces déchets peuvent dorénavant permettre de repenser une nouvelle production. Certains ont en effet l'avantage d'être esthétiques et exploitables et offrent l'opportunité de créer de la matière par une « seconde vie ».

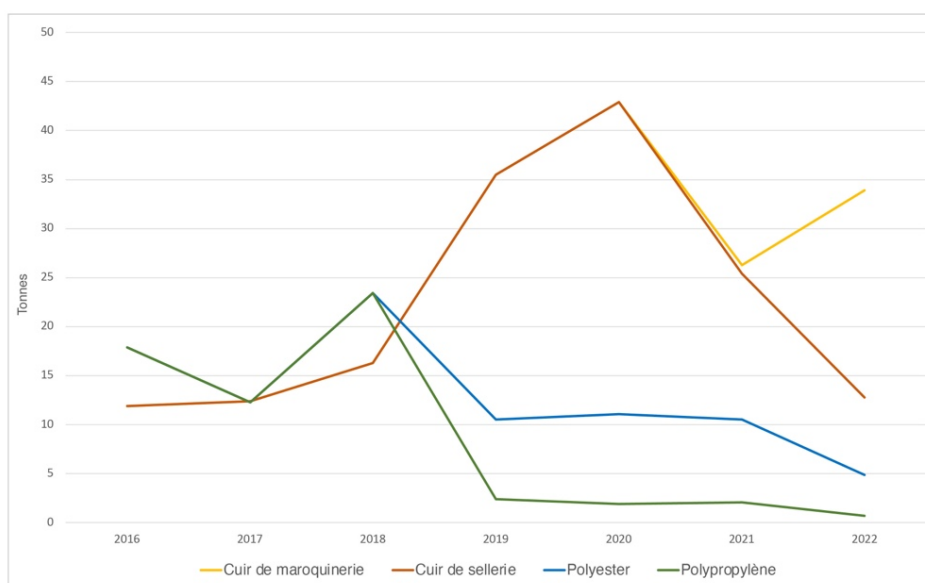


Figure 25 : Quantité de déchets de cuir et textile collectés par Api'Up en Tonnes par Année (Api'Up)

Depuis toujours l'homme vit dans un décor coloré et construit une « culture chromatique » autour de la couleur et de ses significations symboliques. De nos jours, certains symboles historiques perdurent. Le Designer couleur et matière intervient dans le processus de création afin de développer l'imaginaire coloré des individus en reformulant les idées reçues et les clichés, en inventant de nouvelles mythologies contemporaines et en formant, de manière pédagogique les usagers à la couleur. Ce rôle de formateur est essentiel au regard de l'univers chromatique du recyclage. Dans ce cadre, la perception sensorielle des objets, ou de leurs usages forme un élément fondamental qui doit être pris en compte dès la conception d'un projet, au même titre que les performances technologiques et techniques.

L'upcycling est un processus qui, comparé au recyclage dont il est l'héritier, a pour objectif de transformer et d'ennoblir la matière récupérée pour en faire un produit à forte valeur ajoutée. Ce processus repose sur une méthodologie où le travail de collecte, d'artisanat et d'assemblage de

matières ou de pièces permettent de donner lieu à un nouvel objet. Malgré le savoir-faire nécessaire à cette pratique, l'upcycling est victime de préjugés, notamment sur l'aspect esthétique ou sur le confort du produit final. Ceci est en partie vrai (aujourd'hui le déchet est le nouvel objet à la mode et il est traité de diverses manières plus ou moins abouties). Néanmoins, le principe d'ennoblissement et de revalorisation des matériaux est un exercice stimulant pour les concepteurs et les ingénieurs qui s'interrogent sur les excès de production. Cette orientation de la réinvention de l'objet diffère par les moyens de la mise en œuvre et les discours qui le portent. La citation attribuée à Antoine Lavoisier (inspirée du philosophe grec Anaxagore) « rien ne se crée, rien ne se jette, tout se transforme » prend tout son sens ici.

Cette thèse fait appel à une approche croisée entre différents domaines tels que la physico-chimie, l'ingénierie, le design et le sensoriel. L'upcycling est un domaine complexe qui demande une culture interdisciplinaire afin d'avoir une vision globale tout en faisant le lien entre la recherche scientifique et le volet appliqué des matériaux en milieu industriel. Ce domaine nécessite un ensemble de connaissances et de savoirs complémentaires. L'ensemble de ces compétences fonctionne en synergie, et forme un équilibre. Il est important de pouvoir analyser la phase d'expérimentation et d'effectuer un travail de mesures précis à travers une cinétique afin d'exploiter un ensemble de phénomènes par le mouvement de la matière. Le designer couleur agit comme vecteur d'expérimentation pour valoriser des matériaux hétérogènes en les choisissant pour leur matérialité. Il agit sur l'enjeu principal de l'upcycling qui est la valorisation de la matière première, pour cela il a besoin de comprendre les propriétés physiques et chimiques de la matière afin de maîtriser la mise en œuvre et la caractérisation de nouvelles surfaces, toutes gammes de matériaux confondues. L'avantage d'avoir des connaissances sur les matériaux, de la synthèse aux applications, permet d'anticiper et d'optimiser leurs propriétés.

Cette pratique encourage notamment les collaborations de toutes sortes et vient mettre en lumière le savoir-faire des artisans, l'imagination des designers et l'expertise des scientifiques.

Le rôle du designer couleur est de faire le lien entre les différents acteurs du processus de création, il crée une passerelle entre le consommateur et le fabricant, le bureau de recherche et le laboratoire de production... Ces phases propres au travail du designer couleur doivent aboutir à la création d'outils de communication, afin de faire connaître la démarche d'upcycling et le travail du designer couleur et matière pour faire comprendre les enjeux de la valorisation, et de pouvoir faire vendre et commercialiser cette démarche. Le designer couleur et matière est un dénicheur de matières insolites qui regorgent de trésors d'inventivité. Surprendre est la meilleure façon d'intéresser.

Le projet de thèse est orienté vers une approche scientifique et design du développement de plusieurs matériaux selon plusieurs étapes, de la recherche bibliographique exhaustive sur les matériaux recyclés du type de ceux qui sont développés, à la réalisation de panneaux rigides à base de cuir ou de textile recyclés pour des éléments plans et le développement de teintures naturelles pour valoriser des déchets de bois. Ce travail passe par l'analyse des propriétés physico-chimiques des matériaux avant et après-fabrication, ainsi que par les instruments analytiques classiques du laboratoire permettant d'analyser les performances mécaniques et de durabilité selon des normes internationales. Le projet de recherche a consisté au développement d'une démarche qui permet de valoriser les éléments textiles et cuirs (les couleurs, les textures), en lien avec les matériaux de la région, c'est-à-dire les savoir-faire (ancestraux, artisanaux, culturels, industriels etc.) et leurs potentiels d'innovation (recherche et développement, dynamisme social, économique, culturel et scientifique). Tout au long du projet de thèse, une stratégie d'amélioration de chaque produit a été mise en place (de la conception à la production) afin d'atteindre les optimisations indispensables dans une perspective d'industrialisation.

CHAPITRE 1 : DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU MATÉRIAU À PARTIR DE DÉCHETS DE CUIR

1.1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1.1 LE MATÉRIAU CUIR

Le travail du cuir se fait en différentes phases. Dans un premier temps les peaux brutes subissent un premier traitement de salage pour les conserver car elles contiennent en moyenne 75% d'eau et sont très putrescibles. Les modes de traitements de conservations les plus courants sont le salage, le séchage, ou un combiné des deux. Les peaux subissent ensuite un premier classement avant de poursuivre leur transformation. [39]

Le métier de tanneur fait appel à des techniques de plus en plus sophistiquées, qui lui permettent une meilleure maîtrise des procédés de transformation permettant de passer de la peau brute à un cuir fini. Les caractéristiques physico-mécaniques et sensorielles du cuir dépendent du savoir-faire du tanneur au travers duquel il fait appel à la chimie et à la mécanique pour obtenir le cuir souhaité. Selon le procédé utilisé, une même peau peut donner des cuirs finis très différents (souplesse, fermeté, épaisseur, toucher, couleur...). Ce travail reste long car il consiste en une multitude d'étapes. Quelle que soit l'utilisation finale du cuir ou son espèce animale, les procédés de transformation les plus courants se déroulent toujours en quatre phases principales. On parle de tannerie pour les grandes peaux tel que les bovins, pour les petites peaux comme l'agneau par exemple on parlera plutôt de mégisserie. [39]

• LE TRAVAIL DE RIVIERE

La première phase de transformation est appelée le travail de rivière et s'effectue en six étapes qui consistent à réhydrater les peaux et à les préparer pour le tannage. Ces étapes sont les suivantes :

1-La trempe permet de redonner un taux d'hydratation à la peau proche de son état initial. Cette opération permet également de dessaler et éliminer les parties organiques solubles. Entre 300% et 500% du poids des peaux sont nécessaires en quantités d'eau.

2-L'épilage a pour but d'éliminer l'épiderme et les poils, grâce à des agents chimiques à bases de sulfures pour détruire la kératine. Cette action dégrade les fibres de collagène afin d'augmenter les réactions de la peau avec les matières tannantes. Elle influe sur les propriétés physiques du cuir, notamment sa souplesse. La peau gonfle sous l'effet de cette opération.

3-L'écharnage élimine les tissus sous-cutanés par une opération mécanique qui rabote la peau, ce qui crée un déchet très hydraté et alcalin appelé carnasse.

Après ces trois premières étapes il reste seulement le derme de la peau. Ce dernier a subi des traitements mais est très alcalin. Il faut donc éliminer ces agents basiques avant de pouvoir passer à l'étape du tannage qui se déroule généralement en milieu acide.

4-Le déchaulage permet d'éliminer les produits alcalins combinés au collagène par des sels (sulfates et chlorure d'ammonium) ou par des acides organiques faibles (acides lactiques ou butyrique) ou encore de l'acide carbonique. Un rinçage vient éliminer les sels solubles formés. Cette opération permet également de faire dégonfler la peau.

5-Le confitage est une action biochimique effectuée par des produits enzymatiques qui a pour but de dégrader les fibres élastiques. Cette opération contribue à favoriser la souplesse du cuir, ce qui améliore l'état de surface de la fleur grâce à la dégradation des pigments résiduels présents au cœur des follicules pileux. A ce stade, la peau est désormais blanchâtre.

6-Le picklage consiste à faire absorber une quantité importante d'acide à la peau, en présence de sels neutres (NaCl) pour faire réprimer le gonflement dû à l'acidité du milieu et favoriser une meilleure diffusion des agents tannants. Cette opération permet ensuite de réaliser un tannage minéral ou synthétique, mais s'il s'agit d'un tannage végétal elle ne sera pas réalisée. Dans ce cas

un conditionnement permet une légère diminution de l'alcalinité des bains par du métabisulfite de sodium. Une première refente est possible à la fin de cette première phase. [39]

• LE TANNAGE

Vient ensuite le tannage, phase cruciale qui permet de rendre la matière imputrescible par une action chimique. Les agents tannants vont se fixer entre les fibres de collagène, ce qui permet de stabiliser la structure collagénique. C'est l'étape qui va transformer la peau très hydratée et putrescible en matériau cuir peu hydraté, imputrescible, doté d'une structure résistante et plus ou moins souple. Il existe différents types de tannage et donc différents agents tannants sont utilisés, industriellement ils sont règlementés et limités. Ce sont principalement les sulfates basiques de chrome (chrome trivalent) pour les produits minéraux, des extraits de mimosa, de châtaigner ou de quebracho pour les tanins végétaux et des produits organiques pour les tannins synthétiques. [39]

Le tannage minéral : il consiste à dissoudre le sulfate de chrome dans l'eau pour le faire pénétrer dans la peau par agitation dans un foulon (cuve rotative en bois ou inox). L'aptitude plus ou moins grande des sels de chrome à se fixer avec les fibres de la peau (l'astringence), dépend de l'état chimique du bain de traitement et de la peau à tanner. Mondialement, environ 80% des cuirs sont tannés avec cette méthode, ce qui rend le cuir plus souple, avec plus de couleurs possibles. Le chrome 3 peut se transformer en chrome 6 ce qui entraîne des allergènes cutanés, voir cancérigène si ingestion. [40] En sortie de tannage au chrome on utilise l'appellation « *Wet Blue* » (bleu mouillé).

Le tannage synthétique : ce procédé a été développé avec des tanins synthétiques constitués de polyphénols, de glutaraldéhyde et des dérivés de sels de phosphonium. Ils permettent d'obtenir des cuirs denses et moelleux mais qui nécessitent un retannage pour optimiser les propriétés du cuir à l'usage. Ce type de tannage permet d'obtenir des couleurs plus claires mais avec une moins bonne texture, il est également plus coûteux. [41]

Le tannage végétal : il est artisanal, et entraîne une perte de l'élasticité de la matière, peu de couleurs sont possibles. Il peut se faire à partir de tanin de sumac, myrobolan, châtaignier (tanins hydrolysables) ou de tanins de mimosa, chêne, pin, sapin, quebracho (tanins condensés). [42] Dans la mémoire collective le cuir est marron, cela correspond aux couleurs des tanins végétaux et à la patine naturelle de la matière.

Le tannage mixte : c'est un mélange des différentes techniques de tannage. Il est courant d'associer un tannage végétal avec un tannage synthétique pour augmenter la souplesse du cuir. Pour éclaircir un maximum les peaux c'est un mélange entre le chrome et des tanins synthétiques qui sera opéré.
[39]

A la fin de cette phase de tannage, un premier tri qualité est effectué.

• LE CORROYAGE

Le corroyage est la phase qui permet d'ajuster la forme et la tenue du cuir afin de définir ses propriétés finales en procédant à une série de cinq opérations mécaniques :

1-La refente : Cette étape consiste à réaliser une découpe dans l'épaisseur pour la désépaissir, (une peau de bovin au milieu du dos peut atteindre 1 cm d'épaisseur) la partie sans fleur résultante porte le nom de « croûte de cuir ».

2-Le dérayage : Il consiste à gratter côté chair pour égaliser l'épaisseur du cuir. Cette opération est similaire à un rabotage (le déchet est nommé la dérayure).

3-Le retannage : Un second tannage peut être effectué si besoin pour modifier les propriétés du cuir.

4-La nourriture : Cette étape consiste à nourrir le cuir par l'ajout de matière grasse.

5-La sèche : Opération de séchage du cuir au bout de 3 semaines de travail, conservation de 10% d'humidité environ. Le cuir est essoré puis tendu sur cadre et parcourt un circuit ventilé, dans d'autres cas il est séché sur plaque sous vide.[39]

• LA FINITION

La phase de finition regroupe l'ensemble des opérations qui donnent au cuir son aspect final (brillance, couleur, relief...). Certains gardent un aspect « brut ». On trouve ainsi de multiples appellations en fonction des opérations effectuées :

- les « velours » : aspect velouté (très poreux, salissant)
- le Nubuck : léger ponçage côté fleur
- le Cuir velours : ponçage côté chair (velouté moins fin)
- la croûte velours : ponçage sur une croûte (les 2 faces)
- le cuir pleine fleur : aucune action mécanique
- la fleur corrigée / rectifiée : ponçage préliminaire avant finition
- finition sur croûte [39]

Une finition supplémentaire, comme l'application d'un apprêt filmogène permet également de donner la couleur finale. Il est également fréquent de réaliser des opérations mécaniques comme le grainage, pour imiter un motif de peau naturelle ou représenter un motif artistique, souvent déposé par les marques pour avoir leur propre grain de cuir.

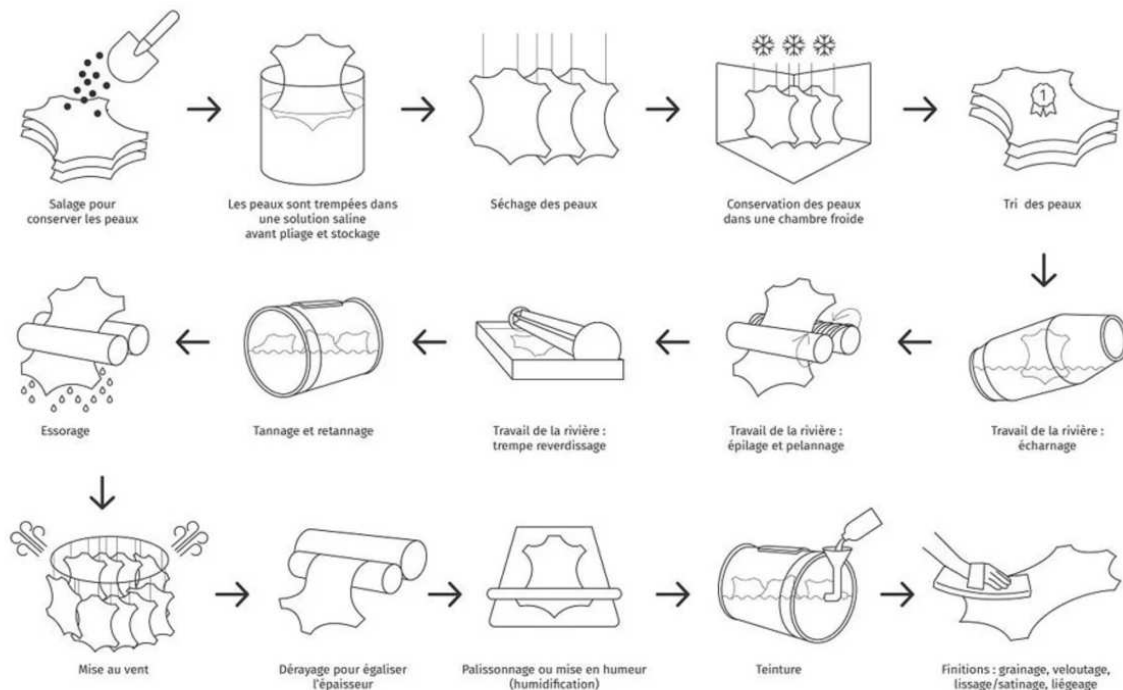


Figure 26 : Etapes de la fabrication du cuir [43]

1.1.2 LA COMPOSITION CHIMIQUE DU CUIR

Le cuir est un matériau majoritairement constitué de protéines et d'eau. Les protéines sont des molécules complexes dont la structuration peut être décomposée en quatre échelles distinctes (Figure 26). Elles sont constituées d'un ou plusieurs polypeptides, qui sont des enchaînements d'acides aminés liés par des liaisons covalentes : les liaisons peptidiques. C'est cet enchaînement qui caractérise la structure primaire des protéines. La structure secondaire décrit la manière dont se replie cet enchaînement sur lui-même sous l'action de liaisons hydrogènes avec notamment les atomes d'oxygène des groupes carbonyles. Les plus courants sont l'hélice α et le feuillet β . Ces hélices ou feuillets formés ne sont pas plans, ils présentent des coudes et plis dus aux interactions entre leurs différents groupements. Sur toute la longueur du polypeptide, ces repliements impliquent la formation d'une structure tridimensionnelle définie, la structure tertiaire. La forme de la protéine, par l'exposition de sites particuliers, lui confère des propriétés physico-chimiques et biologiques. Tout changement configurationnel implique la perte de ces propriétés. Dans le cas de protéines composées de plusieurs polypeptides, cette fonctionnalisation va conduire les macromolécules à s'associer par liaison faible et effets stériques, générant une structure quaternaire. Le solvant dont les protéines sont en présence détermine également leur conformation, et peut jouer un rôle stabilisant ou déstabilisant. [44] Lors de la fabrication du cuir, des interactions vont être créées au niveau des structures secondaire à quaternaire. [45]

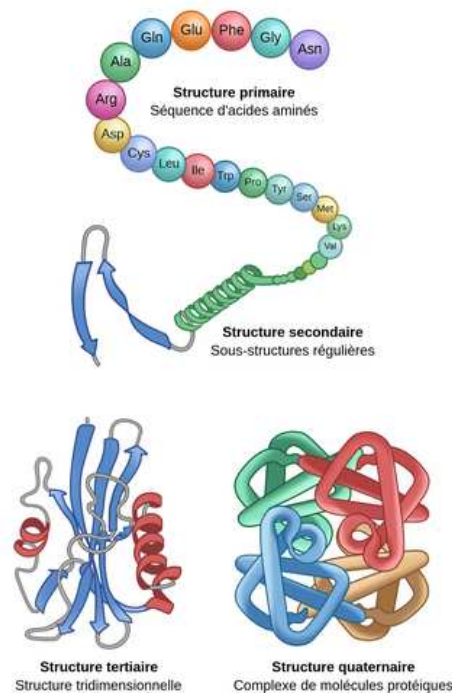


Figure 27 : Les différentes structures de protéines [46]

Les principales protéines contenues dans la peau sont l'élastine, la fibronectine et le collagène. Le collagène représente 70% des protéines de la peau, et participe grandement à ses propriétés mécaniques. Il existe plusieurs types de collagène présents en proportions variables selon l'animal. Le type I, fibrillaire, est toujours largement majoritaire, cette description se concentrera donc sur celui-ci.^[45] Les acides aminés principaux constitutifs du polypeptide du collagène I sont l'hydroxyproline, la proline, l'alanine et la glycine (tableau 1). La proline, encombrante, contraint la géométrie et génère des liaisons hydrogène avec les agents tannants. La glycine joue un rôle structurant car elle permet l'établissement de liaisons hydrogène entre les trois chaînes, toutes décalées entre elles d'un résidu (portion distinctive d'un acide aminé) à chaque fois. Deux polypeptides de type hélice $\alpha_1(I)$ et un α_2 forment un tropocollagène qui est une unité structurale du collagène (structure quaternaire). La molécule de tropocollagène mesure environ 300 nm de long. Sa cohésion interne est renforcée par des interactions électrostatiques entre les groupements acides et basiques. L'eau présente dans la peau joue aussi un rôle stabilisateur en formant une « gaine de solvant ». ^[45-47]

Tableau 1 : Composition du collagène de type I [47]

amino-acide	type I *	
	$\alpha_1(I)$	α_2
hydroxy 3-proline	0,9	0,8
hydroxy 4-proline	102	100
acide aspartique	42	48
thréonine	19	19
sérine	29	29
acide glutamique	78	67
proline	118	118
glycine	330	329
alanine	129	102
valine	14	28
méthionine	8,5	6,0
isoleucine	6,1	18
leucine	20	32
tyrosine	2,1	2,0
phénylalanine	14	14
hydroxylysine	5,5	8,0
lysine	29	24
histidine	2,8	7,1
arginine	51	49

Les molécules de tropocollagène s'organisent entre elles, formant des fibrilles de collagène. Dans la peau, ces fibrilles ont un diamètre compris entre 40 et 100 nm. Au sein de ces fibrilles, les molécules de tropocollagène se placent parallèlement les unes aux autres, mais décalées par rapport à celles des couches voisines (Tableau 1). Le décalage vaut environ un quart de la longueur de la molécule de tropocollagène, soit 67 nm. Cette organisation laisse des espaces libres dans lesquels peuvent s'insérer d'autres éléments. Des liaisons intermoléculaires, électrostatiques et hydrophobes (forces de London) stabilisent l'ensemble. Les molécules de tropocollagène peuvent aussi être reliées au niveau de leur terminaison par des liaisons covalentes en cas de chevauchement. Dans la peau, les fibrilles composent elles-mêmes des fibres de plus grand diamètre et longues d'une dizaine de

micromètres, qui s'organisent selon une superposition de feuillets d'orientations diverses. Le caractère organisé des fibrilles de collagène confère une structure semi-cristalline au cuir, avéré par des analyses DSC et ATD.[45]

La peau est constituée de trois strates, par profondeur croissante : l'épiderme, le derme et l'hypoderme (Figure 27). Seul le derme est conservé dans la fabrication du cuir. Il intervient dans la tenue mécanique et dans la vascularisation de la peau. Il se subdivise en stratum papillaire ou *fleur*, la face externe, et en stratum réticulaire ou *chair*. Les fibres de collagène sont plus épaisses mais enchevêtrées moins densément dans la couche chair. Dans le stratum réticulaire, elles s'organisent en faisceaux comportant aussi des fibres élastiques formées d'élastine. Les fibroblastes, composants cellulaires, sont aussi présents et chargés notamment de synthétiser les précurseurs du collagène et de l'élastine. Une matrice gélifiée englobe les fibres, composée notamment d'acide hyaluronique.

[39–45]



Figure 28 : Schéma de la constitution d'une peau [48]

Le procédé d'obtention du cuir implique un grand nombre d'étapes comme évoqué précédemment. A la fin du travail de rivière, la peau est essentiellement composée de collagène et d'eau. L'étape de transformation de la peau en cuir entraîne de nombreuses modifications au niveau des molécules de collagène. Les principales sont présentées dans le schéma ci-dessous (Figure 28).

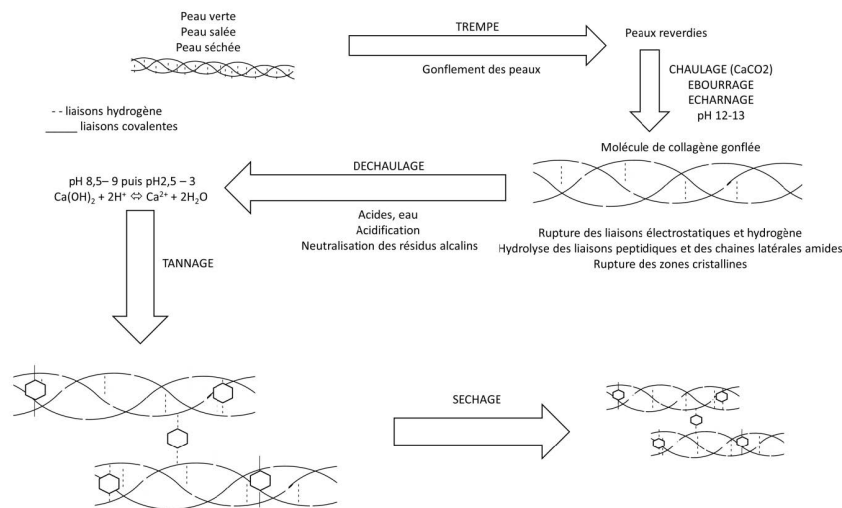


Figure 29 : Schéma bilan de l'impact du processus de transformation d'une peau en cuir au niveau de la molécule de collagène. [45]

Dans sa thèse sur la caractérisation des effets de la chaleur sur des cuirs de tannage végétal, Éléonore Izquierdo propose ce schéma. Il représente les deux types de stabilisation hydrogène et covalentes des molécules de collagène par les tannins. Configurations possibles dans le cas de l'utilisation de tannins de type condensé. Le procédé de transformation permet l'acquisition de nouvelles propriétés telles qu'une résistance à la putréfaction, à la chaleur ainsi qu'une bonne résistance mécanique.

Le tannage le plus répandu est réalisé avec des sels minéraux, majoritairement au chrome, qui viennent créer des liaisons covalentes à l'intérieur et entre les molécules de tropocollagène (structures tertiaire et quaternaire), renforçant la structure et évacuant une partie de l'eau (Figure 28). Historiquement le tannage était végétal, les tanins hydrolysables créant des liaisons hydrogène et hydrophobes ; et les tanins condensés créant des liaisons covalentes en sus des deux précédentes. Comme évoqué précédemment, depuis une période relativement récente, des tanins synthétiques, aussi appelés organiques, commencent à émerger. Le principe de leur action tannante est similaire aux précédents, mais les groupements sur lesquels sont réalisées les liaisons diffèrent en fonction de la nature de l'agent tannant. Par exemple, le chrome se lie aux groupements carboxyles et les aldéhydes aux groupes amines, mais le phénomène est encore assez peu documenté. [45-49]

1.1.3 LA VALORISATION DES DÉCHETS CUIRS

Le cuir est un précurseur du recyclage. Si l'on met de côté la question des cuirs exotiques (crocodiles, serpents, etc.), les peaux utilisées dans le tannage du cuir sont issues d'animaux élevés uniquement pour leur viande. La peau est considérée comme un déchet, et n'est valorisée ni par les

éleveurs ni par les abattoirs, et doit même être rapidement évacuée afin d'éviter d'éventuels problèmes sanitaires. De cet état de fait découlent deux conséquences indéniables : le cuir est le produit de la valorisation d'un déchet et se substitue à la production d'une matière neuve ; consommer moins de cuir n'a pas d'impact sur l'abattage d'animaux, voire un impact négatif. [48]

D'autres entreprises ont fait le pari de la valorisation de ces co-produits, comme par exemple Authentic Materials qui a créé la « pierre de cuir ». Basée à Toulouse, l'entreprise s'est spécialisée depuis sa création en 2016 dans l'exploitation de matières naturelles (chutes ou invendus) vouées à la destruction. Vincent Menny, ingénieur de formation et président de la structure, a développé avec son équipe un procédé de traitement naturel qui permet à ces matières premières organiques d'être valorisées. En pratique, l'entreprise récupère et recycle des chutes, rebus ou invendus de matières organiques auprès des grands noms de la maroquinerie, de la joaillerie horlogerie ou de la parfumerie. Grâce à une technologie dérivée de la métallurgie des poudres, elle transforme ensuite ces matières nobles, tel le cuir, la soie, la laine, les minéraux de pierres précieuses, les coquillages, certains bois précieux en blocs de matières reconstituées. Ces nouvelles matières sont soit pures, soit composites, agrégées avec des thermoplastiques biosourcés. Ces nouveaux matériaux, revendus à la marque de luxe, lui offrent de nouvelles possibilités de création, comme des montures de lunettes, des pièces de décoration, des stylos ou des flacons. Un modèle d'une parfaite circularité où les fournisseurs sont aussi les clients de l'entreprise. [50]

Il y a une dizaine d'années, l'upcycling ne faisait pas encore partie des priorités des industriels du secteur. « Depuis 2020 environ, la valorisation de matériaux défectueux ou inutilisés est devenue le dénominateur commun à toutes les maisons de luxe. La prise de conscience écologique évolue.

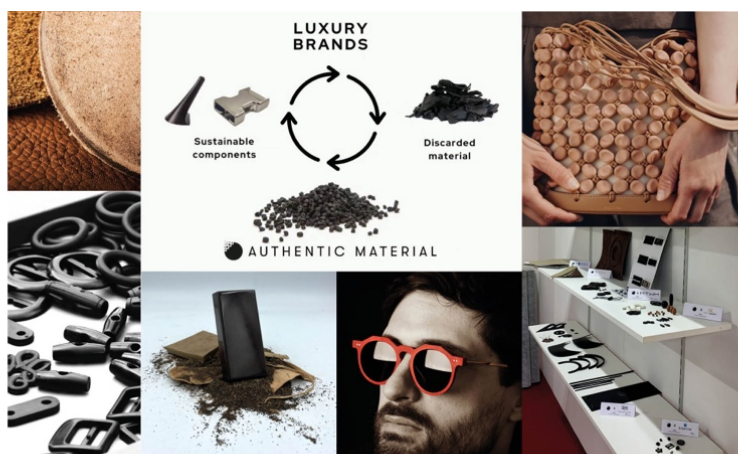


Figure 30 : Exemples des réalisations de valorisation de cuir par Authentic Material

1.1.5 CAHIER DES CHARGES DE LA VALORISATION DES DÉCHETS DE CUIR

Le projet se positionne dans le cadre du programme « Materia » qui a permis à la société API UP de développer un nouveau matériau à partir de déchets de cuir en collaboration avec l'équipe Xylomat IPREM comme expliqué précédemment.

Dans un premier temps, le but était de fabriquer des panneaux en composites cuir de manière à créer des éléments modulaires pour des bureaux de type « *open space* ». Le matériau devait être suffisamment cohésif pour pouvoir être mis en forme par moulage sous thermocompression, mais il devait également être un bon absorbant acoustique. Dans un second temps, l'enjeu était également de réaliser des panneaux de cuir « rigides », dans le but de remplacer des éléments structurels de mobilier. Les contraintes à respecter pour la réalisation de ces panneaux à base de cuir étaient de plusieurs natures. Pour l'aspect mécanique, l'ensemble des propriétés d'un panneau doit à minima égaler les exigences définies par la norme NF EN 622-5 concernant les panneaux de type MDF correspondant à une épaisseur nominale comprise entre 6 et 9 mm, pour la cohésion interne et la résistance à la flexion. Ils doivent également posséder une masse volumique inférieure ou égale à 800 kg/m³, valeur définie par la société Api'Up et correspondant à la limite haute d'un panneau MDF traditionnel. Concernant l'aspect matière, pour rester dans une démarche d'upcycling, il est nécessaire de limiter l'utilisation de produits autres que les déchets de cuir collectés par Api'Up, ainsi que les excès de consommation de matière et d'énergie lors de la production. De plus le matériau doit être recyclable.

Tableau 2 : Nnorme NF 622-5 "Caractérisation des panneaux MDF pour usage en milieu sec" [51]

Caractéristiques	Méthode d'essai	Unité	Gammes d'épaisseurs nominales (mm)								
			1,8 à 2,5	> 2,5 à 4	> 4 à 6	> 6 à 9	> 9 à 12	> 12 à 19	> 19 à 30	> 30 à 45	> 45
Gonflement en épaisseur 24h	EN 317	%	45	35	30	17	15	12	10	8	6
Cohésion interne	EN 319	N/mm ²	0,65	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50
Résistance à la flexion	EN 310	N/mm ²	23	23	23	23	22	20	18	17	15
Module d'élasticité en flexion	EN 310	N/mm ²	-	-	2 700	2 700	2 500	2 200	2 100	1 900	1 700

1.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

1.2.1 MATIÈRES PREMIÈRES

La matière première principale est ici un déchet issu de l'industrie régionale de cuir. Elle est issue de chaînes de production et se présente sous forme de chutes de coupes qui proviennent de plusieurs entreprises issues de deux secteurs : la maroquinerie (avec un tannage majoritairement au chrome, plutôt souple et d'une grande diversité de couleurs) et la sellerie équestre (avec un tannage végétal majoritairement, plutôt rigide et de couleurs sombres). La particularité de ces déchets est qu'ils suivent les tendances au fil des saisons, c'est essentiellement le gisement de maroquinerie qui varie le plus. En conséquence, les couleurs vives, claires et pastels font une apparition ponctuelle dans l'année au cours de l'été. Certaines typologies de cuir réceptionnées se retrouvent régulièrement et dans des quantités relativement consentes, que l'on peut qualifier d'intemporelles. Cependant il s'avère que leur couleur peut varier légèrement en fonction du bain de teinture. Le cuir de sellerie est quant à lui, moins sujet à ces variations de mode, présente des couleurs sombres, comme le noir et le marron mais des variations plus importantes s'observent quant à la typologie même des différents cuirs.

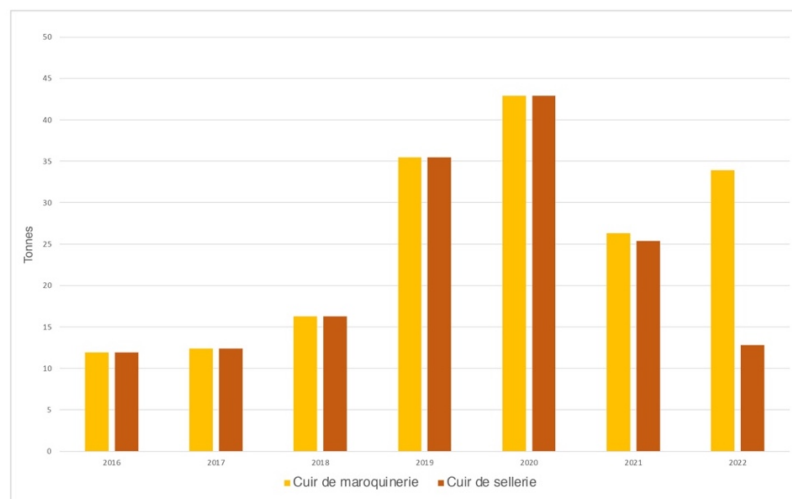


Figure 31 : Chutes de production de cuir récoltées par Api'Up en Tonnes par Années

Tableau 3 : Typologies et notations des déchets de cuirs réceptionnés par Api'Up

Entreprise	Domaine	Typologie	Tannage	Couleurs	Notation
Epidaure	maroquinerie	refente	chrome	multicolore	«Epidaure»
Laffargue	maroquinerie	chutes de coupes	chrome	multicolore	«Laffargue»
Bastin	cordonnerie	dérayures	végétal	camel	«D.Bast»
Fuchs	sellerie équestre	chutes de coupe	végétal	marron, noir	«rafiné F»
Matech Paper	sellerie équestre	chutes de coupe	végétal	marron, noir	rafiné MP»
Hermès	maroquinerie	dérayures	chrome	bleu pastel	«D.Herm»
Hermès	maroquinerie	chutes de coupe	chrome	multicolore	«chutes»
Hermès	maroquinerie	refente	chrome	multicolore	«refentes»
LIM Group	sellerie équestre	chutes de coupe	végétal	marron, noir	«équestre»
Voltaire	sellerie équestre	chutes de coupe	végétal	marron, noir	«équestre»
Périers	maroquinerie	Dérayures d'alligator	Organique	blanc	«D.Alligator»

Comme le montre le référencement ci-dessus des différents cuirs collectés, leurs caractéristiques sont différentes. Certains ont subi un tannage végétal comme le cuir provenant de la société LIM Group qui est tanné au quebracho, mimosa et châtaignier (tanins condensés). C'est également le cas pour les dérayures de la tannerie Bastin, qui produisent du cuir pour la cordonnerie, qui sont affichées tannage 100% naturel au châtaignier et au quebracho (tanins condensés). La tannerie Périers qui travaille des cuirs pour la maroquinerie a un tannage synthétique sur la base d'un dérivé de la triazine (molécule entrant dans la composition de nombreux pesticides). La société Hermès utilise le tannage au chrome pour ses cuirs de maroquinerie, quant au groupe Voltaire, ils utilisent des cuirs provenant de plusieurs tanneries mais leur tannage est confidentiel.

Les cuirs sont réceptionnés en morceaux de tailles très diverses et sont ensuite triés par Api'Up. Les plus grandes pièces sont classées par taille allant du A5 au A1 puis revendues pour du réemploi. Les chutes de coupes les plus petites sont triées par couleurs puis broyées par un broyeur à couteaux. Plus le broyage est fin, plus le temps de traitement et le rebus sont importants.

Le mélange collant utilisé est d'origine biosourcée. Il est employé traditionnellement dans l'industrie pour le collage du bois massif. La composition détaillée de la formulation reste confidentielle. Durant le déroulement du projet Matéria, un brevet a été déposé « Procédé de fabrication de pièces composites à partir de cuir, produits obtenus », FR3110485 (B1). [52] (Annexe 1)

1.2.2 TRI COULEUR DES CUIRS

Comme présenté sur les photos de la figure 31, les chutes de cuirs sont collectées mélangées. Le but étant de les transformer en un nouveau matériau, il était indispensable de réaliser un travail de classement pour pouvoir les stocker déjà triés par couleur. Ce tri permet de faciliter la gestion du

broyage et par la suite d'anticiper les quantités présentes en fonction des couleurs pour la réalisation des panneaux.

Les approvisionnements étant dépendants des collections des maroquineries et donc des saisons et des tendances, certaines couleurs apparaissent et disparaissent rapidement du gisement et certaines teintes varient au fil des mois ou des années. Il était donc primordial d'effectuer un travail de tri et de supports modèles pour les employés d'Api'Up d'après leur état des lieux du gisement. Une contrainte non négligeable était à prendre en compte, la place disponible pour le stockage. Il était donc impossible de séparer chaque couleur, chaque nuance séparément. C'est un travail de « groupes couleurs » qui a été proposé afin de garantir la pérennité des teintes réalisables en panneaux tout en ayant conscience de la variabilité des nuances possibles. Ce travail de tri nécessite une veille permanente afin de s'adapter au gisement.



Figure 32 : Collecte des cuirs et travail d'état des lieux au sein d'Api'Up

En plus des caractéristiques évoquées précédemment, les cuirs proviennent de différents animaux tels que la vache, le veau, l'agneau, la chèvre et le taurillon. Ces différentes origines des peaux sont reconnaissables au touché, notamment à ce que l'on appelle « la main du cuir » qui consiste à ressentir sa texture et sa souplesse en le froissant dans sa main. Cette différenciation n'est pas toujours simple à appréhender pour des non-initiés. Pour les chutes destinées au broyage, cette caractéristique n'est pas prise en compte lors du tri couleur dû aux approvisionnements aléatoires, ce qui explique la grande inhomogénéité et l'irrégularité des groupes de couleurs.

1.2.3 BROYAGE DES CUIRS

Les chutes de cuir collectées ont été broyées par la société Api'Up en différentes granulométries (5 mm ; 3 mm ; 1,5 mm) avec un broyeur à couteaux industriel fabriqué sur mesure

en Italie par la société Enginplast. Un des types de cuir, après avoir été broyé à 1,5 mm, a été envoyé à l'entreprise Technopoudre pour être micronisé à 500 μm .

Les dérayures ont été utilisées directement ou après tamisage ($> 5 \text{ mm}$ ou $> 800 \mu\text{m}$) à l'aide d'un tamiseur Endecotts Minor 1430. Les poussières de dérayure de cuir tanné végétal supérieures à 400 μm (notée « PDV ») ont également été récupérées pour la fabrication de panneaux.

La taille du broyeur étant conséquente, la quantité minimum de cuir broyé possible est de 5 kg. Le remplissage du broyeur se fait à la main et au fur et à mesure, il faut donc prévoir le temps nécessaire ainsi que le temps de nettoyage entre chaque changement de couleur. Il a donc fallu s'adapter pour les phases de recherche et développement couleur qui requièrent des petites quantités mais une grande diversité de couleurs différentes.



Figure 33 : Broyeur à couteaux d'Api'Up

1.2.4 PRÉPARATION ET MÉLANGE DU CUIR BROYÉ

Il était important de connaître l'humidité des cuirs collectés afin d'adapter les dosages pour la préparation de la colle. La mesure a été effectuée à l'aide d'une balance dessiccatrice Kern DBS.

Dans certains cas, le cuir broyé a subi un traitement thermique de 1h à 100 °C en étuve (Memmert UF110, ventilation 100 %, ouverture clapet 100%). Les dérayures, réceptionnées humides, ont été séchées à l'air libre pendant une semaine, et n'ont pas été tamisées afin de conserver les différentes tailles de fibres et les poussières. Le cuir raffiné est le même que le cuir « Équestre », consistant en un mélange de cuirs provenant de LIM Group et de Voltaire. Il a été passé dans un

raffineur à papier de la société Matech Paper ou par un autre fourni par le revendeur suisse Fuchs Maschinen AG (Granomat JP 250). Il a été conservé dans un réfrigérateur, et effilé manuellement.

Pour la réalisation d'un panneau, la quantité de cuir broyé nécessaire est pesée et le mélange collant est effectué en proportion et au dernier moment pour chaque panneau. L'ensemble est ensuite mélangé dans un mélangeur de laboratoire pour homogénéiser la matière. Au fur et à mesure de l'optimisation du procédé de fabrication des panneaux, plusieurs types de mélangeur ont été utilisés, tels qu'un mélangeur à pales (anciennement fabriqué sur mesure pour l'IUT de Mont de Marsan) puis une bétonnière modifiée dans le laboratoire afin de faciliter le mélangeage (capot de fermeture et roulement pour accueillir le pistolet de pulvérisation pendant la rotation).



Figure 34 : Mélangeur à pales conçu sur mesure pour la société Api'Up

Le mélange a été réalisé de deux façons différentes :

1- Mélange avec pulvérisation de colle (noté « Pulv. ») : le cuir a été introduit dans le mélangeur, puis la formulation collante a été pulvérisée sous mélangeage. L'ensemble a ensuite été laissé en rotation pendant 5 minutes avant de le mettre en forme par thermocompression.

2- Mélange avec formation de la colle in situ (noté « I.S. ») : les constituants solides de la colle ont été introduits dans le mélangeur. L'ensemble a été mélangé pendant 5 minutes, puis l'eau a été pulvérisée sous rotation du mélangeur. La totalité a ensuite été mélangé pendant 5 minutes avant de la mettre en forme par thermocompression.

Les pulvérisations ont été effectuées à l'aide d'un pistolet à peinture (diamètre buse : 2,4 mm) connecté à un compresseur (pression : 1,5 bar) ou d'un pistolet Airless ultra Filaire Graco, buse FFLP410, vitesse 2.

Plusieurs formulations de colles naturelles ont été testées mais leurs compositions détaillées restent confidentielles. En raison des risques liés au soulèvement de matière pulvérulente et à la

manipulation de matière, les étapes allant du mélange à la sortie de presse ont été réalisées avec port d'EPI : blouse, gants latex ou nitrile jetable, masque de protection respiratoire 4255+ 3M.

1.2.5 PRESSAGE DES PANNEAUX CUIR

Une fois le mélange homogène obtenu, il est placé dans un cadre métallique amovible, sur une plaque métallique revêtue d'un film téflon. Le mélange est ensuite pré-tassé manuellement, à l'aide d'une pièce métallique plate. Après pré-tassage, le cadre est retiré et la seconde plaque téflonnée est placée par-dessus. Les faces téflonnées sont placées au contact de la matière. Les panneaux ont été pressés par thermocompression au laboratoire à l'aide de deux presses à plateaux chauffant :

- Presse de laboratoire Carver (20x20 cm, 24 tonnes) utilisée pour la phase d'optimisation.
- Presse pilote Pagnioni Monza / 3R (60x60 cm, 100 Tonnes) employée pour la fabrication de prototypes et la préproduction.

Les conditions de mise en forme (pression, durée de pressage et température des plateaux chauffant) restent également confidentielles.



Figure 35 : Presse à thermocompression Pagnioni Monza / 3R

Pour la phase de recherche et d'optimisation, les panneaux ont été pressés entre deux plaques à l'aide d'une cale métallique (5, 10 ou 20 mm) pour conditionner leur épaisseur finale. Les panneaux en préproduction devant être mis en forme dans un moule, des premiers essais ont été réalisés avec deux moules en Polyoxyméthylène (POM), de tailles réduites mais d'épaisseur de 20 mm afin de conserver l'épaisseur d'un panneau à taille réelle, et pouvoir réaliser des essais de résistance mécanique. Pour la comparaison des différents congés d'arrête, 4 rayons différents ont

été prévus (2, 3, 4 et 5 mm). Ce matériau a été choisi car il présente de bonnes performances mécaniques et chimiques, tout en étant facilement usinable mais il est faiblement conducteur de chaleur. Lorsque le moule a été préchauffé à 100°C puis utilisé dans la presse à 100°C, une mesure à l'intérieur du moule a montré que la température réelle interne lors d'un cycle de pressage atteignait 75°C à la fin du cycle.

Pour la phase de préproduction il a fallu concevoir un moule en aluminium, chemisé avec du POM pour éviter l'adhérence de la matière, et un système de piston symétrique a été imaginé pour résoudre des problématiques de moulage. Les moules ont été conçus en interne au laboratoire, sur le logiciel Catia V5, puis usinés par des entreprises sous-traitantes.

Concernant les paramètres de mise en forme, une durée générale de mise en forme de 20 minutes a été déterminée. Elle correspond au temps de prise de la colle seule, additionnée d'une marge tenant compte de la propagation de chaleur au sein du panneau.

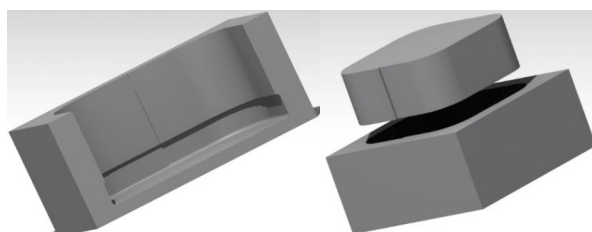


Figure 36 : Modélisation d'un moule en POM

Malgré un problème de finition des arrêtes supérieures, le rayon de 2 mm a été retenu pour les congés d'arrête. Un second moule en POM (V2) a ainsi été imaginé pour tenter de remédier à ce problème. Il s'agit d'un moulage « symétrique » avec deux pistons.

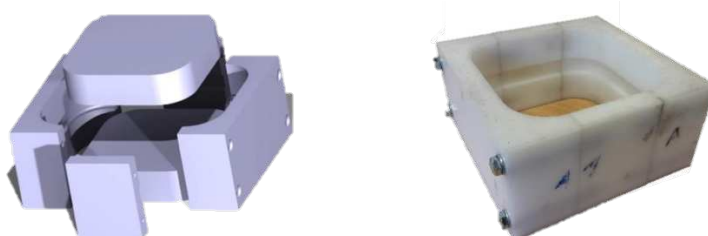


Figure 37 : Moule en POM V2 avec double piston (modélisation à gauche et moule fini à droite)

Le moule pour la pré-production a été imaginé en aluminium pour sa conductivité thermique ainsi que pour sa plus grande résistance par rapport au POM. Il était donc nécessaire de tester

l'adhérence du panneau à l'aluminium. L'utilisation de plaques en aluminium brut a conduit à une adhérence importante. Deux produits de démoulage ont alors été testés : un démoulant liquide qui n'a pas empêché l'adhérence, et une cire de démoulage qui a conduit à une très faible adhérence, mais avec la nécessité de renouveler l'application très régulièrement. C'est donc un chemisage du moule en POM qui a été retenu. Les parois intérieures du moule mesurent 22,5x22,5 cm et les plaques 29x29x0,2 cm.

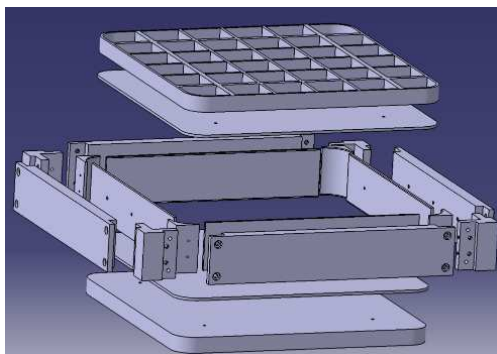
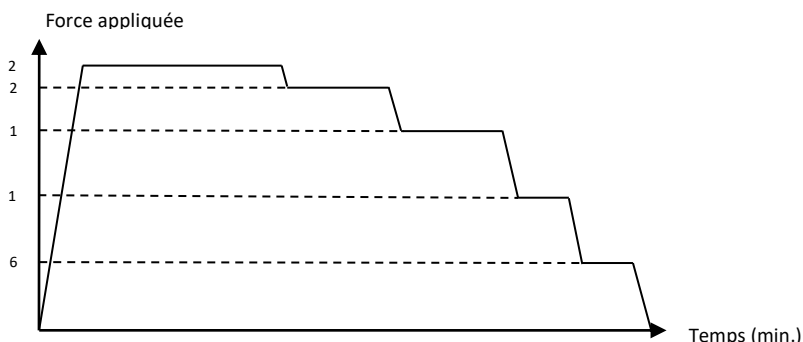


Figure 38 : Modélisation du moule en aluminium

Pour la fabrication des panneaux en composite cuir, deux premiers cycles de pressage ont été appliqués selon la presse utilisée. Un cycle présentant 5 paliers avec la « petite » presse pour la partie optimisation et un cycle présentant 4 paliers avec la « grande » presse (Figure 34) pour la partie prototypage et moulage. À la suite d'optimisations, les paliers ont été réduits au nombre de deux, dont un palier de décompression comme présenté en Figure 38.

Des essais supplémentaires d'optimisation ont été conduits de manière à réduire le temps de prise afin d'augmenter la productivité. Les paramètres étudiés ont été la quantité d'eau, la concentration de la colle et la température de pressage.



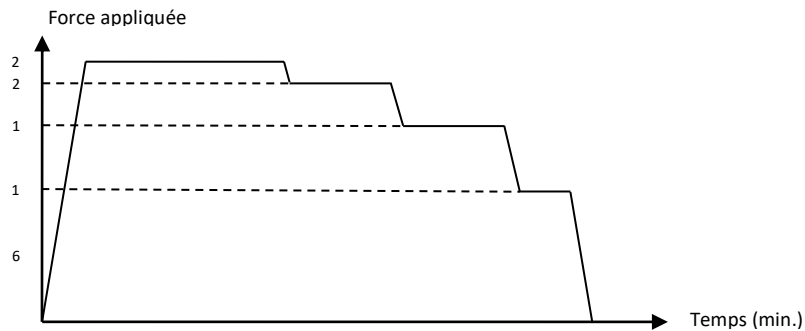


Figure 39 : Exemples de courbes de pressage des panneaux avec différents paliers de décompression

En vue de la perspective d'industrialisation, le laboratoire a accompagné l'entreprise API'UP dans l'établissement d'un cahier des charges pour l'investissement dans une presse de thermocompression. La presse industrielle retenue à ce jour a été proposée par SUTEAU-ANVER (Figure 39).

Les caractéristiques sont les suivantes :

- Presse hydraulique mécanosoudé avec vérin central montant et chariot automatique rentrant
- Plan de travail 600x600 mm
- Puissance 120 tonnes
- Précision du centrage : +/- 0.05 mm
- Ouverture entre les plaques (sans les moules) et course : 300 mm
- Chauffage inférieur et supérieur 250°C avec plaque en fer et avec rainure en T

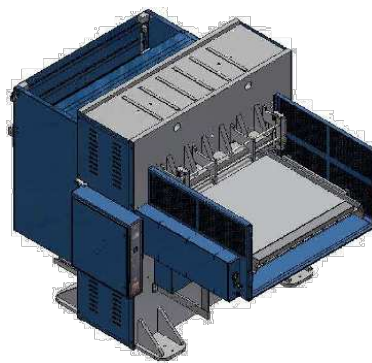


Figure 40 : presse proposée par SUTEAU-ANVER pour l'industrialisation

1.2.6 SÉCHAGE DES PANNEAUX DE CUIR

Dans un premier temps le séchage des panneaux prototypes a été effectué à l'air libre sur des grilles ou, pour certains, à l'étuve (Memmert UF110, température moyenne de 50°C environ, ouverture clapet arrière 100% et ventilation 100%). Les panneaux dits acoustiques ont été séchés pendant 2 jours dans une enceinte climatique dont la porte a été laissée entre-ouverte avec un

chauffage soufflant (2 kW) disposé en partie basse de manière à créer un courant d'air chaud ascendant. Ils ont ensuite été laissés séchés à température ambiante pendant 3 semaines. Après optimisation du procédé, les panneaux sont mis à sécher 2 jours sur grille dans un séchoir avec un chauffage soufflant puis ils sont ensuite laissés à température ambiante pendant 5 jours.

1.2.7 RECYCLABILITÉ DES PANNEAUX DE CUIR

La problématique de la recyclabilité des panneaux de cuir avait été soulevée très tôt, étant donné que ce projet s'intègre dans le cadre d'une stratégie d'économie circulaire. Quelques essais ont ainsi été entrepris pour évaluer une recyclabilité simple en refabriquant de nouveaux panneaux à partir de panneaux existants. Pour cela, des panneaux préalablement fabriqués au laboratoire selon la procédure classique ont été passés au broyeur à couteaux d'Api'Up.

Dans un premier temps, un panneau a été fabriqué en considérant le broyat comme du cuir seul, et donc en ajoutant l'eau et la colle selon les conditions classiques (12 % de colle concentrée à 20%), puis pressé à chaud. Dans un second temps, un panneau sans colle ajoutée a été fabriqué en considérant que la colle était déjà présente dans le panneau broyé. Pour cela, le broyat a été réhumidifié dans le mélangeur par pulvérisation d'eau (même quantité que lors du procédé de base) puis pressé à chaud. Un troisième panneau a ensuite été réalisé, cette fois-ci en ajoutant la moitié de la quantité de colle et d'eau du procédé initial. Puis un quatrième panneau a été réalisé sans aucun ajout, ni d'eau ni de colle, en considérant que la colle présente dans le panneau broyé pourrait être « réactivée » lors du pressage à chaud.

1.3 CARACTÉRISATION DES PANNEAUX DE CUIR « ACOUSTIQUES »

1.3.1 MESURES PHYSIQUES DES FIBRES DE CUIR

L'humidité des panneaux a été mesurée à l'aide de deux humidimètres : un humidimètre résistif de la marque Laserliner pour la mesure en surface et un humidimètre capacitif GANN HT85T pour la mesure à cœur. Les mesures en surface ont été effectuées en 5 points (4 angles + centre), tandis que les mesures à cœur ont été répétées sur 3 zones. Les valeurs retenues sont les moyennes respectives des séries de mesures. La détermination du taux d'humidité final des panneaux a été conduite en plaçant des chutes de petite taille dans une étuve Memmert à 105°C. Les morceaux étaient pesés en amont puis régulièrement, jusqu'à ce que leur masse n'évolue plus.

Le comportement thermique des fibres de cuir a été étudié par analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC) sur un appareil TA instruments Q20 et par analyse thermogravimétrique (ATG) sur un appareil TA instrument Q500, piloté par le logiciel TA Universal Analysis. Une DSC consiste à comparer l'évolution d'un flux de chaleur traversant un échantillon comparé à celui traversant une référence vide (air). Cette différence permet de déduire les enthalpies et températures de changement de phase que subit l'échantillon au cours de la montée et de la descente en température. Une ATG consiste à analyser la perte de masse d'un échantillon en fonction de l'augmentation de la température. Cela permet de détecter d'éventuels effets de décomposition, d'évaporation, de désorption, d'oxydation, d'absorption ou de sublimation. Ces analyses ont été conduites afin de déterminer si les cuirs se dégradent en dessous de la température de thermocompression. Elles ne permettent en aucun cas de déterminer la température de dénaturation, puisque ce phénomène n'est pas accompagné de perte de masse. La diminution de masse de 0 à 110°C est due à l'évaporation de l'eau.

Les conditions expérimentales de la DSC ont été les suivantes : environ 5 mg d'échantillon dans un creuset en aluminium de 20 μ L, rampe de température : 10 °/min, jusqu'à 300°C, sous azote. Les conditions expérimentales de l'ATG ont été les suivantes : environ 10 mg d'échantillon, rampe de température : 10 °/min, jusqu'à 600°C, sous azote.

Les analyses thermogravimétriques (ATG) ont été effectuées grâce à un appareil TGA Q500 de TA instruments, sous air sur une plage de température de 30 à 650°C, avec une rampe montante et descente de 10°C/min. Les analyses par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ont été réalisés par une DSCQ20, TA Instruments selon le cycle suivant : 20°C → 160°C → 20°C sous flux d'azote ou d'air. Les rampes étaient toujours de 10°C/min.

1.3.2 ESSAIS MÉCANIQUES DES PANNEAUX DE CUIR

Les premiers essais mécaniques ont été réalisés sur une machine d'essais universelle Testometric M500-50kN, équipée d'une cellule de mesure de 500 kg et pilotée via le logiciel Dynatech. Les paramètres utilisés pour les essais de rupture en flexion 3 points sont les suivants : compression arrêt distance = 15 mm, vitesse = 3 ou 5 mm/min, distance entre appuis = 140 mm.

Les paramètres utilisés pour les essais de rupture en cohésion interne (traction perpendiculaire) sont les suivants : traction arrêt distance = 15 mm, vitesse = 3 ou 5 mm/min.

La suite des essais a été réalisée sur une machine d'essais universelle SYNTAX de la marque 3R piloté par le logiciel SYNTAX 3 et reliée à une cellule de force de 2 kN. Les paramètres d'essais sont une distance entre appuis de 160 cm et une vitesse de 1 mm/min.

Les tests de flexion 3 points ont été réalisés selon la norme EN 310, et des tests de cohésion interne, en traction perpendiculaire, selon la norme EN 319. Les éprouvettes de flexion mesuraient 18x3 cm en raison d'hétérogénéités de bord, et les éprouvettes de cohésion interne 5x5 cm. Cependant, la colle thermofusible appliquée sur les éprouvettes pour cohésion interne s'est montrée inefficace. De plus, une dénaturation de surface due à la haute température de fonte de la colle a été observée empêchant la réalisation de ces essais de cohésion interne.



Figure 41 : Machine universelle SYNTAX 3R

Les dimensions des éprouvettes préparées pour les essais de flexion 3 points ont été mesurées en 3 points pour chaque face. Le volume a été calculé à partir des moyennes de ces mesures. La masse volumique (en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a été mesurée de la façon suivante, où m est la masse de l'éprouvette en grammes ; v est le volume de l'éprouvette en centimètres cube.

Le module d'élasticité en flexion E_m (en MPa) et la résistance à la flexion f_m (en MPa) sont calculés à partir des formules suivantes :

$$E_m = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{4 b t^3(a_2 - a_1)} \quad f_m = \frac{3 F_{max} l}{2 b t^2}$$

Où :

l est la distance entre les centres des appuis, en millimètres,

b est la largeur de l'éprouvette, en millimètres,

t est l'épaisseur de l'éprouvette, en millimètres,

$F_2 - F_1$ est l'augmentation de charge, en newtons, sur la section droite de la courbe charge-déformation. F_1 doit être approximativement de 10 % et F_2 approximativement de 40 % de la charge de rupture,

$a_2 - a_1$ est l'augmentation de la flèche à mi-longueur de l'éprouvette (correspondant à $F_2 - F_1$),

F_{max} est la charge de rupture, en newtons.

La résistance à la traction perpendiculaire au plan du panneau f_{tl} (nommée cohésion interne), exprimée en MPa, est calculée selon la formule suivante :

$$f_{tl} = \frac{F_{max}}{a b}$$

F_{max} est la contrainte de rupture, en newtons,

a est la longueur de l'éprouvette, en millimètres,

b est la largeur de l'éprouvette, en millimètres.

Les valeurs retenues sont les moyennes des mesures de chaque échantillon.

1.3.3 ESSAIS ACOUSTIQUES

La détermination des coefficients d'absorption des panneaux a été réalisée par la méthode du tube de Kundt (figure 41). Les échantillons ont été préparés à l'aide d'un emporte-pièce d'un diamètre de 35 mm. En mesurant les valeurs du maximum et du minimum de pression dans le tube puis en appliquant la formule ci-dessus, on obtient la valeur du coefficient d'absorption acoustique noté « α ».

$$\alpha = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

Avec :

$n = \frac{Y_{max}}{Y_{min}}$, Y_{max} et Y_{min} correspondant respectivement aux maximum et minimum de l'amplitude de tension de sortie du microphone amplifié, mesurés par oscilloscope, correspondant aux maximum et minimum de pression acoustique dans le tube.

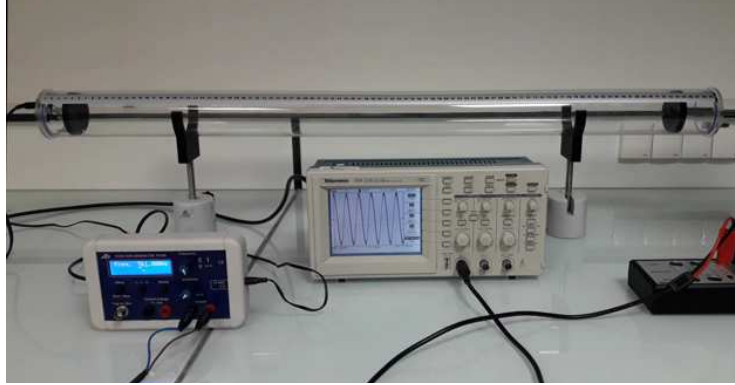


Figure 42 : Tube de Kundt

1.3.4 ANALYSES VISUELLE DES PANNEAUX DE CUIR

MESURES DE COULEUR

Les mesures de couleurs ont été réalisées avec le spectrophotomètre X-Rite Pantone Ci62 illuminant D65/2. Un premier groupe de 15 panneaux tests, de couleurs différentes, réalisés avec du cuir Epidaure broyé en 5mm, a été mesuré avec 5 mesures par panneaux. Les données $L^*a^*b^*$ ont été traitées avec le logiciel Matlab pour présenter les résultats dans un espace en 3 dimensions afin d'observer la diversité chromatique de chaque coloris de panneau.

Afin de vérifier la reproductibilité des coloris des panneaux pour donner suite au travail de tri effectué en amont, des mesures de couleurs ont été réalisées sur trois coloris disponibles au laboratoire (rouge, noir/bleu et noir/marron). Chaque panneau a été mesuré en 5 points (les 4 angles et le centre).

La reproductibilité des panneaux Granispher a été contrôlée par mesures colorimétriques. Trois coloris du nuancier ont été mesurés sur quatre panneaux avec cinq mesures (aux quatre angles et au centre) par panneau. Les quatre panneaux ont été comparés les uns avec les autres. D'après les résultats $L^*a^*b^*$, le delta E^* a été calculé pour mesurer les différences de couleurs.

MESURES DE BRILLANCE

Des mesures de brillance ont été réalisées selon la norme ISO 2813 [53], avec un brillancemètre BYK Garder, micro-tri-gloss. Les panneaux de cuir produits sont un matériau de type dit « bas brillant », ce qui nous a amené à utiliser l'angle de mesure du test à 85°.

L'unité des mesures de brillance est le GU « Gloss unity ». La zone de mesure pour l'angle 85° est de 5 x 38 mm. [54] Le nombre d'unités de brillance, détectable à l'œil nu et perçue comme significativement différent est variable selon la brillance du matériau et l'angle de mesure. L'angle de 85° est plus sensible aux différences de brillance en dessous de 10 GU. Globalement, une différence de 5 GU, lorsqu'elle est mesurée avec le bon angle, est seulement perceptible par un observateur confirmé. [55]



Figure 43 : Brillancemètre

1.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LES PANNEAUX DE CUIR « ACOUSTIQUES »

1.4.1 TRI COULEUR ET NUANCIERS CUIR

Comme indiqué précédemment, la mise en place d'un nuancier a été primordiale afin d'accompagner au mieux les équipes chargées du tri couleur. Ainsi les figures 43, 44 et 45 décrivent le résultat du travail de classement des matières premières que j'ai effectué afin que ces nuanciers servent de référence aux opérateurs qui devront effectuer le tri en amont sur les matières premières. Avec la mise en place des nuanciers, le tri se fait par les opérateurs dès l'arrivage du gisement. Ainsi, les opérateurs peuvent stocker les cuirs par couleur et permettre un meilleur contrôle et une meilleure homogénéisation de la couleur des panneaux finis.

Pour le nuancier Laffargue (Figure 43), les échantillons sont représentés sous leurs deux faces car leur verso peut être différent du recto. On constate que certains sont beige tandis que d'autres sont noir. Il s'agit de cuirs très fins utilisés pour des doublures. Une fois broyés, leur couleur du verso peut ressortir, mélangées aux granulats de la couleur du recto. Ils sont donc à prendre en compte car il n'est pas possible de les évincer du tri car ils représentent une quantité importante du gisement.



Figure 44 : Nuancier du gisement des cuirs Laffargue (recto/verso)



Figure 45 : Nuancier du gisement des cuirs Epidaure

L'observation des échantillons des cuirs Epidaure s'est effectuée sur le verso car c'est l'aspect le plus proche, visuellement, du broyat et donc du panneau final. Un travail de nomination des couleurs a été effectué sur ce nuancier pour faciliter la communication. Comme expliqué dans la partie « Introduction, Dénomination des couleurs » il existe différentes méthodes de nominations, ici ce sont des termes de couleurs + un terme référentiel ou uniquement un des deux qui ont été choisis. L'ajout d'un qualificatif a parfois été nécessaire pour différencier des teintes proches.

Un paramètre important venait perturber ce travail de tri, celui de l'exposition lumineuse. Les sacs de chutes de cuir étaient stockés sous un chapiteau extérieur, la lumière y était donc variable et modifiée par la teinte de la toile en plastique. Après constat de cette problématique de perception des couleurs qui est dû au phénomène de métamérisme (cf Introduction, Théorie de la couleur), les échantillons ont été observés sous différentes sources lumineuses afin de trouver le meilleur moyen d'expertiser correctement les chutes lors du tri couleur. Un exemple avec des échantillons orange est présenté dans la figure 45 ci-dessous. On constate que l'observation sous chapiteau est faussée,

celle à la lumière du soleil étant la plus fiable, quant à l'image numérique, elle est légèrement différente de celle au soleil mais elle permet tout de même l'identification des différentes teintes.

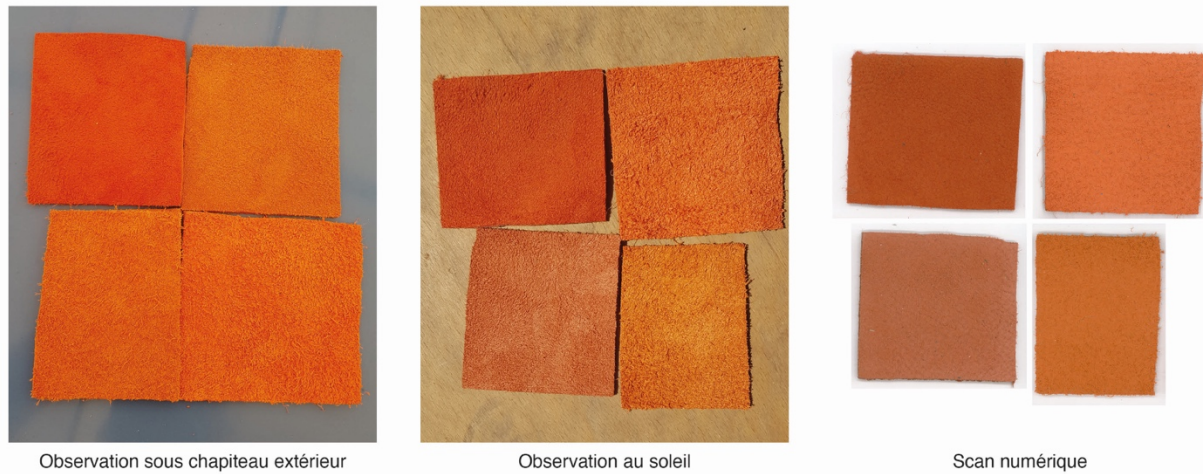


Figure 46 : Comparaison d'échantillons sous différentes sources lumineuse pour mettre en évidence le phénomène de métamérisme

Au vu du grand nombre de teintes différents et des quantités variables du gisement, il a été nécessaire de réaliser un travail de regroupement des teintes les plus proches afin de former des « groupes couleurs ». Les groupes ont donc été constitués en mélangeant les deux gisements (Laffargue et Epidaure) afin de réunir des quantités suffisantes pour envisager les futures productions pour la commercialisation.



Figure 47 : Exemple du travail de groupes couleurs à partir des échantillons de cuir

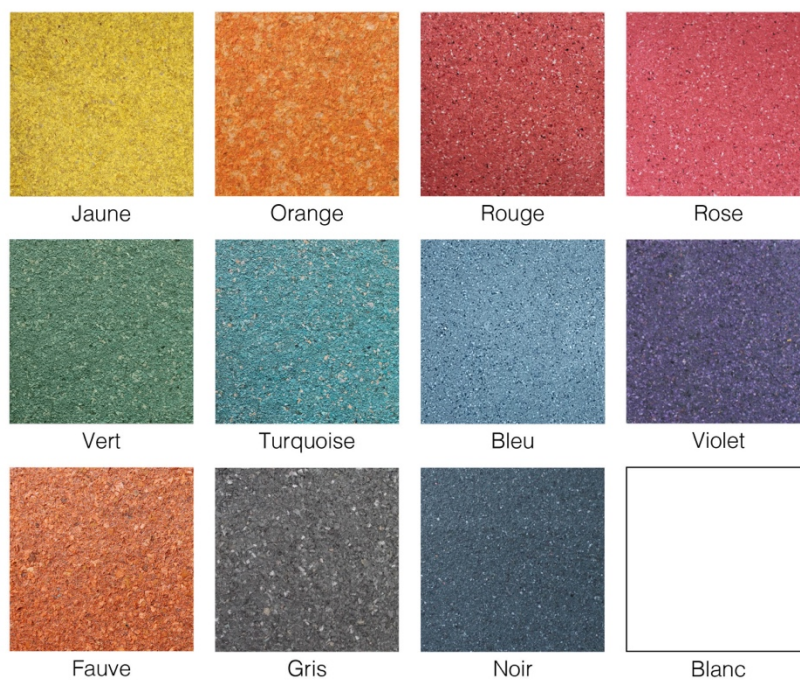


Figure 48 : Nuancier de panneaux avec les cuirs Laffargue

1.4.2 DÉVELOPPEMENT DES PANNEAUX DE CUIR « GRANISPHER »

A l'issue de la première phase qui a démarré en 2019, un nouveau matériau composite formé à partir de broyat de cuir et d'une formulation à base de colle naturelle a été mis au point au laboratoire. Ses propriétés mécaniques et acoustiques ont été évaluées et ont validé son utilisation pour la fabrication de panneaux à visée occultant et absorbant acoustique. Ce matériau a été mis en forme par thermocompression sous forme de panneaux simples pendant la partie optimisation, puis par moulage sous pression pour la fabrication des premiers prototypes à la demande de la société API'UP. La seconde phase qui s'est déroulée de 2020 à 2021 a permis l'optimisation du matériau et des prototypes. Cela s'est concrétisé par l'amélioration des conditions de préparation du composite (moulage, formulation) et de la conception objet pour converger vers une adéquation entre le design et la solidité des prototypes. Les éléments « paravent », « bureau » et « suspendu » ont ainsi été fabriqués.

Avec le premier moule en POM, il a été observé une problématique de congé d'arrêtes lors du moulage avec un seul piston. La partie inférieure n'était pas comblée, comme on peut le voir sur la figure 48. Une réflexion a donc été menée pour une deuxième version de moule avec cette fois-ci un double piston afin de permettre un pressage symétrique.

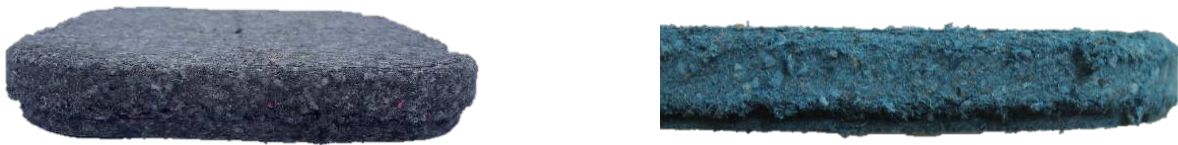


Figure 49 : Panneau obtenu avec le moule V1 à gauche, et le moule V2 à droite

Une fois ce second moule fabriqué, nous avons observé que la problématique des congés d'arrêtes était toujours présente mais cette fois sur les deux faces. Les arrêtes inférieures et supérieures ne sont toujours pas comblées. Après discussion avec des spécialistes du moulage, aucune solution simple n'a été déterminée pour remédier à cette problématique. Ainsi, après accord du studio de design La Racine, les congés d'arrête ont été abandonnés au profit d'arrêtes droites.

Mise en place de l'optimisation du protocole :

Différents paramètres ont été optimisés dans des conditions proches de celles de la future production industrielle, en conservant le principe de double piston du moule POM V2.

Le but était d'améliorer deux caractéristiques importantes : le taux de colle et la densité. Ce qui permettrait d'alléger la masse finale en plus de l'aspect éco-conception, et de diminuer les coûts

de production. Un troisième paramètre a également été modifié pour optimiser le protocole et la formulation : le système de mélangeage (mélangeur ou bétonnière). Une bétonnière adaptée au volume de mélange a été acquise par API'UP et modifiée au laboratoire pour faciliter son utilisation (capot de fermeture avec roulement intégré pour accueillir le pistolet de pulvérisation).



Figure 50 : Bétonnière modifiée en cours d'utilisation

Plusieurs protocoles de mélanges différents ont été testés afin d'optimiser au mieux le procédé.

Tableau 4 : Protocoles permettant de tester la diminution du taux de colle

Référence (n° test)	3-32	3-33	3-34	3-35	3-36
Mélange	Mélangeur	Mélangeur	Mélangeur	Mélangeur	Mélangeur
Cuir	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu
Ordre de mélange	A	A	A	B	B
Densité théorique	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7
% colle / cuir	8%	8%	10%	8%	8%
% concentration colle	15%	15%	18%	13%	13%

D'autres essais ont également été réalisés afin de diminuer la densité (objectif 0,4), à la suite d'une demande d'un client afin d'améliorer la « punaisabilité » du panneau.

Tableau 5 : Protocoles permettant de tester la diminution de la densité

Référence (n° test)	3-37	3-39	3-43
Mélange	Mélangeur	Bétonnière	Bétonnière
Cuir	Bleu	Bleu	Bleu
Ordre de mélange	A	A	C
Densité théorique	0,4	0,4	0,4
% colle / cuir	8%	8%	8%
% concentration colle	5%	5%	5%

Observation sur les différents panneaux obtenus :

Les essais menés avec un taux de colle de 8% ont généré des panneaux (3-32, 33, 34, 35, 36) pas assez cohésifs et pelucheux, tout comme les essais menés sur la densité à 0,6 (panneaux

3-44, 52, 53, 56, 57) et à 0,4 (panneaux 3-37, 39, 43). La diminution de la densité à 0,6 (panneaux 3-33, 34, 35, 44, 52, 53, 56, 57) a également rendu les panneaux pelucheux et pas assez cohésifs. D'autres essais pour expérimenter une densité à 0,4 ont été menés mais les résultats se sont avérés très friables et pelucheux (panneaux 3-37, 39, 43).

A l'issue de ces essais de mise en œuvre, les paramètres initiaux (densité 0,7, taux de colle 12 %, concentration de la colle 20 %) ont ainsi dû être conservés. Néanmoins, la bétonnière modifiée a été adoptée pour la production. En effet, le mélangeage est satisfaisant, tandis que le mélangeur à pales est sous-dimensionné pour les panneaux finaux. La diminution d'eau ainsi que l'augmentation de la température au-delà de 70°C ont conduit à l'apparition de tâches sur la surface des panneaux. Par ailleurs, les panneaux présentant une densité inférieure à 0,7 se sont montrés trop friables et pelucheux. Les conditions retenues sont donc une température de pressage inférieure à 70°C, une densité 0,7 et une concentration de la colle à 20%.

A la suite des premières optimisations réalisées, des prototypes de panneaux acoustiques ont été produits selon une procédure de pré-industrialisation. Le point d'amélioration essentiel a été la création d'un moule en aluminium chemisé POM. Nous avons optimisé la conception pour améliorer la finition des arrêtes avec un pressage symétrique permettant un moulage plus fin. Un post-usinage des arrêtes a quand même été nécessaire pour obtenir une finition satisfaisante. Plusieurs techniques ont été testées : un cutter, une défonceuse munie d'une fraise ¼ de rond 2mm et une Dremel munie d'une fraise à meuler.

Durant la phase de recherche précédente, une optimisation a été réalisée. Les panneaux obtenus ont présenté des propriétés satisfaisantes pour l'entreprise (performances mécaniques, acoustiques, esthétiques, etc.) et ont permis de valider une nouvelle matière à intégrer dans le répertoire proposé par API'UP : le « GRANISPHER ».

Des éléments de mobilier ont été ainsi fabriqués : les modules « EQUINOX », actuellement commercialisés sous la marque OSPHER (figure 51). Des améliorations structurelles restaient cependant nécessaires.

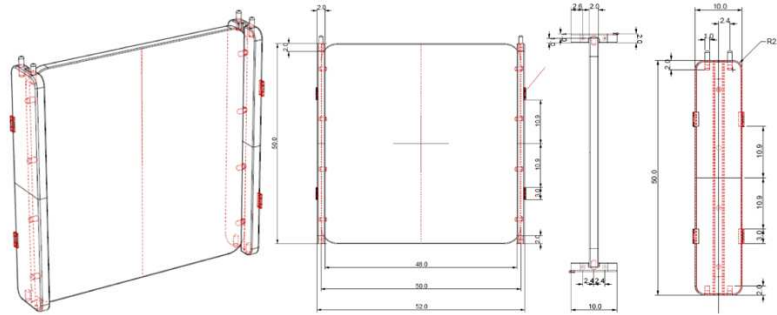


Figure 51 : Plans des éléments de paravents proposés par le studio La Racine



Figure 52 : Prototypes des éléments de mobilier avec les panneaux de cuir

Après 3 années de R&D en collaboration avec API'UP, des éléments de mobilier professionnel ont été imaginés, conçus et fabriqués au laboratoire en partenariat avec le studio de design La Racine. A l'issue de cette aventure, une nouvelle marque a vu le jour, créée par API'UP et dénommée OSPHER, pour commercialiser les produits intégrant les nouveaux matériaux élaborés dans le cadre de ce projet : Les premiers éléments composés du dénommé « GRANISPHER » ont été exposés en 2022 dans le cadre de la Paris Design Week, Le French Design à la galerie Via à Paris (Annexe n°2). Cette exposition proposée à la Galerie Design Ameublement Français a pour objectif de présenter les innovations et projets intéressants dans le domaine de l'ameublement. Chaque entreprise participante a pu exposer ses créations au sein de la galerie pour la durée d'une semaine. Les panneaux en Granispher des modules présentés à cette exposition ont été fabriqués au laboratoire selon les dernières optimisations et assemblés à API'UP.

1.4.3 INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-MÉCANIQUES

• ANALYSES THERMOGRAVIMÉTRIQUES

Des analyses ATG ont été conduites afin de déterminer si les cuirs se dégradent en dessous de la température de thermocompression. Ces mesures ne permettent pas de déterminer la

température de dénaturation, puisque ce phénomène n'est pas accompagné de perte de masse. La diminution de masse de 0 à 110°C est due essentiellement à l'évaporation de l'eau.

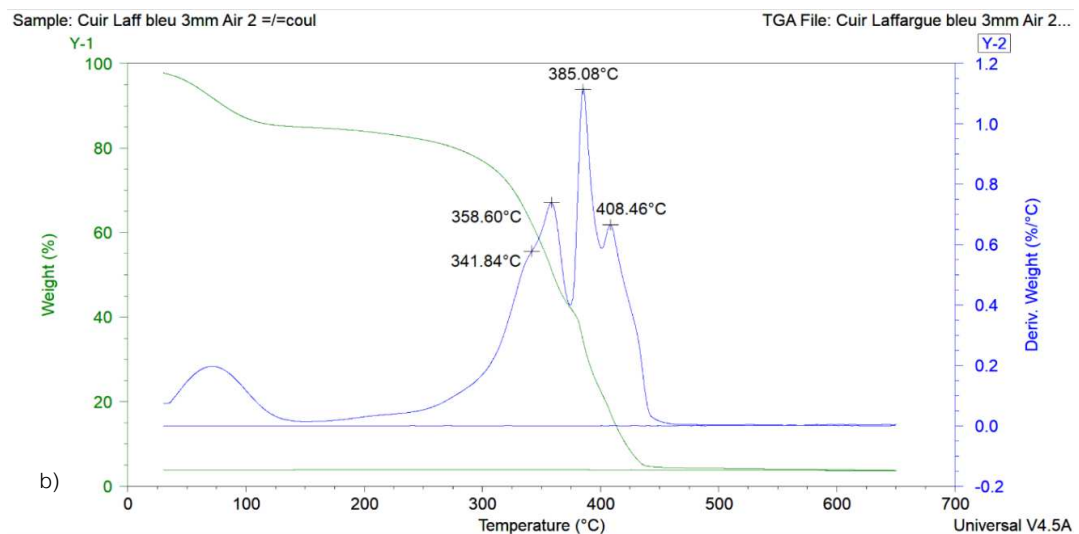
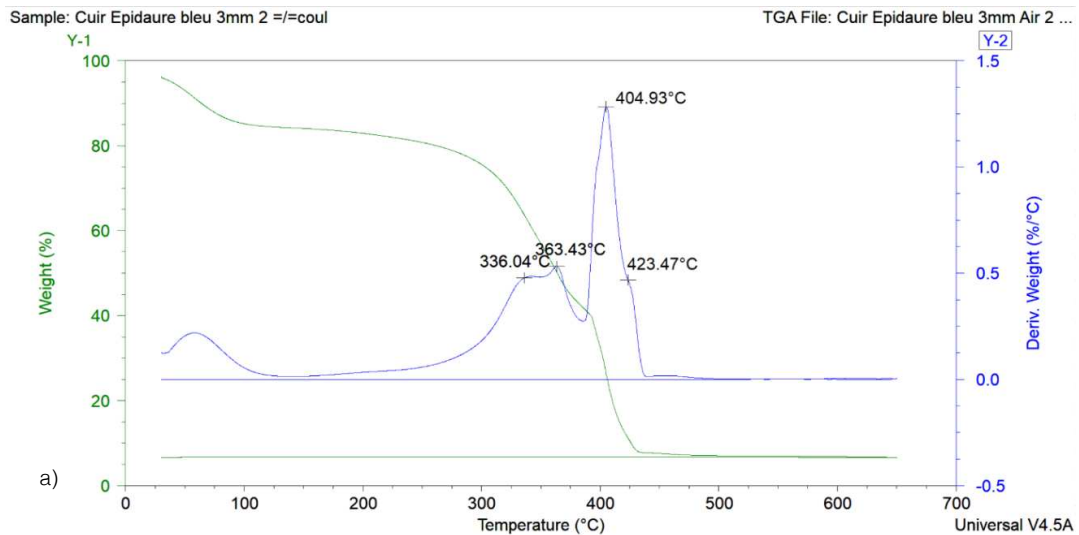


Figure 53 : Analyse thermo gravimétrique d'échantillons de cuir, a) cuir Epidaure b) cuir Laffargue

• ANALYSES DES CONDITIONS DE SECHAGE

Durant toute la première phase, le séchage des panneaux s'est effectué à l'air libre durant plusieurs jours. Il s'est révélé très long (supérieur à une semaine pour atteindre 15 %RH) pour les panneaux aux dimensions des prototypes (2 cm d'épaisseur). Une optimisation du séchage est donc apparue nécessaire pour l'industrialisation. Deux paramètres ont alors été étudiés : le tuilage potentiel

lors d'un séchage en étuve et l'évolution de l'humidité de panneaux séchés soit en étuve, soit en enceinte climatique.

Dans un premier temps, 3 panneaux ont été placés entiers en enceinte climatique, dans les conditions suivantes : 50°C et 40 %HR. Selon l'équilibre hygroscopique des bois en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant, ces conditions devraient conduire le matériau à une humidité de l'ordre de 8 %HR. Seule l'humidité en surface a été mesurée pendant 3 jours car les panneaux étaient destinés aux prototypes V2.2 présentés dans la partie suivante : la mesure à cœur à l'aide d'un humidimètre capacitif à pointe aurait conduit à la formation de trous disgracieux.

Une rapide chute de l'humidité a été observée (contrôlée plus finement pour le panneau 10), avec une stabilisation aux alentours de 11% après 2 jours de séchage. L'avantage de l'enceinte climatique est le contrôle de l'humidité relative de l'air, permettant un équilibre de l'humidité du matériau. Cependant, le coût d'investissement d'un tel équipement industriel est élevé, et un séchage en étuve, moins onéreux, constituerait une solution industrielle préférable. Un suivi du séchage en étuve a donc été réalisé. Cependant, la dimension de l'étuve étant insuffisante pour introduire un panneau entier : chaque panneau a été coupé en deux parties égales après pressage. Elles ont ensuite été placées dans l'étuve, selon les conditions suivantes : 50°C, ventilation 100% et ouverture du clapet 100%. Un relevé de l'humidité en surface et à cœur a été effectué durant 3 jours (Figure 53).

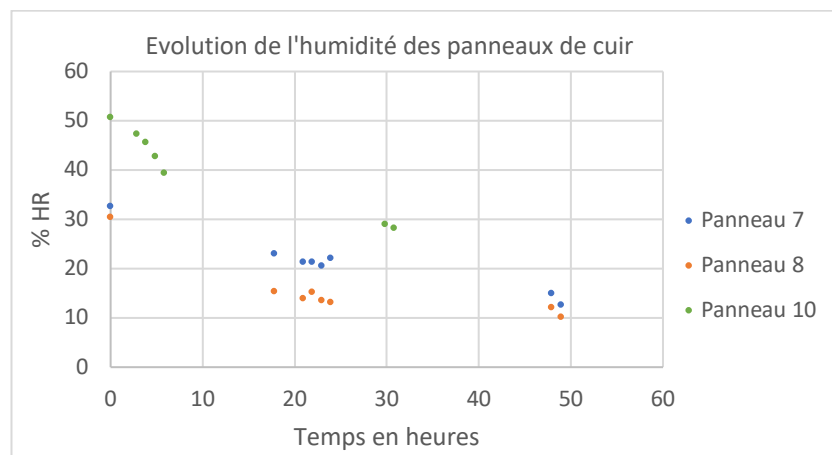


Figure 54 : Suivi de l'humidité des panneaux au cours du temps lors du séchage en enceinte climatique

• ANALYSES DE L'ABSORPTION ACOUSTIQUE

Des tests acoustiques ont été effectués à l'aide d'un tube de Kundt ($D = 35 \text{ mm}$) sur les panneaux produits avec la procédure validée pour la pré-production. Les résultats sont présentés en figure 54. Il s'est avéré que le coefficient d'absorption acoustique était supérieur à 0,4 entre 2 et 6,5 kHz, mais en dessous pour des plus basses fréquences, et ce pour trois couleurs de panneaux évaluées (vert, bleu clair et bleu foncé). Ainsi, les performances acoustiques étaient proches de celles de panneaux de liège aggloméré de même épaisseur (20 mm), sur la gamme de fréquence 500-1000 Hz et 4-6,5 kHz, mais inférieures pour la gamme 1250 à 3000 Hz.

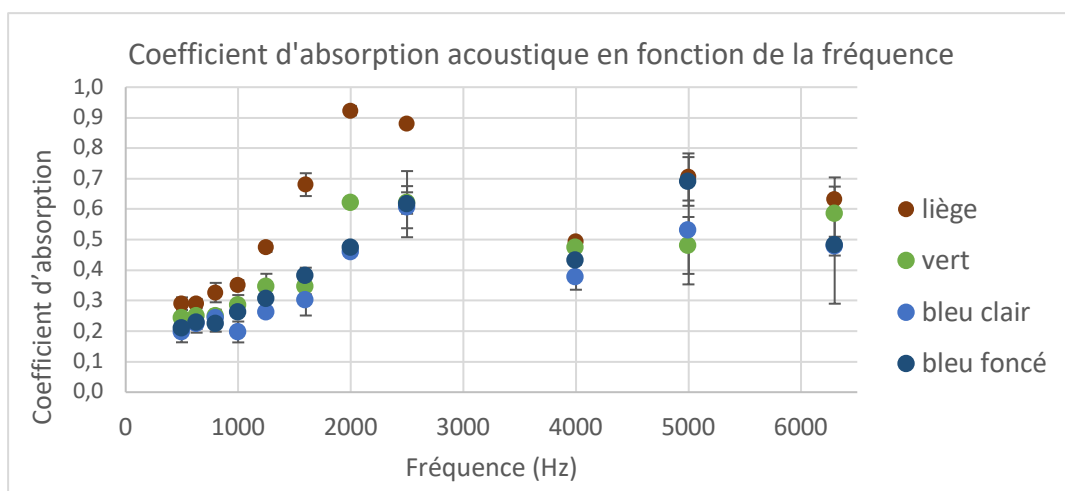


Figure 55 : Analyse de l'absorption acoustique de trois échantillons de panneaux de cuir comparé à un échantillon de liège

1.4.4 RECHERCHES ET OPTIMISATION DES MÉLANGES DE COULEURS

Un travail de recherche a été mené sur les mélanges de couleurs des différents cuirs du gisement. Le but était de valoriser un maximum de couleurs ainsi que de pouvoir créer différentes nuances. A la demande du studio de design La Racine, certains mélanges devaient être éclaircis avec du blanc. La problématique principale de ce travail de mélange est la quantité du gisement disponible dans chacune des différentes couleurs, il a donc fallu s'adapter et anticiper les futurs volumes de production nécessaires. Les photographies ci-dessous montrent une partie des expérimentations chromatiques réalisées en mélangeant différentes couleurs de cuir, de différentes provenances ainsi que différentes granulométries. L'élaboration d'un « nuancier panneaux » est nécessaire afin d'optimiser le tri en amont ainsi que pour maîtriser la production. Celle-ci sera en fonction des quantités disponibles tout en assurant une certaine reproductibilité nécessaire à la production de panneaux haut de gamme.

Cette expérimentation chromatique permet de constater que le champ des possibles est immense. On observe que certaines combinaisons permettent de valoriser des teintes présentes en trop faible quantités dans le gisement pour pouvoir proposer des panneaux unis de cette même teinte. Le blanc par exemple, présent en trop petite quantité, a permis d'éclaircir certains coloris ou en contraster d'autre. Le mélange de différentes granulométries apporte une autre apparence au matériau et s'est avéré intéressant. Cependant le broyage en 1,5 mm génère trop de perte, il n'a donc pas été retenu pour l'instant. Certaines couleurs de cuir ont été jugées moins esthétiques, l'enjeu était donc de trouver les bonnes combinaisons afin de démontrer que l'ensemble du gisement était exploitable.

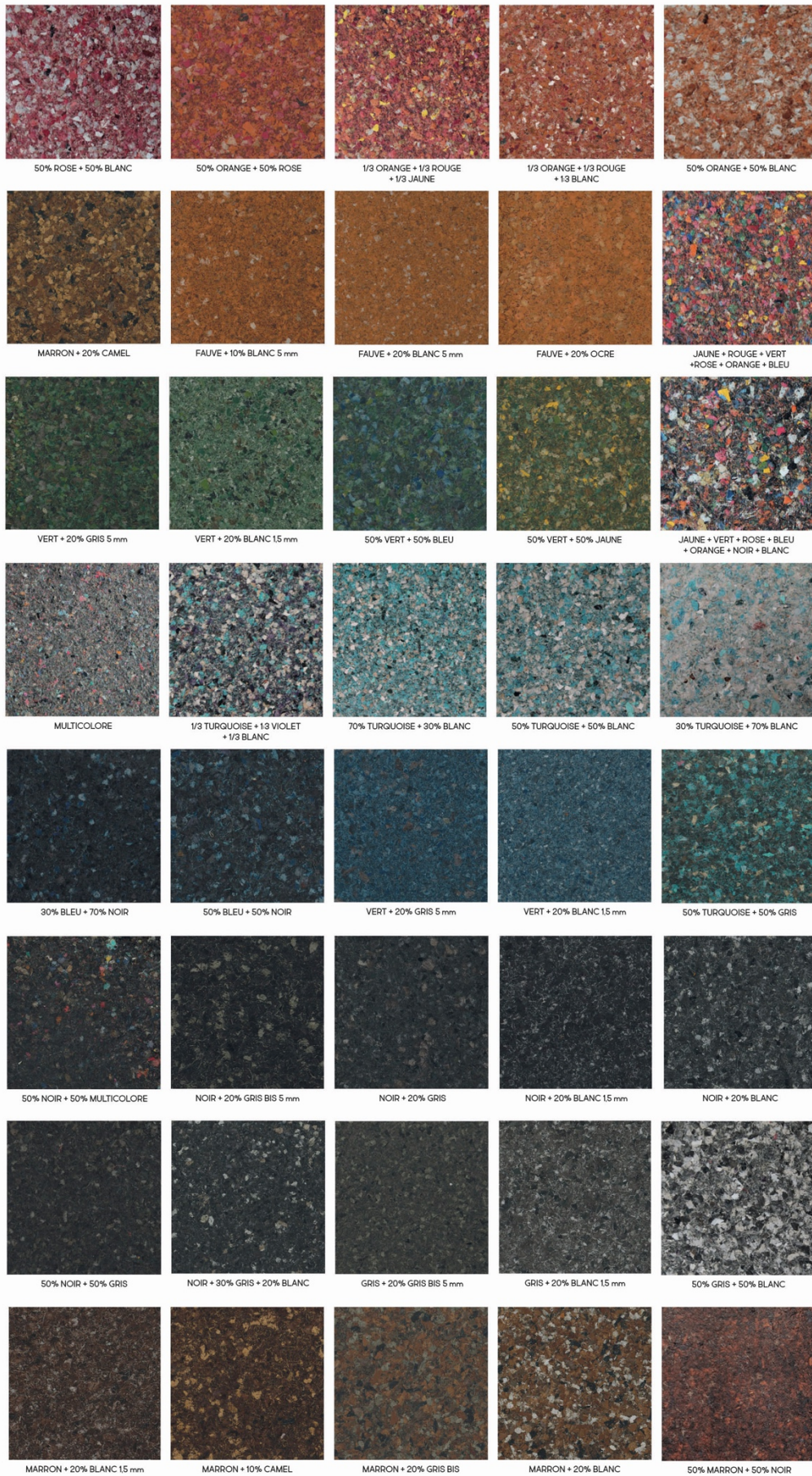


Figure 56 : Expérimentation chromatique avec différentes typologies et de granulométries de cuir

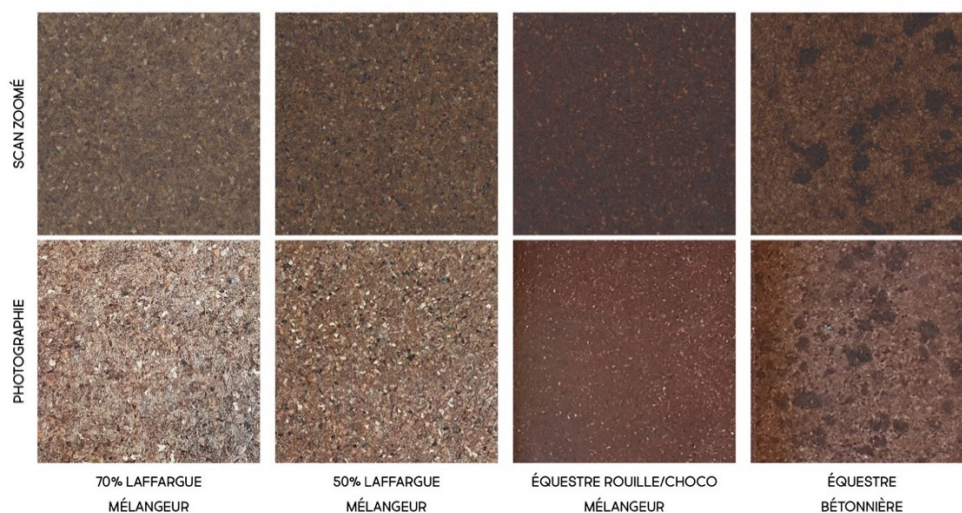


Figure 57 : Recherches chromatique pour la teinte marron du nuancier OSPHER

Ces expérimentations de mélanges de couleurs ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants. Cependant il a fallu choisir parmi les teintes de cuir présentes dans les plus grandes quantités des différents gisements afin d'anticiper les volumes de production. C'est donc sept coloris qui ont été retenus pour former ce premier nuancier de Granispher. La composition de chaque coloris est présentée dans le tableau n°6. Le travail de nomination de ces teintes a été réalisé par le studio de design La Racine.

Tableau 6 : Composition des mélanges de couleurs sélectionnés pour la gamme Ospher

Bleu Céleste		Bleu Odyssee	
30% Bleu	Epidaure Bleu Foncé	50% Epidaure	Epidaure Bleu Foncé
	Epidaure Bleu Clair		Epidaure Bleu Clair
70% Noir	Cheval	50% Laffargue	Laffargue Bleu
	Laffargue		
	Epidaure		
Brun Cacao		Brun Liège	
50% Marron	Cheval Marron chocolat	50% Epidaure	Epidaure Fauve
	Cheval Marron rouille	50% Laffargue	Laffargue Fauve
50% Noir	Cheval		Brun Ecorce
	Laffargue	Cuir Cheval	50 %Marron chocolat
	Epidaure		50 % Marron Rouille
Rouge Grenade		Noir Ardoise	
50% Epidaure	Epidaure Rouge	33 %	Epidaure Noir
50% Laffargue	Laffargue Rouge	33 %	Laffargue Noir
		33 %	Cheval Noir

: Réalisation du nuancier Granispher pour la marque Ospher



Figure 58 : Nuancier Granispher pour la marque Ospher

1.4.5 MESURES DE COULEUR

Ce travail de mesure a été réalisé à partir d'un nuancier couleurs de panneaux de cuir Epidaure (figure 44). Cette typologie de cuir était nouvelle dans le gisement au moment des essais. Les 15 panneaux du nuancier ont été mesurés avec un spectrocolorimètre à raison de cinq mesures par panneaux. Le but était de démontrer la diversité chromatique d'un seul et même panneau réalisé à partir d'une seule couleur de cuir. Les résultats sont présentés dans les graphiques de la figure 59 avec L^* en ordonné et a^* et b^* en abscisse.

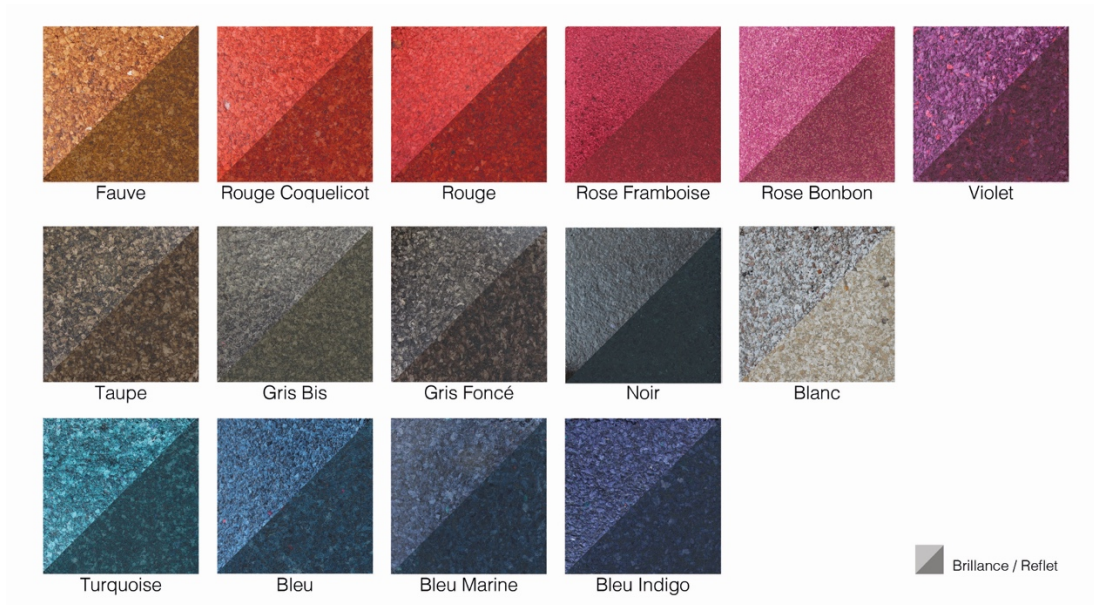


Figure 59 : Nuancier de panneaux réalisés avec le cuir Epidaure en 5mm

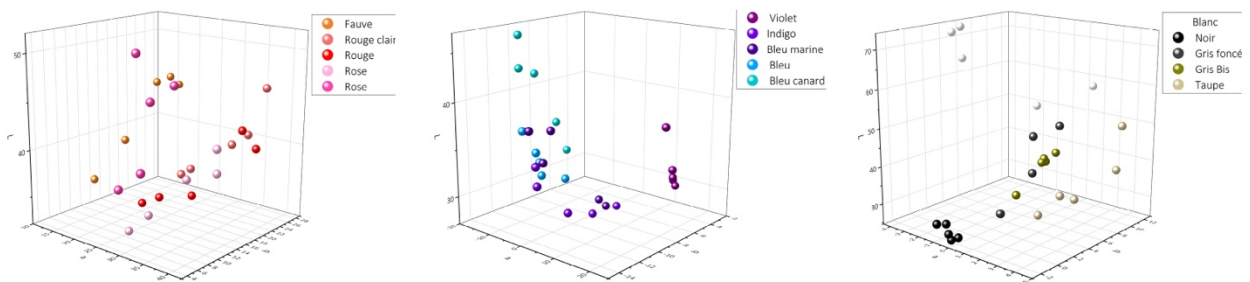


Figure 60 : Mesures de couleurs sur 15 panneaux de couleur différente avec 5 mesures par panneau

Les couleurs analysées par le spectrocolorimètre ne correspondent pas au ressenti visuel du panneau. Les données numériques exprimées par l'appareil ont été rentrées dans le logiciel InDesign afin de comparer le rendu visuel avec la photographie des panneaux. Le fait que ceux-ci aient une homogénéité de couleur relative, est vraisemblablement à l'origine du problème. Dans le cadre de la commercialisation, cette réflexion sensorielle est importante afin de pouvoir réaliser un nuancier fidèle pour la future marque.

La figure 60 présente les résultats du contrôle de reproductibilité des panneaux Granispher. On observe que la majorité des résultats sont en dessous de $\Delta E > 2$, ce qui signifie que la différence de couleur est perceptible seulement par un observateur expérimenté. Les résultats supérieurs à $\Delta E^* > 2$ restent inférieurs à 3, il s'agit donc d'une différence perceptible même par un observateur inexpérimenté mais cette différence reste faible. Le matériau Granispher n'est pas un matériau monochrome, comme le montrent les résultats précédents (figure 59), ce qui explique les différences

de teinte entre les panneaux d'un même coloris. Ces différences restent faibles, ce qui valide la reproductibilité des panneaux Granispher grâce au travail de tri couleur qui a été mis en place en amont.

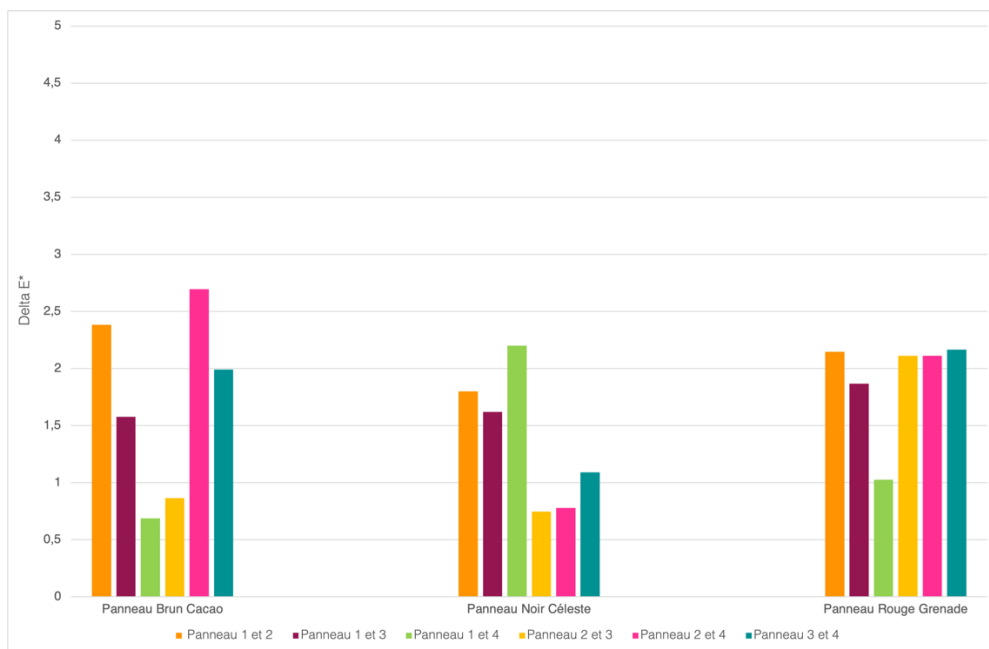


Figure 61 : Contrôle de la reproductibilité des coloris des panneaux Granispher

Rappel de l'interprétation des résultats :

- $0 < \Delta E < 1$: est une différence non perceptible, ou un seuil de perception par un observateur expert.
- $1 < \Delta E < 2$: est une différence presque invisible, perceptible seulement par un observateur expert.
- $2 < \Delta E < 4$: est une différence perceptible et visible, même par un observateur inexpérimenté.
- $4 < \Delta E < 5$: est une différence notable, ou limite d'acceptation comme « une même couleur ».
- $\Delta E > 5$: est évaluée comme une autre couleur, les observateurs voient deux couleurs distinctes. [25]

1.4.6 MESURES DE BRILLANCE

D'après les résultats des mesures de brillance des panneaux cuir présentés dans les graphiques des figures 61 et 62, et sachant que le seuil de faible brillance est de $UB < 10$, on constate que ce nouveau matériau est très peu brillant. Les résultats sont tous en dessous de 4 UB, ce nouveau matériau peut donc être qualifié de mat.

Les différences de granulométries ne permettent pas d'établir une corrélation avec les résultats de brillance. Les mesures étant faites à l'aide d'un appareil portatif avec une zone de mesure

réduite, le placement de l'appareil sur le panneau reste aléatoire. Cependant la moyenne des 5 mesures par panneau permet d'obtenir des premiers résultats cohérents.

Pour le premier graphique (figure 61), les résultats ont un faible écart les uns avec les autres, à l'exception du coloris coquelicot et du bleu marine, mais cela reste indissociable à l'œil nu.

Pour le second graphique (figure 62), les écarts entre les résultats sont très légèrement supérieurs, mais là encore l'observation des panneaux ne permet pas de différencier leur brillance. Les panneaux n° 4, 6, 14, 16 et 18 contiennent 20% de broyat à 1,5 mm et pourtant leurs résultats sont variables. Le pic du panneau n°6 peut être expliqué par la forte présence de cuirs pelliculés dans le groupe vert, et même une fois broyé, ces petits morceaux plus brillants que les autres se retrouvent sur la surface du panneau et donc possiblement dans la zone de mesure. Ce résultat de 3,2 GU reste faible sur l'échelle de la brillance. L'ensemble des panneaux mesurés dans le second graphique sont présentés dans la figure 63.

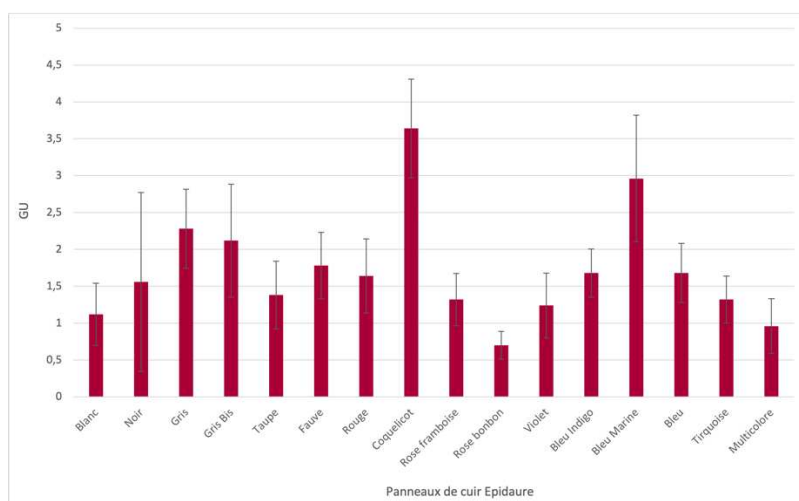


Figure 62 : Mesure de brillance des panneaux de cuir Epidaure en 5 mm

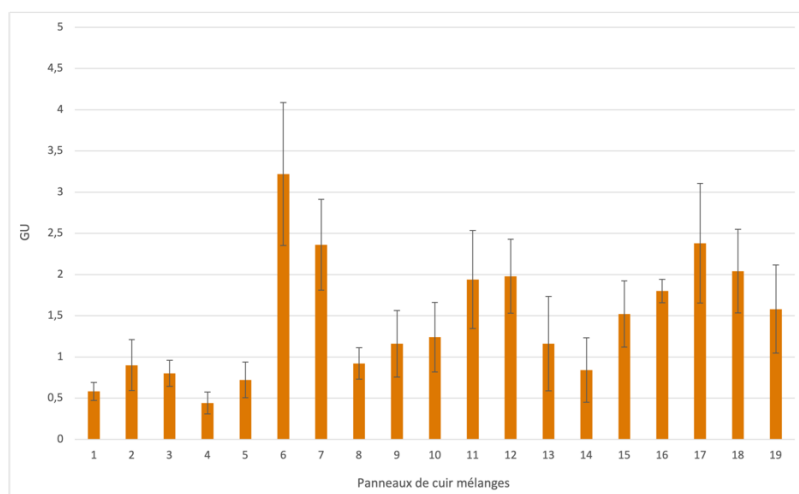


Figure 63 : Mesure de brillance des panneaux de cuir (mélange de granulométrie)

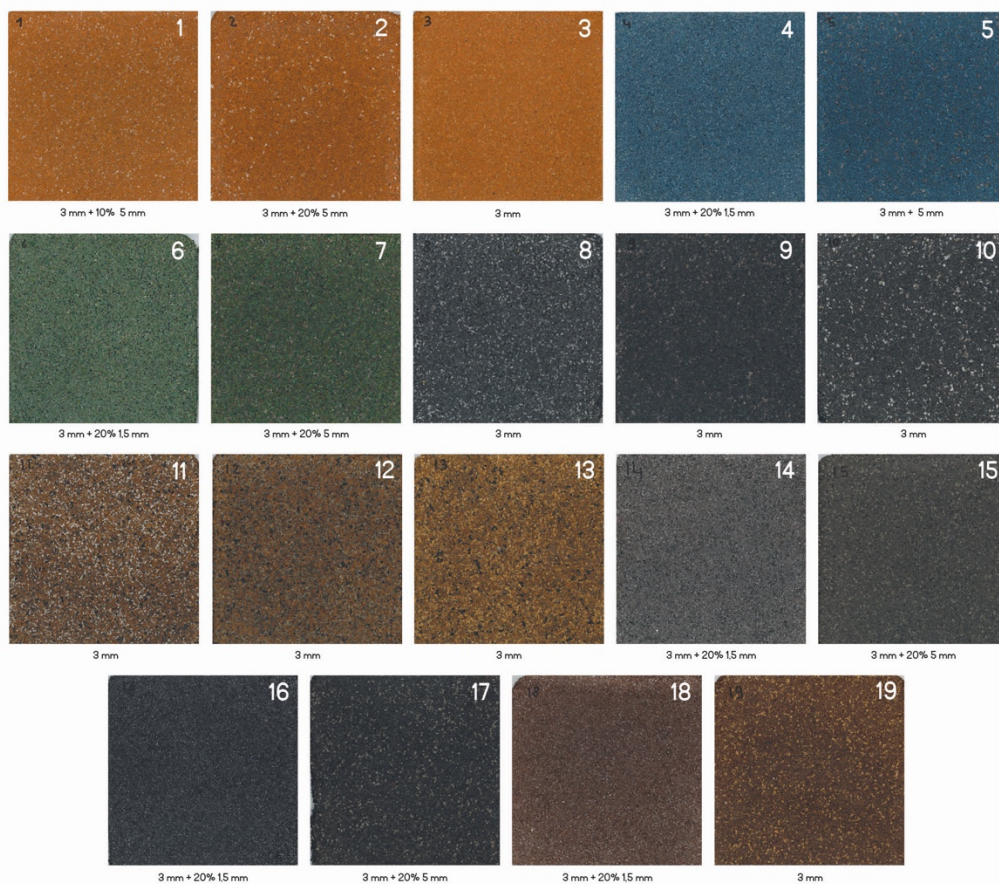


Figure 64 : Mélange de granulométrie des panneaux de cuir présentés dans les mesures de brillance

1.4.7 INFLUENCE DU RECYCLAGE

Les résultats des essais de recyclabilité des panneaux de cuir sont présentés ci-dessous, en référence à la figure n°64 :

a) Le panneau obtenu avec l'ajout de colle et d'eau s'est révélé très compact, dense et solide avec une surface plus lisse que les panneaux classiques.

b) Le panneau sans aucun ajout supplémentaire ne présente pas une bonne cohésion et on observe également qu'il a gonflé après le pressage.

c) Le panneau obtenu avec l'ajout de la moitié de la proportion de colle/eau est moins dense que le premier mais sa cohésion est plus faible.

d) Le Panneau avec l'ajout d'eau a montré une cohésion insuffisante, avec un problème de friabilité.



Figure 65 : Panneaux recyclés

Ces premiers essais de recyclage ont permis d'observer qu'un ajout d'eau et de colle était nécessaire pour obtenir une bonne cohésion ainsi qu'une bonne compression du panneau. Ces résultats sont encourageants pour la suite et démontrent la recyclabilité des panneaux. L'idéal serait donc de trouver une optimisation intermédiaire afin de ne pas obtenir un panneau trop dense et trop lourd mais en conservant de bonnes propriétés mécaniques.

1.5 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DES PANNEAUX CUIR

« RIGIDES »

Le procédé est identique à celui pour les panneaux « acoustiques » mais avec différentes typologies de cuir.

1.5.1 CONDITIONS EXPÉRIMENTALES DES ESSAIS DE « LIÈGE DE CUIR »

Des panneaux de faible densité ont été préparés, toujours avec le mélange collant naturel, pour optimiser ce type de panneaux ressemblant à du liège. Les conditions communes sont les suivantes :

Tableau 7 : Conditions de mise en œuvre de panneaux de « liège de cuir »

REFERENCE	3-5	3-40	3-45	3-46	3-48	3-49	3-50	3-54
CUIR	Micronisé	Micronisé	Laffargue 1,5 mm	Laffargue 1,5 mm	Micronisé	Micronisé	Epidaure 1,5 mm	Epidaure 1,5 mm
PROCEDURE	A	B	B	B	B	B	B	B
MELANGE	Mélangeur	Bétonnière	Bétonnière	Bétonnière	Mélangeur	Mélangeur	Bétonnière	Mélangeur
TAUX DE COLLE	8 %	8 %	8 %	12 %	10 %	10 %	8 %	12 %
CONCENTRATION DE COLLE	5 %	5 %	7 %	5 %	3 %	5 %	5 %	5 %
MOULE	V2	V2	V2	V2	V1	V1	V2	V2

1.5.2 CONDITIONS EXPÉRIMENTALES D'AJOUT DE FIBRES LONGUES

Plusieurs typologies de fibres ont été évaluées : Cuir fibreux : dérayures wet blue (« DWB ») ou dérayures de cuir tanné végétal (DV) ; Textile soie défibré (SD) ; Fausse lisière soie/polyester (FL). Deux colles ont été utilisées (à base de tanin ou de caséine) selon deux modes d'introduction (I.S. et Pulv.). Dans le cas de la pulvérisation de la colle, de nouvelles formulations plus adaptées à cette technique ont été élaborées : Caséine 3a et 3b. En effet, le mélange initial (Caséine 1a) tend à s'épaissir rapidement et à boucher le système de pulvérisation. Par ailleurs, un pulvérisateur de type « Airless » a été utilisé pour cette phase.

Les conditions générales de mise en œuvre ont été les suivantes : masse volumique théorique 800 kg/m³ (sauf pour le panneau 5-10 : 900 kg/m³), 15% de colle, pressage entre plaques métalliques revêtues téflon, cale de 20 mm, 3 MPa, 20 minutes (18+2). Dans un premier temps, cinq panneaux ont été préparés en ajoutant des proportions variables de fibres dans le cuir (cf tableau ci-dessous). Dans ce cas, la colle caséine 3b a été pulvérisée. Ces panneaux ont été pressés à 60°C.

Tableau 8 : Description des essais de mélange cuir / fibre

Référence (n° test)	5-11	5-12	5-13	5-14	5-15
Cuir	Équestre	Équestre	Équestre	Chutes	Refentes
Fibres	FL	TSD	TSD	TSD	TSD
Ratio cuir/fibres	75/25	75/25	98/2	98/2	98/2

D'autres panneaux ont été fabriqués à partir de cuirs fibreux et de colle caséine, six sont présentés dans le tableau 9. Ces panneaux ont été pressés à une température modérée, sauf pour le panneau 5-17, pressé à une température supérieure.

Tableau 9 : Modalité des essais de pulvérisation

Référence (n° test)	5-10	5-16	5-17	5-18	5-20	5-23
Cuir	D.Bast > 5mm	D.Herm > 5mm	DV > 5mm	D.Bast	D.Bast	D.Herm
Type de colle	3a	3b	3b	3b	1a	1a
Procédure	Pulv.	Pulv.	Pulv.	Pulv.	I.S.	I.S.

Enfin, des panneaux ont été produits à partir de cuirs fibreux et de colle tanin. Dans ce cas, les panneaux ont été pressés à plus haute température. Ce sont les panneaux 5-21 (D.Bast) et 5-22 (D.Herm).

1.6 RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LES PANNEAUX CUIR « RIGIDES »

Lors de la première phase des recherches qui s'est déroulée en 2019, il a été montré qu'il était possible d'obtenir un composite très dense et cohésif par thermocompression avec seulement 8% de colle naturelle. Ce nouveau matériau a été gravé à l'aide d'une mini-fraiseuse numérique, ce qui a permis de valider l'usinabilité du matériau (Figure 65). Cependant, il n'a pas été possible de reproduire ce matériau à l'identique. Nous en avons déduit que cela était lié à la spécificité du premier gisement de cuir utilisé qui n'est plus disponible.



Figure 66 : Test d'usinage sur la première plaquette en cuir "rigide" obtenue

Nous nous sommes alors focalisés sur l'optimisation de ce matériau cuir « rigide » à partir des gisements disponibles. C'est alors que le cuir de sellerie équestre broyé à 1,5 mm et le cuir micronisé semblaient être les plus adaptés pour ce type de panneaux, tandis que les autres cuirs et les refentes ont conduit à des panneaux fragiles et pelucheux. Cela peut s'expliquer par l'aspect fibreux du cuir équestre ou micronisé, au contraire des broyats des refentes et chutes qui apparaissent sous forme granulaire.

La dénaturation des protéines du cuir, que ce soit par une macération en présence de chaux ou via un traitement thermique, n'a pas permis de retrouver une compacité comparable à celle obtenue pour les panneaux fabriqués avec les lanières de refentes.

1.6.1 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-MÉCANIQUES DES PANNEAUX CUIR RIGIDE

• ANALYSES THERMOGRAVIMÉTRIQUES

Les principaux résultats des analyses thermogravimétriques sont présentés dans la figure ci-dessous :

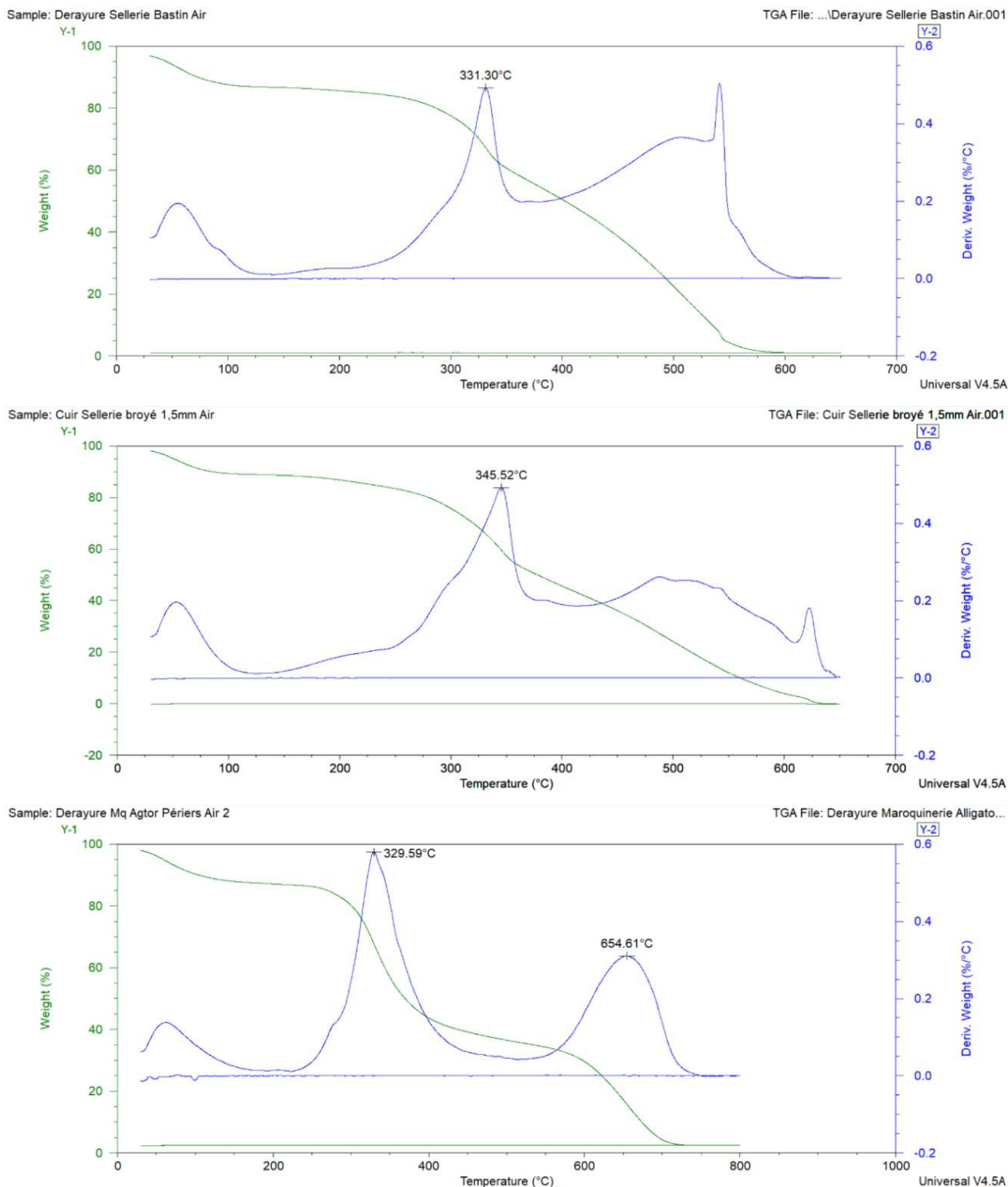


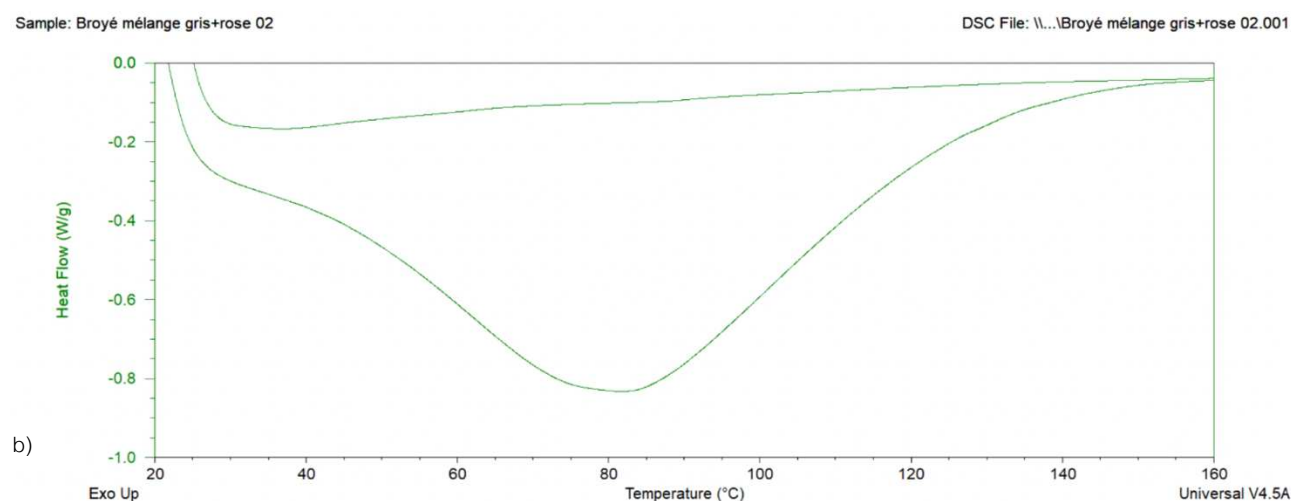
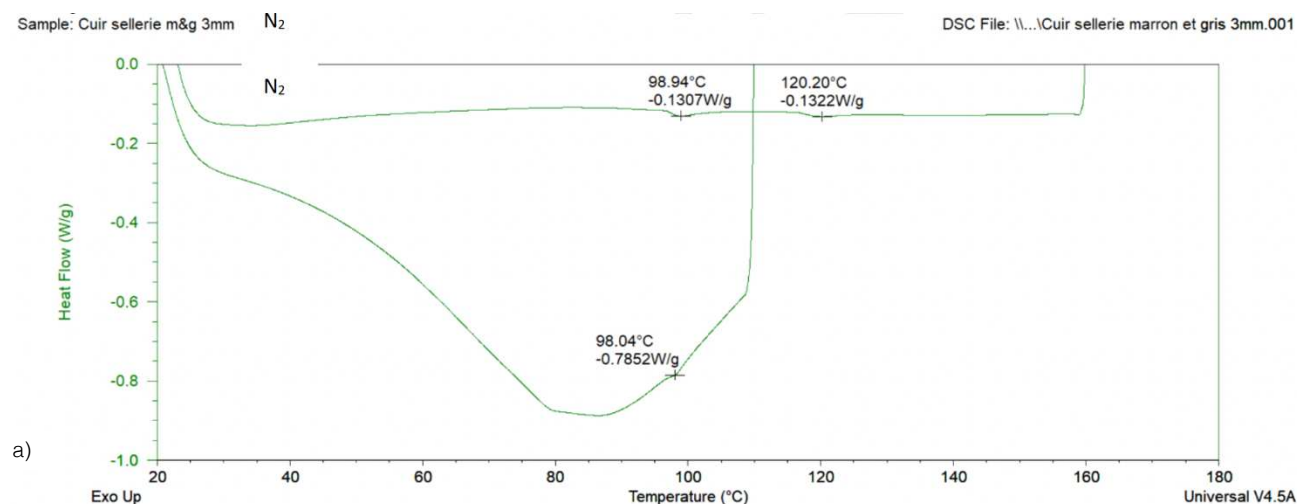
Figure 67 : Analyse thermogravimétriques d'échantillons de différents cuir destinés aux panneaux rigides

La figure ci-dessus présente : a) dérayure sellerie Bastin ; b) Cuir sellerie broyé 1,5 mm ; c) dérayures alligator. Le gradient de température va jusqu'à 800°C. Les analyses ont été réalisées sous air. Sur les courbes, nous observons après 200°C soit l'élimination de l'eau résiduelle contenue dans chaque panneau, un premier pic de dégradation survient aux alentours de 330°C ((a) 331°C ; b)

345°C ; c) 329°C). Ce premier pic correspond à la dégradation des protéines et des fibres de collagène. Une deuxième étape de dégradation est observée au-delà de 500°C pour le « D.alligator » (pic à 654°C). C'est le seul des trois échantillons de cuir qui présente cette typologie. Cela semble confirmer la présence d'un dérivé triazine, correspondant à la plage de décomposition du résidu primaire (500-750°C).

• ANALYSES CALORIMETRIQUES DIFFERENTIELLES

Des analyses calorimétriques différentielles (DSC) ont été menées sur plusieurs échantillons de cuir à destination des panneaux rigides, à la fois sous azote et sous oxygène. La figure ci-après décrit les résultats obtenus pour deux échantillons.



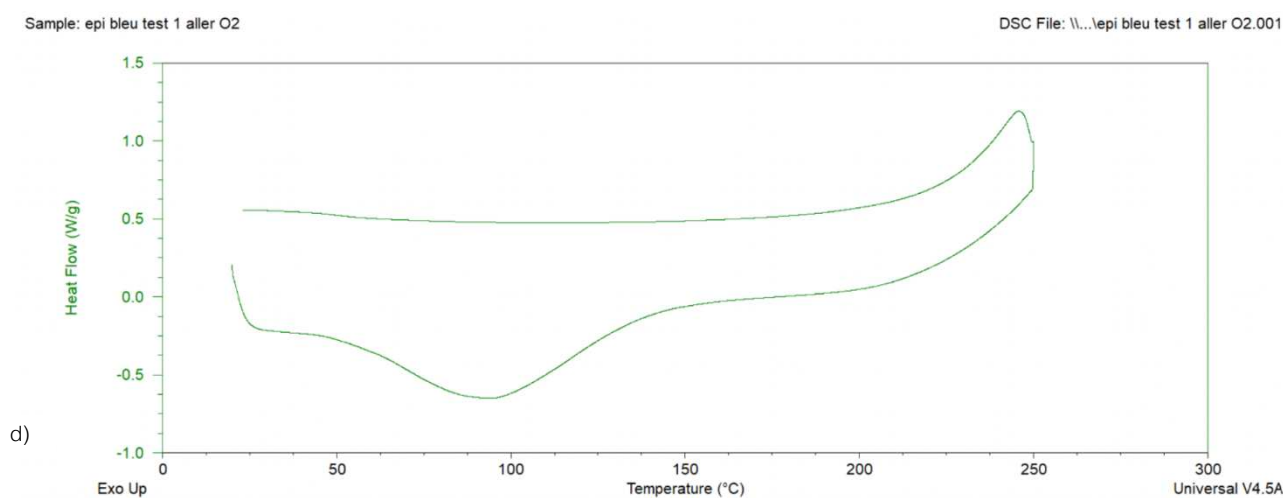
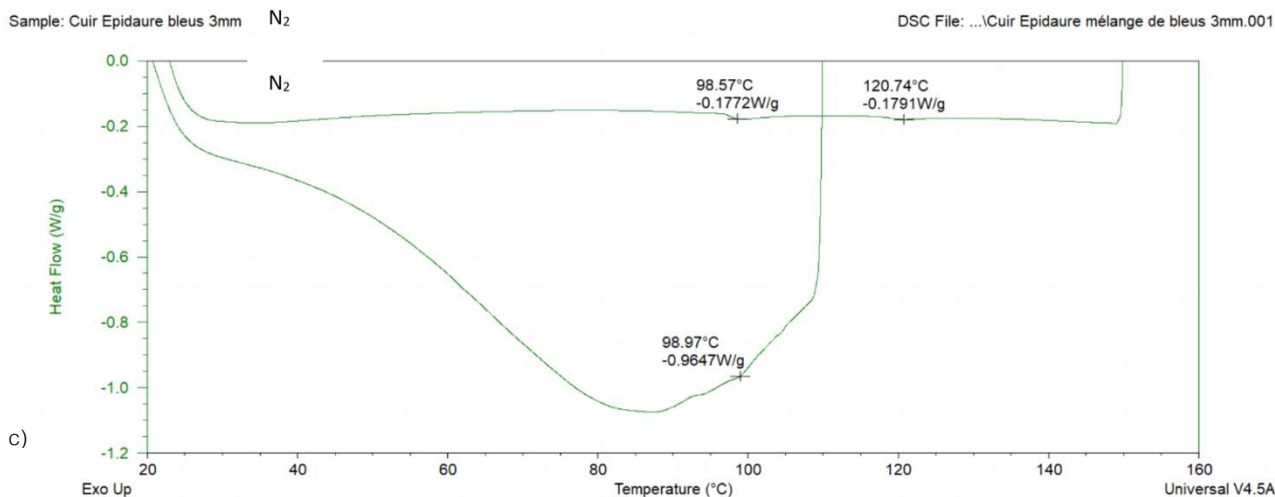


Figure 68 : Résultats des analyses de calorimétrie différentielle sur quatre échantillons de cuir à destination des panneaux rigides. a) cuir de sellerie sous azote ; b) Cuir de sellerie broyé sous oxygène ; c) cuir Epidaure 3mm sous azote ; d) Cuir Epidaure sous oxygène.

L'exploitation des DSC obtenues sur les échantillons de cuir est relativement complexe. En effet, le(s) pic(s) de dénaturation tend(ent) à se confondre avec le pic engendré par la déshydratation, c'est-à-dire aux alentours de 100°C. Le fait que la déshydratation ait lieu à ces températures correspond à ce qui a été observé sur les analyses ATG. On observe ainsi deux pics aux alentours de 100 et 120°C très similaires sur plusieurs typologies lors de DSC sous atmosphère inerte et sous azote. Ces pics disparaissent lors d'une analyse sous O₂. Ces pics sont témoins de la dénaturation du collagène, ou plus probablement de la fonte de zones cristallines du cuir et à la dégradation des fibres de collagène, qui se chevauchent avec le pic de déshydratation. Une atmosphère oxydante agirait de la même manière que l'eau, et impliquerait une dénaturation plus précoce, impliquant une destruction des zones cristallines à plus faible température, ce qui pourrait être confondu avec la déshydratation. Ce comportement thermique du cuir correspond bien aux observations déjà faites dans la littérature.

[56-58]

Toutefois ces essais sont difficilement exploitables car les cycles sous azote nécessitent une déshydratation préalable, à l'origine d'une dénaturation du cuir étudié. Dans ces conditions, le second cycle jusqu'à 160°C n'est pas effectué sur du cuir dans son état initial. Certains cycles ont aussi été poursuivis jusqu'à 250°C, sans donner de résultats notables. Pour compléter, il pourrait donc être envisagé de réaliser des analyses DSC sur des cuirs relativement secs et saturés d'humidité, sous air et sous azote, suivant le même cycle unique pouvant être programmé jusqu'à 350°C, la limite de l'appareil étant 400°C.

• PERFORMANCES MECANQUES DES PANNEAUX DE CUIR « RIGIDE »

Les résultats des essais de flexion 3 points des panneaux 6-33, 6-35, 6-36 et 6-41 sont présentés ci-dessous dans la figure 68 avec du cuir de sellerie broyé et raffiné et des dérayures (a), du cuir de sellerie broyé (b) et des dérayures de cuir d'alligator (c).

Ce sont les panneaux de dérayures de cordonnerie et ceux de cuir raffiné (fibres très longues dans les deux cas) qui possèdent les moins grands allongements à la rupture et domaines élastiques, ce qui se retrouve dans leur côté cassant durant les essais. Ce sont aussi eux qui possèdent qualitativement les modules d'Young les plus élevés.

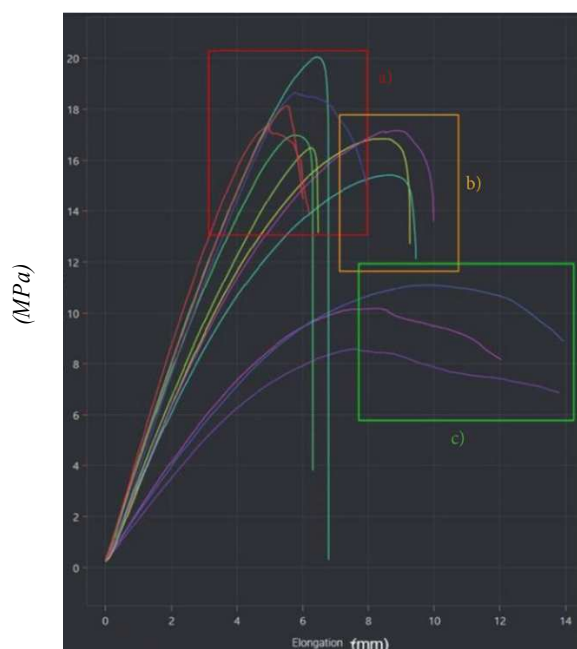


Figure 69 : courbes d'essais de flexion 3 points

Tableau 10 : Performances mécaniques des panneaux de type MDF

Référence (n° test)	Contrainte maximum en flexion 3 points (MPa)	Module en flexion (MPa)	Contrainte maximum en traction perpendiculaire (MPa)
4T-01	7,0±0,7	1032±82	0,28±0,06
4T-02	6,6±1,4	930±226	0,25±0,07
4T-03	2,8±0,2	329±82	N.D.
4T-04	3,0±0,2	457±58	N.D.
4T-05	1,9±0,1	298±48	N.D.
4T-06	3,9±0,8	616±144	N.D.
4T-07	1,6±0,2	192±41	N.D.
4T-08	4,9±0,7	796±65	N.D.
4T-09	2,5±1,0	211±124	N.D.
4T-10	6,1±0,6	966±300	0,39±0,16
4T-11	1,1±0,3	146±26	N.D.
4T-13	4,1±0,3	755±27	N.D.
4T-14	2,9±1,0	595±45	N.D.
4T-15	3,2±0,6	565±46	N.D.

Synthèse des principaux résultats obtenus :

Des panneaux solides et cohésifs ont été obtenus avec du cuir équestre et une colle naturelle via un pressage à 60 ou 70°C. Les mesures des performances mécaniques (proche de 10 MPa en flexion 3 points et de 0,3 MPa en traction perpendiculaire) ont montré des résistances mécaniques de l'ordre de la moitié de celles requises pour des panneaux MDF de bois.

Des essais de pressage à des températures supérieures ou égales à 120°C (sans eau), ont généré de fortes dégradations. Les cuirs de type « refentes » ont conduit à des panneaux peu rigides mais présentant des craquelures, tandis que le cuir équestre a montré un gonflement plus ou moins marqué selon la température, jusqu'à la formation d'une mousse solide, avec un aspect de type mousse polyuréthane rigide. Des recherches complémentaires sur ce type de produit pourraient ouvrir une nouvelle voie vers la fabrication de matériaux isolants.

Avec une colle à base de tanins, des panneaux rigides ont été obtenus, mais les résistances mécaniques des meilleurs panneaux n'ont pas dépassé 1/3 de celles requises pour des panneaux MDF de bois.

L'ajout de fibres longues (soie ou mélange soie/polyester) n'a pas permis d'améliorer les performances mécaniques. Cependant, des résultats très encourageants ont été obtenus en utilisant du cuir fibreux de type dérayures, et en particulier avec des dérayures de cuir tanné végétal. Dans ce cas, des résistances mécaniques proches ou supérieures à celles requises pour des panneaux MDF de bois ont été mesurées (16,3±3,1 MPa contre 20 MPa en flexion 3 points et 0,92±0,17 MPa contre 0,6 MPa en traction perpendiculaire).

1.6.2 INFLUENCE DE LA GRANULOMÉTRIE

En réduisant encore la granulométrie, c'est-à-dire en utilisant les poussières issues des dérayures de cuir tanné végétal, un panneau dense (masse volumique = 1070 kg/m^3) et rigide a été obtenu, mais ne présentant pas l'aspect « résiné » précédemment observé. Il a cependant montré de bonnes performances mécaniques : résistance à la flexion 3 points de $13,5 \pm 0,8 \text{ MPa}$ et une cohésion interne de $0,51 \pm 0,17 \text{ MPa}$.

Malgré les optimisations des conditions, il n'a pas été possible d'obtenir un composite présentant des caractéristiques similaires à celle obtenues lors de la première phase avec le cuir spécifique, même si un matériau s'en approchant a été préparé à partir de poussières de dérayures. Des recherches pourraient être continuées dans cette voie pour déterminer les conditions optimales avec ce type de matière première, et en particulier avec l'étude du comportement de différentes poussières issues des processus de fabrication du cuir (lors du ponçage par exemple).

PANNEAUX DE TYPE « LIEGE DE CUIR »

Un essai avec du cuir saturé en humidité a conduit à la formation d'un panneau (3-5) de très faible densité (0,4), mais suffisamment rigide et cohésif pour une utilisation en tant que panneaux isolants par exemple. Le cuir micronisé s'est montré particulièrement adéquat dans ce cas, conduisant à un matériau rigide et cohésif. En revanche, le cuir de maroquinerie broyé en 1,5 mm n'a pas été performant. Selon la procédure de mise en œuvre, l'aspect final du panneau s'est montré très différent, en particulier pour le cuir micronisé avec un aspect proche du liège aggloméré pour le panneau 3-5, très lisse et homogène pour le panneau 3-40, lisse et inhomogène pour les panneaux 3-48 et 3-49. D'une manière générale, ils se sont montrés rigides avec une solidité similaire à celle du liège aggloméré. Les panneaux 3-48 et 3-49 ont présenté la plus grande rigidité. Les panneaux issus de cuir de maroquinerie se sont montrés beaucoup plus fragiles et pelucheux. Le panneau 3-54 est apparu le plus solide et cohésif dans cette catégorie, indiquant que l'augmentation du taux de colle est favorable (12% de colle).

D'autres panneaux ont donc été fabriqués pour optimiser ce type de matériau. Une application en isolation a été imaginée et des mesures de conduction thermique ont ainsi été réalisées.

Les valeurs suivantes ont été déterminées pour les panneaux 3-5 et 3-49 respectivement :

- Conductivité thermique : $0,062$ et $0,053 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Diffusivité thermique : $0,117$ et $0,111 \text{ mm}^2.\text{s}^{-1}$
- Capacité thermique : 529 et $476 \text{ kJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$

Selon ces valeurs de conductivité thermique, les panneaux évalués sont considérés comme isolants. En effet, selon la norme française RT 2012, un matériau est considéré comme isolant si sa conductivité thermique est inférieure à $0,065 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ils sont cependant légèrement moins isolants que le liège (environ $0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

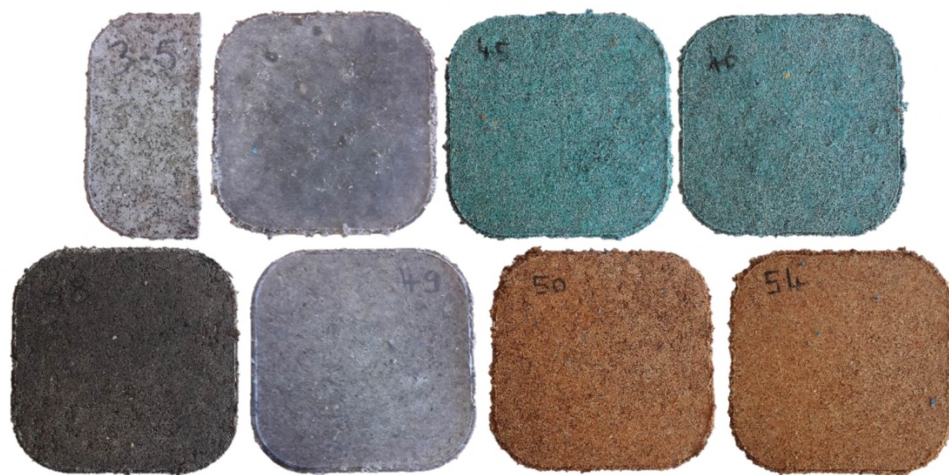


Figure 70 : Panneaux de « liège de cuir »

1.6.4 INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

Les meilleures performances mécaniques ont été obtenues pour les panneaux 4T-01, 4T-02 et 4T-10, indiquant qu'il est préférable de presser à une température inférieure ou égale à 120°C . Cependant, les résultats ne sont pas homogènes. Par exemple, le panneau 4T-11 devrait présenter des performances mécaniques comprises entre celles des panneaux 4T-02 et 4T-10, alors qu'il est bien en deçà. Ou encore, l'augmentation du taux de colle semble bénéfique à 120°C (panneau 4T-13 contre 4T-11), mais néfaste à 150°C (panneau 4T-14 contre 4T-08). Cela confirme l'inhomogénéité des panneaux et la forte influence de la qualité du mélange sur la solidité du composite.

Les meilleurs panneaux ont présenté des valeurs de contraintes maximales en flexion 3 points entre 6 et 7 MPa et des modules en flexion autour de 1000 MPa. Pour ces panneaux, les contraintes maximales en traction perpendiculaire sont de l'ordre de 0,3 MPa. Là encore, les performances mécaniques se sont montrées en dessous des valeurs attendues pour des panneaux de type MDF de bois.

1.6.5 INFLUENCE DU TAUX DE COLLE

Le taux de colle est une fraction massique en matière sèche. Il apparaît qu'à tous autres paramètres égaux par ailleurs, les panneaux fabriqués avec plus de colle que les panneaux de référence présentent une meilleure performance. De plus les panneaux à 25% de colle en masse sèche sont en moyenne plus résistants en flexion que ceux à 20%.

Le panneau (D-Alligator) 6-12 constitue une référence aux développements précédents du projet. On semble retrouver l'importance d'un taux de colle supérieur. Cependant, cette référence atteint à peine les performances de la précédente, qui résistait jusqu'à $16,3 \pm 3,1$ MPa pour seulement 15% de colle, résultat qui n'a pas été retrouvé avec le panneau 6-12. De plus, les panneaux successifs à 20 et 25% de colle ne présentent pas d'amélioration concrète de résistance. Cependant, ils ont un aspect très densifié et des bulles d'air étaient piégées à l'intérieur. Il semblerait que la quantité de bulles augmente avec le taux de colle. Il semble que dans ce cas, le taux optimal de colle soit inférieur à 25 %.

Dans la lignée des autres panneaux à fibres très longues, pour les panneaux de cuir raffiné, l'augmentation du taux de colle entre les panneaux 6-40 et le 6-41 n'est pas suivie d'une amélioration des performances. Des essais complémentaires seront à mener avec des taux inférieurs et des cales, car les valeurs de contrainte maximale sont très encourageantes.

L'augmentation de la résistance avec le taux de colle n'est significative que pour les panneaux à base de cuir de sellerie rigide broyé, les résistances des autres panneaux plafonnant rapidement. Les taux d'humidité optimaux pour le cuir d'alligator et le cuir raffiné n'ont pas été étudiés, et ceux des autres sont à affiner, notamment en fonction du taux de colle. Car si le taux d'humidité permet une imprégnation optimale des fibres, ajouter de grandes quantités de colle pourrait nécessiter l'addition d'un peu d'eau.

1.6.6 INFLUENCE DES FIBRES

L'utilisation du broyat issu de chutes ou de refentes, a conduit à des panneaux fragiles et pelucheux. Le broyage de ces deux typologies de cuir a produit des particules, et non des fibres qui auraient permis probablement de meilleures performances mécaniques comme dans le cas de composites à base de renforts fibrés. L'ajout de cuir micronisé n'a également pas permis d'améliorer les performances. Le cuir équestre broyé à 1,5 mm a permis d'obtenir de meilleurs résultats que ceux issus des refentes et chutes, avec un panneau cohésif et solide.

Une expérimentation d'ajout de fibres longues dans les panneaux de type MDF a été réalisée de manière à améliorer les performances mécaniques, en particulier en flexion 3 points. Un remplacement du cuir granulaire par des fibres de cuir ou un ajout de fibres longues dans du cuir granulaire a été entrepris.

Résultats des essais d'ajout de fibres longues dans les panneaux de type MDF

L'utilisation d'une quantité importante (25%) de soie issue de TSD a conduit à un panneau non cohésif (5-12). Cependant, à cette même proportion mais en incorporant des FL soie/polyester, un panneau compact a été obtenu (5-11). L'ajout de 2% de TSD dans du cuir équestre, des refentes ou des chutes a permis de produire de panneaux compacts et cohésifs

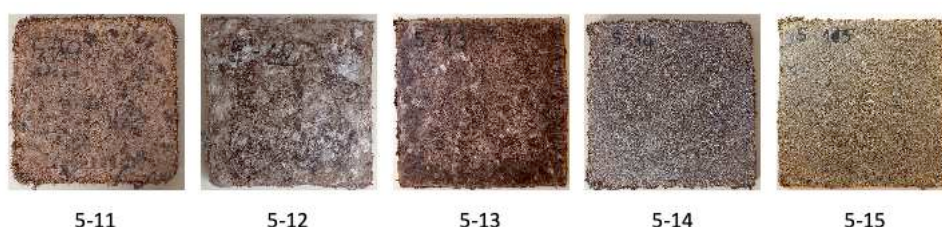


Figure 71 : Résultats des panneaux obtenus à partir de différents mélanges cuir/fibres

D'une manière générale, l'incorporation de fibres dans du broyat de cuir n'a pas permis d'obtenir des performances mécaniques satisfaisantes, avec des contraintes maximums en flexion 3 points de l'ordre de 5 MPa. (Cf tableau ci-dessous)

Tableau 11 : Résultat des contraintes max en flexion

Référence (n° test)	5-11	5-12	5-13	5-14	5-15
Masse volumique mesurée (kg/m ³)	800	ND	920	840	840
Contrainte max. en flexion (MPa)	4,3±1,6	ND	4,8±0,7	2,7±0,2	3,5±0,1

Les panneaux issus de dérayures fabriqués dans des conditions « standard » (colle caséine, pressage à 60°C) se sont tous montrés compacts et cohésifs. Ceux produits à partir de « D.Bast » se sont montrés lisses, contrairement à ceux provenant de « D.Herm ».

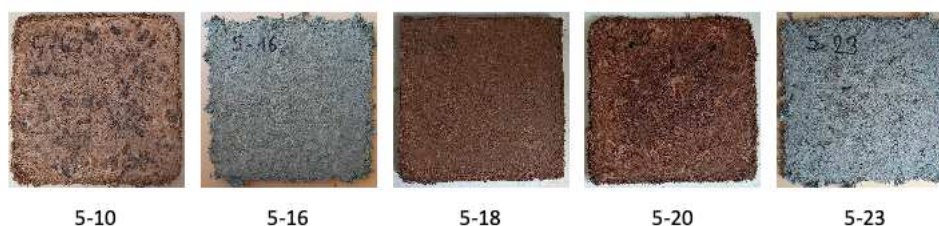


Figure 72 : Panneaux de dérayures obtenus dans des conditions standards

L'utilisation des dérayures Bastin (D.Bast) a permis d'améliorer la résistance à la flexion trois points, tandis que les dérayures Hermès (D.Herm) ont conduit à des panneaux présentant des performances proches de celles de panneaux obtenus avec du cuir granulaire. Cette différence peut provenir de la typologie des fibres. En effet, les « D.Herm » ont été réceptionnées sous forme de cylindres comprimés humides et il a été nécessaire de les séparer en grattant, puis de les faire sécher, conduisant à des morceaux de quelques centimètres de long et de plusieurs millimètres d'épaisseur. Les « D.Bast » ont été réceptionnées également humides, mais non comprimées. Après séchage, elles se sont présentées sous forme d'un mélange de poussières et de fibres ($x > 5 \text{ mm}$: 29% ; $5 \text{ mm} > x > 800 \mu\text{m}$: 38% ; $800 \mu\text{m} > x > 400 \mu\text{m}$: 13% ; $400 \mu\text{m} > x$: 19%). L'épaisseur des plus gros copeaux n'excédait pas 1 mm. Ainsi, les « D.Bast » utilisées dans cette étude présentaient des surfaces spécifiques plus importantes que celles des « D.Herm », et donc une capacité d'encollage supérieure. D'autre part, l'épaisseur importante des « D.Herm » rendait la compression plus difficile.

La pulvérisation de la colle élaborée ne semble pas améliorer les performances mécaniques, comme observé en comparant les panneaux 5-18 et 5-20. Il est cependant difficile de déterminer si cela provient du mode d'introduction ou de la composition de la colle. Cela étant, le panneau 5-20 montre qu'il est possible de s'approcher de performances mécaniques requises pour les panneaux de type MDF de bois concernant la résistance en flexion 3 points (16 MPa contre 20 MPa) et même de les surpasser en cohésion interne (contrainte max. en traction perpendiculaire de 0,9 MPa contre 0,6 MPa).

Tableau 12 : Caractéristiques des panneaux de type MDF fabriqués à partir de cuirs fibreux

Référence (n° test)	5-10	5-16	5-17	5-18	5-20	5-23
Masse volumique mesurée	940	790	ND	820	101	820
Contrainte max. en flexion (MPa)	6,4±2,0	4,0±0,2	ND	10,0±1,6	16,3±3,1	3,5±0,8
Contrainte max. en traction perpendiculaire (MPa)	ND	ND	ND	0,56±0,09	0,92±0,17	ND

Par ailleurs, la colle de tanin a permis d'obtenir des panneaux cohésifs avec des performances mécaniques intéressantes, mais inférieures à celles obtenues avec la colle élaborée au laboratoire. Là encore, les « D.Bast » se sont montrées plus pertinentes que les « D.Herm ».

Tableau 13 : Caractéristiques des panneaux de type MDF fabriqués à partir de cuirs fibreux et de colle tanin

Référence (n° test)	5-21	5-22
Masse volumique mesurée (kg/m ³)	900	860
Contrainte max. en flexion (MPa)	11,2±1,0	5,6±1,7

1.6.7 INFLUENCE DE L'ASPECT ESTHÉTIQUE

La particularité des panneaux de cuir « rigides » est que le gisement est beaucoup moins riche chromatiquement parlant, que celui des panneaux dits « acoustiques ». La provenance de ces typologies de cuir en est la cause puisqu'ils sont issus de la filière sellerie équestre, ils sont donc tannés naturellement (ce qui les rend plus rigides) mais leur utilisation finale induit une palette de couleur réduite. On y retrouve des nuances de marron allant du camel jusqu'au brun, ainsi que du noir.

1.7 CONCLUSION SUR L'ÉTUDE ET LE DÉVELOPPEMENT DE PANNEAUX DE CUIR

1.7.1 CONCLUSION SUR LES PANNEAUX DE CUIR « ACOUSTIQUES »

L'optimisation des différentes étapes du processus de valorisation des déchets de cuir a permis d'obtenir une première série de panneaux dit « acoustiques » qui ont présenté des performances mécaniques, acoustiques et esthétiques satisfaisantes pour l'entreprise et ont permis de valider une nouvelle matière intégrée dans la gamme de produits proposé par API'UP : le GRANISPHER. Des éléments de mobilier ont été ainsi fabriqués : les modules « EQUINOX », actuellement commercialisés sous la marque OSPHER. Un brevet « Procédé de fabrication des pièces composites à partir de cuir, produits obtenus », FR3110485 (B1) a pu être déposé suite aux premières phases de recherche de ce projet.

Le travail de tri des couleurs en amont du broyage a été bénéfique pour le processus de tri des opérateurs et il a également permis de faciliter le travail d'expérimentation pour le choix des couleurs des panneaux commercialisables. L'efficacité du tri a été confirmée par le contrôle qualité visuel des différents coloris lors de la production des panneaux, ainsi que par les mesures de couleurs qui confirment cette reproductibilité.

La résistance et la souplesse des grands panneaux de cuir, même imparfaits, est très encourageante pour le développement de panneaux plus épais et de plus grande taille. Cela impliquera également des durées sous presses plus importantes pour permettre à la chaleur de se propager. Les problématiques liées à la difficulté de mélanger beaucoup de matière devront être réglées.

Un meilleur contrôle du taux d'humidité des matières reçues avant mise en forme permettrait d'éviter l'ajout de quantités excessives d'eau, ainsi qu'une meilleure répartition de la colle.

L'augmentation de la température a induit des défauts de surface et les essais de diminution de la densité et du taux de colle n'ont pas permis de changer la formulation. Les tubes internes ont induit des marques sur les faces des panneaux, la rigidité de ces derniers a permis l'abandon des tubes internes. Les analyses DSC et ATG seront à exploiter plus efficacement pour caractériser plus précisément chaque cuir et leur comportement une fois l'approvisionnement des typologies plus stabilisées.

Les mesures colorimétriques ont permis de mettre en évidence la richesse chromatique de ce matériau ainsi que d'attester de l'efficacité du tri couleur et du processus de fabrication par la reproductibilité d'un coloris prédéfini.

• PERSPECTIVES POUR LES PANNEAUX DE CUIR « ACOUSTIQUES »

Pour faciliter le tri couleur par les opérateurs, une observation sous cabine à lumière a été envisagée ainsi que l'investissement dans un colorimètre « de poche » afin de pouvoir réaliser du contrôle qualité directement sur le site de production. De nouveaux coloris pourraient être proposés suite aux expérimentations de mélanges de couleur et de granulométrie. Pour donner suite au travail de tri couleur qui a été mis en place, une étude de prédiction des couleurs des panneaux pourrait être utile grâce aux mesures des échantillons de cuirs comparés aux mesures de couleur des panneaux.

Concernant l'aspect acoustique de ce nouveau matériau, et pour être reconnu comme tel sur le marché, une étude complémentaire de l'absorbance en chambre acoustique permettrait de qualifier de façon plus précises les performances. Il serait intéressant également de réaliser des analyses sensorielles, en réalisant un sondage à l'aide d'un questionnaire, à l'image d'une enquête de terrain, afin de connaître le ressenti des futurs utilisateurs de ce nouveau matériau.

1.7.2 CONCLUSION SUR LES PANNEAUX DE CUIR « RIGIDES »

• PANNEAUX « MDF » DE CUIR

Via un pressage à une température supérieure à 50°C, des panneaux solides et cohésifs ont été obtenus avec du cuir équestre et une colle naturelle, avec des résistances mécaniques proche de 10 MPa en flexion 3 points et de 0,3 MPa en traction perpendiculaire. Ces résultats correspondent à la moitié des performances requises pour des panneaux MDF de bois.

De fortes dégradations ont été observées lors des essais de pressage à des températures supérieures ou égales à 120°C (sans eau). Les déchets de refentes ont conduit à des panneaux peu rigides mais présentant des craquelures, tandis que le cuir de sellerie équestre a montré un gonflement plus ou moins marqué selon la température. Les réactions allant jusqu'à la formation d'une mousse, avec un aspect de type mousse polyuréthane solide. Des recherches complémentaires pourraient ouvrir une nouvelle voie vers la fabrication de matériaux isolants.

Les essais de panneaux rigides avec une colle à base de tanin, n'ont pas obtenus de bons résultats. Les résistances mécaniques n'ont pas dépassé 1/3 de celles requises pour des panneaux MDF de bois. L'ajout de fibres longues (soie ou mélange soie/polyester) n'a pas permis d'améliorer les performances mécaniques des panneaux MDF.

Des résultats très encourageants ont été obtenus en utilisant du cuir fibreux de type dérayures, et en particulier avec des dérayures de cuir tanné végétal. Dans ce cas, des résistances mécaniques proches ou supérieures à celles requises pour des panneaux MDF de bois ont été mesurées (16,3±3,1 MPa contre 20 MPa en flexion 3 points et 0,92±0,17 MPa contre 0,6 MPa en traction perpendiculaire). La faisabilité de fabriquer un matériau de type MDF de cuir semble ainsi tout à fait réaliste. Une poursuite des recherches pourrait permettre de continuer les optimisations, de prototyper des panneaux de plus grandes dimensions, ainsi qu'une montée en échelle de production.

Des tests à des températures inférieures sont à conduire, de même qu'à des temps différents, de manière à optimiser la consommation d'énergie et la vitesse de production et à tenir compte de la dénaturation des cuirs qui y sont plus sensibles.

• PANNEAUX « HDF » DE CUIR

Après de nombreuses modifications des formulations et des conditions de mise en œuvre, il a été possible de se rapprocher des caractéristiques des panneaux obtenus lors de la première phase d'expérimentation avec les lanières de cuir de type refente dont l'approvisionnement a été interrompu. En effet, des panneaux rigides, cohésifs et denses ont été obtenus, en particulier avec le cuir équestre ou les poussières de dérayures de cuir tanné végétal. Cependant, l'aspect « résiné » n'a pas été reproduit. D'autre part, les refentes et les chutes ont conduit à des panneaux généralement friables et pelucheux.

Lors des essais de pressage à chaud (150°C) de cuir équestre tanné végétal, avec une colle naturelle concentrée à 20%, un matériau noir, densifié et très rigide a pu être obtenu. Mais lors de la décompression, un éclatement du panneau s'est produit. Des recherches complémentaires pourraient permettre de déterminer les conditions idéales pour la préparation d'un tel matériau, tout en s'affranchissant de ce phénomène problématique d'ouverture du panneau. Dans des conditions similaires, les refentes et chutes n'ont pas présenté ce comportement, mais des dégradations de type craquelures sont apparues. A l'intérieur du panneau, la formation d'un matériau d'apparence similaire à ce qui a été obtenu avec le cuir équestre a été observée.

D'autre part, ces conditions de mise en forme sont susceptibles de provoquer la formation de chrome hexavalent (dans le cas de cuirs tannés au chrome), et nécessitent ainsi des analyses complémentaires afin de vérifier la pertinence d'une telle stratégie. Des recherches restent donc nécessaires de manière à déterminer les conditions adéquates de détection/quantification de chrome

hexavalent. Par ailleurs, des panneaux cohésifs ont été obtenus sans colle, montrant que la dénaturation partielle des protéines peut concourir à l'encollage des fibres.

Les panneaux sans cales peuvent être une solution pour densifier les typologies qui le peuvent et développer des panneaux de type HDF, sous réserve d'une étude d'ajustement de la pression. Les panneaux de broyat s'écrasent moins que ceux de dérayures, mais ils sont plus sensibles à l'apparition de fissures. L'utilisation d'un moule pourrait permettre de limiter les effets de bord et permettre une meilleure homogénéisation et un contrôle de la densité. Cet effet se retrouve dans les versions réduites réalisées pour des tests de coloration. Il est important de garder en tête qu'Api'Up dispose de moyens limités pour contrôler la qualité des matières qu'elle reçoit, ce qui peut impliquer certaines irrégularités.

Au cours de cette étude l'accent a été placé sur la résistance maximale à la flexion trois points. Ces panneaux étaient destinés à être soutenus par une armature en bois, dans des portes par exemple, et en milieu sec. Une étude de l'encollage des fibres au microscope électronique à balayage pourrait apporter des éclaircissements supplémentaires quant à sa qualité selon la typologie. Dans le cas d'un mauvais enrobage des fibres, l'utilisation d'un ensimage plastique pourrait être envisagée. Seulement, les éléments qui le composeraient devraient rester dans un cadre biosourcé, de réutilisation et aussi proches du cuir que possible. Le développement d'une matrice à base de cuir pourrait aussi être une solution pour améliorer l'affinité matrice / renfort. Les préparations sous forme de gélatines de cuir ont démontré leur intérêt, mais cette seconde solution se heurte à sa grande sensibilité physico-chimique. D'autres formulations et préparations sont donc à rechercher en parallèle de la poursuite d'investigation sur la colle de cuir.

L'augmentation de la résistance avec le taux de colle n'est significative que pour les panneaux à base de cuir de sellerie rigide broyé, les résistances des autres panneaux plafonnant rapidement. Si le taux d'humidité permet une imprégnation optimale des fibres, ajouter de grandes quantités de colle pourrait nécessiter l'addition d'un peu d'eau supplémentaire. Des tests à des températures inférieures restent à conduire, de même qu'à des temps différents, de manière à optimiser la consommation d'énergie et la vitesse de production et à tenir compte de la dénaturation des cuirs qui y sont plus sensibles.

• PANNEAUX « LIEGE » DE CUIR

Des panneaux peu denses (400 kg/m^3) ayant une apparence de liège aggloméré ont été produits à partir de différentes typologies de cuir. Les panneaux préparés avec du cuir micronisé se sont montrés les plus performants et des mesures de conductivité thermique ont été conduites sur deux d'entre eux. Ces panneaux sont apparus isolants au regard de la norme française RT 2012.

Si ces campagnes d'essais présentent des avancées satisfaisantes, de nombreuses optimisations concernant les paramètres étudiés restent cependant à prévoir.

• PERSPECTIVES POUR LES PANNEAUX DE CUIR « RIGIDES »

Si l'ensemble de ces campagnes d'essais présentent des avancées satisfaisantes, de nombreuses optimisations concernant les paramètres étudiés restent cependant à prévoir. Plus la densification est efficace et moins les panneaux sont poreux, mais plus les risques de retrouver des bulles d'air piégées dans les panneaux sont élevés. C'est une problématique qu'il faudra résoudre, et une des pistes pourrait être de réaliser un pressage sous vide.

Les panneaux à base de cuir d'alligator ne se destinent probablement pas au même emploi que les autres, leur souplesse et leur colorabilité les dirigeant peut-être à la réalisation d'assises renforcées ou de plus petits objets. Une montée en échelle prochaine est donc envisageable pour les panneaux de cuir de sellerie broyé et de dérayure de cordonnerie. Pour le cuir alligator et le cuir raffiné, quelques recherches supplémentaires sont nécessaires.

Pour améliorer le procédé de recyclage des panneaux sans ajout de colle supplémentaire, il pourrait être envisagé d'acidifier légèrement le broyat en contrôlant le pH (jusqu'à pH 4,6) de manière à « réactiver la colle », puis de pulvériser une solution pour reformer la formulation collante au sein du broyat.

Il serait intéressant de réaliser des mesures colorimétriques sur les panneaux rigides pour observer l'étendu chromatique de ce matériau et éventuellement déterminer avec prédiction le résultat final en fonction de la typologie de cuir utilisé et les conditions de mises en œuvre (type de colle, quantité d'eau, température de pressage etc.)

Les panneaux rigides ont un nuancier beaucoup moins étendu que les panneaux acoustiques, en raison de la différence de gisement initial. Il serait intéressant d'expérimenter la coloration des panneaux dans la masse avec des colorants ou des pigments naturels. Cela permettrait d'élargir le champ des applications possibles en apportant une autre dimension esthétique à ce nouveau matériau.

Une des prochaines étapes serait également de réaliser des essais d'éléments structurels de mobilier avec ces panneaux, afin de valider ce critère du cahier des charges initial.

CHAPITRE 2 : DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU MATÉRIAU À PARTIR DE DÉCHETS TEXTILES

2.1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1.1 LES DIFFÉRENTES TYPOLOGIES DE TEXTILES UTILISÉS

Si elle permet la réalisation de fils ou de non-tissés, la matière peut être nommée « textile ». Cette matière se présente sous forme de fibres (de petites longueurs allant de quelques mm à quelques cm) ou sous forme de filament (longueurs de plusieurs centaines de mètres). Plusieurs paramètres influencent la qualité des fibres comme leur finesse, leur section, leur longueur et leur composition chimique. Certaines propriétés sont spécifiques aux usages auxquels ces fibres sont destinées.

Les fibres textiles se classent en trois grandes familles en fonction de leur origine :

Fibres naturelles : Origine végétale ou animale

Fibres artificielles : Cellulose régénérée

Fibres synthétiques : Produits chimiques transformés

Les textiles utilisés dans nos travaux de recherche sont d'origine synthétique, c'est-à-dire fabriqués par une chimie de synthèse à partir de dérivés du charbon ou du pétrole. Ces fibres sont issues de réactions chimiques qui produisent un monomère. Cette molécule de base forme ensuite une chaîne nommée polymère. Le procédé de polymérisation a été mis au point dans les années 1930. Dans ce groupe des fibres synthétiques on retrouve les polyamides, les polyesters, les acryliques, les chlorofibres et les polyuréthanes. [59]

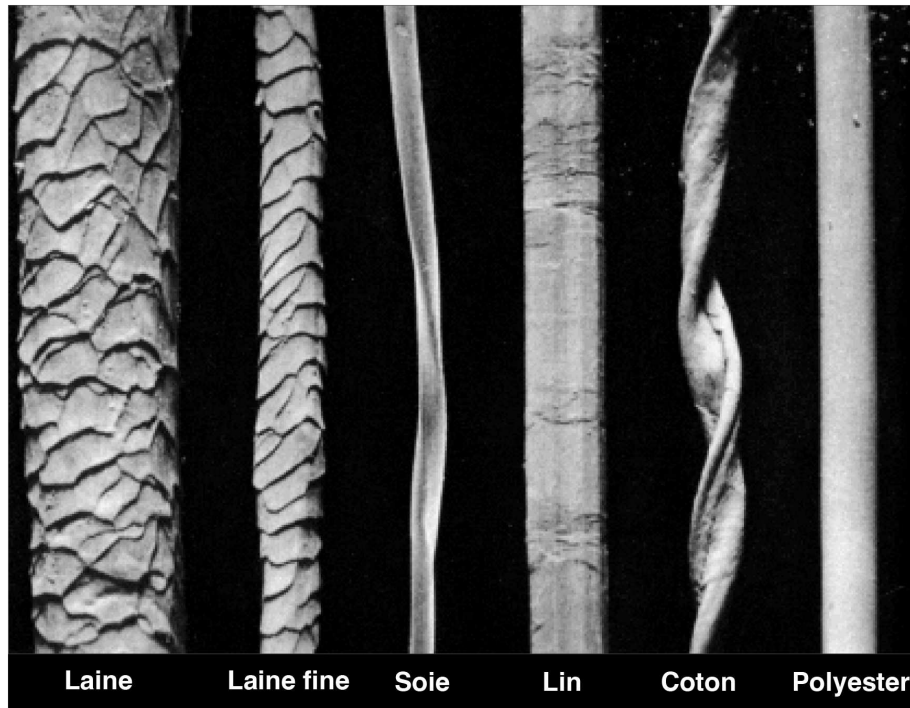


Figure 73 : Comparaison de fibres naturelles et du polyester au microscope [60]

Le Polyester

Le PET, ou polyéthylène téréphtalate, est un polymère communément utilisé. Ce polymère est produit par condensation d'un acide téréphtalique et d'un alcool (éthylène glycol). Le polyester est produit sous forme de fibres ou de filaments. Le plus souvent il est de section ronde ou trilobée. Il est également possible de le trouver texturé par fausse torsion fixée (FTF). [59]

Dans l'industrie textile, le PET est fréquemment désigné sous le nom de Polyester. Les textiles collectés par API'UP le sont sous cette appellation. Le PET, ou polyéthylène téréphtalate est un polymère communément utilisé. Il possède une masse volumique avoisinant 1 400 kg/m³, une température de transition vitreuse (T_g) comprise entre 69 et 115°C, et une température de fusion (T_f) comprise entre 245°C et 285°C (CF partie 2.4.6 Influence des caractéristiques physico-mécaniques). [61–62]

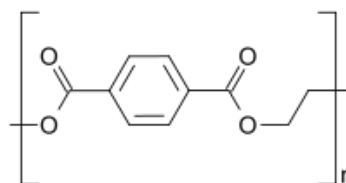


Figure 74 : Formule chimique du polyester

Le polyester présente de bonnes propriétés mécaniques avec une haute résistance à la traction et à l'abrasion tout en ayant une très bonne élasticité. Il résiste parfaitement aux micro-organismes et aux insectes ainsi qu'à la lumière. Le polyester est infroissable avec un entretien facile et un séchage rapide. Il est cependant plutôt rêche au toucher et a tendance à boulocher lorsqu'il est mélangé à une autre fibre. Le polyester se teint difficilement, uniquement à haute température et il a un taux de reprise d'humidité seulement de 3%. Son pouvoir adiathermique est faible (résistance thermique et propriétés de rayonnement).

Il est principalement utilisé dans l'industrie de l'habillement pour des tissus de style « soierie » comme les doublures, des robes ou des chemisiers, des costumes...etc. Utilisé en mélange avec d'autres fibres comme de la laine, de la viscose ou du coton, le textile de polyester est également employé pour du linge de maison, des gazes et des filtres industriels, des voiles de bateaux ou des bâches. Comme il s'agit d'une fibre chimiquement transformée, certaines entreprises déposent des marques de polyester aux caractéristiques et aux origines différentes. Les marques commerciales les plus connus sont Tergal (France), Trévira et Diolen (Allemagne), Tertial (Italie) et Dacron (Grande Bretagne).

Certains polyesters ont été modifiés afin de leur apporter de nouvelles propriétés telles que le Polyester « bas pilling » dont le poids moléculaire a été abaissé pour réduire le boulochage ; le Polyester « Y » a une chaîne moléculaire modifiée pour faciliter la pénétration des teintures ; le Polyester à sections modifiés permet le transfert de l'humidité par capillarité et une meilleure régulation de la température. Le Coolmax de Dupont de Nemours est utilisé pour la production de vêtements de sport ; le Polyester à section creuse permet d'emprisonner l'air et d'obtenir une meilleure isolation thermique. Les principales marques commerciales sont Themax, Hollofil, Qualofil, Filwell, ainsi que Trévira CS, Diolen 40, Fidon FR pour le Polyester « non feu » qui est ignifugé par ajout d'un retardateur de flamme avant le filage. [59]

Le Polypropylène

Le polypropylène, ou PP, est également un polymère courant. L'un des plus utilisés dans l'industrie, le polypropylène (PP) est un thermoplastique semi-cristallin qui se recycle. Ce matériau est obtenu par polymérisation Ziegler-Natta ou par catalyse métallocène des monomères propylènes. C'est un polymère vinylique à la structure chimique proche de celle du polyéthylène (PE). La symétrie de l'addition de monomère dans la chaîne de polymère est due à la présence du groupe méthyle (-CH₃) dans le monomère propylène. Il est caractéristique de la polymérisation du propylène, comparé à la synthèse de l'éthylène qui est beaucoup plus simple. [63-64]

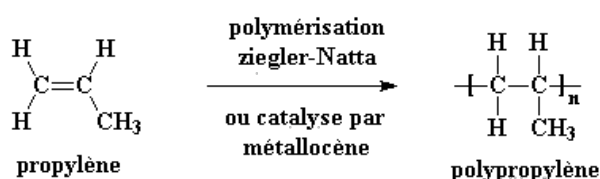


Figure 75 : Polymérisation du polypropylène

Selon sa configuration en homopolymère, copolymère à bloc ou statistique, sa masse volumique est comprise entre 890 et 910 kg/m³. Sa température de transition vitreuse (Tg) est d'environ -10°C et sa température de fusion (Tf) se situe entre 130 et 175°C selon sa tacticité. La viscosité est une autre caractéristique importante du polypropylène qui est présente à l'état fondu, ce qui permet de faciliter la production par extrusion ou par moulage. Sa cristallinité se situe entre 60 et 70% et il possède également des caractéristiques mécaniques et une dureté intéressante. Le module d'élasticité du polypropylène est de 1,14 à 1,55 GPA. Sa résistance à la traction est de 31 à 41,4 MPa, et sa limite d'élasticité est de 31 à 37,2 MPa. Il a une limite d'allongement allant de 100 à 600%. (4) Le Polypropylène est un matériau insoluble à froid. Il commence à se dissoudre à partir de 80°C. Il ne présente pas de risque toxicologique particulier lorsqu'il est utilisé à température ambiante, à l'exception du danger dû aux poussières inertes s'il y a manipulation sous forme pulvérulente. [63–65–66]

Tableau 14 : Caractéristiques du polypropylène [67]

	Homo-polymères	Copolymères à blocs	Copolymères statistiques
Masse volumique (kg/m ³)	900-910	890-905	890-905
MFI à 230°C sous 2,16 kg (g/10min)	1-55	0,8-100	1,7-40
Absorption d'eau (%)	<0,05	<0,05	<0,05
Température de fusion (°C)	160-170	160-168	130-164
Température de transition vitreuse (°C)	-25 à -15	-25 à -15	-25 à -15
Conductivité thermique (W/(m.k))	0,22	0,22	0,22
Capacité thermique massique (J/(kg.k))	1700	1700	1700
Résistance à rupture (MPa)	31-42	28-38	28-38
Allongement à rupture (%)	100-600	800-900	450-900
Résistance en flexion (MPa)	42-58	35-49	40-45
Module d'Young en traction (MPa)	1200-1700	1100-1500	900-1300
Résistance au choc à 23°C (Kj/m ²)	2,5-6	7-50	5-20

Le recyclage du polypropylène peut se faire de façon mécanique, chimique ou thermique.

La technique du recyclage mécanique est une méthode qui consiste à le broyer après lavage pour ensuite le refondre pour le transformer en granulés. Ce procédé ne modifie pas la structure chimique des plastiques. [68–69]

Les apprêts chimiques sont des traitements qui utilisent un ou plusieurs produits chimiques pour apporter de nouvelles propriétés aux textiles qui ne les possèdent pas initialement. Comme par exemple les apprêts ignifugés susceptibles d'empêcher la combustion d'une matière inflammable ou de ralentir sa vitesse de propagation. L'ignifugation se fait par imprégnation du tissu par une résine spécifique qui est polymérisée. Cependant il existe de nouvelles fibres résistantes au feu comme le Kevlar, le Normex ou le Kermel. Les apprêts d'imperméabilisation ont pour but de rendre le textile imperméable à l'eau et à l'air comme les bâches ou toiles de tentes. Pour ce procédé, le tissu est trempé dans une solution hydrophobe à base de résines naturelles ou synthétiques qui ont pour but de colmater tous les orifices. Les apprêts hydrofuges rendent le tissu imperméable à l'eau mais il reste perméable à l'air. Ce revêtement permet de laisser passer la transpiration par exemple tout en faisant glisser les gouttes de pluie à la surface sans qu'elles pénètrent. Pour ce procédé on utilise des résines chimiques qui enrobent les fibres par application sur le textile ou bien directement en les modifiant chimiquement. [63]

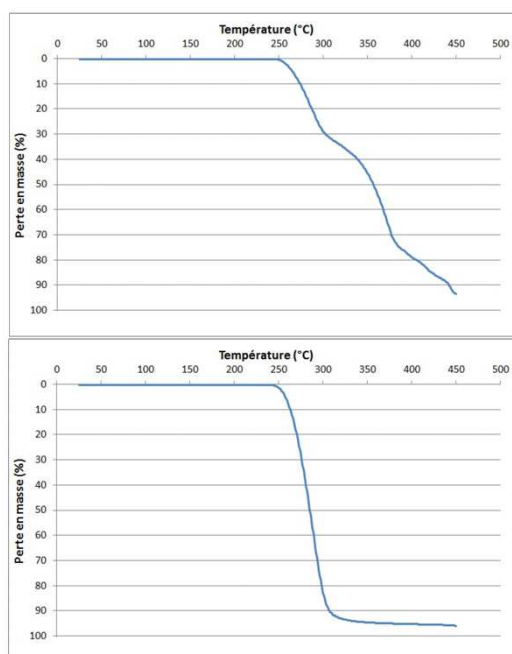


Figure 76 : Comportement de deux polymères différents par analyse thermogravimétrique (ATG)

Ces deux thermogrammes montrent la différence de réaction à la chaleur et les différents stades de la température de dégradation de deux polypropylènes différents. Le premier commence sa dégradation à 252°C et à 300°C, à ces températures il a perdu environ 30% de sa masse initiale. Le second commence sa dégradation à 247°C et une fois atteint les 300°C il a perdu environ 85% de sa masse initiale. Une fois la température de 450°C atteinte, les deux types de polypropylène sont dégradés à environ 95%. [65]

2.1.2 LES TYPES DE DÉCHETS GÉNÉRÉS

Afin d'optimiser la matière utilisée, le placement (ou plan de coupe) est l'aboutissement des recherches visant à obtenir les positionnements des patrons sur le textile à couper les plus économiques possibles. Aujourd'hui assisté par ordinateur, le placement est comme un puzzle de pièces imbriquées qui permet d'évaluer les quantités de matière nécessaires pour la production. La qualité d'un rendement s'exprime en rendement (ou efficacité) en pourcentage.

$$R \% = \frac{\text{surface des patrons placés}}{\text{surface du rectangle du placement}} \times 100$$

Le pourcentage de perte est donc $P = 100 - \% \text{ rendement}$

Il y a des contraintes à prendre en compte, comme le sens du fil ou les motifs. Pour les tissus à motifs il faut respecter les raccords de dessins, ce qui engendre plus de perte lors du placement allant de 20 à 35% contre 18 à 25% pour les tissus unis. A ces pertes s'ajoutent les défauts et les pertes lors de la confection, ce qui peut faire augmenter le pourcentage de matière mise au rebut. [59]

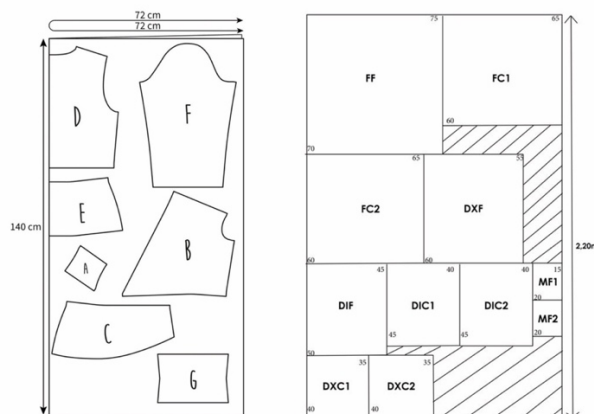


Figure 77 : Exemples de plans de coupe

Étape primordiale dans les ateliers, la coupe est le stade où les étoffes sont transformées en différentes pièces qui seront assemblées par la suite pour confectionner le produit. Mais cette étape génère les premiers déchets de la chaîne de production, et en quantité élevée. Plusieurs paramètres (dimensions, motifs, forme et emplacements) entrent en compte lors de l'étape de la coupe dans l'étoffe. En moyenne le taux de perte est de 15 à 35% mais il est possible de jouer sur ces paramètres

pour tenter de générer le moins de chutes possible, d'autant plus qu'aujourd'hui ce sont des tâches assistées par ordinateur.

Selon la matière des déchets générés, les filières de recyclage sont très différentes. La difficulté majeure est de séparer les différents types de déchets par matière, voire par coloris, et d'éliminer les déchets divers (papier, carton, plastique) utilisés dans des dispositifs automatisés. C'est ce tri qui s'avère particulièrement délicat et difficile à mettre en place dans les ateliers de coupe en raison de la grande diversification des matières et des coloris. [59]

Les principales voies de valorisations utilisées sont l'effilochage, la cartonnerie pour la fabrication des cartons feutres ou autres produits isolants, et l'essuyage industriel pour des chiffons jetables mais uniquement en coton et triés par couleurs.

2.1.3 LA VALORISATION DES DÉCHETS TEXTILES

En post-consommation et en post-production, les déchets textiles sont désormais à considérer comme une matière à part entière, une ressource qu'il faut réussir à valoriser en la recyclant ou en l'upcyclant. Des premières initiatives ont vu le jour pour des tentatives de solutions de valorisations pour recréer de la fibre du fil ou du textile. En pratique il est plus difficile de dépasser le stade de recherche et développement mais certains projets y parviennent. L'enjeu des années futures sera d'y parvenir à l'échelle industrielle afin que les plus grandes marques répondent d'ici à 2030 à leurs engagements pouvant aller jusqu'à un taux de 100% des collections en fibres recyclées.

L'enjeu est de pouvoir passer de la preuve de concept à l'industrialisation. Si certains acteurs majeurs de l'industrie soutiennent une mini-série ou une collection capsule pour lever les verrous technologiques, c'est à grande échelle que toute l'industrie doit se transformer pour intégrer ces solutions. Mais certaines initiatives nécessitent des grandes transformations pour pouvoir se déployer, allant de la méthode aux métiers qui sont amenés à évoluer et d'autres à se développer (collecteurs, trieurs...).

Atteindre une mode circulaire en boucle fermée est une forte ambition pour l'industrie, animée par de nombreux travaux de recherches. Il faudra d'abord lever plusieurs verrous technologiques sur les matières, le démantèlement et les process de valorisation ainsi que de nombreux travaux sur l'automatisation qui sont à engager pour qu'un modèle circulaire en boucle fermée puisse devenir réalité. Un jour peut-être, il sera possible de ramener en magasin ses articles en fins de vie, éventuellement assister à leur transformation puis repartir avec un nouveau produit pour une expérience ultime avec le consommateur comme principal contributeur. [11]

2.1.4 CAHIER DES CHARGES

Les panneaux de Polyspher ont pour but d'être des éléments rigides et solides, ayant pour visée une application de type MDF (Medium Density Fiberboard). Les exigences mécaniques devront donc correspondre à la norme NF EN 622-5.

Tableau 15 : Tableau de la norme NF 622-5 "Caractérisation des panneaux MDF pour usage en milieu sec" [70]

Caractéristique	Méthode d'essai	Unité	Gammes d'épaisseurs nominales (mm)								
			1,8 à 2,5	> 2,5 à 4	> 4 à 6	> 6 à 9	> 9 à 12	> 12 à 19	> 19 à 30	> 30 à 45	> 45
Gonflement en épaisseur 24 h	EN 317	%	45	35	30	17	15	12	10	8	6
Cohésion interne	EN 319	N/mm ²	0,65	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50
Résistance à la flexion	EN 310	N/mm ²	23	23	23	23	22	20	18	17	15
Module d'élasticité en flexion	EN 310	N/mm ²	–	–	2 700	2 700	2 500	2 200	2 100	1 900	1 700

Sa commercialisation nécessite une optimisation fine sur des critères supplémentaires :

- L'esthétique du matériau : étant destiné à un marché haut de gamme, son aspect extérieur doit être exempt de défauts autres que ceux naturellement présents dans le matériau, et ne doit donc comporter aucune fissure, hétérogénéité ou décoloration.
- La finition : le matériau doit être usinable pour permettre des opérations de finition sans détériorer ni son esthétique ni sa solidité. Les possibilités de cintrage doivent être confirmées. L'usinage du matériau doit pouvoir être relativement simple et le procédé doit être adapté à une production à échelle semi-industrielle.
- Les dimensions : le panneau Polyspher doit mesurer 50x50x1 cm (dimensions d'une assise en cours de développement).

Les panneaux réalisés en 10 mm d'épaisseur doivent satisfaire les performances suivantes : résistance maximale en traction transversale de 0,6 MPa et résistance maximale en flexion 3 points de 22 MPa.

Par ailleurs, il est envisagé de pouvoir cintrer ce matériau pour obtenir des éléments courbes. Le but est de les intégrer soit comme des panneaux (plateau de tables, substitution de montant bois, etc.), soit comme assise ou dossier de chaise. Le matériau devra être suffisamment solide et cohésif pour être usiné par fraisage CNC, mais doit également pouvoir être cintré.

En raison des risques liés aux manipulations de cette matière pulvérulente et au dégagement de COV lors de la thermocompression, les étapes allant du mélange à la sortie de presse ont été

réalisées avec port d'EPI : blouse, gants latex ou nitrile jetable, masque de protection respiratoire 4255+ 3M. En effet, lorsqu'ils sont chauffés à plus de 200°C, ces deux polymères émettent des Composés Organiques Volatiles (COV), dangereux pour la santé : des diènes, alcanes et alcènes de longueur de chaîne carbonée allant de C9 à C31 pour le PP ; des paraffines, oléfines et hydrocarbures aromatiques pour le PET. [71–72]

2.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

2.2.1 MATIÈRES PREMIÈRES

Les textiles utilisés pour la fabrication des panneaux sont issus de chutes de découpe de l'entreprise SOKOA situé à Hendaye dans le Pays-Basque. Spécialiste en mobilier et équipements de bureau professionnel. Les textiles récupérés sont du polyester (polytéréphtalate d'éthylène : PET) et du polypropylène (PP). Ces chutes sont broyées à Api'Up avec un broyeur à couteaux permettant d'obtenir des fibres de 3 mm.

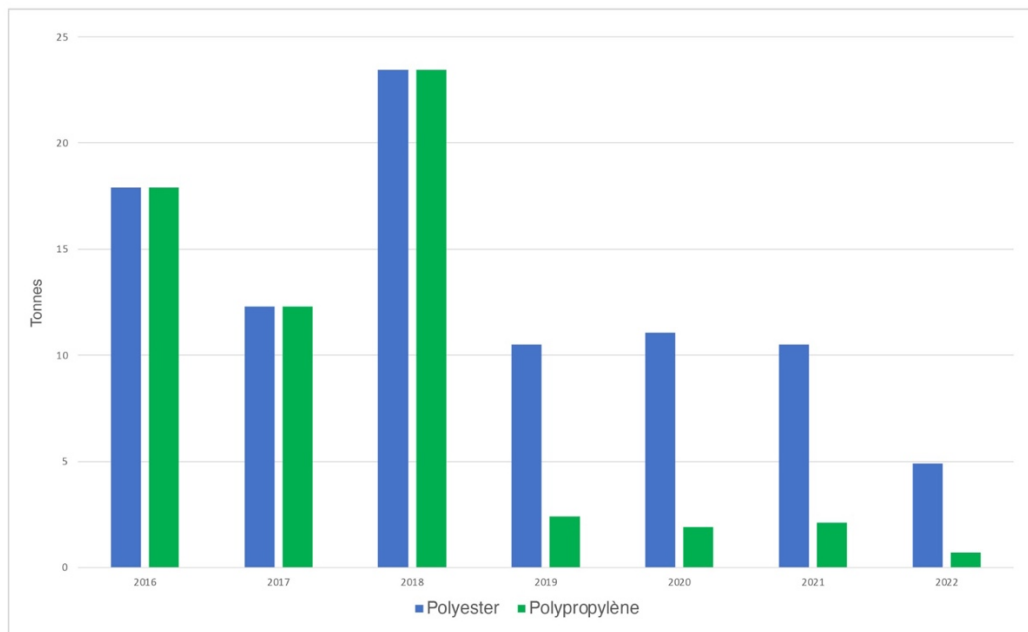


Figure 78 : Chutes de production de textile collectées par Api'Up en Tonnes par Années (Api'Up)

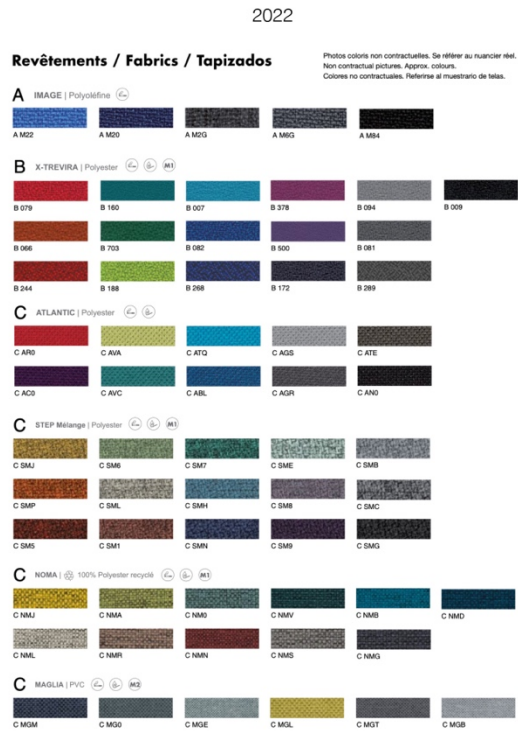


Figure 79 : Évolution du nuancier Sokoa entre 2020 et 2022 [73]

2020

A	Composition Composition	Poids / m ² Weight / m ² Peso / m ²	Résistance à l'abrasion Abrasion resistance Resistencia a la abrasión	Solidité à la lumière Light resistance Resistencia a la luz	Résistance au feu Fire resistance	Environnement Environment Medioambiente
IMAGE	100% Polypropylène	296 g/m ²	40 000 cycles	5/6	EN 1021-1 Cigarette	Oeko-Tex
B						
X-TREVIRA	100% Polyester Trevira CS	300 g/m ²	100 000 cycles	6	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette M1 AM18 NF D 60013 BS 7178 Medium Hazard	Oeko-Tex EU ECOLABEL
ATLANTIC	100% Polyester	350 g/m ²	110 000 cycles + Garantie 10 ans	5-7	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette	Oeko-Tex EU ECOLABEL
NAPEL	89,5 % PVC 10,5 % PES	660 g/m ²	40 000 cycles	>6	-	-
DIABOLO CLUB	85% PVC 15% cotton	750 g/m ²	150 000 cycles ⁽¹⁾	>6	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette M1 AM18 ⁽¹⁾ BS 5852 crtb 5	Sanitized
C						
GINKGO	85% PVC 15% Cotton	830 g/m ²	150 000 cycles ⁽¹⁾	>6	Gamme C: Range C: Gamma C:	Oeko-Tex Sanitized
URBAN	85% PVC 15% Cotton	820 g/m ²	150 000 cycles ⁽¹⁾	>6	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette M1 AM18 ⁽¹⁾ BS 5852 crtb 5	Oeko-Tex Sanitized
STEP-STEP MÉLANGE	100% Polyester Trevira CS	336 g/m ²	100 000 cycles + Garantie 10 ans	5-7	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette M1 AM18 ⁽¹⁾ BS 5852 crtb 5	Oeko-Tex EU ECOLABEL
D						
BOND	98% Polyester recyclé 2% Polyester	379 g/m ²	100 000 cycles + Garantie 10 ans	6-7	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette BS 5852 crtb 5	Oeko-Tex EU ECOLABEL

2022

A	Composition Composition	Poids / m ² Weight / m ² Peso / m ²	Résistance à l'abrasion Abrasion resistance Resistencia a la abrasión	Solidité à la lumière Light resistance Resistencia a la luz	Résistance au feu Fire resistance	Environnement Environment Medioambiente	Nettoyage / Cleaning Limpieza	Entretien / Maintenance Mantenimiento
IMAGE	100% Polyoléfine	300 g/m ²	100 000 cycles	6/7	EN 1021-1 Cigarette BS 5852 G	Oeko-Tex	Aspirateur / Chiffon humide et savon doux. Vacuum / Wet cloth and soft soap. Aspirador / Paño húmedo y jabón suave.	Chiffon imbibé d'Ethanol. Cloth soaked in Ethanol. Paño empapado en Etanol.
DEKORA	100% Polyoléfine	255 g/m ²	100 000 cycles	5/6	EN 1021-1 Cigarette BS 5852 G	Oeko-Tex	Aspirateur / Chiffon humide et savon doux. Vacuum / Wet cloth and soft soap. Aspirador / Paño húmedo y jabón suave.	Chiffon imbibé d'Ethanol. Cloth soaked in Ethanol. Paño empapado en Etanol.
PUMA	87% PVC 6,5% PES 6,5% CO	700 g/m ²	100 000 cycles	5/6	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette BS 5852 D1	O	Aspirateur / Chiffon humide et savon doux. Vacuum / Wet cloth and soft soap. Aspirador / Paño húmedo y jabón suave.	Tout détergent, solvant, solution alcoolisée sont à éviter. Avoid all kinds of detergent, solvent or hydroalcoholic solution. Evitar todos los detergentes, disolventes o solución hidroalcohólica.
NAPEL	89,5 % PVC 10,5 % PES	660 g/m ²	50 000 cycles ⁽¹⁾	>6	O	O	Eponge humide et savon doux. Wet sponge and soft soap. Esponja húmeda y jabón suave.	Spray désinfectant suivi d'un rinçage à l'eau claire. Disinfectant spray followed by rinsing with clear water. Spray desinfectante seguido de enjuague con agua limpia.
B								
X-TREVIRA	100% Polyester Trevira CS	300 g/m ²	100 000 cycles	6	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette M1 AM18 NF D 60013 BS 7178 Medium Hazard	Oeko-Tex EU ECOLABEL	Aspirateur / Eponge humide et savon doux. Vacuum / Wet sponge and soft soap. Aspirador / Esponja húmeda y jabón suave.	Tout détergent, solvant, solution alcoolisée sont à éviter. Avoid all kinds of detergent, solvent or hydroalcoholic solution. Evitar todos los detergentes, disolventes o solución hidroalcohólica.
DIABOLO CLUB	85% PVC 15% cotton	750 g/m ²	150 000 cycles ⁽¹⁾	>6	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette M1 AM18 ⁽¹⁾ BS 5852 crtb 5	Sanitized Phthalates free	Eponge humide et savon doux. Wet sponge and soft soap. Esponja húmeda y jabón suave.	Spray désinfectant suivi d'un rinçage à l'eau claire. Disinfectant spray followed by rinsing with clear water. Spray desinfectante seguido de enjuague con agua limpia.
C								
ATLANTIC	100% Polyester	350 g/m ²	110 000 cycles + Garantie 10 ans	5-7	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette M1 AM18 ⁽¹⁾ BS 5852 crtb 5	Oeko-Tex EU ECOLABEL	Aspirateur / Eponge humide et savon doux. Vacuum / Wet sponge and soft soap. Aspirador / Esponja húmeda y jabón suave.	Chiffon imbibé d'Ethanol. Cloth soaked in Ethanol. Paño empapado en Etanol.
NOMA	100% Polyester recyclé	314 g/m ²	60 000 cycles + Garantie 10 ans	5-8	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette M1 AM18 ⁽¹⁾ BS 5852 crtb 5	Oeko-Tex	Aspirateur / Eponge humide et savon doux. Vacuum / Wet sponge and soft soap. Aspirador / Esponja húmeda y jabón suave.	Chiffon imbibé d'Ethanol. Cloth soaked in Ethanol. Paño empapado en Etanol.
STEP MÉLANGE	100% Polyester Trevira CS	336 g/m ²	100 000 cycles + Garantie 10 ans	5-7	EN 1021-1 Cigarette EN 1021-2 Allumette BS 5852 crtb 5 M1 AM18 ⁽¹⁾	Oeko-Tex EU ECOLABEL	Aspirateur / Eponge humide et savon doux. Vacuum / Wet sponge and soft soap. Aspirador / Esponja húmeda y jabón suave.	Chiffon imbibé d'Ethanol. Cloth soaked in Ethanol. Paño empapado en Etanol.

Figure 80 : Evolution des compositions des revêtements du nuancier Sokoa [73]

2.2.2 TRI COULEURS DES TEXTILES

Les textiles sont directement triés par couleurs dès leur arrivée dans les locaux d'Api'Up, afin d'être stockés séparément, et prêts à être broyés. Le travail de groupes par couleur s'est effectué en deux grandes étapes : un premier tri a été effectué en séparant les différentes couleurs en 9 groupes. Des premiers panneaux ont été pressés pour observer le résultat, puis un deuxième tri, suite à une nouvelle réflexion, a été mis en place afin d'apporter les modifications nécessaires pour affiner les premiers tris, ce qui a conduit à une séparation en 19 groupes.

Le nuancier de l'entreprise SOKOA évolue (annexe 3), ce qui impacte le tri et les groupes de couleurs formés. L'upcycling est dépendant de son gisement, il faut donc être conscient que la production du matériau final ne peut pas être parfaitement identique au fil du temps.



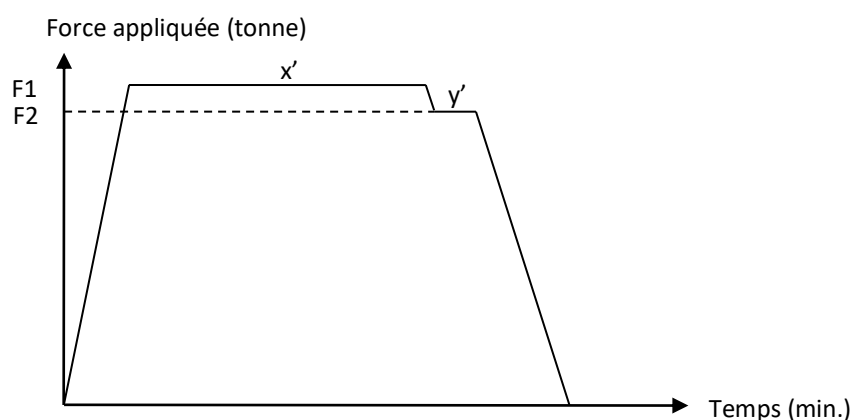
Figure 81 : Stockage des textiles triés par couleur

2.2.3 PRESSAGE DES PANNEAUX TEXTILES

Le pressage des panneaux textiles est réalisé dans les mêmes presses de thermocompression que les panneaux cuir. Après la pesée du mélange de PET, les « boulettes » de fibres textiles ont été cassées à la main pour obtenir des amas de la plus petite taille possible. Le mélange a ensuite été placé dans un cadre métallique amovible sur une plaque en métal revêtue de téflon. Le mélange a été réparti le plus homogènement possible puis pré-tassé manuellement à l'aide d'une pièce métallique plate. Trois dimensions de cadre ont été utilisées, selon celle du panneau : en métal de 22,5x22,5 cm ; en mélaminé de 49,9x48,6 cm (assise) ou de 54,6x30 cm (dossier). Deux dimensions de plaque ont été utilisées : 29x29x0,15 cm ou 56x56x0,15 cm. Des cales de 1,2 ou 1,35

cm ont été utilisées, posées à côté des plaques téflonnées d'une épaisseur de 0,2 cm. Elles permettent d'imposer une épaisseur de 8 ou 9,5 mm. Le panneau produit est ensuite laissé refroidir sous des poids pour éviter les déformations.

Pour placer et enlever l'ensemble à presser entre les plateaux, des gants de protection contre la chaleur (ROSTANG, PARA4HEAT+ gamme G3A) sont employés. Lorsqu'ils sont chauffés à plus de 200°C, ces deux polymères émettent des Composés Organiques Volatils (COV), dangereux pour la santé : des diènes, alcanes et alcènes de longueur de chaîne carbonée allant de C9 à C31 pour le PP ; des paraffines, oléfines et hydrocarbures aromatiques pour le PET. Pour des raisons de confidentialités, les paramètres du cycle de pressage (figure 81) ne seront pas détaillés.



2.2.4 CARDAGE DES FIBRES

Afin d'obtenir une matière défibrée, homogène (ne présentant pas d'amas), et surtout des mélanges de couleur plus homogènes, les textiles broyés ont été cardés à l'aide d'une cardeuse ELBA (figure 82). Il s'agit d'une machine d'ancienne facture, principalement utilisée par les tapissiers d'ameublement pour aérer les balles de crin ou de laine. Le broyat est entraîné par aspiration entre deux disques hérissés de pointes, qui vont intimement mélanger les fibres entre elles. Deux passages sont idéalement nécessaires afin d'obtenir un mélange homogène. La couleur résultante est composée des couleurs initiales selon leurs proportions. Le mélange cardé est ensuite brassé à la main pour supprimer les éventuels agglomérats restants.



Figure 83 : Cardeuse à crin Elba

2.2.5 OPTIMISATION DU PROCÉDÉ

La phase de développement du Polyspher a débutée en 2021. Des premiers essais ont été réalisés en 100% polyester en un seul pressage, puis une réflexion a été menée sur l'optimisation de ce nouveau matériau. Une organisation assimilable à un composite structural a été développée : un composite sandwich. Il est composé de trois strates : deux couches extérieures (CE) fines en PET présentant notamment des propriétés esthétiques ; et une couche interne (CI) plus épaisse et moins dense en PET et PP. Dans la couche interne, pouvant elle-même être considérée comme un composite renforcé par fibres, le PP fondu constitue la matrice et les fibres de PET le renfort, tous deux organiques. L'objectif de cette optimisation a été d'augmenter la cohésion de la couche externe (CE), de manière à améliorer la résistance à la traction transversale et réduire l'infiltration de PP fondu au travers des couches externes. Pour cette étape, deux paramètres ont été étudiés : la densité surfacique des fibres de PES, comprises entre 0,089 et 0,222 g.cm⁻², et la température des plateaux de la presse (entre 220 et 230°C). Le pressage des couches externes en amont permet un début de fonte partiel du PET assimilable à un frittage. L'assemblage est ensuite réalisé, permettant de fondre le PP.

L'optimisation a été organisée en différentes étapes décrites dans les paragraphes ci-dessous :

1- Optimisation de la couche interne (CI)

Le but de l'optimisation de la CI était d'obtenir les performances mécaniques indiquées par le cahier des charges en flexion et en cohésion interne. Le paramètre étudié pour cette optimisation est la température et la proportion de PES et de PP. Le rapport massique PES/PP a été varié de 40/60 à 60/40 pour une masse volumique de panneau d'environ 950 kg/cm³. Deux températures ont été

évaluées : 180 et 230°C. Les panneaux ont tous été pressés à une pression de 3,70 MPa pendant 10 minutes avec une cale de 10 mm.

Tableau 16 : Paramètres des essais d'optimisation de la couche interne

Référence (n° test)	5-PE-07	5-PE-08	5-PE-09	5-PE-10	5-PE-11	5-PE-12	5-PE-13	5-PE-14	5-PE-16
Ratio PES/PP	50/50	40/60	70/30	60 / 40	50/50	40/60	60/40	30/70	30/70
Température de pressage (°C)	180	180	180	180	230	230	230	230	230

2- Opération de pressage de la couche externe (CE)

Après dépôt de la matière au milieu du cadre, ce dernier a ensuite été retiré et une feuille de papier kraft a été placée au contact de la face rugueuse. Ensuite, une seconde plaque métallique a été apposée. Le papier kraft permet d'obtenir un état de surface plus propice à l'établissement d'une interface CE/CI solide. Le mélange a ensuite été placé sous presse. Par la suite l'utilisation de plaques aluminium revêtues en téflon a permis l'obtention de surfaces lisses et planes. Mais les essais effectués ont montré qu'une surface pressée avec du papier kraft permettait une meilleure adhésion de la CE à la CI, comparée à celle pressée contre une plaque téflonnée.

Les deux surfaces de la CE n'ont donc pas été mises en contact avec les mêmes surfaces lors de leur fabrication : la surface destinée au contact avec l'extérieur a été pressée sur une plaque d'aluminium téflonnée tandis que la surface assemblée à la CI a été pressée contre du papier kraft.

3- Assemblage

Après pesée du mélange PET/PP pour la CI, une première CE a été placée, face rugueuse vers le haut, sur une plaque métallique téflonnée. Le cadre amovible a été disposé, le mélange y a été placé et les amas ont été cassés manuellement puis le mélange pré-tassé manuellement. Le cadre a ensuite été retiré, puis la deuxième CE et une seconde plaque métallique téflonnée ont été disposées de la même manière. L'ensemble a ensuite été placé sous presse.

4- Optimisation de l'assemblage

Une fois les CI et CE optimisées, deux techniques d'assemblage ont été évaluées (Figure 83). L'adhésion entre les couches ainsi que le temps de fabrication ont été comparés pour évaluer les techniques.

Une fabrication en deux temps : (1) fabrication des CE, (2) dépôt de la matière de la CI entre les deux CE préalablement pressées et pressage de l'ensemble du panneau.

Une fabrication en trois temps : (1) fabrication des CE, (2) fabrication de la CI, et (3) superposition des trois couches, puis pressage pour leur assemblage.

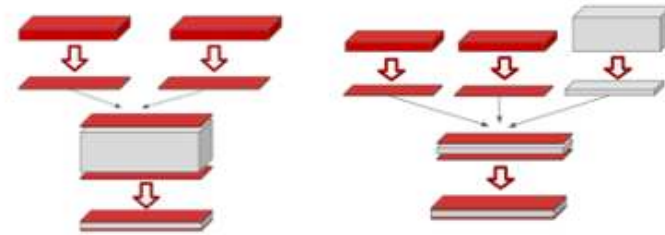


Figure 84 : Schémas du pressage d'un panneau Polyspher en 2 temps (à gauche) et en 3 temps (à droite)

5 - Découpe et finition des panneaux

Une fois refroidi, le panneau a été découpé aux dimensions à l'aide d'une scie à ruban puis poncé à la ponceuse sur table (grain 120). Les congés d'arrêtes, lorsqu'ils étaient nécessaires, ont été usinés à l'aide d'une défonceuse sur table avec une fraise quart de rond de 5 mm.

2.2.6 USINAGE DES PANNEAUX TEXTILES

Différents essais d'usinage ont été réalisés afin de tester les différentes méthodes de découpes et d'assemblage utilisées par Api'Up. Sept techniques ont été réalisées sur un échantillon de panneau (Découpe à la scie à format et à la scie à ruban, usinage à la toupie, vissage, perçage, assemblage avec des pointes, insert à visser et à frapper, usinage à la lamelleuse)

Des essais de découpe et de gravure à la laser TROTEC ont également été réalisés. La découpe n'a été réalisable que sur des panneaux de fines épaisseurs de moins de 1cm, dû aux contraintes de la machine. Plusieurs paramètres ont été utilisés afin d'optimiser au mieux les aspects de finitions.

2.2.7 MOULAGE DES PANNEAUX TEXTILES

Pour tenter de limiter les débordements de matière, un moule constitué d'un cadre de 29x29x6 cm et d'un piston 29x29x4,5 cm a été conçu au laboratoire. Il a été fabriqué à partir de profilés en acier de 3x6 cm. Un des côtés est amovible et doté d'attaches à griffe-goupille pour permettre de retirer les plaques et le panneau (figure 84). Le mélange encadré des deux plaques téflonnées y est placé, puis le piston est placé sur le dessus. Étant donné l'épaisseur des plaques, ce moule permet donc de réaliser des panneaux de 1,2 cm d'épaisseur.



Figure 85 : Moule fabriqué au laboratoire pour le pressage des panneaux textiles

2.2.8 CINTRAGE DES PANNEAUX TEXTILES

Deux moules réalisés au laboratoire ont été utilisés pour le cintrage : l'un imposant un grand rayon de courbure, le second un rayon plus faible (figure 85). Le panneau y a été placé en sortie de presse, et le moule a été maintenu par des poids et des serre-joints. Le refroidissement s'est fait également sous hotte, pendant plusieurs heures.



Figure 86 : Moule de ceintrage du polyester avec un grand rayon de courbure

2.3 CARACTÉRISATION

2.3.1 MESURES PHYSIQUES DES FIBRES TEXTILES

ANALYSES DSC

Le comportement des mélanges textile en température a été évalué par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) par une DSCQ20, TA Instruments selon le cycle suivant : 20°C → 105°C → -50°C → 250°C (PP) ou 300°C (PET) → 20°C sous flux d'azote. Les rampes ont été de 10°C/min. Les thermogrammes obtenus sont présentés dans les résultats.

Une DSC consiste à comparer l'évolution d'un flux de chaleur traversant un échantillon comparé à celui traversant une référence vide (air). Cette différence permet de déduire les enthalpies et températures de changement d'état / de phase que subit l'échantillon au cours de la montée et de la descente en température. En raison d'un léger dysfonctionnement, les analyses DSC présentent une erreur de ligne de base qui n'a pas été corrigée. Les pics de fusion et de cristallisation restent exploitables. Les pics exothermiques sont dirigés vers le haut. N'est présenté que le second cycle.

MODELISATION DE LA DIFFUSION THERMIQUE SOUS MATLAB

Dans l'optique de prédire les conditions optimales pour chaque taille de panneaux, modéliser son comportement sous presse était une piste intéressante pour pouvoir déterminer le temps total que le panneau y passe : t_{total} . Pour cela, il faut savoir au bout de combien de temps le PP aura totalement fondu. A cette fin, un programme de calcul sous Matlab (compatible avec le logiciel libre Octave) a été réalisé.

Le calcul suit la méthode d'Euler implicite. Il tient compte de l'écrasement progressif de la matière, de la quantité d'air présente dans le mélange, du chauffage des plateaux et des extrémités du panneau au contact de l'air, ainsi que d'un gradient de température présent sur les plateaux. L'opérateur peut définir plusieurs matières composant le matériau, plusieurs couches aux comportements différents, ainsi que différentes vitesses d'écrasement. Dans ces conditions, il est possible de « visualiser » l'évolution théorique de la température à l'intérieur du panneau au cours du temps, et ainsi de déterminer la durée minimale pour atteindre une valeur de température donnée.

2.3.2 ESSAIS MÉCANIQUES DES PANNEAUX TEXTILES

La norme NF EN 310 impose pour le test en flexion 3 points sur des panneaux une distance entre les deux points d'appui d'au moins 20 fois l'épaisseur du panneau. Il impose également que la longueur de l'échantillon soit au moins 50 mm plus grande que la distance entre les deux appuis.

Pour des panneaux d'en moyenne 10 mm d'épaisseur, il est donc nécessaire que la distance entre les deux points d'appui soit de 200 mm et que la longueur de l'éprouvette soit de 250 mm. Il n'a pas été possible de produire des éprouvettes d'une telle dimension sur les panneaux réalisés (250 x 270 mm) en raison de l'inhomogénéité entre le centre et les bords du panneau. Il a été nécessaire de retirer au moins 25 mm sur chaque extrémité pour éviter les effets de bord. Les éprouvettes ont donc été découpées aux dimensions 200 x 30 mm et les tests effectués avec une distance entre appuis de 180 mm. Le matériau étudié n'étant pas du bois et les essais ayant été réalisés selon la même procédure, les résultats obtenus ont été considérés valables pour l'étude même si non valables selon la norme.

Les tests de flexion 3 points et de traction transversale ont été effectués à l'aide d'une machine d'essais universelle polyvalente SYNTAX de la marque 3R. Six éprouvettes (trois pour chaque test) ont été découpées sur un même panneau de 250 x 270 mm. La découpe des échantillons a été effectuée à l'aide d'une scie circulaire sur table, avec une précision de +/- 1 mm.

Les paramètres des essais sont les suivants :

-Test de flexion 3 points :

Dimension de l'éprouvette : 200 x 30 mm (+/- 1 mm)

Distances entre appuis : 180 mm

- Test de traction transversale :

Dimensions de l'éprouvette : 50 x 50 (+/- 1 mm)

Les valeurs relevées sont les moyennes des contraintes maximales de trois échantillons, calculées par la machine universelle polyvalente SYNTAX.

TESTS D'USINABILITE

Les panneaux Polyspher étant destinés à substituer des éléments structurels de mobilier, il était essentiel de réaliser des tests d'usinabilité. Ce test a été réalisé par l'atelier de menuiserie d'Api'Up afin d'utiliser les mêmes usinages et les mêmes outillages. Différents essais ont été réalisés comme des découpes à la scie à format et à la scie à ruban, des perçages et des vissages, le positionnement d'insert à frapper ou à visser, des usinages à la lamelleuse et à la toupie, ainsi qu'un assemblage bois avec des pointes.

D'autres essais d'usinage ont été réalisés avec une machine Trotec pour découper ou graver au laser CO₂. Cette technologie permet d'usiner un large choix de matériaux, les panneaux en polyester ou polypropylène sont donc compatibles. Cette option a été envisagée dans l'idée de pouvoir

créer des étiquettes en panneau textile très fin afin de pouvoir estampiller la marque Ospher sur les nouveaux mobiliers.

2.3.4 ANALYSE VISUELLES DES PANNEAUX TEXTILES

MESURES CHROMATIQUES

Certains panneaux ont présenté des modifications chromatiques en sortie de presse. Une étude a donc été menée pour faire des premières recherches avec une mise à l'étuve (Air concept de la marque FIRLABO) des échantillons textiles, à la même température que celle utilisée lors de la thermocompression. Deux essais de deux durées différentes ont été réalisés, un premier essai de 20 minutes qui correspond au temps de pressage lors du pressage des panneaux, puis un second de 1h30. Pour le test préliminaire de décoloration, des morceaux des textiles d'intérêt ont été placés dans une étuve à la température de pressage, pendant la même durée que celle du temps de pressage, ou pendant 2 heures pour déceler des changements moins apparents.

Un contretypage numérique a été réalisé pour référencer les modifications chromatiques des textiles après exposition à la chaleur. A partir de ces références numériques ont été extraits les codes $L^*a^*b^*$ afin de pouvoir calculer le Delta E qui permettra d'évaluer la différence de couleur entre les différents échantillons textiles exposés à la chaleur.

MESURE DE BRILLANCE

Des panneaux textiles du second nuancier de dix-neuf teintes ont été mesurés pour observer la brillance. Les panneaux ont été pressés entre deux plaques métallique téflonnée avec d'un seul côté une feuille de papier kraft pour observer la différence de l'état de surface final. Chaque face a donc été mesuré cinq fois pour obtenir une moyenne. Suites aux premières mesures, les résultats étant inférieurs à 10 GU, l'appareil a été réglé sur l'angle de 85°, préconisé pour la mesure des surfaces à faible brillance.

(Cf 1.3.4 mesures de brillances des panneaux de cuir)

2.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LES PANNEAUX TEXTILES

2.4.1 NUANCIERS TEXTILES

La première phase de tri a permis d'effectuer ce premier nuancier de neuf panneaux (figure 87). L'observation de ces résultats a permis de poursuivre la réflexion sur les groupes couleurs car certains panneaux présentaient des tâches, dues à la complexité à mélanger la matière. Ces tâches peuvent paraître inesthétiques. Certains groupes étant plus homogènes que d'autres, il a été préférable de segmenter d'avantage les groupes afin de garantir une meilleure reproductibilité. Le souci étant que le tri des textiles par couleurs doit s'effectuer au fur et à mesure des arrivages, les textiles s'empilent alors par strates de nuances différentes et il n'est pas possible de les mélanger avant de prélever une quantité à broyer. Ce paramètre non modifiable est donc à prendre en compte dans la conception esthétique des panneaux mais il n'est pas forcément un point négatif car il peut apporter une certaine singularité au matériau. Le but n'étant pas de créer des plaques de plastiques lisses et uniformes comme il en existe déjà sur le marché, mais une matière qui raconte une histoire en gardant son identité de départ : le textile.

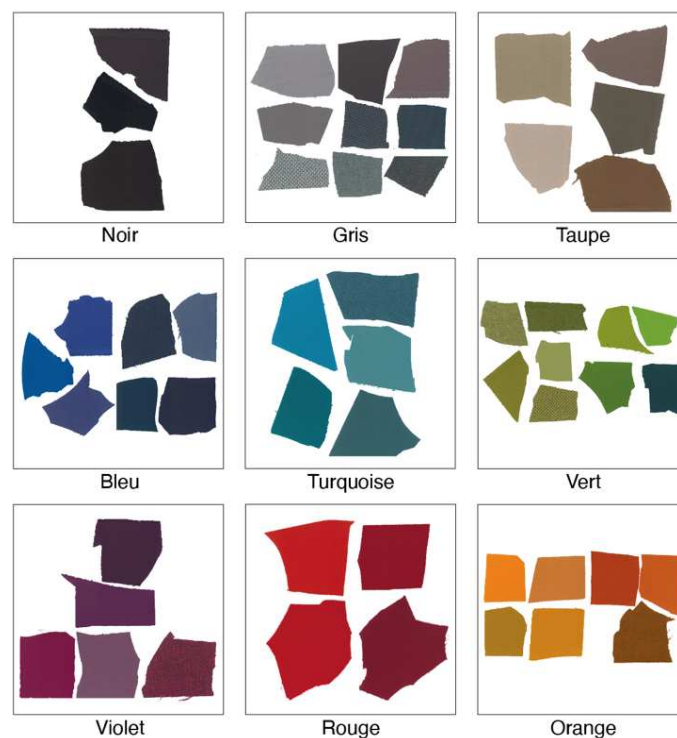


Figure 87 : Premier tri couleur des textiles en 9 groupes

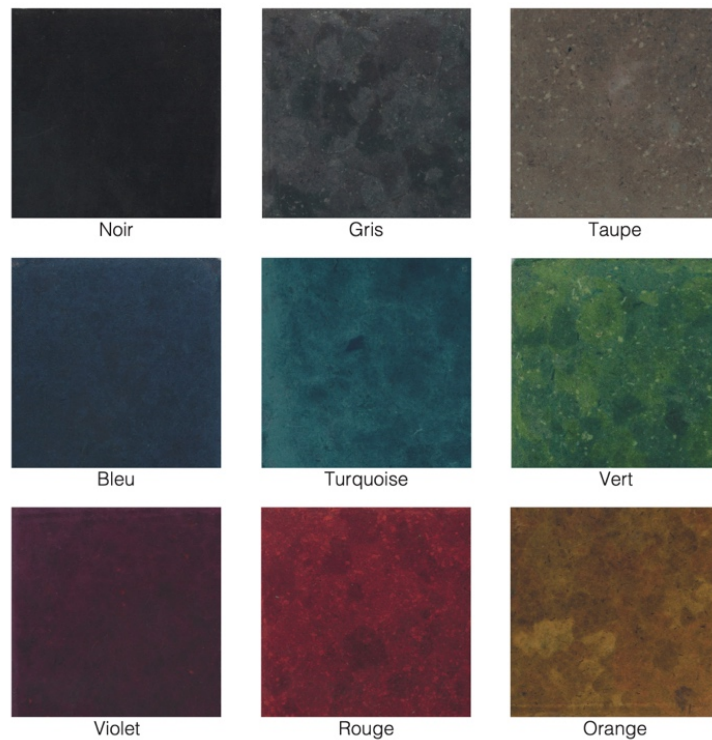


Figure 88 : Premier nuancier de panneaux textiles avec 9 groupes couleurs

Le panneau noir est uniforme, son groupe couleur ne comportant pas des nuances variées, c'est la teinte la plus reproductible. Le bleu en est très proche mais présente de légères nuances et il en est de même pour le violet. Ce dernier présente une petite particularité avec des points rouges, que l'on appellera « pollution », qui sont dû soit à une erreur de tri soit un mauvais nettoyage du broyeur. (Au vu des petites quantités et du grand nombre de couleurs différentes testés, le nettoyage du broyeur entre chaque demande du temps et de la minutie mais cette contrainte qui est accentué lors de la phase de recherche sera atténué avec l'augmentation des quantités d'une production à plus grande échelle.) Le turquoise présente des nuances plus marqués et plus contrastés. Les panneaux gris, taupe, vert et rouge sont plus hétérogène, avec un mélange de nuances fondues, de tâches et de petits points. Ces derniers ne sont pas une pollution comme évoqué précédemment, il s'agit de certaines typologies de textile qui réagissent différemment au broyage. L'orange quant à lui présente des tâches contrastées mais pas de petits points. Ces groupes de tri comportant plus de couleurs que les premiers cités, leur résultat est donc plus hétéroclite et moins uniforme.

Cette notion de reproductibilité, comme évoqué précédemment, n'a pas pour but d'uniformiser le matériau. Cette seconde phase de travail sur le tri des groupes couleurs (figure 88) a été pensée de manière à mieux maîtriser le mélange de cette matière à la fois pulvérulente et agglomérante. Le but était de pouvoir choisir les différentes proportions des teintes dans chaque mélange afin

d'atténuer le prélèvement par strates en fonction des arrivages. Il y aurait donc la même quantité de bleu clair et de bleu foncé dans chaque panneau bleu par exemple.

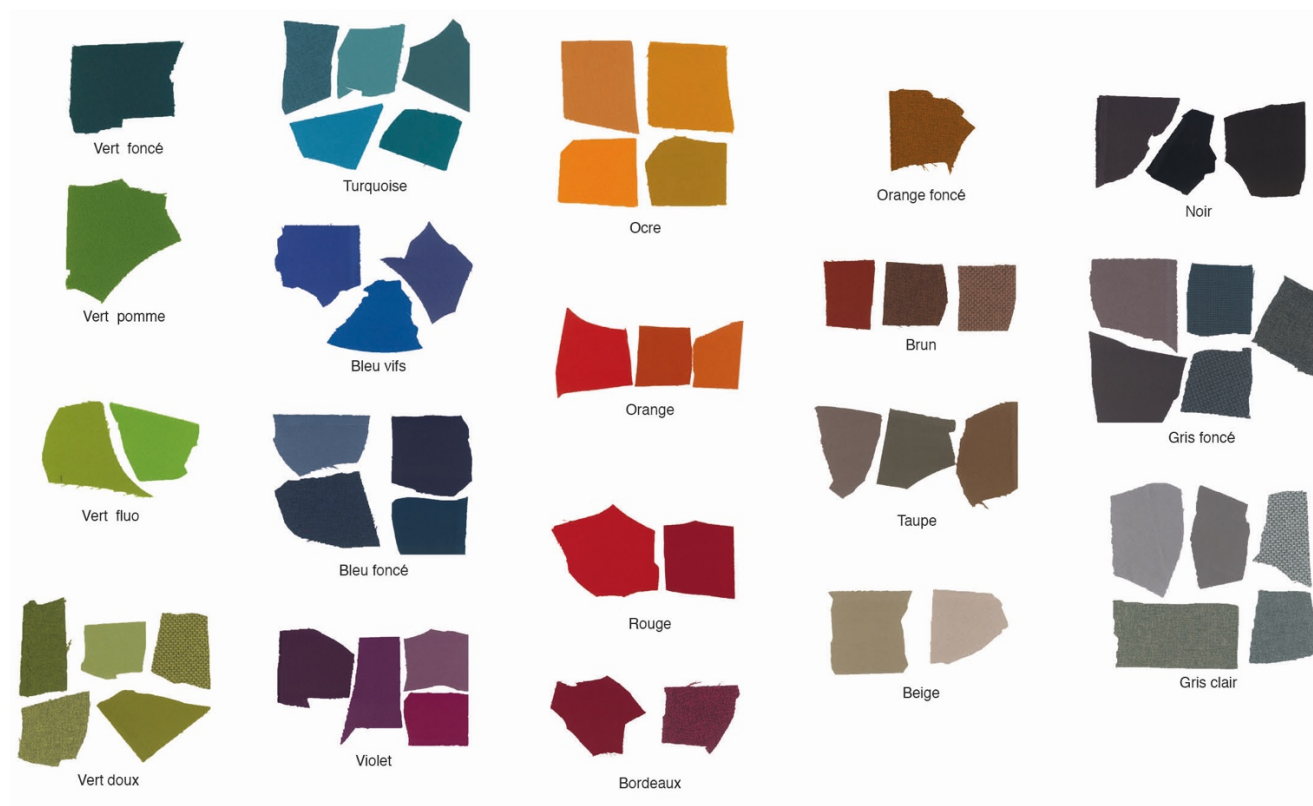


Figure 89 : Nuancier textile des 19 groupes couleurs

Certaines couleurs n'étaient pas prises en compte comme les bruns. Le nuancier de 19 couleurs présenté dans la figure 89 n'est pas figé car les couleurs fluctuent en fonction des saisons et des tendances, ce qui amène à intégrer ultérieurement de nouvelles couleurs dans le groupe le plus adéquat.

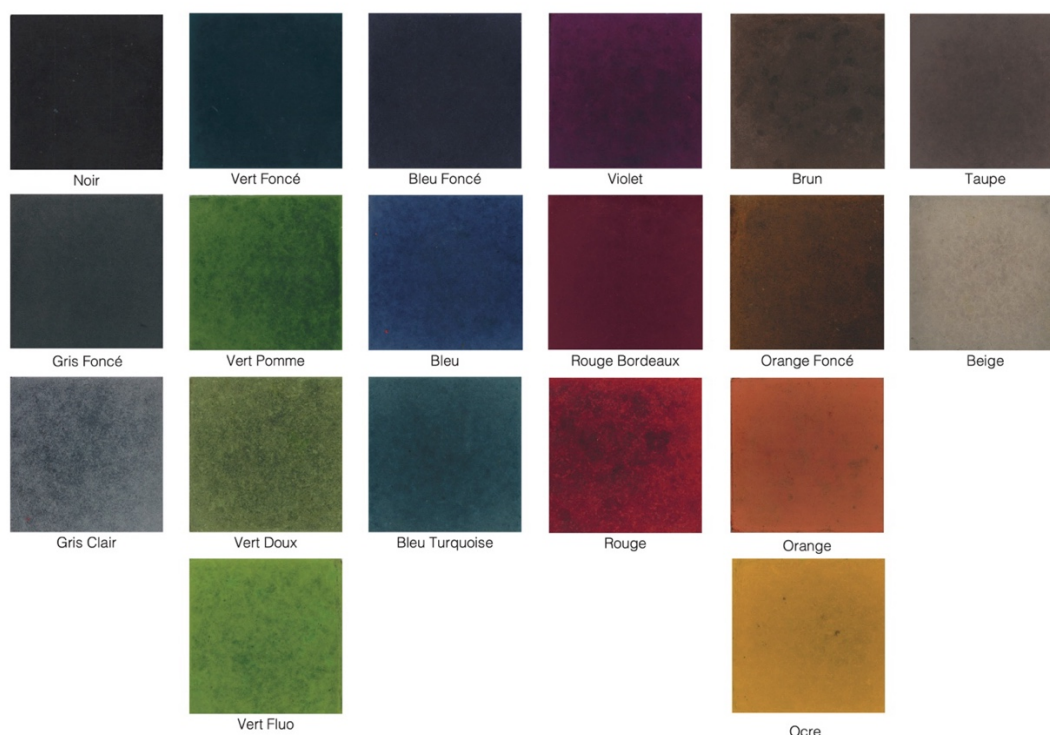


Figure 90 : Second nuancier de panneaux textiles avec 19 groupes couleurs

Cette séparation en 19 groupes a en effet permis d'homogénéiser le rendu des panneaux et d'éliminer les tâches des différentes nuances mal mélangés. Cependant des traces sombres dues à la température du pressage sont d'avantage visibles.

2.4.2 OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DE FABRICATION

Il est apparu que l'assemblage des panneaux en deux temps a permis une meilleure adhésion de la CI avec les CE. De plus, elle nécessitait moins d'étapes et de temps de fabrication. Pour l'optimisation de la fabrication des CE, une première étape a été la détermination d'une masse volumique, le calcul étant fait jusqu'ici à partir d'une densité surfacique. A la suite de plusieurs essais (différentes masses pour une même dimension) et les mesures des dimensions des CE cohésives obtenues, elle a été fixée à 1 100 kg/m³. La pression de mise en forme a été testée à 2,2 MPa et à 3,1 MPa. Les couches externes les plus rigides ayant été obtenues à 3,1 MPa, c'est cette pression qui a été retenue.

Des problèmes d'inhomogénéité et/ou de modification de coloration ont été observés après thermocompression lors de cette première série de tests. Cela a été attribué à une sensibilité à la chaleur de certaines teintures des tissus, ainsi qu'à la présence d'autres composés présents dans les textiles (traitement ignifugeant par exemple). Les CE rouges présentaient par exemple des tâches noires. Par ailleurs, des stocks limités de matière et un approvisionnement inconstant (recyclage)

ont imposé plusieurs changements de typologie de PET non cardés, et ne permettaient pas un contrôle optimal des paramètres.

Une des deux grandes plaques téflonnées a été courbée pour les besoins du cintrage comme expliqué précédemment, et une autre plaque utilisée en remplacement a généré des plis et un collage du papier kraft sur les couches externes, les rendant inutilisables.

Pour des densités surfaciques de 0,089 et 0,119 g.cm⁻², la matière n'a pas recouvert l'ensemble de la surface (figure 90), tandis que celle de 0,148 g.cm⁻² a permis d'obtenir une couche opaque et cohésive. (CE) de gauche à droite : 0,089 ; 0,119 et 0,148 g.cm⁻².

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un mélange de PET 70% noir / 30% bleu cardé deux fois. Ce mélange a été utilisé pour la réalisation ultérieure des panneaux Polyspher. De plus, cette coloration de CE correspond aux prototypes de Polyspher développés dans la phase précédente du projet, et le noir masque les hétérogénéités de frittage.



Figure 91 : Comparaison de la cohésion en fonction de la densité surfacique

L'utilisation de plaques aluminium revêtues en téflon a permis l'obtention de surfaces lisses et planes. Au contraire, l'utilisation de papier kraft provoquait de la rugosité et une tendance à s'effriter lors de la friction. Des essais ont montré qu'une surface pressée avec du papier kraft permettait une meilleure adhésion de la CE à la CI, comparée à celle pressée contre une plaque téflonnée.

Les deux surfaces de la CE n'ont donc pas été mises en contact avec les mêmes surfaces lors de leur fabrication : la surface destinée au contact avec l'extérieur a été pressée sur une plaque d'aluminium téflonnée tandis que la surface assemblée à la CI a été pressée contre du papier kraft.

Avec un pressage à 180°C, les panneaux de CI obtenus ont montré des résultats médiocres, en particulier pour des proportions de PES inférieures à 50% conduisant à des panneaux trop pelucheux et pas assez cohésifs. Les panneaux préparés avec des proportions relatives PES/PP de

70/30 et 60/40, ont montrés des contraintes maximales en flexion 3 points de 5,65 et 9,87 MPa et des contraintes maximales en traction transversale de 0,25 et 0,18 MPa respectivement.

De bien meilleurs résultats ont été obtenus avec un pressage à 230°C. Dans ce cas, une progression de la contrainte maximale en flexion 3 points a été observée avec l'augmentation du pourcentage de PP dans la CI. La meilleure performance a été obtenue avec un rapport massique PES/PP de 40/60.

2.4.3 INFLUENCE DU CARDAGE DES FIBRES

L'étape du cardage a été primordiale pour le mélange des fibres textiles broyées. Autant sur le plan esthétique pour l'homogénéité des couleurs que sur le plan physique. La matière est moins agglomérée, ce qui uniformise sa compression lors du pressage. Le cardage a également permis un meilleur mélange du PET et du PP qu'à la main, et cela a eu une incidence sur les propriétés mécaniques des panneaux.



Figure 92 : Homogénéisation de la couleur par le cardage des fibres



La figure 91 démontre l'efficacité du mélange des couleurs, après 2 passages dans la cardeuse avec des fibres broyées roses et bleues claires, le panneau obtenu a pris une teinte violette. Il a également été expérimenté de mélanger différentes tailles de fibres. Sur la figure 92 on peut voir un mélange réalisé avec des fibres broyées en 3mm et 10mm (les couleurs ont été choisies de manière aléatoire pour ce test). La taille des longues fibres reste visible à la surface du panneau et donne un tout autre résultat esthétique.

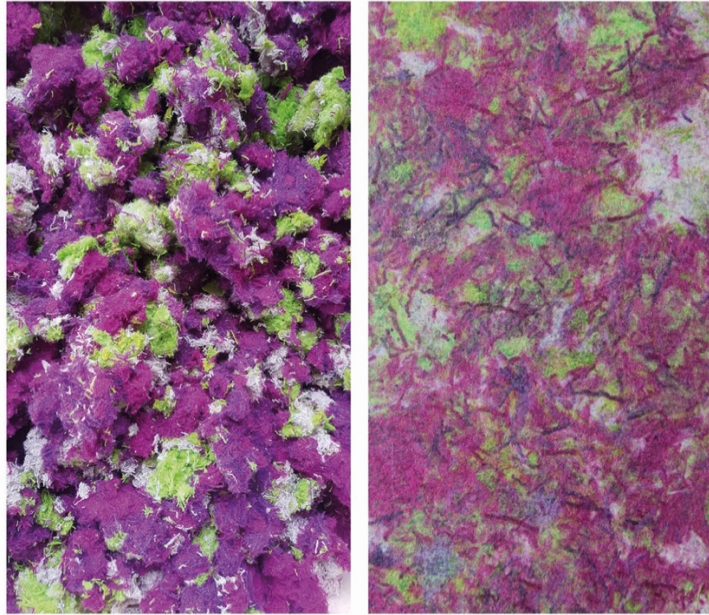
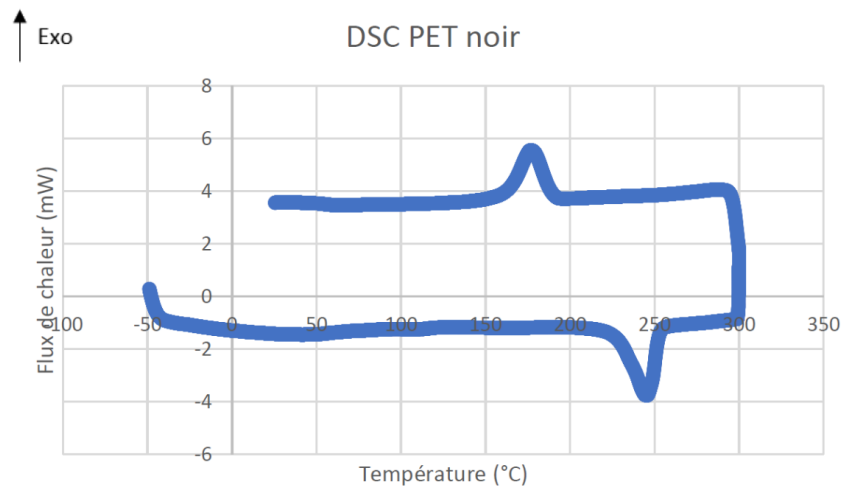


Figure 93 : Homogénéisation de fibres de 3 mm et 10 mm par le cardage

2.4.5 INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-MÉCANIQUES

ANALYSES DSC DES FIBRES TEXTILES

On observe sur la figure 93 que la fusion de ces PET commence aux alentours de 220°C, ce qui permet d'effectuer le frittage.



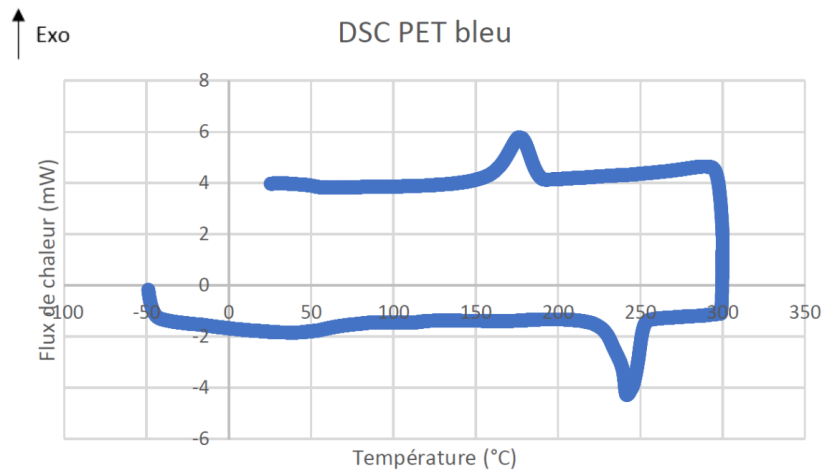


Figure 94 : Cinétique DSC du PET bleu et noir

La figure N°94 présente les résultats de l'analyse DSC sur des textiles PP. On observe un pic multiple, probablement caractéristique d'un mélange de plusieurs typologies de PP. La température de fusion maximale semble être aux alentours de 165°C.

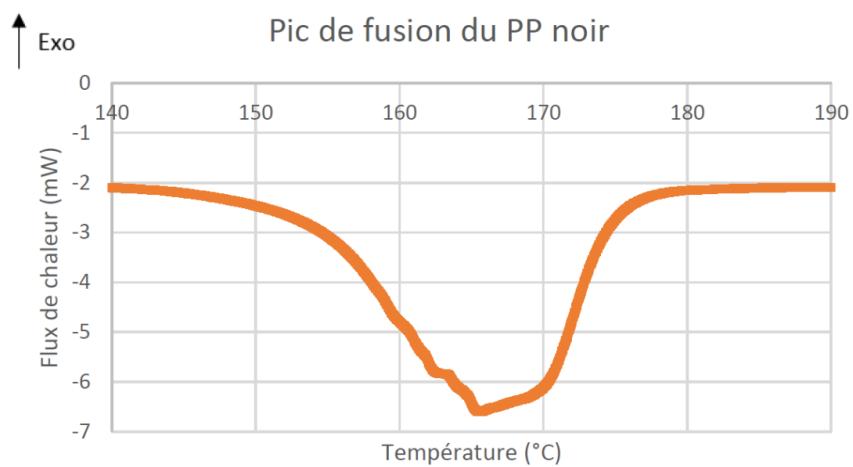
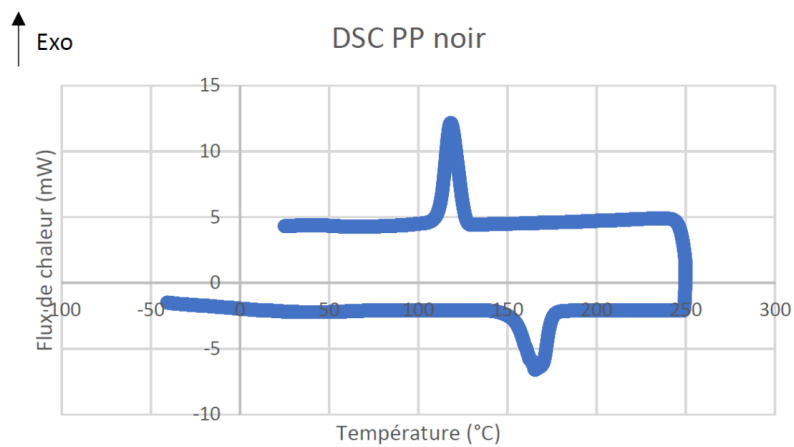


Figure 95 : Cinétique DSC du PP noir

FLEXION 3 POINTS DES PANNEAUX TEXTILES

Les panneaux tri-couches réalisés à partir d'un mélange à la cardeuse ont présenté une résistance mécanique en flexion 3 points de 24,3 MPa contre 22,1 MPa pour le mélange à la main. Les faciès de rupture (figure 95) ont montré que l'homogénéité était meilleure pour un mélange préparé à la cardeuse. En effet, avec un mélange à la main, des agglomérats de fibres de PES non imprégnées par le PP fondu, ont formé des couches, réduisant la résistance mécanique. Lors de la flexion, ces couches ont cédé les unes après les autres au contraire du mélange intime qui a cédé d'un seul coup.



Figure 96 : Observation de la cohésion de la couche interne non cardé (gauche) et cardé (droite)

L'utilisation de fibres de 1,5 mm ou 3 mm de PP n'a pas modifié les performances mécaniques. Les fibres de PP de 3 mm ont été privilégiées afin de s'accorder avec la taille des fibres de PES en 3 mm et ainsi limiter les réglages à effectuer lors du broyage. Par ailleurs, le broyage à 1,5 mm est beaucoup plus énergivore et générateur de rebuts. Un essai de proportion 30/70 PES/PP a été effectué au vu de la tendance des performances mécaniques à augmenter avec la quantité de PP. Le panneau obtenu a fortement fondu, le rendant inapte à l'application souhaitée. Il était également impossible de former des éprouvettes à partir de ce panneau. En réduisant le temps de pressage à moins de 10 minutes, le résultat a été similaire.

Les résultats en traction transversale des trois proportions montrent que les contraintes maximales dépassent toutes les 0,6 MPa attendus. La meilleure performance moyenne est atteinte avec une proportion massique PES/PP de 50/50. Au regard des essais en flexion 3 points, c'est donc la proportion PES/PP 40/60 qui a été retenue.

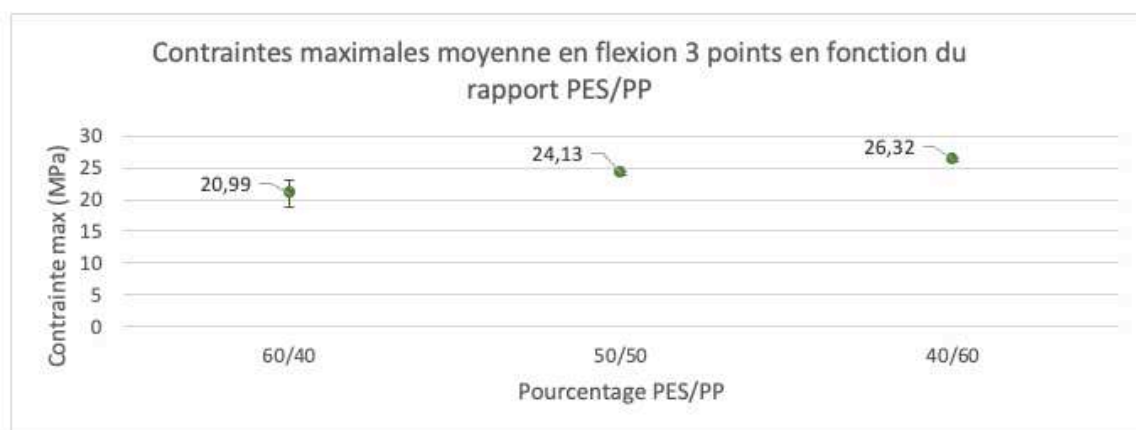


Figure 97 : Contraintes maximales moyennes en flexion 3 points des différentes proportions

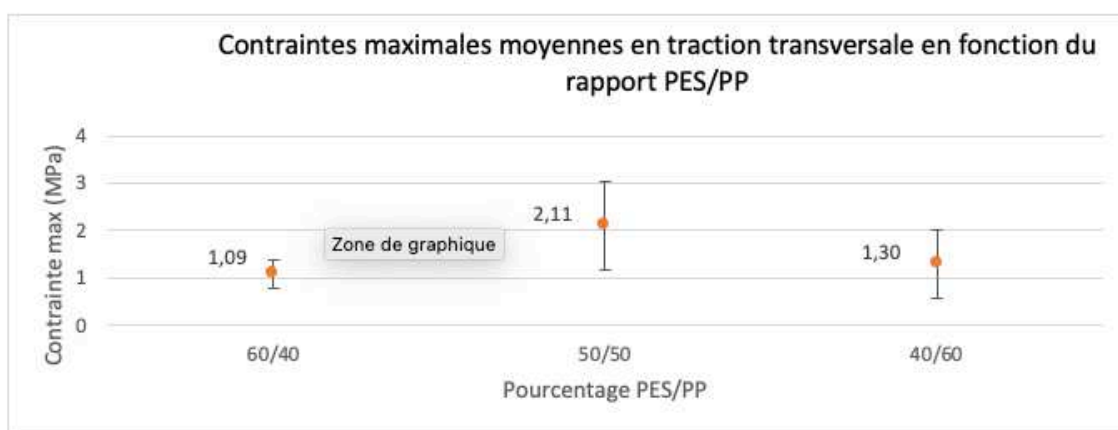


Figure 98 : Contraintes maximales moyennes en traction transversale des différentes proportions

2.4.6 INCIDENCE DE LA RÉPARTITION DE LA CHALEUR LORS DU PRESSAGE

La température de fusion maximale du PP déterminée par DSC est de 165°C. Par mesure de précaution, une marge de 6%, soit 180°C, sur T_f a été programmée pour déterminer le temps total sous presse. Ainsi, il est possible d'observer sur la figure 94 que le modèle prédit que tout le PP sera fondu au bout d'environ 8 minutes dans un panneau de 50x50x1,3 cm. Ceci pourrait expliquer le débordement important observé au cours des essais, où le panneau restait plus de 10 minutes sous pression, sachant qu'une partie du PP est fondue bien avant 8 minutes. Pour un plus petit panneau de 25x25x1,3 cm, cette durée passe à 7'30". Ce modèle reste à confronter à l'expérimentation, et un facteur d'amortissement sera probablement à rajouter à la suite de mesures par thermocouple. Ce facteur serait à ajouter au niveau de t_c : juste après l'écrasement de la matière. De plus, deux facteurs supplémentaires devraient être pris en considération : la vitesse de dégagement de l'air une fois le PP fondu, ainsi que de la taille du panneau (épaisseur et longueur) si elle s'avère exercer une

influence sur cette vitesse de dégagement. Le deuxième facteur impactera la diffusion thermique de la boucle après t_c , ou pourrait impliquer la création d'une nouvelle boucle entre la phase de fusion et la réouverture de la presse. Enfin, il est à adapter au moule utilisé : notamment dans le cas d'un piston creux, les échanges étant bien moins importants sur la CE en contact avec le piston.

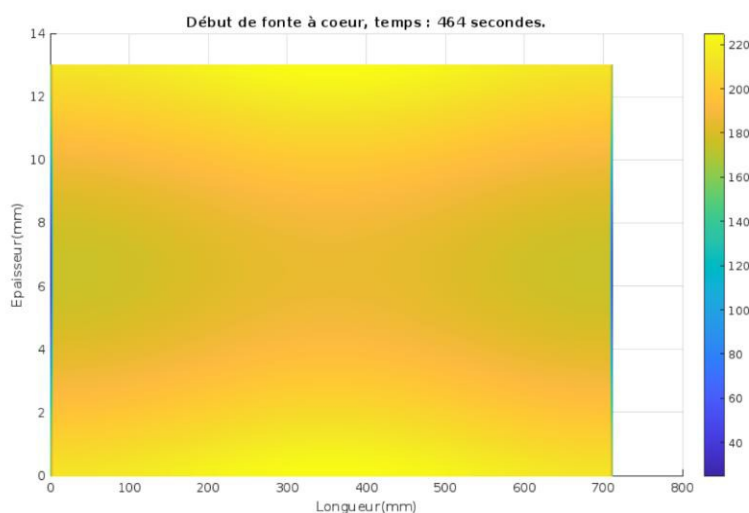


Figure 99 : Modélisation de la répartition de la température à l'intérieur d'un panneau PET/PP

2.4.7 INCIDENCE DU MOULAGE

Les panneaux 6-PE-7, 6-PE-8 et 6-PE-9 ont été réalisés avec un moule spécifique. Les couches externes ont été réalisées en PET bleu pour faciliter le repérage des défauts dans un premier temps. Le piston du moule présente l'inconvénient d'être creux, ce qui réduit grandement sa capacité d'échange thermique entre le plateau chauffant et le panneau. En conséquence, la partie en contact du piston a moins bien fondue (figure 99). Un second piston en aluminium plein, conducteur, est à l'étude. Le débordement a été réduit de façon importante.



Figure 100 : borure du panneau moulé 6-PE-7

Un pressage à froid sur la petite presse a été effectué en amont du pressage moulé. Le fait de pré-presser cette matière réduit significativement l'épaisseur du panneau en entrée de presse, réduisant la taille de moule nécessaire et permettant d'évacuer une grande proportion d'air pour limiter les risques de reprise d'air. Cela a pour effet de réduire par deux le temps nécessaire à passer

en chauffe sous presse. Ne nécessitant que d'une faible pression (0,1 MPa), il implique néanmoins l'usage d'une deuxième presse ainsi que d'un moule rudimentaire pour éviter les débordements. Les panneaux réalisés selon les paramètres du 6-PE-7 avec le moule présentaient un débordement très limité, et le cintrage selon le petit rayon de courbure a été réussi. Cependant, la typologie de PET utilisée pour les CE, choisie pour mettre en exergue les imperfections, trop sensible, ne permet pas d'envisager une montée en échelle.

2.4.8 INCIDENCE DU CEINTRAGE

Le système de cintrage mis en place nous a permis de pouvoir cintrer des panneaux avec des angles supérieurs à 30°. Nous avons observé cependant des craquelures sur la couche externe en extension. Le débordement de la couche interne a été atténué sur le panneau 6-PE-8 grâce au moulage.



Figure 101 : Résultat des essais de cintrage dans le moule à petit rayon de courbure

Les tests de cintrage avec grand rayon de courbure ont été concluants, conduisant à la réalisation d'un dossier de chaise.

2.4.9 INCIDENCE DE L'USINAGE

Les différents essais d'usinage se sont avérés positifs pour la majorité des panneaux à l'exception des inserts qui ont provoqué la fissuration du panneau lors de la frappe et du vissage. Ces résultats permettent d'envisager des découpes et des assemblages entre les panneaux ou des associations avec d'autres matériaux pour la réalisation de mobilier. Seuls les panneaux en 100% polyester ont subi des tests d'usinage afin d'obtenir des premiers résultats.



- 1 - Découpe à la scie à format
- 2 - Usinage mèches à chapelle
- 3a - Vissage
- 3b - Perçage
- 3c - Insert à visser
- 4 - Usinage lamelleuse
- 5 - Assemblage bois avec des pointes
- 6 - Usinage à la toupie
- 7 - Découpe à la scie à ruban

Figure 102 : Essais d'usinages sur un panneau en polyester

Les essais de découpe et de gravure laser se sont montrés concluants. La figure 102 montre des résultats de gravures sur des chutes d'éprouvettes des essais mécaniques, dans le but de pouvoir estampiller le futur mobilier directement sur les panneaux de Polyspher. Différents réglages ont été testés afin de trouver le bon équilibre entre lisibilité et esthétique du logo.



Figure 103 : Essais de gravure laser sur panneaux textiles

2.4.10 INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LA COULEUR DES TEXTILES

La figure 103 présente les résultats obtenus après comparaison de la modification chromatique des textiles exposés à haute température, similaire à la température de pressage des panneaux. Trois échantillons de chaque textile sont présentés : brut, après exposition à haute température pendant 20 min puis après exposition pendant 1h30. Les échantillons qui sont restés seulement 20 min présentent déjà quelques changements mais ne sont pas représentatifs de la modification chromatique observée sur les panneaux. C'est pour cette raison qu'un deuxième essai a été réalisé sur une durée plus longue.

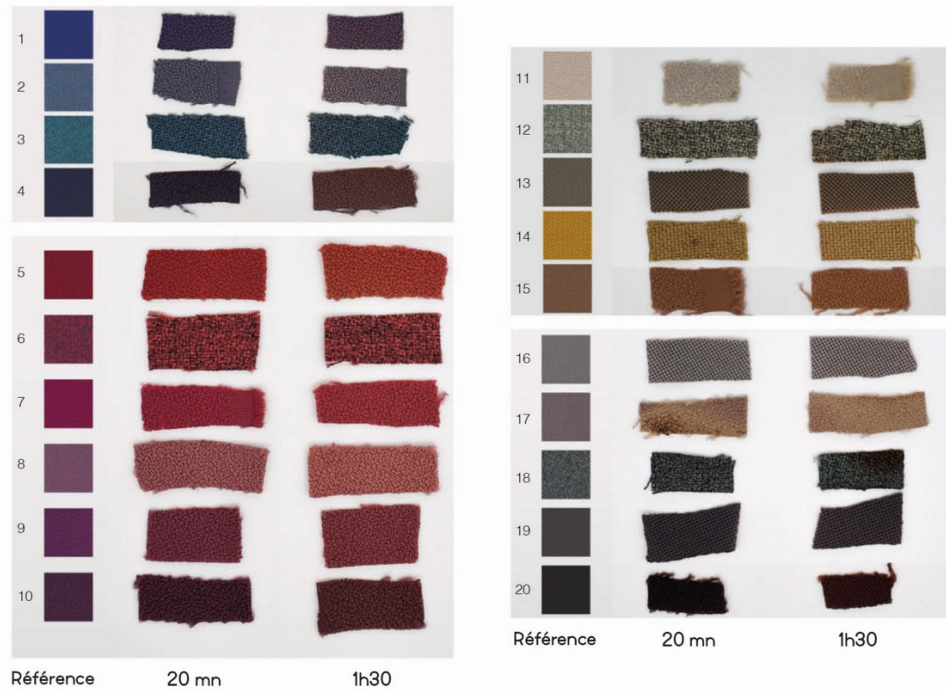


Figure 104 : Échantillons des essais de résistance chromatique des textiles à la chaleur

Une sélection de textiles identifiés comme pouvant présenter un changement de coloration avec la montée en température a été identifiée. L'étude préliminaire de l'évolution de leur couleur a mis en évidence que certains textiles, majoritairement de l'armure caractéristique du tissu STEP réalisé en polyester Trevira CS, présentent une dégradation de couleur importante. Cependant, la variation de couleur semble aussi dépendre de la couleur initiale. Un textile a fondu, indiquant qu'il ne s'agit pas de PET. Il est ainsi difficile à ce stade de déterminer dans quelle mesure la dégradation de couleur est liée au polymère, au(x) pigment(s), au(x) traitement(s) appliqué(s), notamment ceux pour la résistance au feu. On peut donc dire qu'ils subissent un effet thermochromique.

2.4.11 MESURE DE COULEUR

La figure 104 représente les relevés chromatiques numériques effectués d'après la figure 103. Les 20 échantillons de textiles testés à la chaleur y sont représentés, avec trois cercles pour les trois paramètres (référence, 20 min et 1h30). Les coordonnées $L^*a^*b^*$ de chaque cercle ont été relevés pour pouvoir ensuite calculer les Delta E^* afin de connaître les écarts de couleur provoqués par la température.

Le DE^* n°1 compare la couleur de l'échantillon de référence avec celle de celui chauffé pendant 20 min, le DE^* n°2 compare la couleur de l'échantillon chauffé pendant 20 mn avec celle de

celui chauffé pendant 1h30, puis le DE* n°3 compare la couleur de l'échantillon de référence avec celle de celui chauffé pendant 1h30. L'ensemble des résultats sont présentés dans le graphique de la figure 105. La couleur des cercles a été contretypé à l'œil nu, en faisant référence au plus proche de l'impression visuelle ressentie des échantillons. Les données étant issues de couleurs numériques (unies), les résultats ne sont pas basés sur le calcul d'une moyenne et il n'y a pas d'écart types. On constate que pour plus de la moitié des échantillons, la différence de couleur est la plus grande entre l'échantillon de référence et celui exposé à une forte température pendant 1h30. La différence la plus faible se trouve entre les deux échantillons exposés, ce qui correspond à l'observation visuelle. Pour rappel, si $\Delta E > 5$ les deux couleurs sont vues comme distinctes par les observateurs. Dans le cas de cette expérimentation, les trois quarts sont largement supérieurs à ce seuil, ce qui démontre que la chaleur a un fort impact chromatique sur les textiles testés.



Figure 105 : Relevé chromatique des échantillons textiles allant réagit à la chaleur

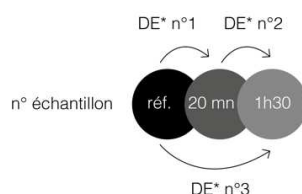


Figure 106 : Détail de la procédure de comparaison entre les différentes variations de teintes d'un même échantillon textile

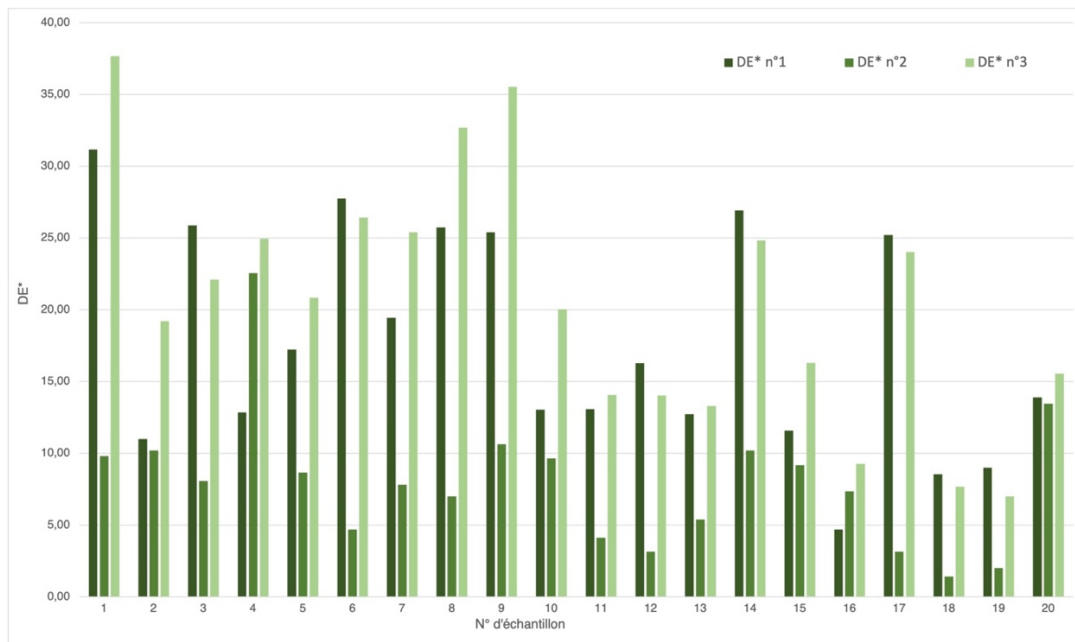


Figure 107 : Graphique de comparaison des DE* entre l'échantillon de base et les températures exposées

2.4.12 MESURES DE BRILLANCE

La brillance de quinze panneaux textiles mesurés est présentée dans le graphique de la figure 107. On constate que la totalité des mesures est inférieure à 8 GU, < 10 GU étant le seuil de « faible brillance ». On peut donc considérer que les panneaux textiles sont d'aspect mat. On observe que la majorité des résultats démontre que le papier kraft donne un état de surface plus mat au panneau que la plaque téflonnée, ce qui correspond au ressenti visuel. Cependant il reste une part de variable, pour certains panneaux mesurés c'est la plaque téflonnée qui a un rendu plus mat. La diversité des typologies des textiles peut être la cause de cette variabilité. L'optimisation des panneaux a également évolué par la suite, mais la brillance n'a pas été remesurée.

Détail des panneaux mesurés : 1 Noir, 2 Gris foncé, 3 Gris clair, 4 Taupe, 5 Beige, 6 Brun, 7 Rouge Bordeaux, 8 Rouge, 9 Orange foncé, 10 Orange, 11 Ocre, 12 Vert fluo, 13 Vert doux, 14 Vert pomme, 15 Turquoise.

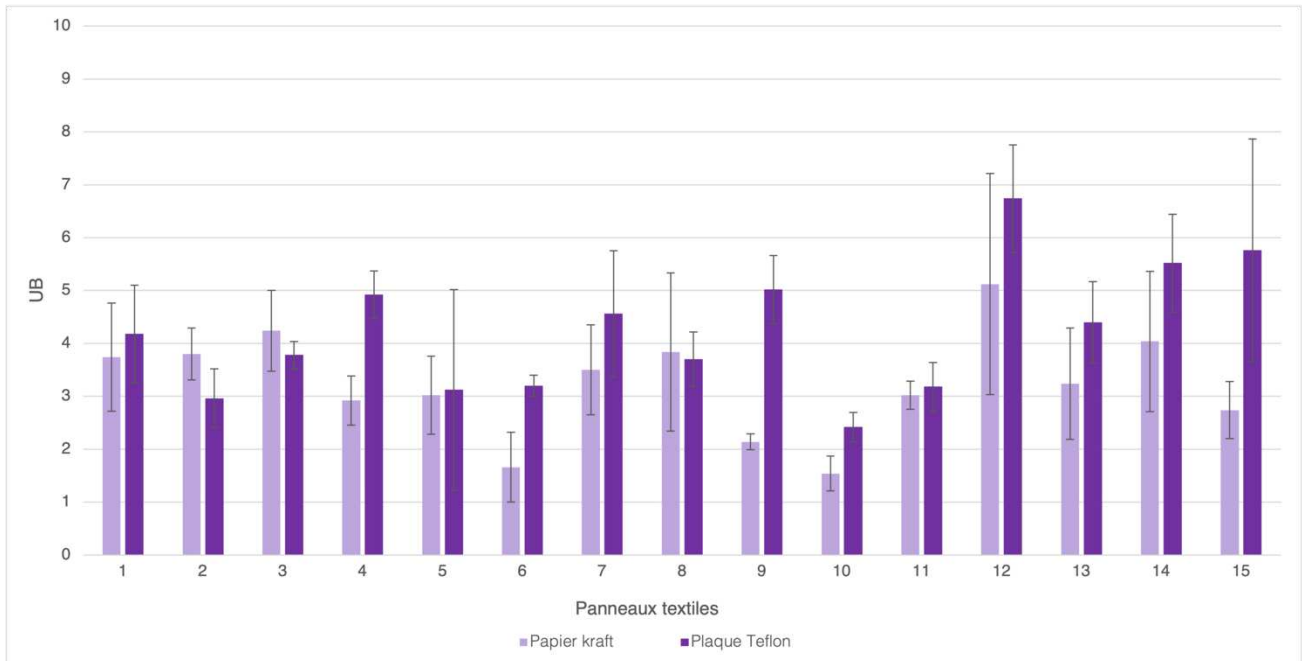


Figure 108 : Comparaison de la brillance des panneaux textiles avec le papier kraft et la plaque Téflon

2.4.13 CRÉATION D'UN NOUVEAU MOBILIER

Au regard de l'avancement du projet, API'UP a décidé de créer une nouvelle marque, de manière à valoriser les nouvelles matières conçues durant ce projet : OSPHER. Après 3 années de R&D en collaboration avec API'UP, des éléments de mobilier professionnel ont été imaginés, conçus et fabriqués au laboratoire en partenariat avec le studio de design La Racine. La nouvelle marque dénommée OSPHER a vu le jour, pour commercialiser les produits intégrant les nouveaux matériaux élaborés dans le cadre de ce projet : Le composite cuir « acoustique », dénommé « GRANISPHER » et le matériau composite tri-couche PES/PP, dénommé « POLYSPHER ».

Le prototype dessiné par les designers du studio LA RACINE pour cette exposition a été une chaise composée de deux panneaux POLYSPHER : un dossier et une assise (figure 108). Afin de respecter la taille de ces éléments, des cadres aux dimensions correspondantes ont été conçus. Le dossier de la chaise présentait un rayon de courbure de 1400 mm. Afin de répondre à cette contrainte, il a également été nécessaire de fabriquer un moule permettant sa courbure. Les deux panneaux ont été fabriqués au laboratoire, tandis que la structure en bois et l'assemblage ont été réalisés par API'UP.

Un premier prototypage a permis de rectifier les contraintes techniques liées au positionnement du dossier, à la taille du dossier et de l'assise et d'adapter le châssis en bois aux panneaux textiles. Cette phase a également permis de juger du confort de la chaise. Une fois les contraintes techniques

écartées, une optimisation de la couleur du panneau a été effectuée pour harmoniser la chaise avec les éléments en GRANISPHER présentés lors de cette exposition.

Des panneaux ont ainsi été produits au laboratoire selon les dernières optimisations et le choix des couleurs. L'esthétique des panneaux ainsi que leurs performances mécaniques sont apparues satisfaisantes, Api'Up s'est chargé de fixer les panneaux sur les parties bois fabriquées par leurs soins. Le prototype ainsi assemblé a été présenté, aux côtés des éléments en panneaux de cuir, à l'exposition la Paris Design Week, Le FRENCH DESIGN à la galerie VIA (Paris) en octobre 2021 (annexe n°2).



Figure 109 : Modélisation 3D et prototypes de la chaise Terria et du tabouret Urano imaginé par le Studio La Racine

L'usinage et plus particulièrement les finitions des arrêtes ont présenté quelques défauts, en désaccords avec le caractère haut de gamme souhaité. Ainsi, le process de fabrication impliquant un cintrage des panneaux (pour le dossier) a induit une réflexion autour de la séquence des opérations, deux séquences ayant été imaginées :

Séquence A : le panneau est cintré en sortie de presse (encore chaud et malléable), puis usiné (découpe et usinage des arrêtes) après refroidissement sous sa forme arquée. Dans ce cas, l'usinage constitue l'étape délicate à optimiser

Séquence B : le panneau est pressé, puis usiné après refroidissement (découpe et usinage des arrêtes). Il est ensuite réchauffé, puis cintré. Dans ce cas, le cintrage peut induire des défauts et une finition resterait nécessaire

Des recherches complémentaires restent donc nécessaires pour déterminer la séquence adéquate et optimiser le process en vue de son industrialisation.

2.5 CONCLUSION SUR L'ÉTUDE ET LE DÉVELOPPEMENT DES PANNEAUX DE TEXTILE

Après de nombreuses optimisations, des panneaux composite textile ont été obtenus, remplissant le cahier des charges proposé par Api'Up. Des améliorations restent cependant possibles concernant le procédé de fabrication (température, temps, etc.), de manière à optimiser par exemple le temps de fabrication, ou encore les performances mécaniques. Un prototype de chaise a pu être fabriqué, intégrant ce composite pour l'assise et le dossier, présenté à l'exposition la Paris Design Week, Le French Design à la galerie Via (Paris). Une étude complémentaire reste nécessaire pour résoudre le problème de finition des panneaux et en plus particulièrement la séquence du process (pressage/cintrage/usinage ou pressage/usinage/cintrage).

Les résultats obtenus concernant la mise au point du matériau composite textile ont, dans l'ensemble, satisfait les exigences du cahier des charges mais ne constituaient pas les paramètres optimaux en termes de résistances mécaniques ou encore d'optimisation du temps de pressage, de la température et de la pression. Les échéances liées à l'exposition des premiers prototypes au mois d'octobre 2021 n'ont pas permis d'approfondir les résultats obtenus. La sélection des paramètres s'est donc effectuée en fonction de la satisfaction ou non aux critères mécaniques et esthétiques imposés. Des paramètres de production ont été définis, notamment une densité liée à une masse volumique et un temps sous presse. Les temps de refroidissement sont prévus avec une large marge, ils pourront être réduits, notamment s'il est possible d'assurer un refroidissement lent et homogène.

La mise en forme par thermocompression ayant lieu juste en dessous de la température de fusion du PET pour permettre le frittage, le contrôle de la température est fondamental. Comme il a été montré dans le cas des composites cuir, la température des plateaux ne correspond jamais exactement à la température de consigne, impliquant des réajustements automatiques plus ou moins rapides au cours du pressage. De plus, il a été mis en évidence dans les phases du projet que les plateaux chauffants présentent un gradient de température allant jusqu'à 15°C de différence entre leurs extrémités et leur centre. Ceci implique de nombreuses imperfections sur les couches externes, telles des parties luisantes, d'aspect fondu qui seraient les seules à être réellement frittées, ou des fissures en bordure pouvant provoquer un déchirement lors de l'assemblage. Ces fissures peuvent aussi être dues à un refroidissement imparfait, trop brutal aux extrémités lors de la sortie de presse et du cintrage, les moules n'étant pas fermés sur les côtés. Un premier test de fabrication de CE a été réalisé sur la nouvelle presse reçue par API'UP sur le site de Domolandes. Les rampes de cette machine ne sont pas contrôlables, mais la montée en pression est très rapide. Ceci a résulté en un

temps sous presse beaucoup plus court, et donc un frittage très insuffisant. En revanche, les CE semblaient plus homogènes, excepté un côté qui fondait systématiquement. D'autres essais seront à conduire sur cette presse, en faisant coïncider les durées, puis en les affinant selon la taille du panneau.

Les panneaux Polyspher présentent une masse volumique avoisinant 1060 kg/m^3 , ce qui est supérieur aux standards du MDF. Diminuer cette densité n'est pas envisageable en raison des densités intrinsèques des polymères utilisés. Augmenter l'épaisseur accroît les risques de présence de bulles d'air, et diminue les propriétés de résistance en flexion, à l'instar des panneaux de cuir. À ce titre, réaliser des panneaux de plus de 2 cm d'épaisseur semble peu envisageable.

PERSPECTIVES

Concernant l'étude de l'évolution de la couleur, la cinétique de cette évolution pourrait être évaluée en réalisant des essais à de plus nombreuses températures. Il peut être également envisagé de réaliser un panneau de couches externes par teinte afin d'observer les modifications chromatiques en conditions réelles de pressage. Des tests similaires avec des textiles broyés pourraient être réalisés, car les échanges thermiques seront différents. Une sélection pourra alors être effectuée en amont. Une optimisation du gain de temps et d'énergie pourrait être envisagée. L'optimisation de la durée et de la pression de mise en œuvre du Polyspher doit se poursuivre afin de permettre de bonnes conditions d'usinage. Cette mise en œuvre est extrêmement sensible à l'opérateur, les différences de frittage pouvant être liées à de trop gros amas et à des hétérogénéités de répartition lors de la préforme. Mettre en forme directement après le cardage pourrait améliorer l'aspect de surface.

La création d'un nuancier de panneaux permettrait de disposer d'une gamme de référence des coloris commercialisables.

CHAPITRE 3 : DÉVELOPPEMENT D'UNE TEINTURE NATURELLE POUR LE BOIS

3.1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Les mots colorants et pigments peuvent prendre des sens différents selon les domaines où ils sont employés (botanique, biochimie, peinture, physique). Du point de vue du chimiste, du designer coloriste et de l'artisan teinturier la différenciation se fait par rapport à leurs caractéristiques d'utilisation, la nature du support et la méthode utilisée. Le pigment reste en suspension dans le liquide ou se dépose au fond, il est insoluble dans l'eau. Les colorants peuvent être naturels ou synthétiques et sont généralement solubles dans l'eau contrairement au pigment, qui lui peut être minéral, synthétique, organique ou métallique. Le choix sera donc différent en fonction de la méthode utilisée, du support et du résultat souhaité. Dans les deux cas ils sont utilisés pour apporter une coloration durable à un support (solide ou liquide). [74–76]

3.1.1 LES PLANTES TINCTORIALES

En fonction de la partie utilisée (aérienne, fleurs, fruits, rameaux, tiges, bois, écorce ou racines) ou de la technique employée, les plantes tinctoriales permettent d'obtenir différentes couleurs. La période de récolte peut également avoir son importance en fonction de la montée de sève et de la floraison par exemple. L'utilisation de la plante fraîche ou séchée impactera aussi le résultat final. [77]



Figure 110 : Dessins de définitions de plantes tinctoriales [74]

Plus de 100 variétés de plantes capables de produire des colorants naturels peuvent être cultivées dans le climat modéré de l'Europe. [78] Pour ce projet nous avons fait le choix d'utiliser uniquement des extraits issus de plantes cultivées en France ou dans des pays voisins pour des questions d'économie circulaire et d'éco-conception. A l'exception de l'indigo qui provient d'Inde. Dans le monde, plusieurs plantes peuvent fournir ce fameux indigo de couleur bleu comme l'indigotier (*Indigofera tinctoria*), mais en Europe on trouve majoritairement le Pastel (*Isatis tinctoria*). Ces plantes font partie de différentes familles botaniques réparties sur plusieurs continents. [78]

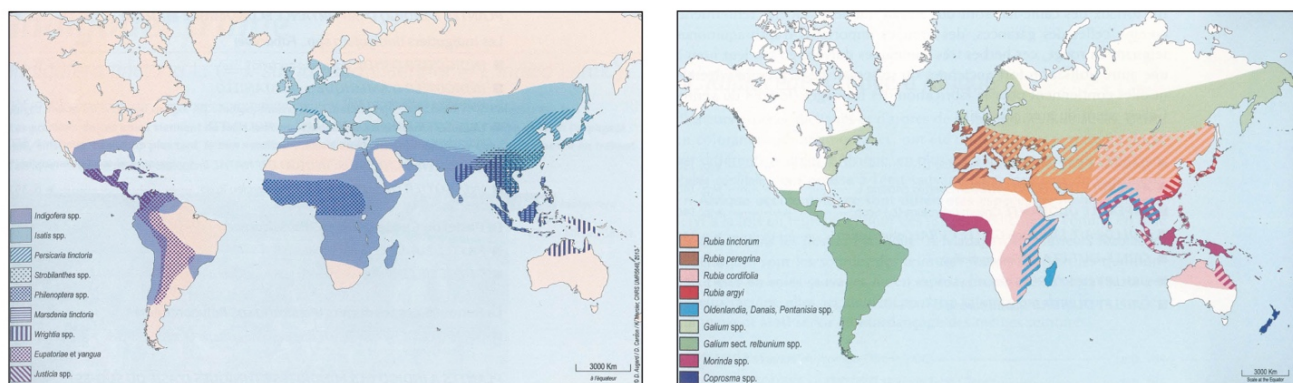


Figure 111 : Répartition des plantes à Indigo (gauche) et des Rubiacées (droite) dans le monde [79]

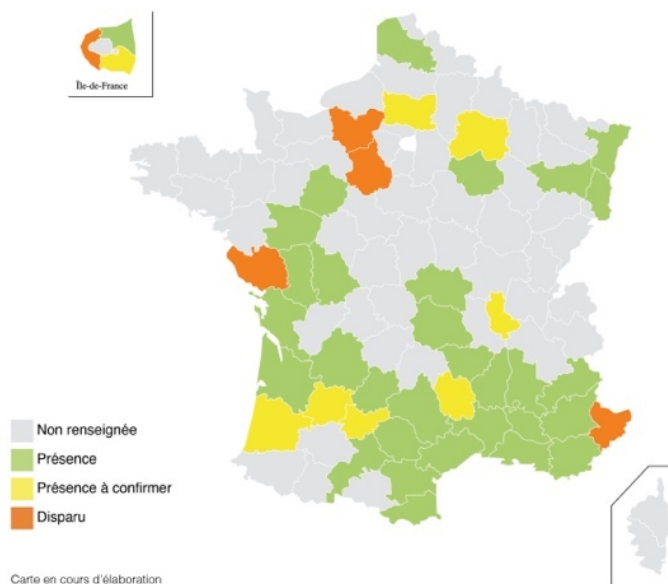


Figure 112 : Cartographie de la rubia tinctorum par département en France (Tela Botanica 2018) [80]

Cependant d'autres sources peuvent fournir des colorants naturels comme l'industrie alimentaire et la sylviculture par exemple. L'utilisation de ces sous-produits et déchets végétaux est importante pour l'introduction des colorants végétaux en tant que source de couleur durable et éco-responsable. [78]

Les colorants naturels suscitent un intérêt croissant à travers le monde et entraînent de nouvelles voies d'expérimentations et de développement technique pour les intégrer dans différents secteurs de production industrielle. En parallèle, de nombreuses entreprises consacrent leurs activités à la production et la commercialisation des colorants naturels. Ils sont vendus sous forme liquide ou d'extraits en poudre soluble, de concentrations et de qualités normalisées avec une facilité de manutention et d'utilisation comparables aux colorants synthétiques. Ces différents extraits permettent d'obtenir une large gamme de couleurs reproductibles et rendent la teinture naturelle possible à l'échelle industrielle sans modifier les équipements déjà existants. [79]

3.1.2 LES PRINCIPALES MOLÉCULES COLORANTES

Les quinones

Colorants de couleur rouges, oranges voire même certains violets que l'on peut retrouver dans des plantes d'Europe occidentale. Connues historiquement, ces plantes sources de rouges ne sont pas très nombreuses. On retrouve parmi elles la famille des rubiacées qui produit des anthraquinones, généralement d'une couleur dite « solide » (résistante à la lumière) contrairement aux naphthoquinones qui elles sont plus fragiles à la lumière. [77]

Les naphthoquinones sont des composés phénoliques, présents dans vingt familles de plantes différentes, mais les espèces exploitées pour leur colorant sont assez peu nombreuses. Pour les plantes de la famille à anthraquinones, les colorants peuvent y être très nombreux comme dans les racines de garance où l'on peut retrouver jusqu'à vingt-huit dérivés anthraquinoniques (mais aucun grand intérêt tinctorial pour certains). [74] Seulement une quinzaine sont responsables de la teinte « rouge naturel n°8 » du *Colour Index*. [81]

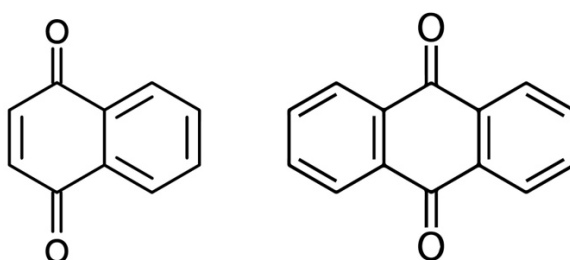


Figure 113 : Molécule de la famille des quinones : naphthoquinone et anthraquinone

Les flavonoïdes

Provenant du latin *flavus* qui signifie jaune, cette famille regroupe environ 4000 molécules différentes. Particulièrement répandus dans le monde végétal et omniprésents dans les plantes vasculaires, cette famille de colorant est source de jaunes, ocres, et de verts. Il est courant de parler de flavones et de flavonols, les deux groupes principaux des flavonoïdes. Le groupe des flavones regroupe la lutéoline (à peine soluble dans l'eau froide, lorsque la décoction refroidit elle se dépose en fines paillettes jaunes au fond du récipient) et l'apigénine qui donne un jaune d'or lumineux mais qui pâli à la lumière. Alors que le groupe des flavonols qui contient le kaempférol et la quercétine sont sources de jaunes vifs plus stables. Les plantes contenant des flavonoïdes n'ont donc aucun intérêt à être fermentées et se dévoileront mieux en milieu alcalin.

Composés polyphénoliques, la flavone est la molécule de base des flavonoïdes, plus particulièrement du sous-groupe des flavones. Les flavones, flavonols et flavanones sont des dérivés. [74-77]

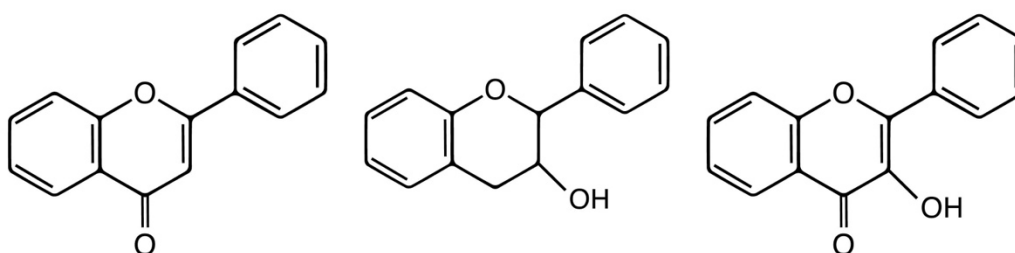


Figure 114 : Principales molécules du groupe des flavonoïdes : Flavone, Flavanol et Flavonol

Les anthocyanes

Les anthocyanes sont un sous-groupe des Flavonoïdes, ce sont des glucosides formés de l'association d'un aglycone appelé anthocyanide et d'un sucre. Ce groupe de colorants est fragile et sensible à la dégradation enzymatique, notamment sous l'action combinée de la chaleur et de l'oxygène. Ces molécules colorantes sont très présentes dans de nombreuses feuilles et de baies pourpres ainsi que certaines fleurs. Elles sont sources de couleurs allant du vieux rose en passant par des mauves et allant jusqu'à des verts clairs et des gris bleutés, elles peuvent également être utilisées en colorant alimentaire ou en cosmétique. Ces molécules colorantes ont la particularité d'être sensibles au pH, ce qui les rend instables. Par exemple en milieu acide on obtiendra du rouge alors qu'en milieu basique elles virent au bleu-gris. Les recettes sont généralement adaptées pour tenter de les stabiliser mais elles restent fragiles à la lumière.

[74-77]

Les xanthophylles comprennent la lutéine et la zéaxanthine. Ils ont une structure chimique similaire à celle des carotènes. Présentes dans de nombreux légumes verts et certaines fleurs, les xanthophylles sont utilisées comme colorants alimentaires.

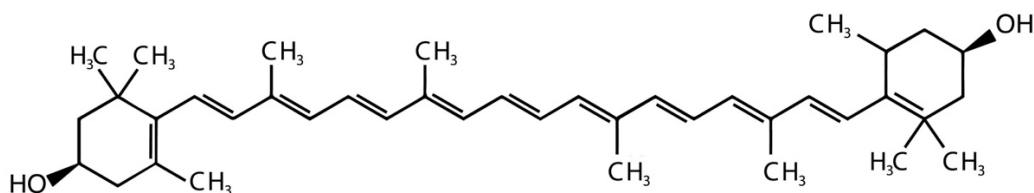


Figure 118 : Molécule de Zéaxanthine @2022 Parlons sciences

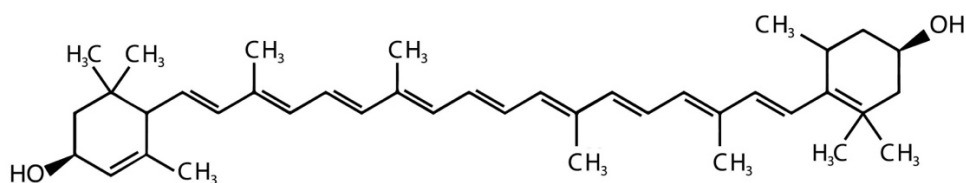


Figure 119 : Molécule de Lutéine @2022 Parlons sciences

Les indigos

Ces plantes dites « à indigo » nécessitent un processus de fermentation pour réaliser une transformation enzymatique (réduction en milieu alcalin) qui permet de produire de l'indoxyle incolore sous conditions de température et de pH adéquats. Le bain obtenu est de couleur jaune-vert, et c'est lors de l'oxydation à l'air que les molécules d'indoxyle se regroupent avec celles d'oxygène et forment l'indigo de couleur bleu que l'on nomme le déverdissement. Avec certaines conditions de température et de pH il est possible de former de l'indirubine qui donne un colorant violet. Ce procédé plus complexe que pour les autres colorants, donne des couleurs particulièrement solides aux bleus indigo.[77]

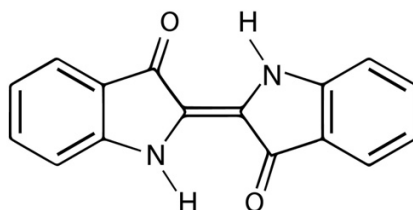


Figure 120: Molécule d'indigotine

Les tanins

Très répandus dans le monde végétal, les tanins sont des polyphénols présents en grande concentration dans certaines plantes ainsi que dans le bois et les écorces de nombreux arbres et arbustes. En chimie ils sont répartis en deux groupes : les tanins hydrolysables et les tanins condensés qui ont des particularités distinctes.

Spécifiques aux angiospermes (plantes à fleurs) comme le chêne par exemple, les tanins hydrolysables sont facilement coupés en deux en milieu acide. Reste donc d'une part un sucre et d'autre part un certain nombre d'acides galliques ou d'acides ellagiques.

L'acide gallique est la base d'un tanin, il en faut au moins trois associés à un sucre pour construire une molécule. Le tanin gallique est lui composé de cinq acides galliques autour d'un glucose et est présent dans le chêne et le châtaigner par exemple. Le deuxième élément de base est l'acide ellagique qui est formé de deux acides galliques et se retrouve dans le bois et les galles de chêne et dans le bois de châtaigner par exemple.

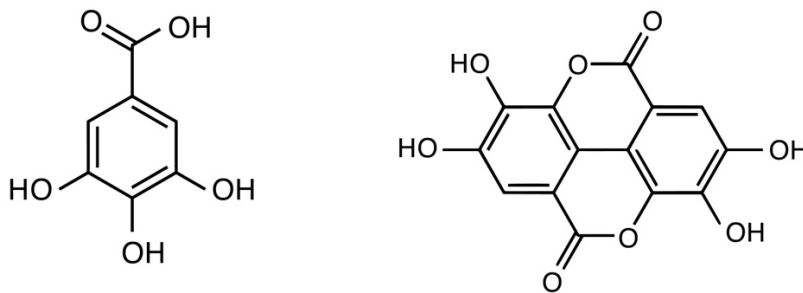


Figure 121 : Principales molécules des tanins hydrolysables : l'Acide gallique et l'Acide Ellagique

Les tanins condensés ont les mêmes propriétés mais sont chimiquement différents. Classés dans les polyphénols, ils font partis de la famille des flavonoïdes et sont largement présents dans le règne végétal comme dans l'écorce de pin et les feuilles de thé. Soumis à une certaine température en milieu acide, ils polymérisent et forment des pigments anthocyanines.

Les tanins sont particulièrement utilisés dans la teinture des fibres cellulosiques car ils permettent la fixation des colorants (l'engallage). Historiquement les tanins ont été utilisés pour leur réaction avec les sels de fer pour obtenir des noirs.[74-77]

Les chlorophylles

Les molécules de chlorophylle sont responsables de la couleur verte des plantes. À l'état naturel, il existe cinq types de chlorophylle (chlorophylle a, b, c, d et e) mais les deux principales sont la chlorophylle « a » (présente dans les plantes, les algues et cyanobactéries) et la chlorophylle « b »

(présente dans les plantes et algues vertes). La « a » constitue les trois quarts de la teneur en colorant de plantes et absorbe mieux la lumière que la « b ». [83] À l'état naturel, la chlorophylle est insoluble dans l'eau mais soluble dans les huiles. [84]

Ces molécules ont une structure très similaire, seule la composition d'une chaîne latérale diffère. Les chlorophylles A et B absorbent toutes deux les ondes de la lumière correspondant aux couleurs bleue et rouge du spectre visible. Les deux types de chlorophylle réfléchissent donc la lumière dans la partie verte du spectre (490 à 550 nm). Mais comme le montre la figure 122 elles diffèrent légèrement, le pic d'absorbance de la chlorophylle « b » est plus élevé dans la partie bleue du spectre alors que celui de la chlorophylle « a » est plus élevé dans la partie rouge. La chlorophylle « a » est associée aux tons verts foncés et la « b », aux tons verts jaunâtres. [82]

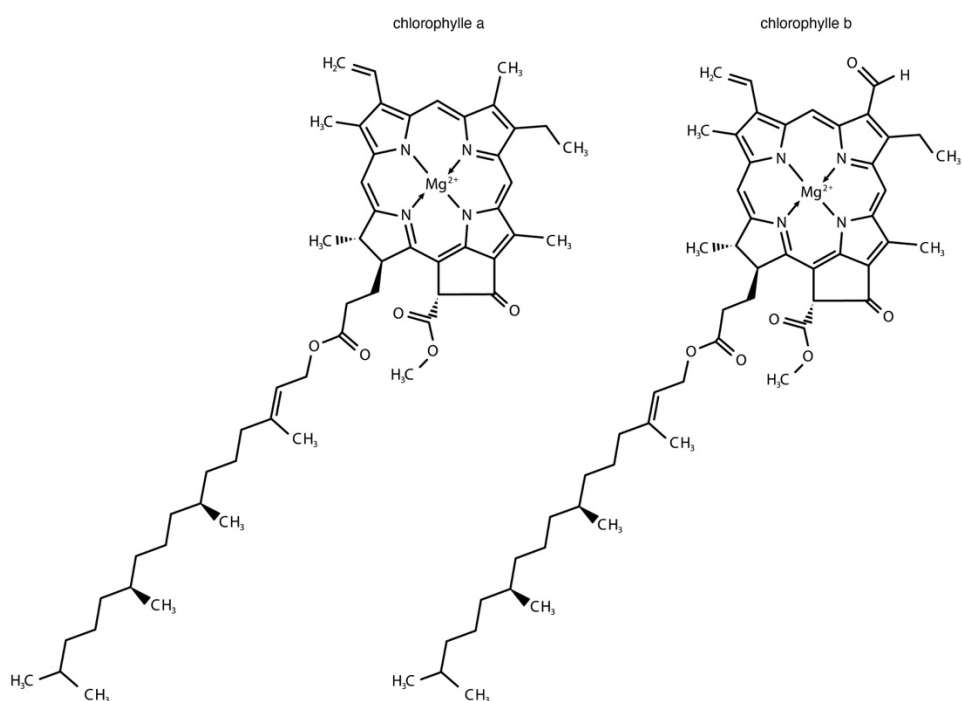


Figure 122 : Molécules de chlorophylle « a » et « b »

Le graphique ci-dessous regroupe les différentes courbes d'absorption des principales molécules colorantes présentées précédemment.

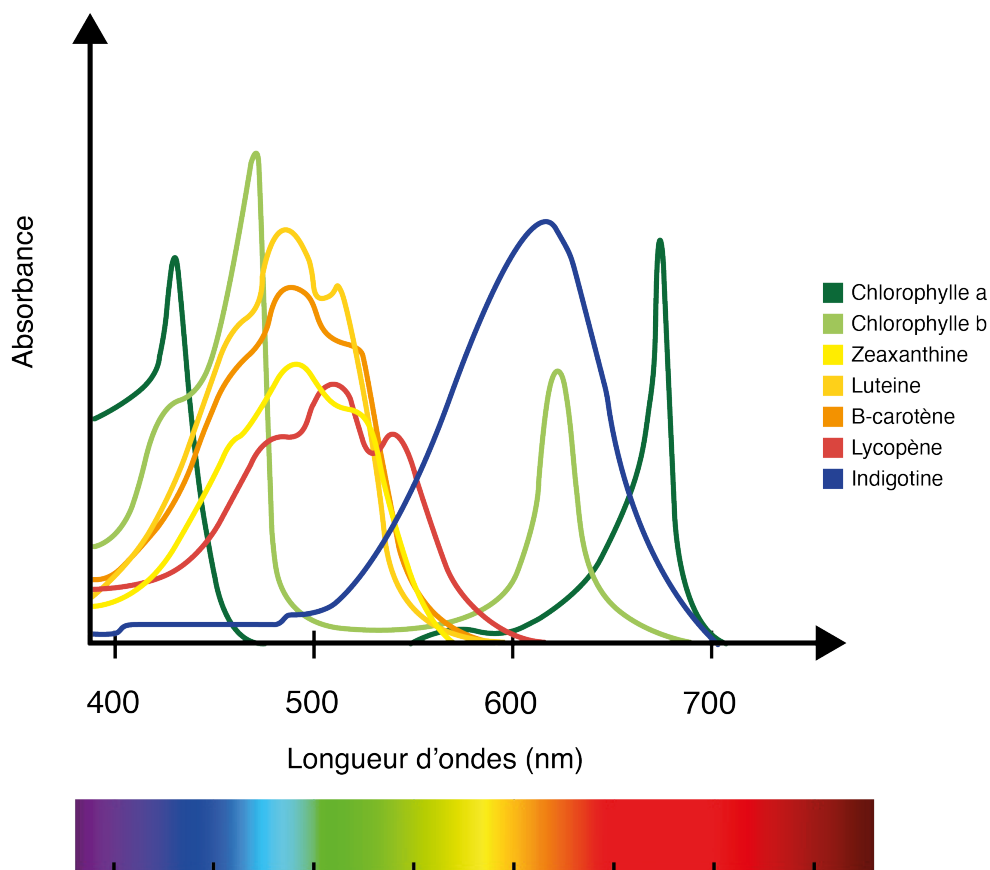


Figure 123 : Courbes d'absorbances des différentes molécules colorantes [82]

3.1.3 MÉTHODES D'EXTRACTION

Il existe différentes méthodes d'extraction en teinture végétale, telles que la macération, la décoction, l'infusion, le principe de cuve fermentée, ou encore la mise en solution dans l'alcool. La majorité des colorants sont solubles dans l'eau, par macération, infusion ou décoction alors que d'autres nécessitent une mise en solution dans l'alcool (alcaline) ou dans une cuve permettant un processus de fermentation (indigo). Un milieu acide ou basique peut favoriser l'extraction suivant les molécules.

Le pH, la température et la durée d'extraction varient selon la nature des colorants à extraire et celle des fibres à teindre. Le but étant de favoriser au maximum la migration des molécules colorantes jusqu'à l'intérieur des fibres. Cependant, aujourd'hui encore, certaines réactions de teinture de fibres cellulosiques par des colorants dits « directs » (naturels ou artificiels) sont des phénomènes mal compris.

- Extraction par macération

On emploie le terme macération lorsque le végétal est resté un temps donné dans de l'eau à température ambiante. Pour certaines plantes, la macération peut être utile pour faciliter l'extraction des colorants qui ne sortiraient pas de la matière première lors de la montée en température sans trempage préalable, notamment pour les parties ligneuses (rameaux, bois et écorces). La macération des baies par exemple permet une fermentation naturelle rapide, ce qui acidifie le bain et peut être pratique pour obtenir un pH entre 3 et 4, sans ajouter d'agent acidifiant par exemple. [77]

- Extraction par macération / fermentation

La macération permet à certaines plantes de libérer plus de colorants lorsqu'elles sont d'abord plongées dans de l'eau pendant plusieurs heures ou plusieurs jours. Le processus biologique de la fermentation met en jeu l'action de levures et de bactéries sur les matières organiques, notamment les matières végétales. Ces micro-organismes digèrent les sucres pour se développer et produisent des gaz, de l'alcool ou des composés acides selon les cas. C'est un processus d'oxydoréduction mené par des enzymes. La substance de départ est donc en partie dégradée. La plus commune est la fermentation alcoolique où des levures transforment des sucres comme le glucose, le fructose ou le saccharose en alcool en dégageant du gaz carbonique. Cependant aucune moisissure ne doit apparaître car ce n'est pas l'état de putréfaction qui est recherché. [74]

- Extraction par infusion

La méthode de l'infusion consiste à extraire les principes actifs d'un végétal par dissolution dans un liquide initialement bouillant que l'on laisse refroidir à température ambiante. L'eau bouillante est versée sur l'extrait en poudre puis le mélange est agité manuellement pendant un temps déterminé.

- Extraction par décoction

La décoction est la méthode la plus employée en teinture car c'est la plus efficace pour extraire les principes actifs des végétaux. Il s'agit de plonger le végétal dans de l'eau bouillante et de maintenir le mélange à une température donnée pendant un temps donné en maintenant une agitation. Il n'est pas nécessaire de rester à ébullition. En fonction des plantes il est recommandé de ne pas dépasser certaines températures. [77]

La plante est en suspension dans de l'eau mise à chauffer. Le plus souvent, le bouillon est maintenu à température pendant 1h mais cette durée peut atteindre 3 ou 4 heures dans certains cas comme pour les écorces. Il est possible de réaliser une deuxième décoction avec les résidus de

plantes pour en extraire le maximum de principes colorants. Le processus de décoction consiste à obtenir une solution aqueuse, ce qui signifie que les colorants sont dissous dans l'eau. Certains sont déjà présents sous forme soluble dans la plante, d'autres nécessitent d'augmenter leur solubilité en ajoutant un adjuvant, comme les plantes à colorants jaunes qui libèrent plus de colorants lorsque le pH augmente. S'il s'agit de plantes fraîches ou de plantes séchées, le poids à utiliser sera différent proportionnellement à la quantité d'eau en fonction de la concentration voulue. [74]

- Extraction en cuve

Certains procédés de teinture n'ont pas besoin d'atteindre de hautes températures. Les pigments insolubles dans leur état coloré peuvent être rendus solubles pour qu'ils puissent imprégner les fibres à teindre. Cela implique un processus de réduction en milieu alcalin. C'est sous leur forme soluble (peu colorée) que les fibres textiles s'imprègnent de ces produits, qui à la sortie du bain se transforment de nouveau en indigo et prennent la couleur finale au contact de l'air, sous l'action de l'oxygène. [79]

3.1.4 MORDANTS ET MORDANÇAGE

L'usage de mordant permet de renforcer l'affinité chimique entre les molécules colorantes et la fibre afin de les fixer solidement. Ces substances peuvent être des sels métalliques (par exemple sulfate de fer ou sulfate de cuivre) ou des molécules organiques comme les acides citriques et oxaliques. Suivant la partie de la plante et le mordant utilisé, il est possible d'obtenir plusieurs couleurs. Plusieurs catégories de colorants qui contiennent plusieurs molécules associées peuvent être fournies par les plantes (c'est le cas des tanins par exemple). C'est cet ensemble complexe de composés qui permet d'obtenir une grande variation de nuances possibles. [77]

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser un mordantage :

-Mordantage avant teinture

Méthode la plus courante depuis le Moyen-âge, elle représente de nombreux avantages comme celui de pouvoir préparer une grande quantité de fibres à l'avance ou d'un point de vue économique, éviter d'altérer le bain de teinture en y ajoutant un sel métallique. Ce premier bain de mordantage peut être réutilisé jusqu'à épuisement pour obtenir des teintes de moins en moins saturées. [79]

-Mordantage simultané

Cette méthode est rapide, essentiellement utilisée pour les teintures rouges des cochenilles sur fibres animales. Une fois la décoction faite, il suffit alors de rajouter la quantité souhaitée de mordant et de maintenir une certaine température jusqu'à dissolution complète avant d'ajouter la fibre. [79]

-Mordantage (ou nuançage) après teinture

Cette méthode permet d'intensifier ou de nuancer et de fixer encore plus les teintes déjà fixées dans la fibre. Le plus souvent, elle s'applique en complément d'un mordantage avant teinture mais il est tout à fait possible de seulement nuancer après teinture. [79]

Certaines molécules colorantes présentent une affinité suffisante envers les fibres à teindre pour les teindre directement sans avoir besoin de réaliser de mordantage.

« La pratique de la teinture naturelle est issue d'un savoir-faire ancestral qui évolue pour répondre à une actuelle demande de reproductibilité avec précision et qualité. » (Cécilia Aguirre, Colorthelife)

3.1.5 LE SAVOIR-FAIRE TINCTORIAL : TEINDRE COMME UN ARTISAN-DESIGNER

Les designers intègrent de plus en plus les savoir-faire artisanaux aux nouvelles technologies, ouvrant la voie à de nouvelles méthodes de création. Hybrides et parfois difficiles à catégoriser, qu'il s'agisse de pièces uniques ou de productions en série, ces œuvres proposent un répertoire de formes novatrices, où l'intervention manuelle du créateur se mêle harmonieusement aux techniques les plus avancées. En s'appuyant sur des logiciels spécialisés, des machines numériques ou encore en redonnant vie à des techniques artisanales traditionnelles, chaque créateur poursuit une quête incessante d'innovation. En réinterprétant les typologies, les couleurs et les matières, ils repoussent et revisitent les limites du design. À l'ère de la révolution numérique, ces pratiques effacent progressivement les frontières entre artisanat et design, réinventant sans cesse ces deux univers. Avec la combinaison d'un projet design avec des méthodologies des arts et de l'artisanat à travers l'approche de la conception par expérimentations et prototypages, l'artisan devient designer et le designer devient l'artisan.

Cette expérimentation de la teinture sur bois est directement inspirée du procédé de la teinture végétale sur textile. Toujours dans le but de développer une innovation pour le processus d'ennoblissement de déchets, cette fois ci sur le bois.

Les colorants offerts par la nature peuvent rendre service aux scientifiques et aux industriels, de plus en plus soucieux de participer à l'essor d'une « économie verte » en diversifiant leur production et en créant des gammes de produits à base de colorants naturels. Ces couleurs offertes par la nature sont un trésor d'inspiration.

3.1.6 LA TEINTURE SUR BOIS

Traditionnellement, la teinture végétale s'effectue sur fibre textile. Ces fibres peuvent être de nature protéique, c'est-à-dire d'origine animale (laine, soie, poils de tous animaux etc.) ou bien de nature cellulosique pour les fibres végétales (coton, lin, chanvre, raphia etc.). Le mordantage de ces dernières se fait en plusieurs étapes car la fibre végétale fixe moins bien les molécules du mordant et de la teinture. Pour améliorer la fixation de la couleur il est courant d'utiliser des tanins. Par ailleurs les fibres supportent très bien les mordants ou additifs à bases de fer qui permettent d'obtenir des couleurs dites « solides ». Il est également possible de teindre du cuir (à ne pas confondre avec l'étape du tannage) ou de la vannerie.

Ces caractéristiques sont compatibles avec une application sur le bois, lui aussi d'origine cellulosique. C'est une matière première renouvelable à l'infini, à condition qu'il soit issu de forêts durablement gérées, car le bois est réutilisable et recyclable. Ce matériau possède des qualités multiples, c'est un bon isolant naturel et durable, il est également apprécié pour son esthétique. C'est pour ces raisons qu'il est présent dans les habitations depuis plusieurs millénaires. [85]

Le Japon est bien connu pour être un lieu de savoir-faire et d'artisanat ancestral. La teinture à l'indigo, art traditionnel japonais connu sous le nom d' « *ai-zome* », est considéré comme un réel patrimoine immatériel par le gouvernement japonais. Dans la région du Tokushima, sur l'île de Shikoku, l'entreprise Aola est producteur d'indigo. Elle perpétue cette tradition et propose des objets d'art de la table teints à la main en mêlant savoir-faire traditionnel et procédé de teinture moderne. Les objets sont en bois de cèdre ou de cyprès japonais.



Figure 124 : Photographie du travail d'Aola, artisan producteur d'indigo au Japon [86]

En 2017, le studio Crème basé à Brooklyn, a utilisé des techniques de teinture chinoise traditionnelle pour créer des chaises en bois de couleur indigo pour Stellar Works (figure 124). Fondée en 2012 par Yuichiro Hori, Stellar Works cherche à créer une fusion entre l'Est et l'Ouest, la Tradition et la Modernité, l'Artisanat et l'Industrie. La marque considère que le bon design est intemporel, et son objectif est d'incarner cette intemporalité en intégrant des matériaux éco-responsables dans chacun de ses produits et en collaborant avec des entreprises engagées dans des pratiques durables.

En édition limitée, cette collection comprend trois chaises teintées dans différentes nuances de bleu dont une en dégradé, colorée à moitié. Les parties en cuivre sont destinés à mettre en valeur les teintes de bleus. Ce travail a été réalisé avec des producteurs d'indigo dans le village de Guizhou, dans le sud de la Chine. Cultivé et récolté en agriculture biologique, l'indigo a été appliqué à la main selon des techniques traditionnelles.

«Le développement de l'édition spéciale de la chaise indigo a été un processus très enrichissant, car il capture l'essence d'un patrimoine d'artisanat chinois et des processus de production artisanaux au sein d'un meuble contemporain», a déclaré le fondateur de Stellar Works, Yuichiro Hori. [87-88]



Figure 125 : Collection « Indigo Exchange Chair », Stellar Works

Autre exemple, une entreprise de parquet de haute qualité et fabriqué à la main, basée à New York a décidé en 2017 de lancer une nouvelle collection dans une série de couleurs uniques. L'entreprise Madera a été fondée avec un objectif clair de proposer une collection de produits en bois de haute qualité, esthétiques et durables pour la communauté de l'architecture et du design. Elle met en relation les scieries, les architectes, les installateurs et les propriétaires dans le cadre d'un processus collaboratif, en adoptant une approche « retour aux sources » avec une esthétique naturelle. [89]

Madera a proposé les teintes « Indigo » pour un bleu profond, « Ochre » pour une teinte dorée chaude, « Green » pour un turquoise, « Fern » pour un vert luxuriant et « Vermillion Red », pour une teinte écarlate, ainsi que le noir et le blanc. Cette « Color-Collection » de sols inhabituels nécessite un savoir-faire méticuleux pour teindre correctement le bois tout en laissant apparaître son aspect naturel. C'est sur des planches de frêne que l'expérimentation a été menée en utilisant des colorants végétaux et minéraux. Chaque couleur est proposée dans une version naturelle ainsi que dans une finition « Aniline » qui est moins sujette à la décoloration lorsqu'elle est exposée à la lumière. Le sol « Indigo » présenté ci-dessous est obtenu en appliquant soigneusement trois couches de teinture. « Fern » est une teinte obtenue en lavant un sol en frêne avec un mélange d'indigo et d'ocre naturel ainsi que de pigments d'aniline pour stabiliser la couleur. Pour la finition, un vernis polyuréthane hydrofuge fixe les couleurs et les rend plus lumineuses.

« Lorsque nous avons commencé à travailler avec des couleurs intenses sur du bois, nous pensions qu'il s'agissait simplement d'une expérience amusante. Puis « indigo » a décollé et nous avons réalisé qu'il y avait une réelle soif de nouveauté et d'excitation dans les revêtements de sol en bois chez les designers. Nous essayons toujours de nouvelles choses et ce qui a commencé comme une simple expérience ludique est devenu l'une de nos collections les plus cool à ce jour. » Selon le témoignage des frères Clason Höök, co-fondateurs de Madera. [90]



Figure 126 : Expérimentation de teintures colorés pour sols par l'entreprise Madera

3.1.6 LE MATÉRIAU BOIS

• ANATOMIE DU BOIS

L'écorce « externe » peut contenir des tanins, produits colorés et antiseptiques. Les lenticelles sont des orifices qui permettent les échanges gazeux avec l'extérieur de l'arbre.

Le Liber sert à transporter la sève et constitue la partie interne vivante de l'écorce. On le nomme également phloème ou l'écorce interne.

Le Cambium est un ensemble de cellules qui génèrent le bois vers l'intérieur et le liber vers l'extérieur.

Le bois est constitué de cellules produites par le cambium. Nommé aussi xylème, il est composé de deux parties :

L'aubier : cellules jeunes et allongées qui ne sont pas encore lignifiées, elles permettent le transport de la sève brute.

Le duramen : les cellules sont lignifiées et se transforment en bois dit parfait au bout de 5 ans. Cette masse principale du tronc assure la tenue mécanique de l'arbre.

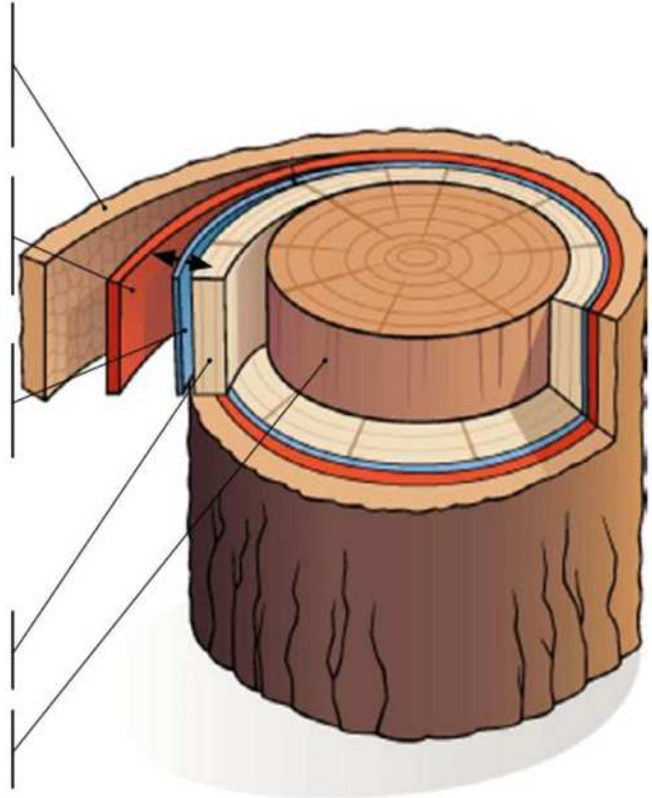


Figure 127 : Schéma de l'organisation des différentes couches d'un tronc d'arbre

Le cambium, qui se situe sous l'écorce et en périphérie de l'aubier, constitue l'assise de cellules dynamiques de l'arbre qui fabrique le bois et le liber. Il se met en place dès la première année de vie et provoque la croissance du tronc et des branches en diamètre. Chaque année, dans les zones tempérées, le cambium fabrique un aubier de printemps et un aubier d'été ce qui forme un cerne annuel. L'âge de l'arbre peut être daté grâce à ses cernes. Les sèves brutes et élaborées sont transportées par le liber (sève élaborée) et l'aubier (sève brute) en circulant au travers de longues cellules. La figure ci-dessus permet de visualiser que la partie vivante se situe à la périphérie du tronc. Le passage des sèves peut être perturbé par des blessures faites au tronc, ce qui constitue des plaies ouvertes aux agents pathogènes. Le maintien mécanique de l'arbre est assuré par le duramen. Il peut être attaqué par des champignons ou même être creux au centre sans que cela ne soit visible de l'extérieur et que les sèves continuent de circuler. À l'inverse, un arbre peut avoir un aspect mort (le passage des sèves ne se fait plus) et être mécaniquement fiable. [91-92]

C'est une très longue histoire entre l'homme et le bois, il lui a fourni l'outil primitif dans divers domaines bien avant la pierre et la terre cuite. Le feu lui a servi de source de lumière et de chaleur, puis à préparer les cuissons. Le bois a constitué le tout premier matériau de construction puis a été utilisé pour la fabrication de meubles. Il a ensuite permis la fonte des métaux. Ce matériau a permis de traduire l'activité et l'ingéniosité de l'homme en nourrissant sa soif de création et de dépassement, c'est-à-dire « le progrès ». Ce matériau a su traverser les siècles par son usage incontournable à chaque époque avec une maîtrise progressive et une évolution des savoir-faire. Le bois a servi le talent des architectes, des ingénieurs et des artistes. [93]

Selon son usage, la profession, sa destination et son devenir, l'arbre reçoit des définitions différentes. Le forestier regarde l'arbre de l'extérieur et a une vision globale du tronc et des branches. Le botaniste s'intéresse à l'intérieur de l'arbre, à la partie vivante en parlant de tissus lignifiés. L'industriel lui, va au cœur de l'arbre en observant les qualités et les performances de ce matériau naturel. Quant au chercheur, il va s'intéresser aux molécules extractibles par exemple. Le bois est donc une matière organique issue du végétal arbre.

La nature et la constitution des fibres, le dessin et la texture des cernes, la couleur des tissus, le site et les conditions de pousse mais aussi bien d'autres critères créent une gamme presque infinie de bois différents. Chaque essence possède ses propriétés, son grain, sa teinte, sa densité et son esthétique. Cependant chaque arbre, chaque bois est unique. En fonction des plans de coupes, le bois n'a pas les mêmes propriétés. Il est hétérogène et anisotrope. [93]

Une fois usinés, les différents morceaux de bois peuvent porter différentes appellations, en fonction des domaines d'application mais également en fonction du sens de coupe.

Ont été définis trois plans de référence en fonction des trois directions :

- La direction longitudinale (L) qui correspond à l'axe de l'arbre
- La direction tangentielle (T) qui est tangente aux cernes de l'arbre
- La direction radiale (R) qui passe par le centre biologique de l'arbre (la moelle)

Les trois plans sont définis par les trois directions :

Le plan RT correspond à la direction radiale et au plan transversal

Le plan LT correspond à la direction longitudinale et au plan tangentiel

Le plan LR correspond à la direction longitudinale et au plan radial [92]

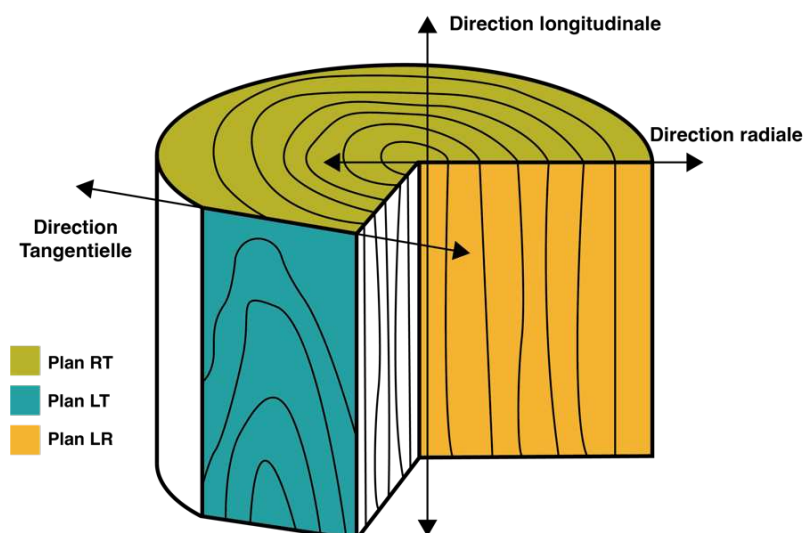


Figure 128 : Direction et plans de références dans le bois (Léa Diaz)

• COMPOSITION CHIMIQUE DU BOIS

La composition chimique du bois est variée et complexe. De manière générale, le bois à l'état anhydre, est constitué d'environ 50% de carbone, de 42% d'oxygène, de 6% d'hydrogène, de 1% d'azote et 1% de minéraux. La cellulose (50%), la lignine (20 à 30%) et les hémicelluloses (15 à 25%) sont les molécules les plus présentes dans le bois. [92-94-95]

La cellulose et les hémicelluloses (macromolécules) forment l'holocellulose et assurent le rôle d'architecture. Elles composent la matrice du bois avec la lignine qui a un rôle de cohésion. On y trouve également des composés appelés les extractibles, qui eux contribuent à la durabilité du bois mais qui influencent également sa couleur. Le tableau ci-après mesure les variations quantitatives et qualitatives des principaux constituants du bois en fonction de l'espèce.

Tableau 17 : Répartition des composés chimiques du bois selon différentes essences [96]

Bois	Gymnospermes		Angiospermes	
	Sapin	Pin Maritime	Chêne	Hêtre
Cellulose (%)	48,2	47,1	44	44,8
Hémicelluloses (%)	20,5	25,2	19	38,2
Lignine (%)	26,9	25,6	20	22,5
Substances protéiques (%)	0,6	0,9	/	1,1
Résines (%)	1 à 1,8	2 à 4	0,7	0,3 à 0,9
Cendres (%)	0,66	0,3	0,4	0,83

Le composant majoritaire des espèces lignocellulosiques est la cellulose (environ 50% de la matière sèche). C'est le polymère naturel le plus abondant devant le chitosane et la lignine. La cellulose a un degré de polymérisation pouvant varier de 1 000 à 30 000 en fonction des espèces.

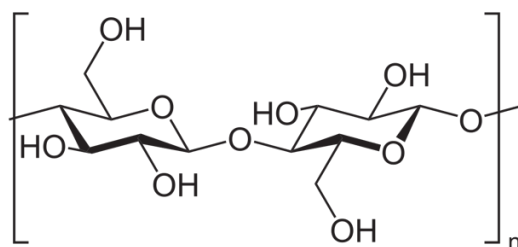


Figure 129 : Formule chimique de la cellulose (cellobiose)

Localisée dans les parois des fibres, des trachéides, et des vaisseaux, la cellulose s'organise sous forme de microfibrilles. Elle possède une partie amorphe et une partie cristalline (environ 70%) qui se forment grâce aux liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires. Cette structure assure au bois sa rigidité ainsi qu'une bonne résistance mécanique notamment en traction.

Les hémicelluloses sont le deuxième polymère retrouvé dans le bois, il est formé par plusieurs monosaccharides tels que le xylose, le mannose et l'arabinose, d'où le fait de parler d'hémicelluloses au pluriel. Chez les angiospermes et les gymnospermes, la structure des hémicelluloses sera différente. [97]

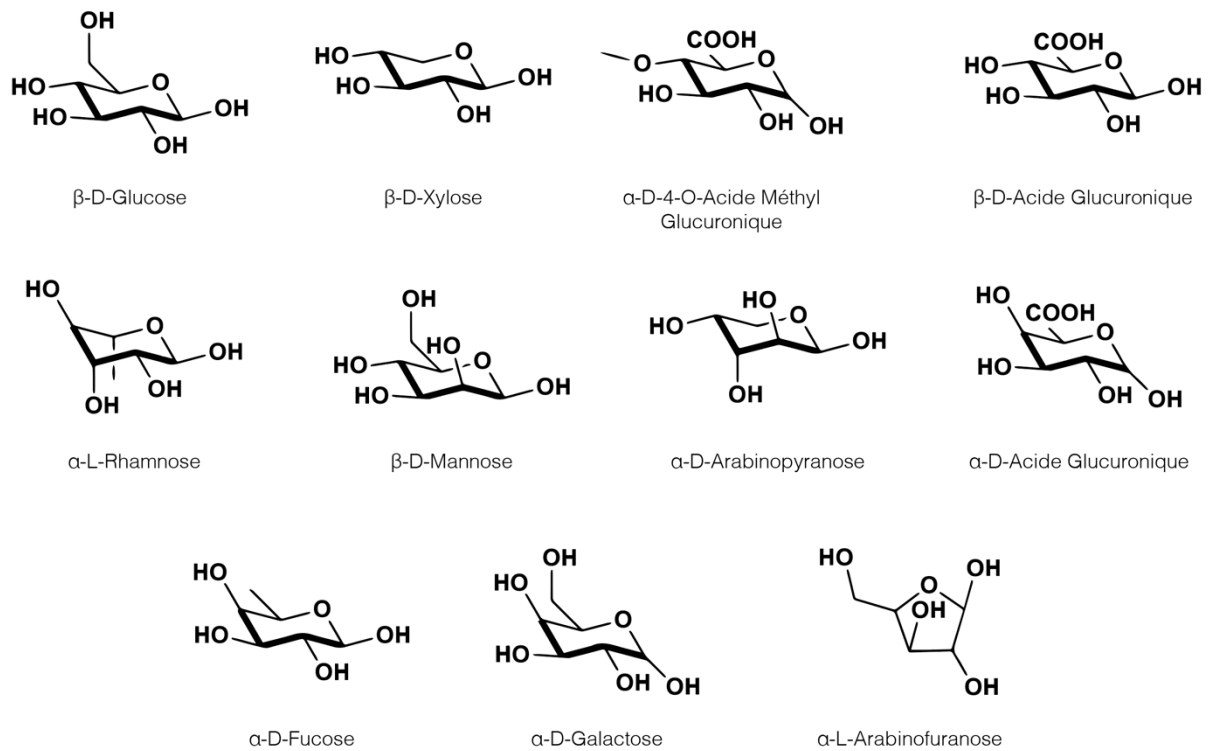


Figure 130 : Unités saccharidiques constituant les hémicelluloses

Chez les feuillus, le motif élémentaire majoritairement présent dans les chaînes d'hémicellulose est le xylose, tandis que chez les résineux on observe une plus grande variabilité de résidus saccharidiques. La cohésion des fibres de cellulose est assurée par les hémicelluloses qui agissent comme comptabilisant à l'interface de la lignine et de la cellulose. [97]

Souvent considéré comme un matériau composite, le bois associe cellulose et hémicellulose comme des fibres et un liant permettant la cohésion de l'ensemble. Le rôle de matrice est assuré par la lignine qui est formée par l'association de 3 motifs élémentaires, c'est une macromolécule tridimensionnelle amorphe. [97]

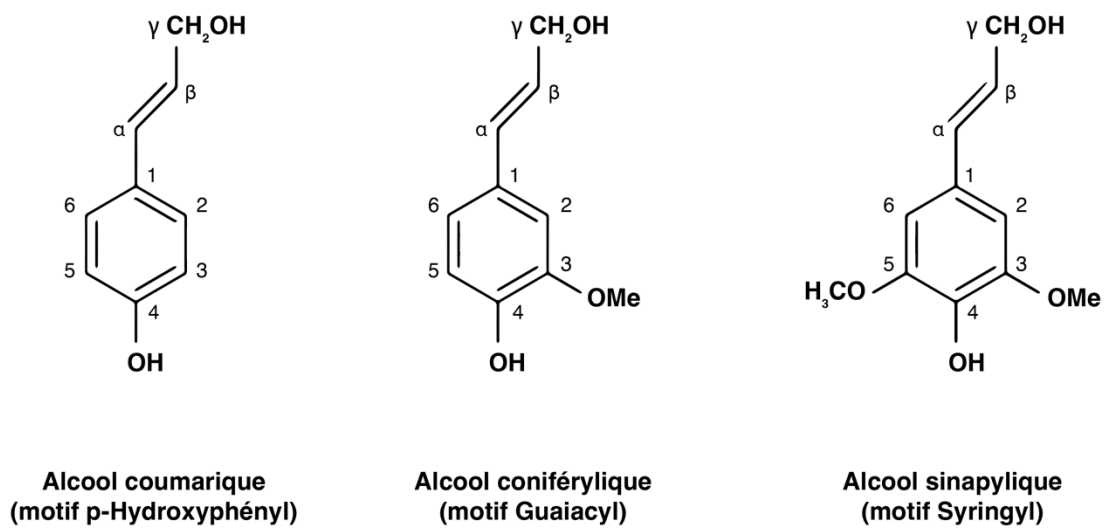


Figure 131 : Composition de la lignine

En fonction de l'essence de bois et de la proportion des monomères, il existe une très grande variabilité de composition de la lignine. Le motif guaiacyl (G) est prédominant, entre 85 et 95% chez les résineux et plus particulièrement dans le pin maritime. Chez les feuillus, comme le hêtre par exemple, le motif syringyl (S) est présent en plus grande proportion à hauteur de 56% pour 40% de motif S. Dans le bois de compression on va plutôt retrouver l'alcool coumarylique (H). La lignine est donc formée par couplage oxydant de ces 3 monolignols. [97-98]

• LE PIN MARITIME

Le pin maritime (*Pinus pinaster*) fait partie des gymnospermes et appartient à la famille des Pinacées, c'est un conifère résineux. Sa longévité est considérée comme moyenne (environ 200 ans). Le pin maritime atteint sa maturité sexuelle à l'âge moyen de 10 ans. [99] Sa croissance est considérée comme rapide avec des pousses annuelles allant jusqu'à plus de 50 cm durant les premières années. [100] A l'âge adulte l'arbre atteint une hauteur de 20 à 30 mètres et son bois est récolté entre 35 et 45 ans. L'écorce représente 20% du volume du tronc, elle est très épaisse et de couleur brune en surface et d'un rouge sombre en profondeur. Lorsque l'arbre vieillit, son écorce devient de plus en plus épaisse et crevassée. [101–102]



Au XIXe siècle, les grands travaux de boisements réalisés en Gascogne étaient à des fins sanitaires afin d'assainir les marécages en asséchant ce qui était une vaste zone humide. Cette plantation fut une manière efficace de supprimer le paludisme transmis aux populations par les moustiques qui y pullulaient. En 1857 l'ingénieur des Ponts et chaussées, Jules Chambrelent, consacre la loi relative à l'assainissement et à la mise en culture de cet espace. 1 million d'hectares sont reboisés grâce à la loi du 19 juin dans un triangle allant de Soulac (Gironde) à Capbreton (Landes) et à Nérac (Lot-et-Garonne) comme le montrent les cartes de la figure 131. [103]

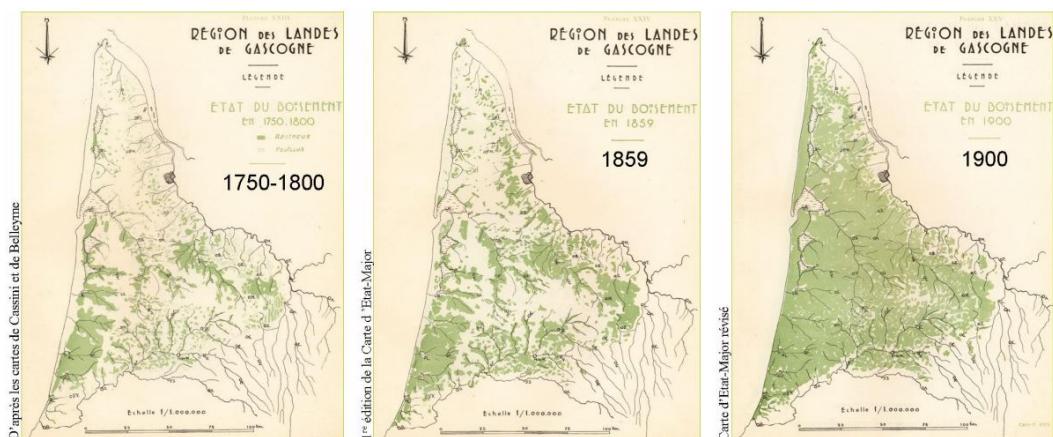


Figure 132 : Carte de l'évolution du boisement des Landes de Gascogne

C'est donc le pin maritime qui a été choisi pour sa présence naturelle et endémique dans le secteur et pour sa capacité d'adaptation à ce sol sablonneux. Le directeur de l'École nationale des Eaux & Forêts Raymond Viney, a écrit dans la Revue forestière française en 1962 que ce triangle Landes, Gironde et Lot-et Garonne constituait l'ensemble forestier le plus prodigieux du pays dans la première moitié du XXe siècle avec 1 182 000 hectares de pins maritimes. Aujourd'hui la région Nouvelle aquitaine est la plus boisée de France avec ses 3 millions d'hectares de forêt, dont près d'un million sont constitués par le triangle des Landes de Gascogne. [103]

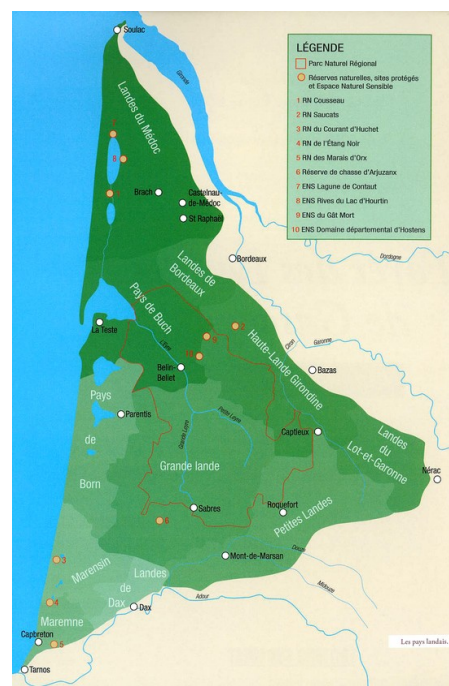


Figure 133 : Carte du triangle forestier

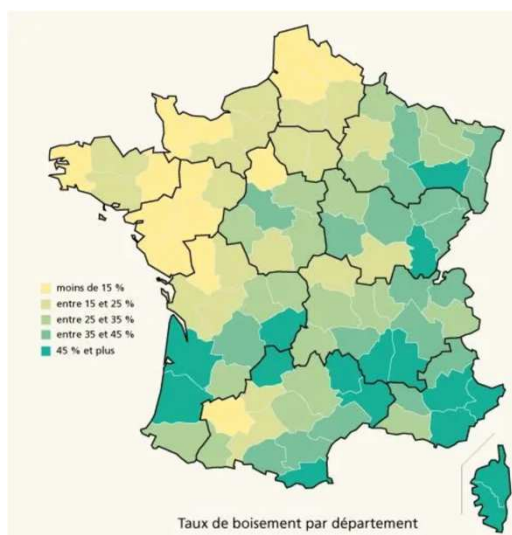


Figure 134 : Carte du taux de boisement en France par département (IGN)

Espèce incontournable du bassin « méditerranéen », espèce commune en France mais aussi en Espagne, au Portugal, en Italie et au Maroc. 4,4 millions d'hectares est la surface mondiale estimée être occupée par le pin maritime. En région Nouvelle Aquitaine, la forêt des Landes de Gascogne est la plus grande forêt dite mono-espèce, elle recouvre environ 1,5 million d'hectares [104]. En comptant les autres régions dans lesquelles il peut également être présent, le pin maritime représente environ 10% de la surface boisée en France.



Figure 135 : Répartition géographique du pin maritime dans le sud-ouest de l'Europe [105]

Adaptée au climat marin, cette espèce est considérée comme frugale (qui se nourrit de peu) ce qui lui permet de se développer sur des sols sablonneux. Le pin maritime peut être utilisé pour la fixation dunaire. [106] Cette espèce accepte les sols acides allant jusqu'à un pH de 3,5, en revanche il ne supporte pas les sols calcaires. Elle peut pousser entre 0 et 800 mètres d'altitude avec une pluviométrie très variable et supporte bien les sécheresses estivales tant qu'il y a une certaine humidité dans l'air et des sols gorgés d'eau en hiver. Adaptée à un froid modéré, cette espèce peut résister à des températures négatives raisonnables. Sa régénération naturelle nécessite une pleine lumière. [102-103-106] Le pin maritime permet le développement d'une strate arbustive et herbacée épaisse, souvent des plantes acidophiles comme les ajoncs et la bruyère.

Le pin maritime, représente 34% de la surface boisée de la Région Nouvelle Aquitaine. Le pin maritime est réparti de façon inégale entre les différents départements (58% pour les Landes et seulement 12% pour les Deux-Sèvres). 91% de cette surface forestière est privée, cette ressource naturelle importante a permis le développement de la filière forêt/bois qui occupe une place très importante dans l'économie régionale. L'importance économique de cette filière recensait, dans un large périmètre, plus de 50 000 salariés en 2016. Les quatre domaines principaux sont la sylviculture, le sciage et le travail du bois, l'industrie papetière et l'activité de charpente. La récolte de bois en Nouvelle Aquitaine fluctue entre 9,7 et 13,2 millions de m³ (ronds sur écorce). A lui seul, le pin maritime constitue 56% de ces récoltes, il est donc considéré comme le pilier de l'économie de cette filière dans cette région. Les forêts de pin maritime sont exploitées depuis les années 1860, initialement plus particulièrement pour le gemmage qui consiste à récolter la résine. [101]

À la suite d'une amélioration génétique des pins maritimes par croisement et la mécanisation des pratiques sylvicoles, la productivité moyenne est passée de 4m³ par hectare et par an dans les

années 1950 à 11,8 m³/ha/an dans les années 2000. Cela rend le pin maritime très compétitif face aux autres pins en France. A lui seul, le pin maritime fournit 20% du bois d'œuvre produit chaque année en France (3,8 Mm³) et 26% soit 2,6 Mm³ du bois de trituration (bois destiné à la fabrication des pâtes de cellulose, des panneaux de fibres ou des panneaux de particules). [99–107]

Pour un pin maritime vieux de 80 ans, le duramen représente environ 42% du diamètre de la base du tronc et diminue sur la hauteur. Le duramen a un taux de croissance d'environ 0,35 mm/an et apparaît au sein de l'arbre vers ses 18 ans. De ses 11 à ses 30 ans son accroissement annuel moyen est d'environ 3,9 mm. [108] Après le séchage, le pin maritime obtient une densité moyenne d'environ 550 g/dm³ et une humidité d'équilibre d'environ 12%. C'est un bois considéré comme moyennement nerveux, dur et peu dense, il est très peu flexible mais a une bonne tenue à la compression. C'est un bois qui se travaille, se cloue et se peint facilement. [102–109] Cependant, ses performances mécaniques peuvent être localement diminuées par la grande quantité de nœuds. Le duramen a une durabilité de classe 3, il peut théoriquement être utilisé sans traitement à l'extérieur selon la norme EN 335 [110], sauf en cas de contact avec le sol. L'aubier quant à lui est considéré comme non durable face aux agents de dégradation biologique du bois. [102–109]

Le bois est sensible aux facteurs abiotiques tel que la lumière, la chaleur, l'eau, etc. Le facteur majeur ici est celui de la lumière, car le bois utilisé est destiné à la fabrication de mobilier d'intérieur. Il sera donc moins soumis à des facteurs d'hygrométrie ou des écarts de température mais sa couleur initiale peut être impactée par la lumière du jour. Ces changements plus ou moins profonds (0,05 mm à 2,5 mm maximum) sont majoritairement dus aux modifications chimiques du matériau. [97] La dégradation applicable aux rayonnements de surface de la lumière visible pénètre jusqu'à 0,2 mm. [111] Étant un composé phénolique qui s'oxyde au soleil, la lignine est photosensible et c'est pourquoi le papier jaunit au cours du temps par exemple. La dégradation de ses fortes teneurs en chromatophores génère un grisaillement naturel car ils permettent l'absorption de 85 % du rayonnement solaire. [112] Au cours du temps, l'apparence visuelle et notamment la couleur du bois, se modifie en raison de mécanismes radicalaires sur les macromolécules du bois. [25]

Si l'on considère l'attrait du bois pour les acheteurs de mobilier et de maisons en bois, l'aspect extérieur est très important à prendre en compte car au moment de l'achat, il peut devenir le critère le plus important. En regardant la texture, les motifs et la couleur de la surface du bois, l'apparence peut être évaluée. Ces caractéristiques du matériau peuvent être incluses dans le concept d'aspects esthétiques de ce matériau. Dans le mobilier, l'apparence du bois est très importante pour l'acheteur. La plupart du temps, cette apparence est même plus importante que l'espèce de l'arbre,

sa provenance ou son origine géographique. [23] Le bois de pin maritime a la caractéristique d'avoir une différence très marquée entre l'aubier, de couleur jaune pâle, et le duramen, de couleur rougeâtre.

• LA COLORIMETRIE DU BOIS

La couleur est une composante importante de l'aspect visuel du bois car elle permet notamment la discrimination d'un bois à un autre. [113] En fonction de leur provenance, des influences climatiques qu'il a subies, de son âge et des plans de coupes, la couleur du bois d'une même essence peut varier. Par exemple les plans radiaux sont généralement plus sombres que les plans tangentiels, probablement dû à la quantité plus importante de vaisseaux ou de fibres exposés. [97]

La partie centrale de l'arbre est souvent la plus colorée, appelée bois de cœur ou duramen. C'est là que se déposent progressivement lors de la dégénérescence du cytoplasme des cellules, des substances chimiques qui absorbent sélectivement la lumière et donnent une résultante colorée au bois. À cela s'ajoute l'absorption de l'énergie lumineuse par les constituants du bois : cellulose, hémicelluloses et lignines. La couleur ne constitue qu'une composante de l'estimation dans l'ensemble des impressions visuelles que l'on ressent à l'examen d'un échantillon de bois. Elle contribue à la reconnaissance ou la désignation d'une espèce. En effet, tous les détails de structure du plan ligneux de l'échantillon observé qui apparaissent à la surface du bois contribuent à la sensation colorée : trace des rayons ligneux, des vaisseaux et des fibres avec leur orientation particulière. (cf figure 127 des plans directionnels).

A cette structure fine anatomique se superpose la trace des accroissements annuels, ainsi que le type de découpe (sciés, déroulés ou tranchés) suivant différentes inclinaisons. Chacun des modes de préparation apportant ses « figures » propres à l'état de surface final de l'échantillon de bois. On conçoit alors aisément que la couleur d'un bois va dépendre :

- de son mode de débit,
- de la direction de ce débit par rapport aux 3 axes du plan ligneux,
- de la composition chimique des constituants des parois végétales,
- de la nature des sources lumineuses utilisées,
- de l'orientation de la surface de l'échantillon par rapport à ces sources lumineuses. [114]

L'aubier (qui vient du latin « albus » : blanc) et le duramen ont une nette différence de couleur due à l'influence des extractibles qui les composent. [97] Les extractibles sont majoritairement responsables de la diversité de la couleur des bois lorsque l'aubier se transforme en bois de cœur. Les aubiers ne contiennent des extractibles que peu ou pas colorés, il s'agit donc d'une étape de

modification de la nature chimique des extractibles que l'on nomme la « duraminisation ». Pour 12 espèces dont les valeurs colorimétriques ont été analysées (feuillus, résineux ou tropicaux), on observe que les duramens sont plus foncés et plus « rouges » que les aubiers. Cependant certains bois n'ont pas un aubier et un duramen différenciés chromatiquement. [25]

La colorimétrie est une des méthodes qui permet de mesurer quantitativement la couleur de surface du matériau sous un illuminant donné. Si la couleur est une composante importante de l'aspect visuel et esthétique des bois, la description de l'apparence des bois qui intègre des notions « d'accroche de la lumière » et de réflexion, ainsi que de « figure » du bois, reste très importante. Les figures de surface relèvent de la structure du bois, tandis que la couleur elle-même relève d'abord de la chimie des bois. [25] En fonction de la composition chimique du bois, sa couleur est très variable. Par exemple dans le pin maritime les ultraviolets sont absorbés par la cellulose et les hémicelluloses, tandis que la lignine et les dérivés phénoliques réagissent. L'aubier et le duramen ont une nette différence de couleur due à l'influence des extractibles qui les composent. La courbe d'absorption ci-après montre que la lignine contribue en grande partie à la couleur du bois (figure 135). [97]

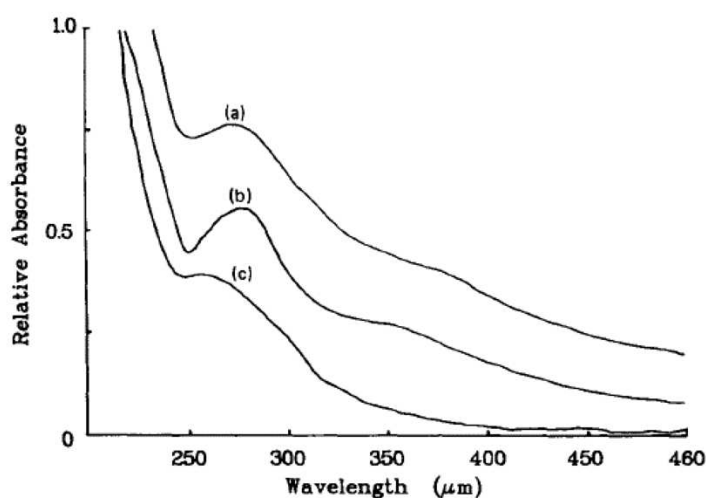


Figure 136 : Spectres d'absorption UV-Vis du bois (a), de la lignine (b) et de la cellulose (c)

La similitude entre les spectres d'absorption du bois et de la lignine montre que cette macromolécule contribue fortement à la couleur du bois. Cela est dû à des motifs particuliers appelés unités coniféraldéhydes et quinones, d'après l'étude de Pew et Connors [115]. Une oxydation des flavonoïdes (habituellement incolores) peut également être responsable de la coloration du bois en générant des systèmes chromophoriques plus complexes et des quinones. La couleur du duramen n'est pas seulement influencée par les flavonoïdes et leurs structures phénoliques. [97]

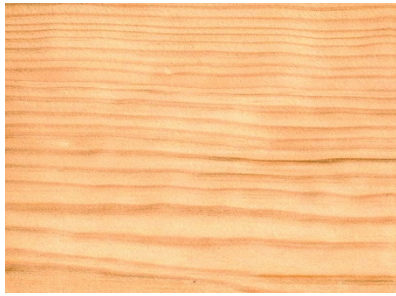


Figure 139 : Veinage du pin maritime en coupe radiale sur le plan LR



Figure 139 : Cernes du pin maritime en coupe transversale sur le plan RT

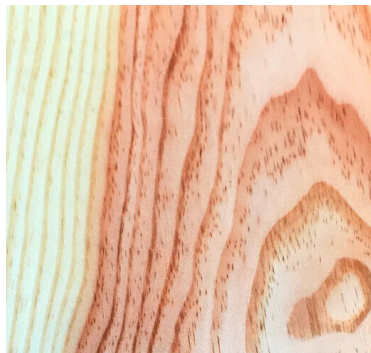


Figure 139 : Différence de couleur entre l'aubier et le duramen du pin maritime en coupe tangentielle sur le plan LT

Les analyses colorimétriques d'un échantillon de bois fluctuent en fonction de l'angle de d'irradiation par rapport au degré d'humidité, à la taille des vaisseaux et des fibres à la surface du bois car, cette dernière n'est pas uniforme. La diffusion de la lumière vers les parois cellulaires (associée à un phénomène de réfraction) est provoquée par le taux d'humidité et la présence d'eau dans les cellules. La luminosité du bois humide est en conséquence diminuée par rapport à celle du bois sec, mais c'est l'inverse pour la saturation ($C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$) qui elle augmente.

Lorsque le faisceau est perpendiculaire à la surface, lors d'une irradiation, la lumière pénètre plus profondément dans les canaux et la mesure du paramètre L^* diminue. Les valeurs a^* et b^* quant à elles augmentent, ce qui est dû à l'interaction avec les extractibles et les chromophores des parois (lignine). Pour une irradiation dans toutes autres directions, les tendances opposées sont observées avec une diminution des a^* et b^* et une augmentation des valeurs de L^* . Plus la rugosité de l'échantillon est considérable et plus la luminosité mesurée le sera aussi. La diffusion de la lumière est donc influencée par l'état de surface et l'orientation des fibres.

À elle seule, la lignine ne suffit pas à démontrer toutes les nuances de couleurs de bois existantes, notamment les différences entre l'aubier et le duramen. La teinte du duramen provient des extractibles et en particulier des phénols qui évoluent en composés complexes et colorés par couplage et polymérisation ou par oxydation (structures difficilement mobilisables par les techniques d'extraction classiques). [97] Les cernes de printemps et les cernes d'été apportent une inhomogénéité

à la couleur du bois, notamment par une variabilité d'épaisseur (paroi cellulaire plus épaisse en été) et par la taille des cellules (plus grandes au printemps. [116] Ces couleurs particulières sont donc induites par ces caractéristiques intrinsèques au bois. [97]

La couleur du bois est par conséquent une notion liée à la physique, la chimie et la biologie, il peut donc s'avérer complexe d'en donner une mesure précise. Ce sont les chromophores, provenant de la lignine, les dérivés de coniféraldéhyde, ainsi que les quinones et les composés extractibles qui sont responsable de la couleur du bois.

Le bois a également des irrégularités, des malformations qui peuvent être des traumatismes subis par l'arbre. Les fentes sont comme des fractures, décollements des éléments selon certaines surfaces, qui proviennent de tensions internes, des faits météorologiques, des conditions d'abattage ou de séchage. Un froid brutal peut produire une gélivure à un arbre sur pied et provoquer son éclatement. Une fente circulaire au cœur du tronc, appelé roulure, est produite par le décollement des cernes consécutifs due à une tension interne ou des vents violents et est fréquente dans le châtaigner et le chêne. Chaque singularité visible du bois (sur pied ou seulement une fois abattu) représente « sa mémoire ». [93]

Suivant le sens de la découpe, le bois de pin maritime présente des « dessins » très variés en surface. Par exemple, la découpe suivant le plan L.R. donne des produits présentant des stries alternées claires et sombres dont la luminosité moyenne change beaucoup.

Il résulte que le pin maritime présente des différences de teintes et d'homogénéité en surface qui peuvent être mises à profit pour un tri de qualité sur un critère d'aspect et de couleur suivant l'aspect final du produit à obtenir à dominante claire et homogène ou sombre et en mélange.

Pour exemple, le parquet et le lambris de décoration en bois de pin maritime possèdent les classements en qualité suivants :

- 1er choix, sans nœuds ou sans défauts apparents,
- 2e choix, avec nœuds,
- déclassé avec nœuds et dont quelques défauts dans les tenons et mortaises d'assemblages.

Ce classement qui repose sur la présence ou l'absence de nœuds, pourrait être amélioré, affiné et diversifié notamment pour le 1er choix. En effet, les lames de 2c choix ne pourront évidemment pas être purgées des nœuds, ce qui conduirait à des pertes de matière première ou des réductions de longueurs qui rendraient plus coûteuses la pose de parquet. Mais, les lames de 1er choix montrent à un examen attentif des variations d' « aspect et de couleurs » très surprenantes et

dont on pourrait tirer parti pour valoriser la production de produits finis en bois de pin maritime. La liste suivante a été dressée à la suite de mesures pratiquées sur des lames de parquet extraites d'un assortiment commercial et classées en valeur décroissante de L^* :

Tableau 18 : Coordonnées chromatiques L^* , a^* , b^* du parquet de pin maritime mesuré sous illuminant C, observateur standard 2°

Lame de parquet	L^*	a^*	b^*	Aspect et couleur
1	80,84	4,58	25,42	jaune très clair
2	80,41	4,92	27,56	jaune très clair
3	77,68	6,04	26,69	jaune clair
4	77,27	6,85	28,97	jaune foncé
5	76,06	6,81	30,75	jaune foncé
6	74,31	7,73	25,86	jaune-rouge
7	72,73	8,71	28,28	bicolore jaune-rouge
8	72,43	7,81	31,69	jaune très foncé
9	70,95	9,90	27,31	bicolore jaune-rouge
10	68,88	12,72	25,51	rouge foncé

Dans cet exemple, qui représente une partie de nos observations prises dans le même lot, on peut voir que la luminance L^* décroît, la coordonnée a^* dans le rouge augmente, ce qui traduit une diminution de la clarté et une augmentation de la couleur brun-rouge, et qui donne un mélange très hétérogène. Ceci est encore accentué par la présence de lames de parquet bicolores « blanches » et « rouges » qui proviennent de la limite bois d'aubier / bois de cœur. La coordonnée b^* n'est intéressante que lorsque a^* est faible ; dans ce cas, elle indique une couleur proche du jaune clair. [114]

En réponse au stimulus visuel, la couleur est une psycho-sensation pour l'homme. Liée aux différents objets observés au cours d'une journée, cette subjectivité sensorielle est transmise par une émotion. En fonction de la perception visuelle et de l'interprétation individuelle de chacun, les effets produits par une couleur sont différents en fonction des personnes. C'est le contrôle physiologique qui régit ces sensations qui dépendent du contexte éducatif et psychologique des personnes concernées.

Dans les intérieurs on retrouve le bois partout, que ce soit en décoration (sculptures, objets artisanaux ou autre), en mobilier ou en matériau de construction (panneaux de bois, escaliers, parquets, lambris etc...). Il fait partie de notre environnement et contribue à créer une atmosphère particulière et sensible par sa naturalité. [23]

Plusieurs études ont été réalisées au niveau industriel mettant en œuvre des analyses d'images couleur. [117-119] En termes de différence perceptible par l'œil, des analyses sensorielles effectuées uniquement avec des couleurs unies ne permettent pas de décrire la texture couleur. Comme le soulignent les travaux de Lafon [120], pour caractériser une surface texturée (comme le bois par exemple), l'étude des seules coordonnées trichromatiques d'une image ne suffit pas. Il est nécessaire de définir un système qui permet de trouver la correspondance entre la perception et des mesures sur des images texturées colorimétriquement. Plusieurs travaux tentent de caractériser la texture couleur par l'étude de la répartition spatiale des coordonnées chromatiques ou du niveau de gris des pixels composant l'image. Nishimura [121] utilise la transformée de Fourier et le filtrage des images pour analyser l'orientation des fibres à la surface des panneaux d'OSB (Oriented Strand Board). N'Dri-Stempfer [85] utilise la méthode des variogrammes pour déterminer la longueur de corrélation de la texture des poudriers. Fujii [122] se sert de la fonction d'autocorrélation des niveaux de gris d'une image. Ce dernier a conclu que la combinaison linéaire des paramètres de la fonction d'autocorrélation correspond à la perception subjective de « texture » et « régularité » de l'image. Ceci est valable que ce soit pour une texture périodique ou pour une texture aléatoire. [123]

3.1.7 BOIS ET SANTÉ

Dans le cadre du projet de thèse, je me suis intéressée à l'utilisation du bois dès le début de mes recherches. Le bois teinté ou non, était susceptible de faire partie de la structure des mobiliers mettant en avant les nouveaux matériaux à partir de déchets de cuir et de textile mis au point dans le cadre du projet OSPHERE. La nécessité de trouver des teintes biosourcées afin d'élargir la gamme de couleur de ces montants en bois m'a amenée à orienter mon travail de recherche vers différentes matières premières afin de disposer d'une palette d'opportunités pour l'entreprise qui les mettra en œuvre.

Issu de l'organisme vivant, l'arbre, le matériau bois possède des propriétés intrinsèques naturelles exploitées dans les usages industriels et technologiques. Étant l'un des premiers matériaux utilisés par l'homme, on peut parler d'une relation ancestrale avec le bois. Au quotidien il semblerait qu'il y ait des bénéfices sur la santé à utiliser du bois dans notre environnement. C'est la réflexion menée par Anne Lavalette et Anna Dupleix-Marchal dans l'article « Bois et santé : rôle du matériau bois sur la santé humaine ».^[124]

Chaque culture a des relations spécifiques, des préjugés, des valeurs et des comportements différents envers la forêt. Les trois facteurs économiques, historiques et culturels évoluent avec le temps, ce qui explique cette complexité. Dans les sociétés européennes, parallèlement à l'exploitation économique, l'urbanisation grandissante éloigne les humains des forêts et par conséquent, au fil des générations, la perte des connaissances. Considéré à l'époque comme « inépuisable », dans les années 1970 le matériau bois devient « renouvelable » dans une perspective d'environnement plus durable. Contrairement aux surfaces intensivement exploitées et habitées, les populations décrivent la forêt comme un espace attirant et représentatif de la nature. Pour contrebalancer avec le rythme de travail et de vie qui génère stress et angoisses, pour combler ce manque ressenti en ville, un mouvement de redécouverte de la nature s'est mis en place. L'idée consiste en un rapprochement de l'espace forestier afin de renouer le contact par la pratique de promenades immersives qui permettraient d'avoir des bienfaits sur la santé mentale et physique des individus. ^[124]

La symbolique de la forêt s'est aujourd'hui enrichie d'une dimension de « naturalité » en plus de sa symbolique économique pour les citoyens. Dans leur perception, la forêt fait référence à une nature « sauvage », un lieu d'une « anti-société » non soumise aux contraintes de la ville. Un lieu où les forces de la nature s'expriment librement, où l'homme peut exprimer ses émotions ou développer ses valeurs émotionnelles méditatives, réflexives et créatives qui ont un effet positif sur la santé nerveuse et physique. ^[125] Pour rapprocher les citoyens de l'arbre, de nombreux pays créent des

« poumons verts » dans les villes afin d'apporter aux habitants de meilleures conditions de vie. Cependant dans l'inconscient collectif des populations, la forêt reste encore pour la plupart le fruit d'une exploitation humaine. Mais l'aménagement et la gestion forestière par l'homme est un modèle pour la mise en valeur d'autres ressources naturelles puisqu'elle a permis l'augmentation de rendements productifs tout en régénérant de la ressource en préservant cette notion de « nature ». La preuve en est qu'aujourd'hui l'homme contemporain en fait une nouvelle utilisation en demandant à la forêt de lui faire du bien. [124]

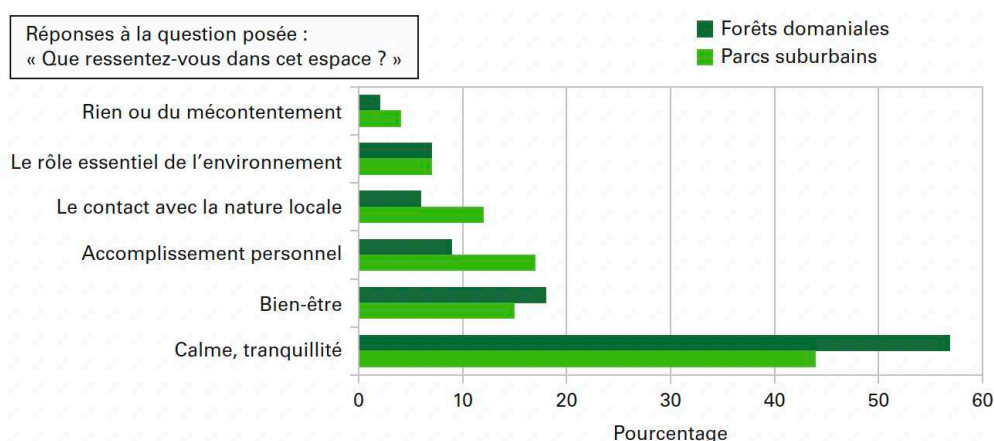


Figure 140 : Ressenti d'utilisateurs des forêts domaniales et parcs urbains d'Alençon, de Blois et du Mans [124]

Une nouvelle pratique émerge à la fin du XX^e siècle, la sylvothérapie. Elle consiste prendre des « bains de forêt ». Cette pratique repose sur le principe de l'éveil des sens en forêt qui permettrait de soigner au contact des arbres. Il a été prouvé que la contemplation (visuelle, auditive ou olfactive) des arbres dans le vent réduit les états dépressifs, relaxe et améliore la concentration, le sommeil et l'estime de soi. Cette pratique reste considérée comme préventive. Pourtant au Japon c'est une discipline (*shinrin-yoku*) reconnue pour ses effets bénéfiques au niveau sociétal et dans le domaine de la santé publique. [126–127]

Sur le même principe que la phytothérapie qui dans un but thérapeutique consiste à utiliser les principes actifs des plantes, la sylvothérapie permet aux promeneurs de capter des substances volatiles odorantes émises par les arbres (écorces, aubier, feuilles, fleurs, bourgeons) qui peuvent être de la famille terpènes ou des phénols et des lactones. Les arbres utilisent eux même ces substances pour communiquer ou se défendre face aux agressions grâce à leurs propriétés antimicrobiennes, antifongiques et insecticides. Contrairement aux effets néfastes sur les insectes et les micro-organismes, ces composés volatiles ont des effets bénéfiques sur la santé humaine via la respiration. [124–128]

Les substances volatiles utilisées en sylvothérapie sont nombreuses et variées, elles sont responsables des propriétés du bois même une fois coupé et mis en œuvre. Dans les environnements intérieurs contenant des éléments en cèdre au Japon (ou autres arbres émetteurs de COV), l'inhalation de cet air montre des effets physiologiques similaires à ceux provoqués par l'air inhalé en forêt en présence des mêmes essences de bois. Les compositions des extractibles varient selon les essences de bois, chacune a ses spécificités. [129–130]

Plusieurs travaux de recherches ont comparé les perceptions sensorielles des individus face à du bois massif, des panneaux à base de bois, des parquets stratifiés, huilés ou des panneaux composites. D'un point de vue sensoriel, le résultat de ces études montre que le bois massif se place en tête du classement pour son côté naturel et non transformés perceptible visuellement ainsi qu'au toucher et procure un sentiment de bien-être. Les sensations au toucher et les motifs uniques du bois sont les premiers indicateurs de sa naturalité. [131–132] Les panneaux OSB, MDF ou les parquets stratifiés qui sont des produits transformés à base de bois ne produisent pas le même ressenti et sont considérés comme moins naturels, plus uniforme et plus industriels. Les adjectifs « doux », « naturel », « vivant », « agréable » et « lourd » ont été employés pour parler du bois massif par les utilisateurs. Une autre étude s'est concentrée sur le ressenti haptique et a été réalisée avec des consommateurs autrichiens pieds et mains nus. Plus de 70% des personnes ont préféré les revêtements en bois huilés qui leur évoquent une texture naturelle et un matériau qualifié de « chaud », « rugueux » et « doux » à la fois. [133] Une étude menée dans 5 pays européens [132] confirme ces résultats en les enrichissant de nouveaux critères en prenant en compte le bruit, la chaleur et l'odeur. Ces critères proviennent des propriétés physiques intrinsèques de ce matériau (densité, dureté, grain, conductivité thermique etc.) et participent à la création d'un environnement perçu comme confortable. [124]

“ L'hypothèse de la biophilie ” (ou la sympathie pour le vivant) est une des explications de la perception positive du matériau bois. Les humains disposeraient d'une affinité innée à interagir avec le monde naturel d'après le psychanalyste américain Eric Fromm dans les 1960. Quelles que soient les époques et les milieux, les humains cherchent à garder un contact avec la nature dans leur espace de vie. En 2008 une société américaine recommande même des principes de mise en œuvre de l'habitat pour prendre en compte la dépendance de l'humain à l'égard de la nature. Les bâtiments doivent intégrer des éléments naturels, évoquer la nature par des formes analogiques et des couleurs naturelles, ainsi que des endroits pour pouvoir se cacher, se réfugier ou surveiller pour reproduire certaines fonctions que nous assurent les lieux naturels.

Le bois porte en lui-même l'évocation de la nature sur le plan sensoriel comme il en est témoigné précédemment. Cela explique pourquoi les matériaux composites l'imitent et reproduisent son veinage et ses nœuds pour paraître plus naturels. [124]

La lumière, associée à une hygiène de vie, prend une place très importante dans l'architecture moderniste vers la fin du XX^e siècle. L'architecte finlandais Alvar Aalto (1898-1976) est l'un des représentants de ce mouvement architectural et va faire de l'utilisation du bois dans l'habitat sa spécialité pour favoriser confort et bien-être des lieux qu'il conçoit. [134-135]



Figure 141 : Villa Mairea conçue par Alvar Aalto en 1938 [136-137]

Récemment, plusieurs études scientifiques ont quantifié l'effet des stimuli visuels du bois en intérieur et en fonction de la proportion des surfaces recouvertes de bois. Les résultats montrent que cela provoque des réactions physiologiques significatives comme la vitesse du pouls, la pression sanguine et l'activité cérébrale. Les usagers ont attribué, de manière subjective, la meilleure qualité en matière de confort à la pièce comportant 45% de couverture bois et pour laquelle les chercheurs ont observé une diminution de la pression sanguine et une augmentation du pouls. [138] Une autre étude compare deux chambres en milieu hospitalier et le comportement des individus qui s'y trouvent. L'une peinte en blanc et la seconde avec un revêtement de panneaux de bois. Les scientifiques ont observé que divers paramètres physiologiques caractéristiques de l'état de stress sont réduits en présence d'un environnement bois. Un lien peut donc être établi entre un état de santé mentale relaxé et la présence visuelle de bois. [139]

Ce matériau possède également des propriétés acoustiques qui varient selon les essences, entre absorption, réflexion et amortissement du son. C'est un excellent matériau pour les auditoriums par exemple. Grâce à ses propriétés vibratoires, le bois parvient à cet équilibre qui procure des espaces sonores agréables à l'ouïe. (29) Le matériau bois a également une faible conductivité thermique qui varie en fonction des essences, de sa teneur en eau et en extractibles etc. Ceci comparé à d'autres matériaux structurels comme le métal, la pierre ou l'acier. La diffusivité moyenne du bois est de 1,6 x

$10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ contre $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour l'acier par exemple. Ses propriétés thermiques en font un matériau ni très chaud ni très froid ce qui le rend agréable au toucher. La conductivité du bois explique également sa faible effusivité, plus un matériau est effusif plus il va absorber rapidement la chaleur sans se réchauffer pour autant ni donner une sensation plus chaude ou plus froide. [124]

Plusieurs études comme celle de Mourey et al en 2002, Millingg et al en 2005, Vainio-Kaila en 2017 [140–142] montrent également que le bois a des propriétés bactéricides intéressantes, notamment le pin et le chêne sur des bactéries présentes dans le secteur de la santé humaine. Comme le montre la figure 141, au-delà de 24h les bactéries ne survivent pas dans les sciures de chêne ni dans celles de pin.

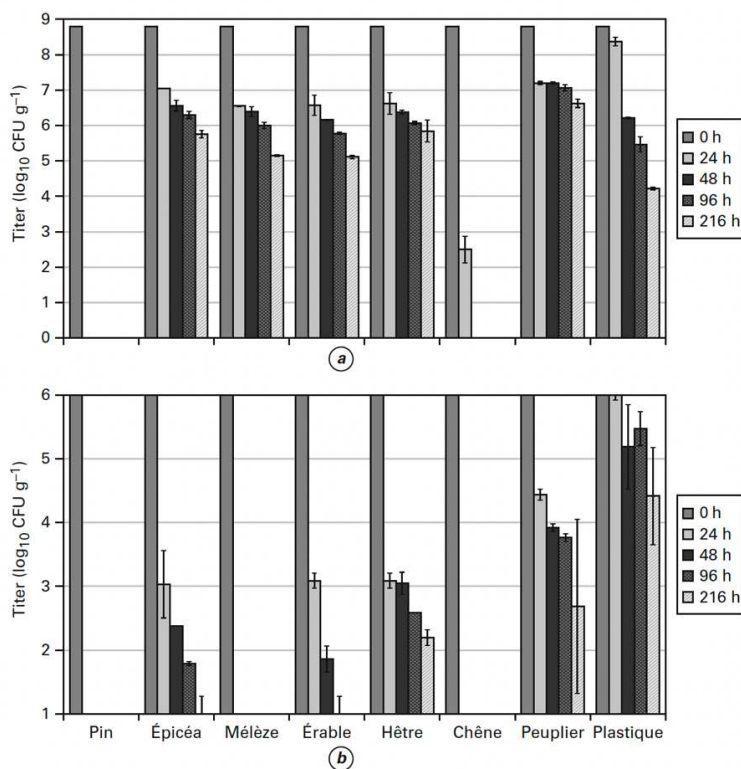


Figure 142 : Survie d'*E. coli* (a) et *E. faecium* (b) sur des poussières de bois et des copeaux de plastiques [142]

De manière générale, sur les autres matériaux que le bois (plastique, verre, acier), toutes les bactéries ont montré un taux de survie plus élevé. Une relation de confiance entre la filière bois et les systèmes de santé pourra peut-être voir le jour grâce à ces résultats afin de dépasser certains préjugés sur les caractéristiques hygiénique du bois. [124]

Matériau d'ingénierie, renouvelable et issu d'une ressource vivante, le bois a des propriétés valorisées dans diverses applications industrielles mais reste moins répandu pour une utilisation dans le domaine de la santé humaine. De nombreuses études démontrent ses bienfaits en caractérisant quantitativement et qualitativement son impact dans certains usages, sur le confort, les sensations de bien-être et la santé des individus.

Grâce à son aspect visuel naturel, son grain, son veinage et ses couleurs, le matériau bois procure une sensation de chaleur et de douceur au toucher qui n'est pas semblable aux autres matériaux. En rappel aux origines de l'humanité, le bois est associé au savoir-faire artisanal et véhicule une image de tradition. Il a également un impact sensoriel sur des paramètres physiologiques des individus qui sont observés lors de balades en forêts, ou dans des aménagements intérieurs, où le bois est quantitativement présent. Ce sont donc des propriétés thérapeutiques dont pourrait bénéficier le secteur de la santé. Pas moins hygiénique que d'autres matériaux qui ont tendance à être privilégiés comme le plastique ou l'inox et l'acier, le bois présente de bonnes propriétés en contact alimentaire également.

Les résultats expérimentaux obtenus par les chercheurs sont à replacer dans le contexte de leurs études et dans des conditions d'emploi particulières car chaque essence de bois a ses propriétés différentes. Par sa capacité à s'adapter à son écosystème, il évoque un matériau qui possède une « personnalité ». La grande diversité des bois en déduit l'usage adéquat de ce matériau pour utiliser « le bon bois au bon endroit » que ce soit pour des usages technologiques ou une utilisation en santé humaine.

L'objectif de l'étude City Zen Wood 2 menée en 2020 et dirigée par l'institut technologique Forêt Cellulose Bois Construction Ameublement (FCBA), appuyée par la Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages (DHUP), fut de développer une méthode permettant d'évaluer de manière objective comment différentes essences de bois affectent le confort des utilisateurs.

Le but était d'étudier comment les utilisateurs réagissent physiologiquement et mentalement en ce qui concerne les émotions liées au stress et à la détente. Cette étude s'est concentrée sur l'analyse des sensations tactiles de la main et olfactives, en comparant les essences de bois françaises et japonaises. En effet, après une stimulation des différentes activités sensorielles, les constantes physiologiques telles que la fréquence cardiaque et la pression artérielle diminuent au contact du bois.

[143]

D'après l'article « *Wood and Its Impact on Humans and Environment Quality in Health Care Facilities* » de Veronika Kotradyova et al. [144], l'utilisation de matériaux naturels, en particulier le bois, est pertinente pour le bien-être humain dans les environnements des établissements de santé ou

sociaux. Par une méthodologie complexe, des tests expérimentaux de réponses physiologiques ont été effectués sur 50 volontaires se déplaçant dans une salle d'attente en bois de l'Institut national d'oncologie de Bratislava pendant 20 minutes. L'électrocardiographe (ECG), la fréquence cardiaque (FC) et l'activité respiratoire ont été mesurés. La pression artérielle et les niveaux de cortisol ont également été observés. Même les émotions des visages des volontaires avant d'entrer dans la pièce et après y être restés ont été enregistrées. L'utilisation du matériau en bois confirme son effet régénérateur et positif sur le système nerveux humain, grâce à une esthétique attrayante (structure, couleur et texture), un confort de contact élevé, une odeur agréable (liée aux émissions de composés organiques volatiles (COV)) ainsi que le bien-être acoustique dans l'espace.

Selon le magazine Architecture Bois [145], le bois aurait dix bienfaits sur notre santé et notre bien-être. Il stimule notre créativité et nous aide à la concentration et augmente notre productivité tout en jouant sur notre humeur par son aspect de matériau agréable qui lui est conféré. Il contribue également à réduire notre stress et notre rythme cardiaque. Les surfaces en bois sont connues pour leur propriétés bactéricide et/ou bactériostatique voir antifongique comme l'atteste une étude du CHU d'Angers. [146]

L'absorption et la réduction de COV nocifs pour la santé ainsi que la stabilisation de l'humidité sont aussi des propriétés intéressantes du matériau bois. [145]

3.1.8 COULEUR ET SANTÉ

La couleur a des vertus sur notre corps et sur notre santé. Des recherches ont été menées sur ce sujet dans diverses disciplines pour éclairer cette pratique utilisée depuis des millénaires. Le réseau « *Color The Life* », est composé d'experts et de designers qui révèlent les potentiels de la couleur dans tous les domaines. Ce réseau a organisé un webinaire au printemps 2021 sur la thématique couleur et santé. Voici quatre exemples de travaux/projets présentés lors de ce webinaire :

1- Coralie Pittet, chromothérapeute, énergéticienne, auteure et technicienne en analyses biomédicales qui travaille sur le soin par la lumière et la matière colorée. Elle explique que cette méthode de la chromothérapie, est utilisée depuis l'Égypte Antique et ne cesse de démontrer son efficacité. Cette thérapie par la couleur est une technique adaptée aux besoins de chacun et qui permet de soulager toutes sortes de symptômes, tant physiques que psychiques. La couleur est appliquée à l'aide de différents supports comme une lampe, un spot, des filtres, etc... Niels Finsen a obtenu un prix Nobel de physiologie et de médecine en 1903. Il a été reconnu pour son œuvre sur le traitement de maladies, spécialement du lupus tuberculeux, au moyen de rayons lumineux

concentrés qui était une nouvelle méthode dont il a conçu le principe, l'application et à laquelle il a donné le nom de « photothérapie ». [147] La chromothérapie est reconnue par la médecine, elle est, par exemple, utilisée dans les maternités pour soigner la jaunisse à l'aide de lumière bleue ou encore par la Nasa pour aider à la cicatrisation des astronautes grâce à la lumière rouge. [148]

2- Delphine Talbot, Maître de conférences en Arts plastiques et Arts appliqués à l'ISCID de Montauban, enseignant – chercheur en teinture naturelle et designer sensorielle et plasticienne, mène un travail de recherche sur la question de la plante à la fois colorante et soignante. Elle a exploré les couleurs issues des plantes en les considérant dans leurs poly-sensorialités afin d'explorer les dimensions colorantes, olfactives et soignantes de ces plantes à travers un projet nommé « Color & Care ».

Ce programme de recherche est interdisciplinaire pour développer une gamme de coloris vertueux en travaillant avec des plantes médicinales et leurs bienfaits pour mettre au point des teintures solides et reproductibles à des fins thérapeutiques. L'objectif est d'en faire une gamme prescriptive de couleurs végétales thérapeutiques, on peut donc parler de palette de couleurs sensorielles. L'objectif est d'améliorer l'empreinte écologique de l'industrie du textile avec des colorations plus écologiques et moins polluantes, ainsi que développer des textiles améliorant la santé et le bien-être grâce aux vertus des plantes tinctoriales, par exemple le cas de l'eucalyptus et de l'oignon.

L'enjeu est de permettre une production textile teints avec des plantes mais qui soient aussi des textiles potentiellement soignants. Une collaboration avec Vanessa Causse qui se dit designer « trend forecaster » du bureau de style parisien Trend Union, permet d'anticiper de nouveaux usages, de nouvelles pratiques tout en valorisant les potentiels du végétal. Ces recherches ont donné naissance à une gamme pour une collection capsule en collaboration également avec le CRITT horticole de Rochefort qui produit des extraits de colorants végétaux.



EUCALYPTUS
 Prototype 1 – Master Class 2020 – Tinctura Medicus

ALIUM CEPA
 Prototype 2 – Master Class 2020 – Tinctura Medicus

Figure 143 : Extrait du projet « Color & Care » de Delphine Talbot

Ce projet a pour but de valoriser la polysensorialité, des coloris issus de matériaux vivants. Un potentiel pour réinventer notre rapport à la couleur et repenser ce qui nous entoure et au plus près de notre corps : l'habillement. L'élaboration d'une gamme prescriptive, un outil conseil, pour des usages en coloration textile, en cosmétique et soin, permet aux entreprises qui souhaitent se différencier par la couleur en ajoutant une dimension écologique voire thérapeutique en développant son offre grâce à la coloration végétale.

Par la combinaison d'approches interdisciplinaires entre le design sensoriel, le design couleur, la pharmacologie, la chimie de la couleur, l'anthropologie des usages et l'histoire des pratiques antiques, la prescription colorielle est proposée pour les secteurs tournés vers l'innovation. Notamment en beauté/santé et dans l'industrie de la couleur. Ce projet permet de faire prendre conscience de la diversité et des possibilités colorielles infinies grâce à ces plantes. [149]

3- Elodie Gobin designer couleur, Florence Aviat experte de sujets sur le bois et la santé, ainsi que Claire Leloy dirigeante de la société de conseil et de veille en construction durable MEDDLE, ont également abordé la thématique « Bois couleur et soins » via le projet de recherche et développement « IMPACTs ». Les bienfaits du bois sur la santé ont été évoqués précédemment (cf revue Bois et santé), mais l'étude de Zhang et al. en 2017 montre qu'il est observé une diminution du stress en fonction de la couleur de l'essence de bois utilisée dans une pièce. 20 sujets ont été exposés pendant 1h où l'évolution des températures de la peau a été observée. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour une pièce 50% bois clair et 50% mur peint en blanc, comparé à des pièces 100% bois foncé, 100% bois clair ou 0% bois (dans l'ordre décroissant des résultats).

4- Isabelle Rodier designer textile, couleur et matière, Enseignante dans le département Design Textile et Matières à l'E.N.S.A.D Paris, a présenté son travail sur l'expérience de la construction d'un lieu de vie pour adultes polyhandicapés et autistes. Elle a retracé les interrogations, les difficultés, et le cheminement qui a permis de mettre la couleur au centre de la conception d'un IME en région Parisienne (Le FAM, La Maison en Plus). Elle s'est interrogée sur la place que peut prendre le projet coloré, s'il est initié dès l'origine et quel terrain de dialogue peut être abordé avec les usagers. De la réflexion en amont, à la conception en passant par les rencontres avec les familles et les institutions, à la réalisation finale, jusqu'au choix de mobilier, chaque étape compte pour que la couleur remplisse la mission qui lui a été donnée.

Le but était de concevoir des harmonies positives et variées suivant les espaces et les étages (envelopper, reconforter dans les chambres, dynamiser et aiguiller pour des espaces de vie par exemple). Les jeunes (futurs habitants de ce foyer) ont fait part de leur peur du blanc (univers hospitalier) et qu'ils avaient une préférence pour des couleurs vives et saturés.

Il était primordial dans cette étude d'éviter les codes des institutions, mais à l'inverse, être dans des codes plutôt domestiques. Dès l'entrée il fallait accueillir et affirmer la singularité du projet en cassant les codes et les attentes liées au handicap comme on peut le voir dans des structures classiques. Dans les couloirs, il a été fait le choix de favoriser la spacialisation (un plan = une couleur) pour éviter la rupture visuelle entre les portes et les éléments de protections murales. Il y a eu un travail sur la singularité des chambres avec 3 harmonies réparties sur les 14 chambres de chaque étage, qui donne la sensation aux usagers d'avoir leur propre chambre et qu'ils puissent se l'approprier. Il était primordial de détourner l'aspect froid du matériel et du mobilier médicalisé, souvent synonyme de moments peu agréables, pour leur apporter plus de gaieté grâce aux couleurs. Le retour a été extrêmement positif, par le personnel encadrant qui s'est également senti valorisé dans ce lieu différent, et par les jeunes et leurs familles qui se sont rapidement approprié les lieux. Ce projet confirme donc les bénéfices de la couleur dans un environnement de soin. [150]



Figure 144 : Conception couleur/matière du foyer d'accueil médicalisé « La Maison en Plus » par Isabelle Rodier

Estelle Guerry, jeune docteur du laboratoire LARA-SEPPIA de l'université de Toulouse Jean Jaurès, a mené ces travaux de recherches sur le rôle de la couleur dans les pratiques de soin. Elle a travaillé sur la conception d'environnements bienveillants et des thérapies alternatives adaptées aux personnes âgées via la couleur. Une innovation grâce au design couleur qui permet de se repérer, se déplacer et de s'orienter plus facilement dans l'espace. Cela crée des environnements propices à la stimulation visuelle et permet de soulager des pathologies cognitives grâce à des pratiques thérapeutiques par la couleur. [151]

Autre exemple de deux hôpitaux Parisiens qui utilisent la couleur au service de la santé : A l'hôpital de l'hôtel Dieu, le Professeur Damien Leger, explique qu'ils utilisent la chromathérapie comme outil thérapeutique pour soulager leurs patients. Exemple, une lumière violette pour atténuer les migraines, verte ou bleue contre les troubles du sommeil. La lumière orange favorise la sécrétion de la mélatonine ou encore la rouge qui favorise l'endormissement. A l'hôpital de la Pitié Salpêtrière à Paris, le service de chirurgie cardiaque a opté pour une couleur bleue sur ses murs afin d'adoucir le quotidien des malades qui le trouvent plus apaisant et tranquillisant, se sentant moins angoissés que dans un univers entièrement blanc cité comme alarmant, tandis que d'autres vont trouver le bleu dynamisant. Les médecins ressentent les effets de sérénité et de détente sur leurs patients pour une meilleure récupération post-opératoire comme l'explique le professeur Pascal Leprince, chirurgien cardiaque. [152]

L'environnement, l'espace qui nous entoure, fait partie de notre quotidien et a un impact sur notre ressenti, nos émotions et même sur des aspects physiologiques de notre corps comme le prouvent les études réalisées sur le sujet. L'harmonie a une grande importance dans la perception des couleurs et la compréhension de l'espace, d'où l'importance de l'expertise du designer couleur. Avec cet aspect d'impact positif sur l'utilisateur, des nouveaux termes ont vu le jour, on parle de « color care » et de « care design » ce qui signifie littéralement prendre soin par la couleur et le design.

3.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

3.2.1 MATIÈRES PREMIÈRES

LES COLORANTS VEGETAUX

Pour les premiers essais, des extraits déjà présents au laboratoire ont été utilisés comme le Phénopin® qui est un résidu de tanins d'écorces de pin maritime commercialisé par la société DRT, du tanin de mimosa, de l'extrait de cachou, et du brou de noix. Ces matières n'étant pas ou plus commercialisées il était difficile d'imaginer une production pérenne en grande quantité pour l'avenir. Nous nous sommes tournés vers des professionnels pour se procurer des colorants commercialisés afin d'obtenir une meilleure reproductibilité. L'entreprise « Couleurs de plantes » située à Rochefort-sur-Mer en Charente Maritime possède un savoir-faire particulier et travaille en collaboration avec le laboratoire du centre d'innovation et de transfert technologique (CRITT) horticole spécialisé au sein de l'association régionale de recherche et de développement horticole (ARRDHOR) dans l'étude et le développement des teintures végétales pour développer de nouveaux procédés au service des industriels.



Figure 145 : Logos de l'entreprise fournisseur des colorants et du laboratoire de recherche associé

Afin de respecter les principes du développement durable, les plantes tinctoriales choisies sont locales ou proviennent d'un périmètre raisonnable, ce qui influence la palette exploitable. Les végétaux sont extraits à l'eau chaude ou à l'éthanol, et les extraits sont ensuite stérilisés pour garantir leur pérennité. Il a été choisi de n'utiliser que des colorants issus de plantes cultivées et extraites en France, à l'exception du polygonum (Inde, Indonésie, Afrique ou Amérique centrale), afin de rester dans une démarche d'économie circulaire et d'éco-conception.

Les extraits colorants utilisés sont les suivants : solidage (*Solidago canadensis*), réséda (*Reseda luteola*), genêt des teinturiers (*Genista tinctoria*), coréopsis (*Coreopsis*), bourdaine (*Frangula alnus*), chêne (*Quercus*), châtaigner (*castanea*), garance standard et riche (*Rubia tinctorum*), et le sorgho des teinturiers (*Sorghum bicolor*). Le polygonum (*Chlorophyllines cuivriques*) a été fourni sous forme de feuilles séchées et le raisin d'Amérique (*Phytolacca decandra*) a été récolté par mes soins dans une forêt locale. L'extrait de garance riche est obtenu par un procédé plus sélectif, que celui de la garance standard procurant un extrait plus riche en molécules colorantes rouges. Les colorants

commercialisés par « Couleurs de Plantes » sont débactérisés, centrifugés puis filtrés à 80 µm pour être conditionnés sous forme de poudre. De la maltodextrine est ajoutée dans les extraits plus riches en sucres pour leur assurer une meilleure conservation.

Tableau 19 : Liste des colorants et pigments de la palette "locale" sélectionnée

	Nom commun	Nom Latin	Molécule colorante	Partie utilisés	Provenance
	Solidage	<i>Solidago canadensis</i>	Flavonoïdes (flavonol)	Sommités fleuries	Poitou-Charantes, France
	Réséda des teinturiers	<i>Reseda luteola L.</i>	Flavonoïdes (flavones, lutéoline)	Tiges fleuries	Poitou-Charantes, France
	Genêt des teinturiers	<i>Genista tinctoria</i>	Flavonoïdes (flavones, lutéoline)	Rameaux fleuris	Poitou-Charantes, France
	Coréopsis	<i>Coreopsis</i>	Flavonoïdes	Tiges fleuries	Poitou-Charantes, France
	Bourdaïne	<i>Frangula alnus</i>	Quinones (anthraquinones)	Ecorce ou rameaux	France
	Châtaigner	<i>Castanea</i>	Tanins (ellagitanins)	Bois	Italie
	Chêne	<i>Quercus</i>	Tanins (ellagitanins)	Bois	Poitou-Charantes, France
	Cosmos	<i>Cosmos sulphureus</i>	Flavonoïdes	Fleurs	Poitou-Charantes, France
	Garance	<i>Rubia tinctorum</i>	Quinones (anthraquinones)	Racines	Poitou-Charantes, France
	Sorgho des teinturiers	<i>Sorghum bicolor</i>	Flavonoïdes (anthocyanidines)	Gaines et tiges	Poitou-Charantes, France
	Raisin d'Amérique	<i>Phytolacca americana</i>	Anthocyanes	Baies	Landes, France
	Polygonum	<i>Polygonum</i>	Indigotine et un flavonol	Feuilles fraîches	Inde
	Chlorophylle de luzerne	<i>Chlorophylle</i>	Chlorophylle B	Aériennes	Europe

Un autre test de teinture a été effectué avec les huiles pigmentaires Rain'boil de Biolie®, spécialiste de l'extraction enzymatique. Ces colorants sont issus de coproduits de l'industrie alimentaire française, incorporés dans de l'huile de tournesol désodorisée. Un test a été réalisé afin de voir si les des huiles pigmentaires ont un pouvoir colorant sur le support bois et de les comparer à celui des extraits de plantes tinctoriales. 7 échantillons ont été envoyés par la marque : Jade green (extrait de poivron vert), Rhodonite red (extrait de poivron rouge), Carnelian orange (extrait de carotte), Hydroblue (extrait de spiruline), Heliodor yellow (extrait de curcuma), Amber orange (extrait de tomate) et Emerald green (extrait feuilles de thé vert et menthe).



Figure 146 : Huiles pigmentaires Biolie®

LE SUPPORT BOIS

Les échantillons de teinture ont été réalisés sur bois, plus précisément l'essence de pin maritime. Cette matière première est issue d'un gisement de déchets de l'entreprise Gascogne Bois présente sur le territoire de Nouvelle Aquitaine. Ces chutes ont été redimensionnées (80 x 45 x 10 mm) et poncées pour simuler la dernière étape de fabrication d'un mobilier.

10 échantillons ont été photographiés, recto-verso, puis un relevé chromatique a été effectué numériquement avec l'outil pipette sur le logiciel InDesign afin de réaliser une analyse chromatique du bois de pin maritime. Avec ces teintes prélevées, une cartographie a ensuite été réalisée pour mieux se rendre compte de l'étendue chromatique des échantillons suivant 2 axes (clair/sombre et brun/beige). Une troisième figure a été réalisée pour représenter l'ensemble des teintes prélevées, cette fois ci rangées en piles par « famille » des teintes les plus proches, ordonnées sur l'axe des L* pour mettre en évidence les extrêmes de luminosités relevés sur la sélection d'échantillons. Ces valeurs sont obtenues via le logiciel InDesign, ce sont donc des valeurs numériques, à dissocier des valeurs mesurées par un appareil de mesure sur des échantillons.

3.2.2 PRÉPARATION DES SOLUTIONS

Les décoctions ont été réalisées avec les différents extraits afin obtenir quatre concentrations différentes. L'extraction se fait dans un erlenmeyer avec 50 ml d'eau déminéralisée (type 2) placée sous agitation et portée à ébullition dans un bain marie d'eau à 100°C. Dès que l'eau à l'intérieur de l'erlenmeyer atteint une température de 95°C, l'extrait en poudre est ajouté puis un bouchon en silicone est placé pour éviter l'évaporation. Certains extraits nécessitent une température plus basse pour extraire certaines molécules colorantes particulières. La décoction est maintenue pendant 30 minutes puis transvasée dans des pots permettant leur conservation. Lors de l'incorporation des extraits en poudre dans l'erlenmeyer d'eau bouillante, l'agrégation de la poudre avec la vapeur d'eau est importante. L'agitation est donc indispensable afin d'éviter les pertes de matière.



Figure 147 : Montage utilisé pour les décoctions



Figure 148 : Fond d'extraction de chlorophylle (Léa Diaz)

3.2.3 COMPARAISON DES PROCÉDÉS D'EXTRACTION

Ce travail a été réalisé avec des étudiants pour comparer les performances de l'extraction des tanins de l'extrait de châtaigner et des déchets d'écorces de chêne (issues d'un procédé de tannage du cuir) en réalisant une décoction et une infusion pour 4 concentrations différentes. Les solutions obtenues ont été appliquées sur échantillon de bois et sur papier puis analysées.

3.2.4 APPLICATION

Sur bois :

L'application des teintures a été réallisée sur les échantillons poncés avec un pinceau plat à poils fins sur les 5 faces visibles. Une fois la première couche sèche, une seconde couche a été appliquée sur la moitié de la surface de l'échantillon afin de pouvoir comparer le rendu final. L'application d'une deuxième couche permet de lisser les imperfections et d'intensifier la couleur de la teinte appliquée.

Sur papier :

Une application a également été faite sur une feuille de papier blanc en un seul passage. Deux types d'application sur papier ont été réalisées : une avec la solution décantée en ne prélevant que le surnageant et une autre avec la solution agitée.

Pour les huiles pigmentaires Biolie, 3 couches ont été appliquées sur les échantillons de bois. Les mesures spectrophotométriques ont été réalisées après séchage à l'air libre.

3.2.5 DOSAGE DES PHÉNOLS

Le dosage des phénols a été réalisé selon la méthode Folin-Coicalteu adaptée à la biomasse. Pour cela, 100 mg de poudre ont été ajoutés dans 6 mL d'acétone (70% dans l'eau). Cette solution a été diluée avec un facteur de dilution de 100. Ensuite, 0,5 mL de cette solution a été mélangée avec 2mL du réactif de Folin-Ciocalteu (10% dans l'eau) et 2,5 mL de carbonate de sodium (75 g/L). Puis, l'ensemble des échantillons a été mis au bain-marie pendant cinq minutes à 50°C. Une gamme étalon a été réalisée avec une concentration en acide gallique comprise entre 0 et 100 mg/L. Les solutions ont été par la suite analysées en utilisant un spectrophotomètre UV-Visible. L'absorbance a été lue à 760 nm. La concentration en phénol des solutions a été calculée selon la loi de Beer-Lambert [106]. Puis, la quantité de phénols des échantillons a été calculée selon la formule suivante où C est la concentration totale de phénols obtenue par la courbe de calibration (g/L), D est le degré de dilution, V est le volume de la solution de départ (L) et $m_{\text{sèche}}$ correspond à la masse sèche de la poudre (g) :

$$\% \text{ phénols} = \frac{C \times D \times V}{m_{\text{sèche}}} \times 100$$

3.2.6 DOSAGE DES SUCRES

Le dosage des sucres a été réalisé selon le protocole décrit par Dubois et al. L'extrait en poudre et le dépôt prélevé après centrifugation sont pesés puis séchés à l'étuve à 50°C afin d'éliminer l'humidité. Ensuite 250 mg de poudre ont été mis en solution dans 15 mL d'acétone (70% dans l'eau) et une dilution avec un facteur 166,6 a été réalisée. Puis, 2 mL de solution d'échantillon ont été mélangés avec 0,05 mL de phénol (80%) et 5 mL d'acide sulfurique (95%).

L'ensemble a été laissé reposer 10 min pour ensuite subir une agitation avant d'être placé au bain-marie pendant 15 min à 30°C. Le même protocole a été répété pour faire la gamme étalon de glucose, comprise entre 0 et 200 mg/L. L'ensemble des solutions a ensuite été analysée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible à 488 nm. La concentration en glucose des solutions a été calculée selon la loi de Beer-Lambert [106]. Puis la formule suivante a été utilisée pour déterminer la quantité en sucres des échantillons où C est la concentration totale de phénols obtenue par la courbe de calibration (g/L), D est le degré de dilution, V est le volume de la solution de départ (L) et $m_{\text{sèche}}$ correspond à la masse sèche de la poudre (g) :

$$\% \text{ sucres} = \frac{C \times D \times V}{m_{\text{sèche}}} \times 100$$

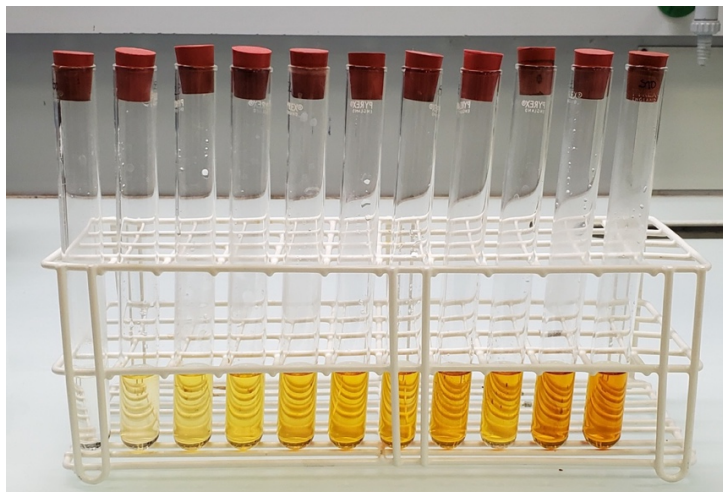


Figure 149 : Gamme étalon du dosage des sucres

3.2.7 NUANÇAGE

Le nuançage, également appelé mordançage post teinture, permet de modifier les teintes de bases obtenues par l'ajout d'un réactif (ou mordant). Voici un exemple de mélange par système pyramidal en utilisant 3 couleurs de base qui permet d'obtenir 12 nouvelles teintes. Cette technique peut se présenter sous différentes formes et avec plusieurs nombres de nouvelles teintes possibles (en carré par exemple). Ce type de technique est très utilisé en peinture, notamment en aquarelle.

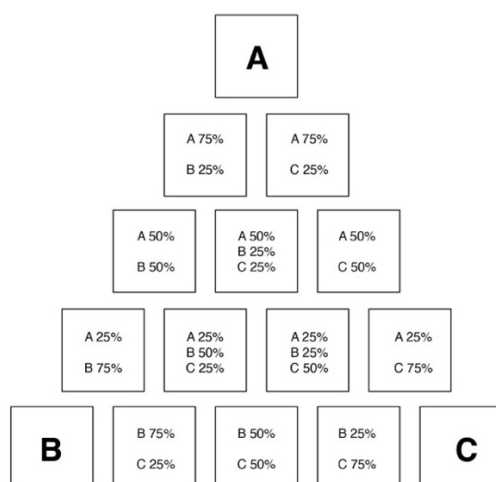


Figure 150 : Système de mélange de couleurs pyramidal

Autre technique très utilisée notamment en peinture, il s'agit d'un tableau de mélange des couleurs les unes avec autres.

Tableau 20 : Système de mélange de couleurs en tableau à double entrée

Concentration X / Concentration X	Teinture 1	Teinture 2	Teinture 3	Teinture 4	Teinture 5	Teinture 6
Teinture 1	1 + 1	1 + 2	1 + 3	1 + 4	1 + 5	1 + 6
Teinture 2	2 + 1	2 + 2	2 + 3	2 + 4	2 + 5	2 + 6
Teinture 3	3 + 1	3 + 2	3 + 3	3 + 4	3 + 5	3 + 6
Teinture 4	4 + 1	4 + 2	4 + 3	4 + 4	4 + 5	4 + 6
Teinture 5	5 + 1	5 + 2	5 + 3	5 + 4	5 + 5	5 + 6
Teinture 6	6 + 1	6 + 2	6 + 3	6 + 4	6 + 5	6 + 6

Comme évoqué dans la partie 3.1.4 « Mordants et mordançage », le nuançage peut également s'effectuer avec l'ajout de réactifs nommés aussi mordants. Lors du workshop mené auprès des étudiants de Master à Montauban en mai 2022, ils ont mesuré le pH des solutions dosées ici à 1% à l'aide de papier pH pour avoir une indication sur les réactions obtenues. Il a été noté :

crème de tartre pH 5, Carbonate de soude pH 10, carbonate de sodium pH 9,5, Alun pH 5, sulfate de cuivre pH 5, sulfate de fer pH 6, acide citrique pH 3. Pour ces essais, seulement les concentrations n°4 ont été mordancées (cf résultats).

3.2.8 VIE EN POT ET DÉCANTATION

Lors de la mise en solution de l'extrait en poudre, cette dernière s'agglomère fortement. La mise sous agitation est indispensable, néanmoins, une légère perte peut être observée (dépôts sur les parois, spatule, ...). Selon l'extrait végétal, le pourcentage de dépôt est plus ou moins grand variant de moins de 1% à 40% pour le solidage par exemple ou encore le châtaignier et la bourdaine qui engendrent également un dépôt important.

Lors de l'extraction des colorants par la société « Couleurs de Plantes », du maltodextrine est ajouté en tant qu'anti-agglomérat pour une meilleure conservation lors du stockage. Cela permet également la standardisation de l'intensité colorante mais cela n'a aucune influence sur la solubilité.

Concernant l'extrait de châtaigner, c'est un bois dans lequel sont présents naturellement des ellagitanins, ce qui est un facteur important dans l'insolubilité et la précipitation des molécules.



Figure 151 : Dépôt insoluble après décoction du Solidage en deux concentrations différentes

Le vieillissement en pot des teintures de châtaigner a été observé en procédant à une application sur papier après 1, 11, 25, 50 et 97 jours pour chacune des quatre concentrations (N°1, 2, 3 et 4) en réalisant trois applications de chaque afin d'obtenir une moyenne des mesures colorimétriques.

Deux types de prélèvement ont été réalisés : une avec la solution décantée en ne prélevant que le surnageant et une seconde avec la solution « re-homogénéisée » par agitation mécanique afin de pouvoir les comparer entre-elles. L'application a été effectuée sur papier Canson 180g/m² et a été réalisée en une seule couche pour observer s'il y avait une modification de la couleur de la solution une fois décantée. La luminosité (L^*) a été mesurée après le séchage.

Après la décoction, les solutions sont ensuite versées dans des tubes à essais fermés pour les laisser décanter. Après sept jours de décantation, le surnageant est transvasé à l'aide d'une pipette dans d'autres tubes à essais et laissé de nouveau décanté afin d'observer si un dépôt se reforme à nouveau. Le dépôt est ensuite mis à sécher dans des coupelles en aluminium.

Les solutions sont laissées reposer quelques minutes puis mises à l'étuve pour calculer la masse sèche récupérée. La mise sous centrifugation à 10 000 tours par minute pendant cinq minutes est réalisée et comparée à la masse obtenue sans centrifugation. L'objectif étant de comparer les couleurs et de connaître l'origine de cette insolubilité.

3.2.9 MESURES DE COULEUR

L'objectif de cette analyse colorimétrique est de montrer que le choix de la concentration, le mélange entre les teintures et que l'ajout de mordant engendrent des changements de couleur. Les mesures de couleurs ont été réalisées avec un spectrocolorimètre portable X-Rite Pantone Ci62. L'appareil a été utilisé avec le réglage du luminant D50/10 (lumière du jour) et SPIN (couleur pure). Les résultats sont donnés en code couleur du système colorimétrique $L^*a^*b^*$. L'espace chromatique $L^*a^*b^*$ CIE, généralement nommé CIELAB, est un espace colorimétrique particulièrement utilisé pour la caractérisation des couleurs de surface. Cet espace chromatique CIELAB est défini à partir de l'espace CIE XYZ. Il présente l'avantage d'une répartition des couleurs plus conforme à la perception des écarts de couleur par le système visuel humain. C'est un espace colorimétrique particulièrement utilisé pour la caractérisation des couleurs de surface.

Pour rappel, trois grandeurs caractérisent les couleurs : la clarté L^* dérive de la luminance de la surface ; les deux paramètres a^* et b^* expriment l'écart de la couleur par rapport à celle d'une surface grise de même clarté. L'axe a^* correspond à l'axe « vert / rouge » et l'axe b^* à celui des « bleu / jaune ». (Cf Introduction, Théorie de la couleur, Systèmes de représentation).

L'illuminant D65 a été utilisé, les illuminants D « daylight » constituent la classe d'illuminants modélisant la lumière du jour de manière plus précise. L'illuminant D65 correspond à une lumière du jour à midi.

3.2.10 VIEILLISSEMENT À LA LUMIÈRE

Au-delà de l'observation des couleurs, il est également important d'observer leur vieillissement à la lumière au cours du temps. Les teintures végétales sont difficilement comparables car plus ou moins solides que les teintures chimiques ou de synthèse. La solidité naturelle de certains colorants les rend résistants à la lumière tandis que d'autres le sont moins et auront également une grande sensibilité au changement de pH. La technique d'extraction du colorant et la méthode de teinture employée peut avoir une incidence sur cette solidité ainsi que la nature des molécules colorantes présentes dans la plante. Les mesures sont effectuées en valeurs $L^*a^*b^*$ données par l'appareil, puis a^* et b^* sont converties en chromaticité nommée C^* pour présenter les résultats.

Les échantillons ont été conservés à l'abri de la lumière dans un premier temps, pendant 220 jours, pour observer si la couleur appliquée au matériau bois pouvait être altérée. Puis dans un second temps les échantillons ont été exposés à la lumière du jour indirectement, en intérieur pendant 205 jours. 5 mesures de couleur ont été réalisées sur la partie présentant 2 couches afin d'obtenir une valeur moyenne suivant chaque axe chromatique et en évaluer l'écart type. Pour une meilleure représentation des résultats, le paramètre de la luminosité (L^*) a été sélectionné, afin de caractériser la luminance des surfaces testées.

La solidité des couleurs est un critère important, on distingue la solidité au frottement et la solidité à la lumière. Ici c'est la résistance à la lumière qui sera testée. Cela consiste à évaluer la capacité de la teinture à résister aux effets de la lumière (artificielle ou naturelle).

Pour mesurer la solidité des couleurs il existe un système de notation par comparaison dans l'industrie du textile pour déterminer les changements de couleurs selon la norme ISO 105-A02 [153] appelée l'échelle des gris. Selon la qualité de la teinture, elle s'éclaircit plus ou moins pendant la période exposée. La différence de couleur par rapport à celle d'origine est mesurée par cette échelle des gris qui comporte 9 niveaux allant de 1 à 5, demi par demi (1, 1,5, 2, 2,5 etc.). 5 étant le meilleur résultat, à ce niveau, aucun changement n'est visible à l'œil nu comparé à l'échantillon d'origine.

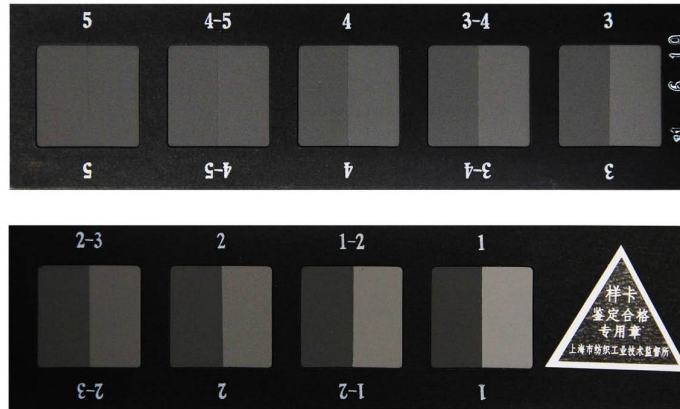


Figure 152 : Echelle des gris

Les échantillons ont été exposés aux lampes xénon dans un appareil de paillasse ci-dessous nommé « suntest » de la marque Atlas pour une simulation haut de gamme du rayonnement solaire selon la référence CIE85 1 lampe au xénon de 1500 W refroidie à l'air.[154] La zone d'exposition de cet appareil est de 28 x 20 cm (560 cm²) et seulement 2 passages ont pu être réalisés donc seulement 24 échantillons ont pu être testés. Les échantillons de bois sont recouverts d'une feuille de papier blanc 80 g/m² sur la moitié dans le sens de la longueur puis exposés à un cycle de 48 heures à 50°C et 550 W/m² d'après la norme ISO 105 B02 [155], et avec un filtre verre pour simuler un vieillissement intérieur avec une exposition au travers d'une fenêtre.



Figure 153 : Suntest Atlas utilisé pour le vieillissement accéléré à la lumière

3.2.11 ESSAIS SUR PANNEAUX DE CUIR

Lors du workshop effectué auprès des étudiants de Master Design Couleur à l'ISCID de Montauban, une expérimentation de teinture sur panneaux de cuir a été réalisée. C'est sur des échantillons de cuir rigide qu'il a été choisi d'appliquer des teintes car les autres panneaux étaient réalisés à partir de cuirs déjà colorés. Ils étaient donc moins appropriés pour recevoir une coloration. Les panneaux rigides utilisés sont fabriqués à partir de cuir dans des teintes de marrons, issu de sellerie équestre comme expliqué dans le chapitre 1. Des tests de teinture dans la masse n'ont pas pu être réalisés, c'est donc une application au pinceau, comme sur le bois, qui a été opérée sur les panneaux une fois secs en utilisant toujours les 4 concentrations des teintes.

3.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.3.1 ANALYSE CHROMATIQUE DU PIN MARITIME

La figure ci-dessous présente les 10 échantillons photographiés avec leur palette proportionnelle représentée à côté de chacun. Ce premier relevé permet d'observer la variabilité des teintes de cette essence de bois, qui influenceront donc les résultats des teintures appliquées par-dessus.

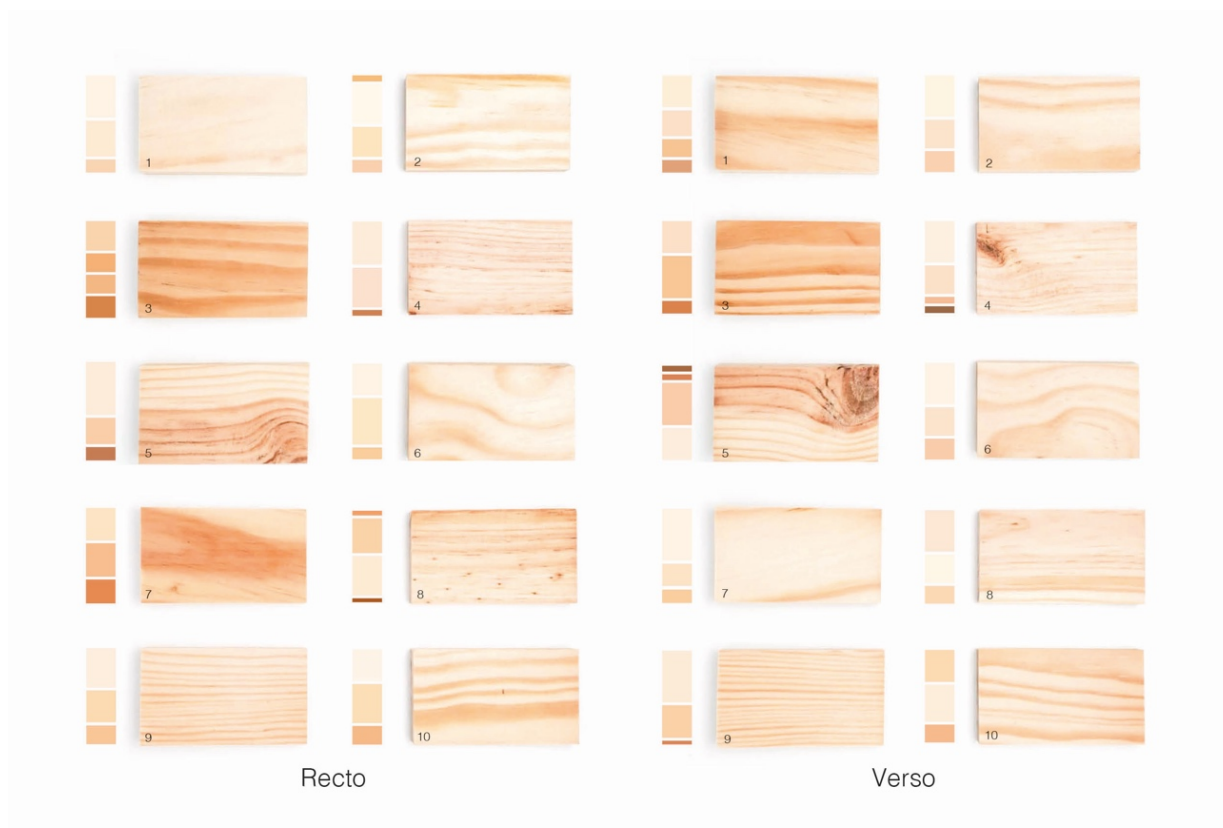


Figure 154 : Analyse chromatique du bois de pin maritime

Une cartographie des différentes teintes prélevées permet de se rendre compte de l'étendu chromatique du bois de pin maritime (Figure 154). La taille des carrés a été représentée de manière proportionnelle par rapport au lot des échantillons observés. Les teintes foncées restent minoritaires sur l'ensemble, mais comme on peut le constater sur la figure 153, elles peuvent être fortement présentes sur un même échantillon.

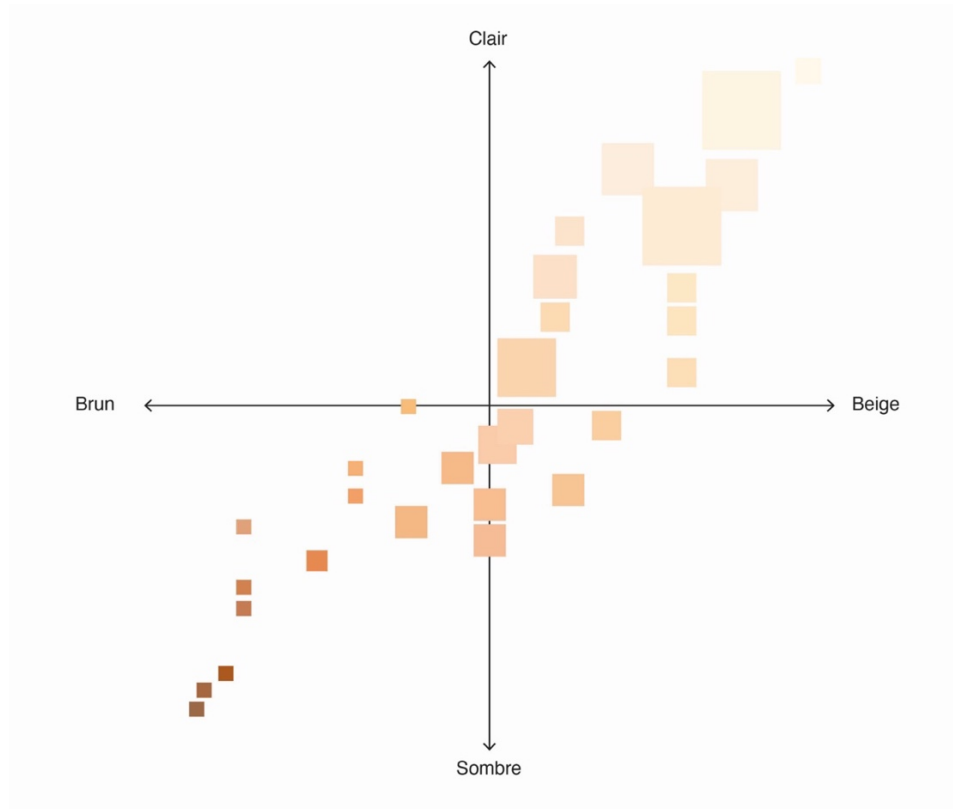


Figure 155 : Cartographie des couleurs du bois de pin maritime

Une troisième figure présente l'amplitude de la variation de la luminosité des teintes relevées (Figure 155). Les mesures restent numériques, et donc différentes d'une mesure au spectrophotomètre, mais permettent un premier état des lieux. Les teintes de la figure 153 ont été regroupées et placées en ligne, classées par groupe de teintes les plus proches. La luminosité varie de $L^* = 98$ jusqu'à $L^* = 47$ (valeurs numériques), ce qui confirme que le bois de pin maritime peut être très contrasté.

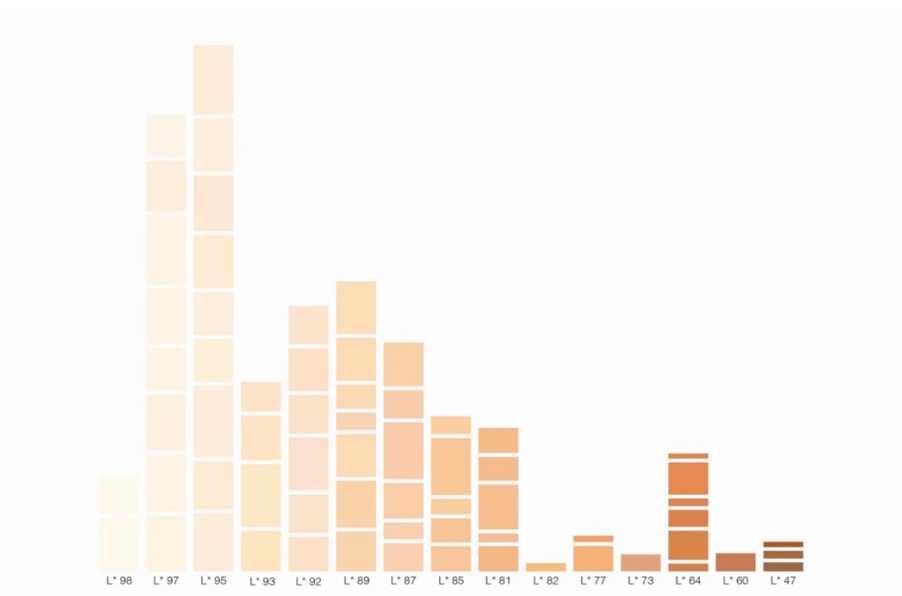


Figure 156 : Analyse chromatique de la luminosité du bois de pin maritime

3.3.2 INFLUENCE DU PROCÉDÉ D'EXTRACTION

Une application sur papier a été réalisée en complément d'une application sur échantillons de bois de pin maritime. Au vu des résultats ci-dessous, aucune mesure colorimétrique n'a été effectuée pour les deux premières concentrations. Une simple observation à l'œil nu suffit pour constater que ce procédé d'extraction pour extraire les molécules colorantes des écorces n'a pas fonctionné.

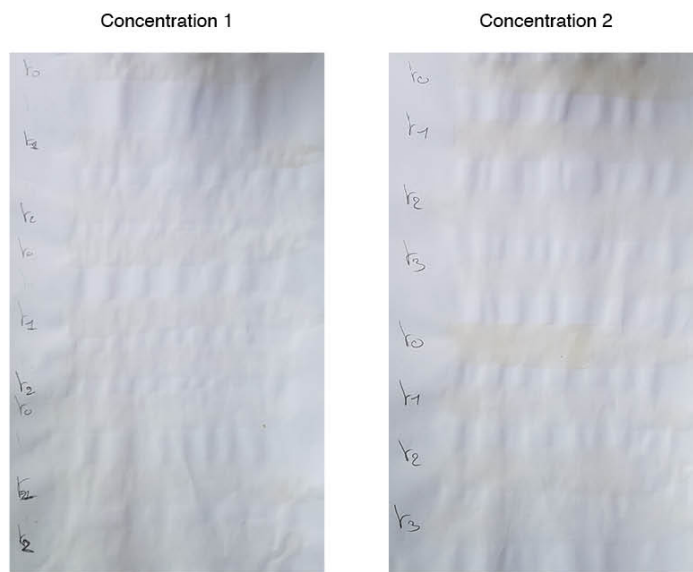


Figure 157 : Application sur papier des solutions d'infusion d'écorces de chêne

Les mesures de colorimétrie ont été réalisées sur les deux autres concentrations les plus élevées.

Mais comme le montre le graphique ci-dessous les teintes restent très claires. Cela explique pourquoi cette méthode d'extraction n'a pas été utilisée pour les autres extraits et pourquoi en teinture végétale on parle essentiellement de la méthode de décoction plutôt que de l'infusion.

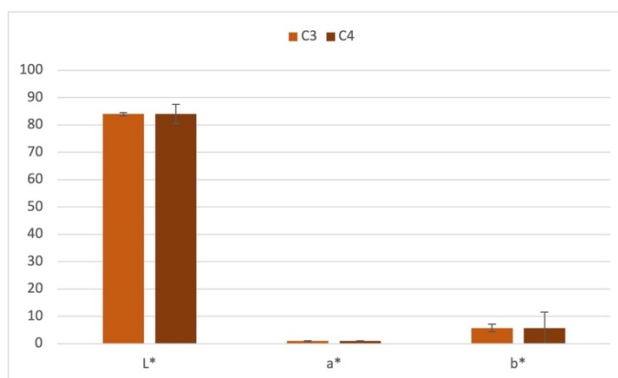


Figure 158 : Mesures colorimétriques de deux concentrations de l'infusion des écorces de chêne

3.3.3 INFLUENCE DES EXTRAITS VÉGÉTAUX

Un premier nuancier a été réalisé dans des teintes de bois naturelles afin d'imaginer une première diversification du choix proposé au client pour les produits commercialisés par Api'Up. Le pin maritime faisant partie des bois clairs, il était important de pouvoir proposer des variantes de teintes plus sombres, se rapprochant de la couleur naturelle d'autres essences de bois telles que le chêne ou le noyer par exemple.



Figure 159 : Exemples de couleurs d'essences de bois naturelles



Figure 160 : Nuancier des premiers essais de teinture et les teintes retenues par Api'Up

Ce premier nuancier a permis à l'entreprise et au studio de design « La Racine » de choisir deux teintes pour faire des essais sur la production de leur mobilier avant de continuer les tests sur la diversification chromatique.

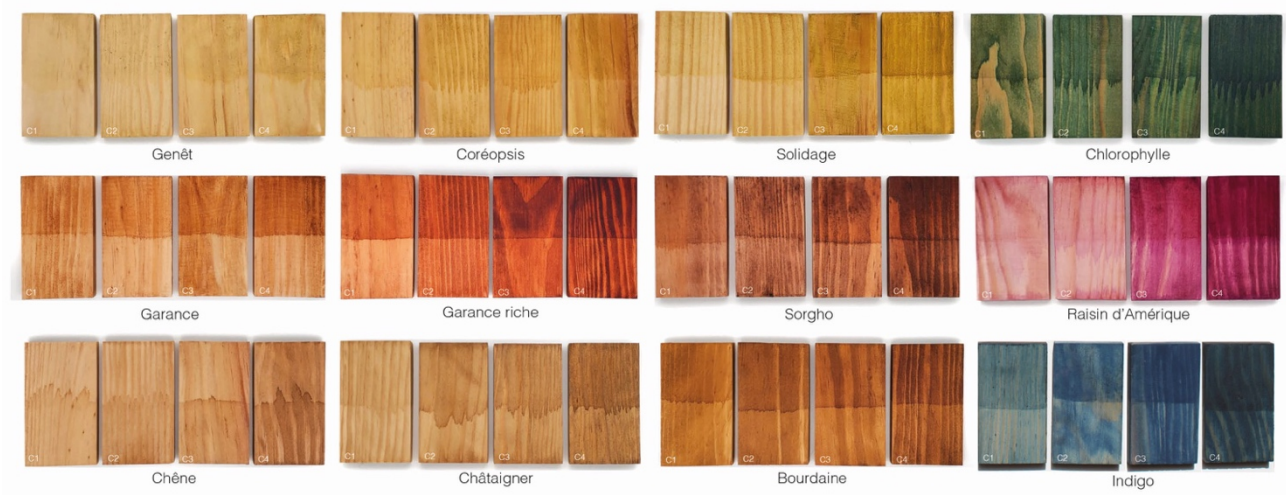


Figure 161 : Nuancier des différents extraits végétaux utilisés

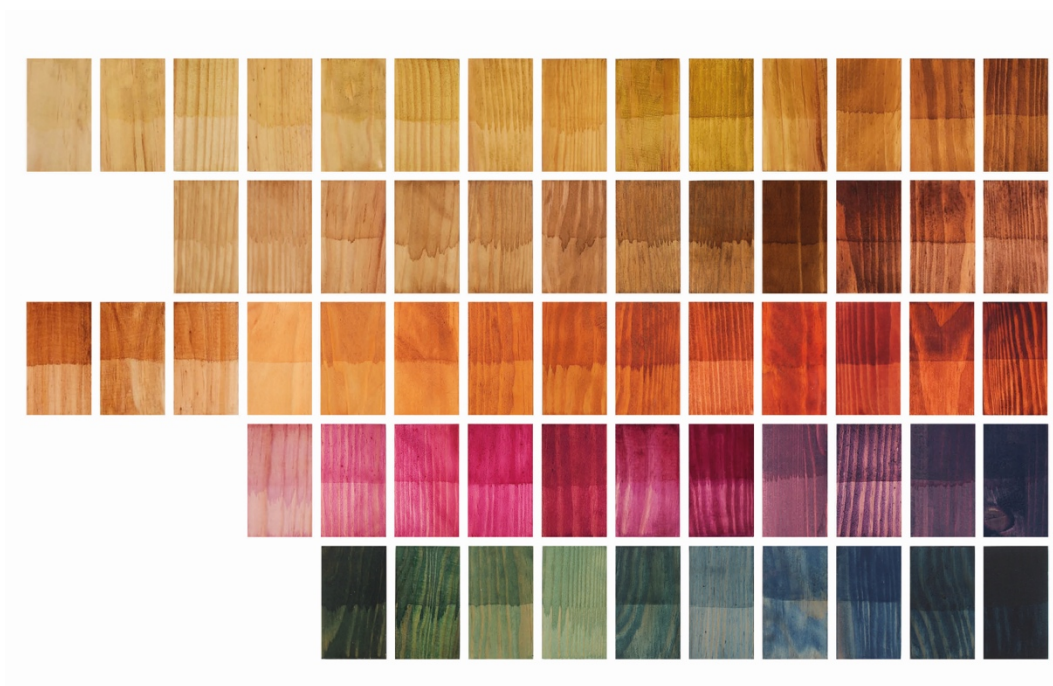


Figure 162 : Nuancier global des teintes obtenues à partir des différents colorants végétaux

Ci-dessous les résultats d'application des huiles pigmentaires Biolie. 3 couches ont été appliquées afin d'obtenir un résultat visible.

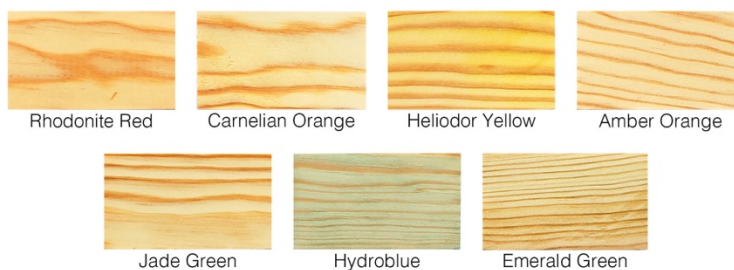


Figure 163 : Échantillons des essais de l'huile pigmentaire Biolie®

Une différence se distingue comparativement aux couleurs du pin maritime brut, cependant les échantillons ne reflètent pas les couleurs des huiles dans les flacons. Seule la teinte bleue se démarque des autres qui donnent une couleur très jaune au bois. La teinte Heliodor yellow se démarque également en donnant un résultat plus jaune orangé. Le graphique de la figure 162 présente la différence de couleur par les coordonnées $L^*a^*b^*$ entre un échantillon de pin maritime brut et les échantillons traités avec les huiles pigmentaires. Les mesures colorimétriques présentées dans ce graphique confirment donc cette appréciation visuelle.

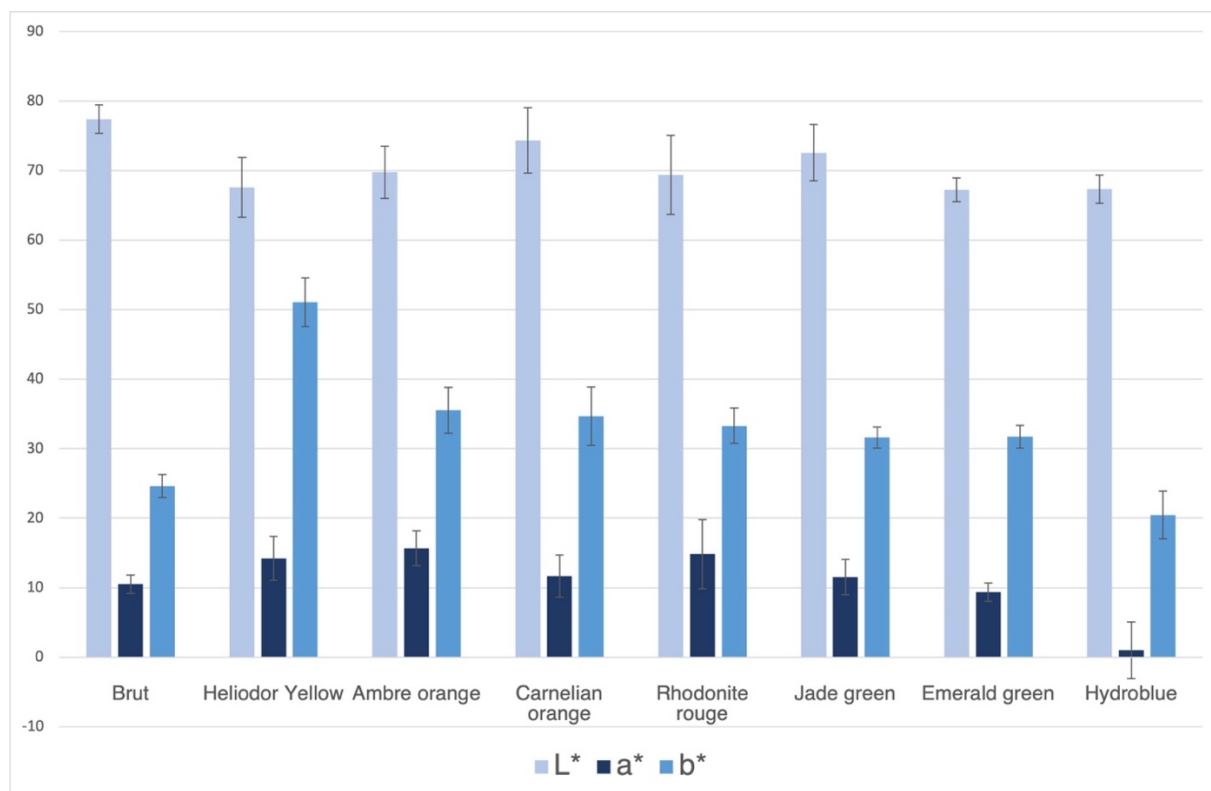


Figure 164 : Colorimétrie des échantillons de bois teinté avec les huiles pigmentaires Biolie®

3.3.4 INFLUENCE DE L'APPLICATION

Une différence de résultat entre l'application d'une couche et de deux couches a été observée. Les images des échantillons ci-dessous montrent l'intensification de la couleur avec l'application d'une seconde couche de teinture.

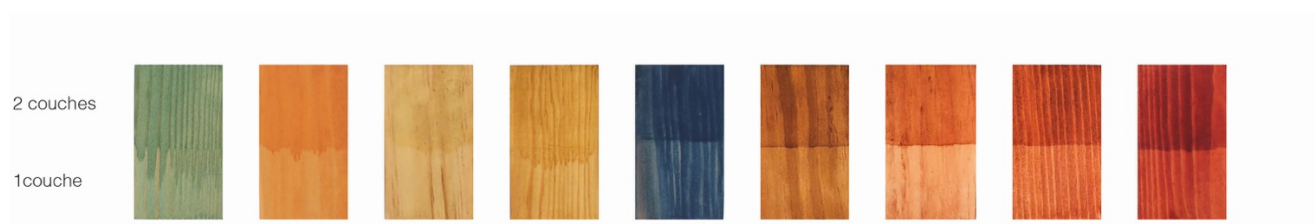


Figure 165 : Exemples d'échantillons pour observation de l'influence de la 2ème couche de teinture

3.3.5 INFLUENCE DE LA DÉCANTATION

Quelle que soit la concentration, les extraits ne sont pas totalement solubles et un dépôt plus ou moins important a été observé dans les solutions. Après décantation, le surnageant est resté bien coloré malgré le dépôt et l'intensité de la coloration reste proportionnelle à la concentration des solutions. L'application sur papier a permis d'observer un premier résultat qui montre que les solutions décantées ont une coloration proche de la solution après agitation. Cette dernière est très légèrement plus foncée, comme l'indiquent les résultats sur le graphique si dessous d'après les mesures colorimétriques.

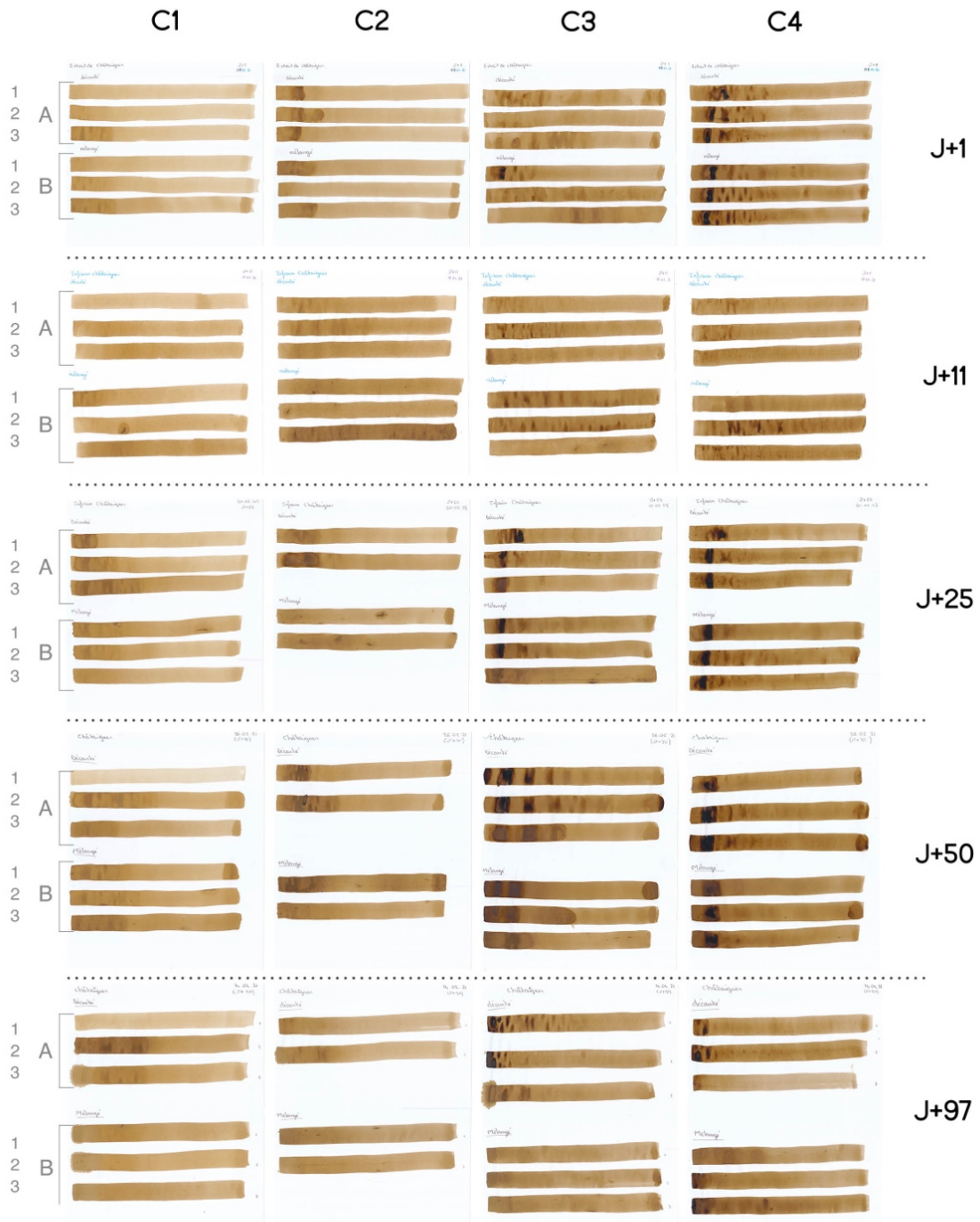


Figure 166 : Comparaison de 4 concentrations de teinture de châtaigner décantées (A) ou mélangées (B) avec 3 applications pendant 97 jours

Cette expérience a permis d'observer la stabilité dans le temps de la couleur des solutions appliquées sur du papier. Les courbes ci-dessous montrent que la coloration des solutions reste stable sur 97 jours. Une moyenne des 3 applications par échantillon a été calculée.

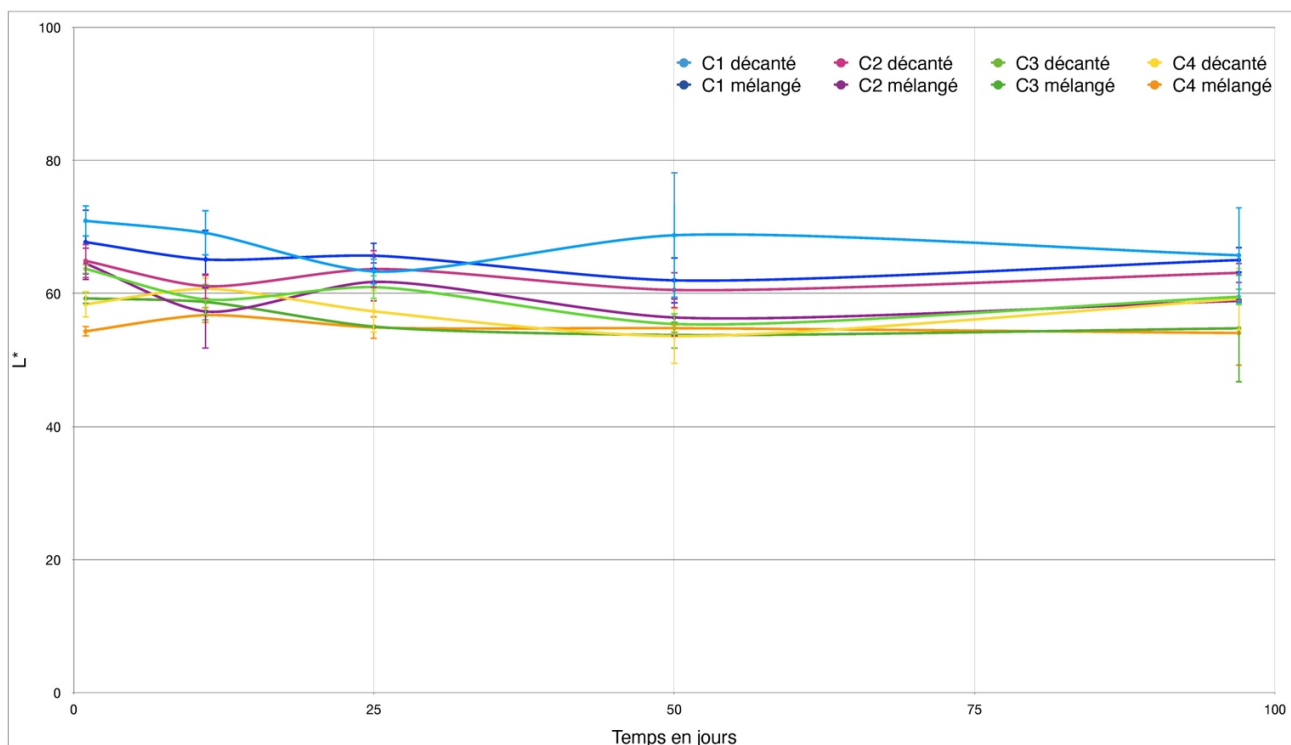


Figure 167 : Evolution de la luminosité des teintures de châtaigner en fonction du temps

La décantation a été observée plus précisément en mesurant la quantité de dépôt. Après seulement 5 jours, la présence de moisissures a été détectée dans les tubes à essais. Cependant elles ne sont que peu ou pas présentes dans le tube présentant la plus forte concentration. Les manipulations sont probablement la source de cette contamination. Malgré son élimination, lors de nouvelles décantations, l'apparition de moisissures continue après quelques jours. Comme le montre le tableau 21, une forte quantité de dépôt est visible. Même après prélèvement du surnageant, une décantation continue de se produire pendant 10 jours, après cette durée aucun dépôt n'a été observé. Il s'agit potentiellement d'une précipitation/complexation de certaines molécules, car la masse initiale est inférieure à la masse du dépôt.

Cette masse n'est pas proportionnelle à la concentration. Comme mentionné dans le bulletin d'analyse de Couleurs de Plantes (Annexe n°4), la solubilité est conforme mais l'insolubilité est notée 0,5%. Ce qui explique la présence naturelle d'une décantation par la présence de molécules insolubles présentes dans l'écorce de châtaigner.

Tableau 21 : Tableau des masses de dépôts des teintures de châtaigner

	C 1	C 2	C 3	C 4
Poudre (g)	0.5	1	1.5	2
Tubes (g)	0.52	0.65	0.81	1.27
Erlenmeyers (g)	0.15	0.44	0.99	1.26

Cette manipulation démontre que la quantité de dépôt reste relativement importante due au fait que la solubilité de l'extrait n'est pas totale. Une modification par l'ajout de solvants est envisageable pour remédier à cette décantation. Il est également possible de prévoir une décantation mécanique par centrifugation pour une meilleure précision. Une manipulation sous hotte pourrait minimiser les contaminations afin de mettre en évidence si elles proviennent directement des extraits en poudre car il est noté : « germes = <100 et moisissures <10 » sur la fiche produit.

Lors de la préparation des dosages, une décantation a été observée. Le calcul de masse de celles-ci a été effectué. Ainsi pour 0,5 grammes incorporés pour la concentration n°2, 0.37 g et 0.39 g sont retrouvés. Cette décantation a été réalisée sur 2 jours. Le taux de solubilité s'élève à 22% pour l'extrait de bourdaine et 26% pour l'extrait de châtaigner, ce qui démontre que ces poudres contiennent un grand nombre de substances insolubles.

La décantation est continue malgré le retrait du dépôt. Ces manipulations n'ont pas été réalisées dans une atmosphère stérile, ce qui a sans doute pu augmenter la prolifération de pathogènes. Le prélèvement de décantation impacte significativement la couleur. Dans le cas où le dépôt n'est pas prélevé et qu'une simple filtration est effectuée, la couleur n'est pas impactée (malgré la présence d'un faible dépôt). Les tests ont été réalisés uniquement sur l'extrait de bourdaine ayant le plus fort taux d'insolubilité (2,6%). Ainsi, certains agents colorants restent en suspension tandis que d'autres se complexent ou décantent.

La perception de la couleur avant et après la dernière décantation est mesurée. Un dépôt est encore visible. Les mesures sont faites après décantation et après remise en suspension du dépôt par agitation. Le graphique de la figure 166 montre que le dépôt impacte significativement la couleur. Néanmoins, si la teinture est mélangée, la couleur reste relativement proche de celle d'origine.

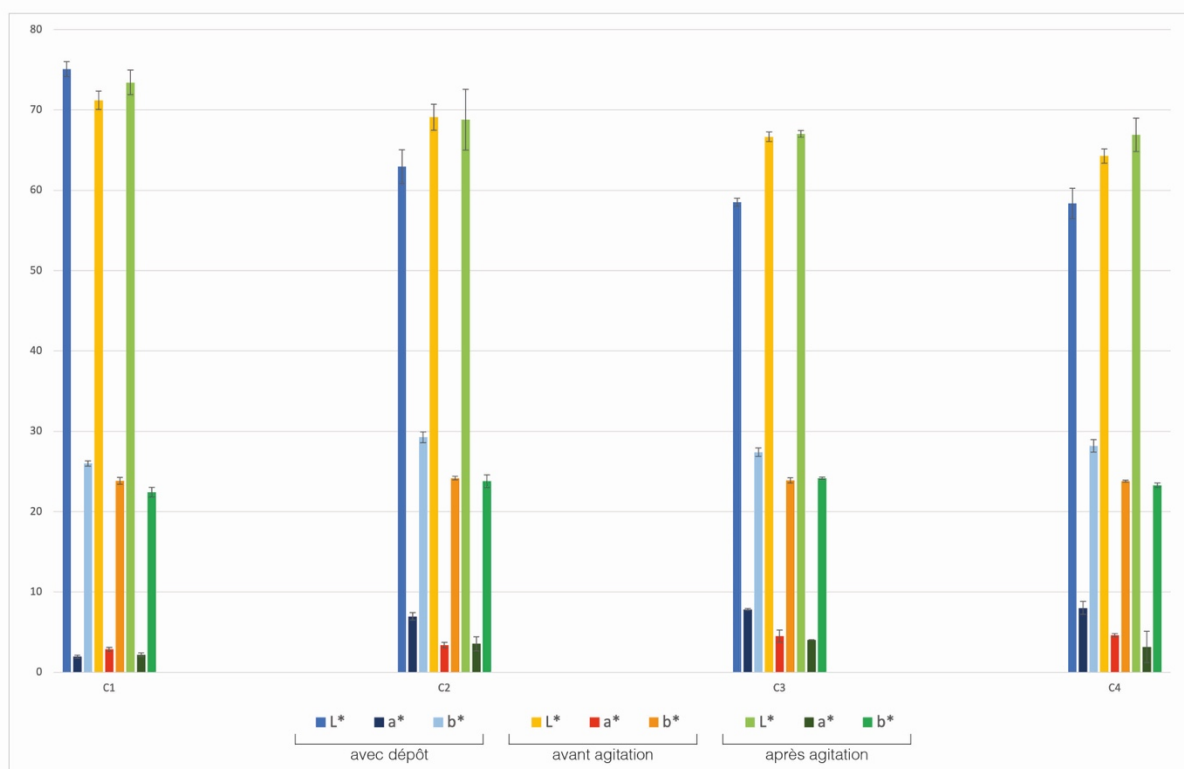


Figure 168 : Mesures colorimétriques après un mois de décantation et après élimination du dépôt, avec et sans agitation

Sur les 4 extraits présentés (figure 168), seul le sorgho a présenté les différences de couleur les plus élevées avant et après agitation. De toute évidence il sera préférable d'agiter les solutions avant utilisation même si la partie soluble dans l'eau des extraits apporte une coloration a priori suffisante. Le dépôt semble donc peu responsable de la teinte. Il pourra être retiré si nécessaire par filtration, centrifugation ou décantation lors de la phase d'industrialisation.

L'observation visuelle des échantillons a mis en évidence une différence de teinte entre les veines tendres (bois de printemps) et les veines dures (bois d'été). Cette disparité chromatique explique les écarts types mesurés représentés sur le graphique ci-dessous.

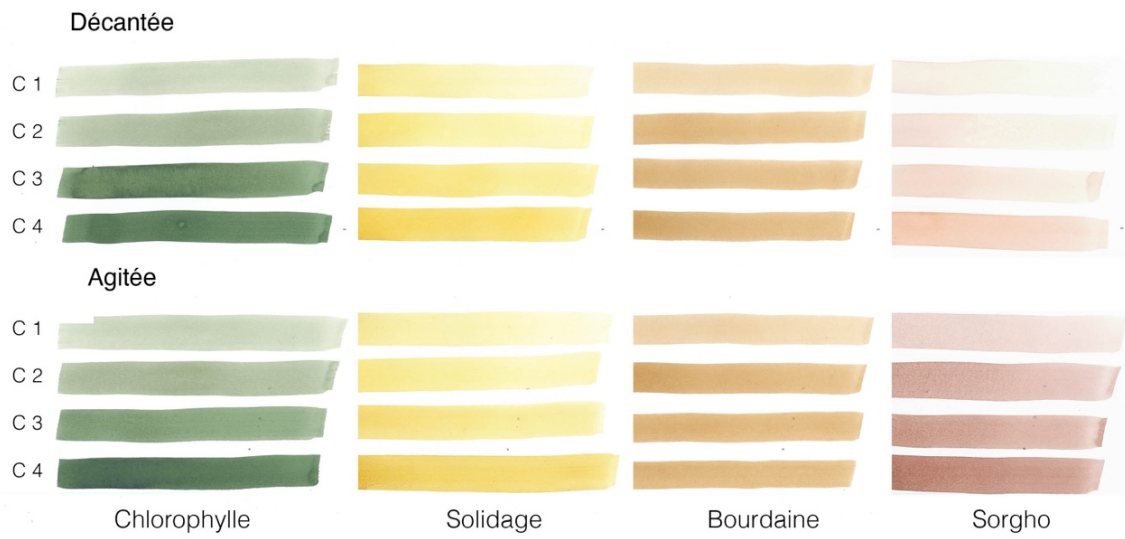


Figure 169 : Application sur papier des solutions après décantation et après agitation

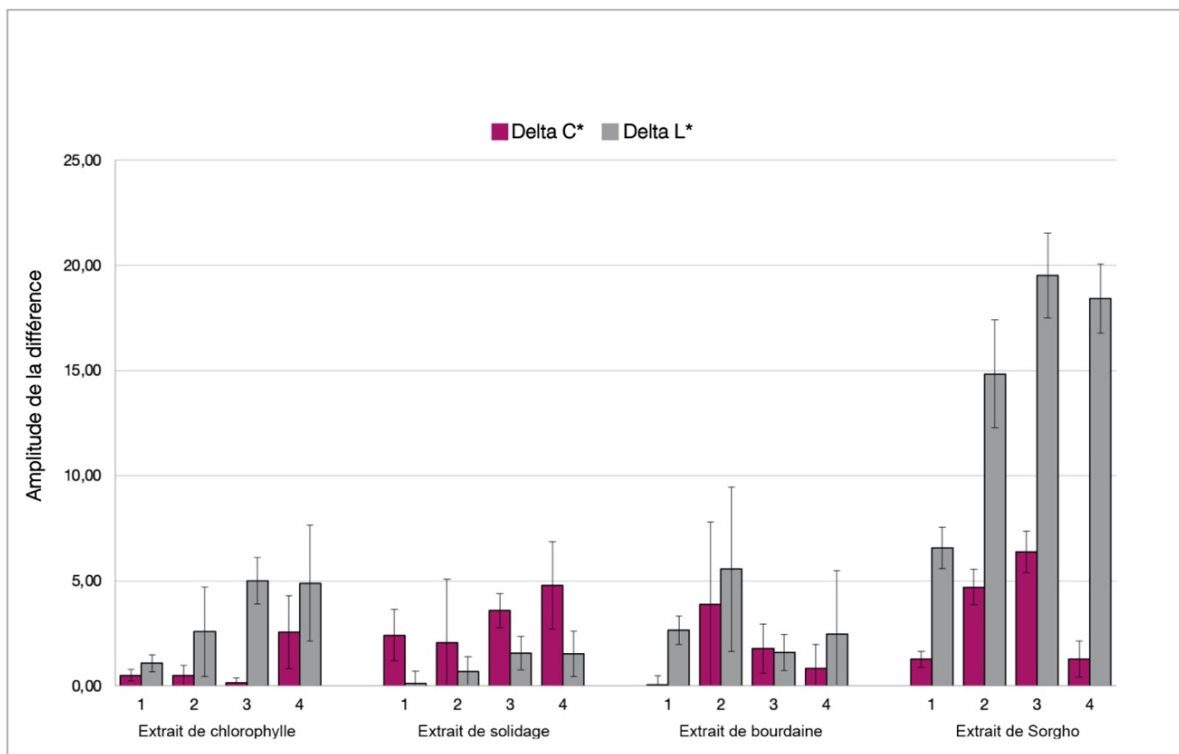


Figure 170 : Différence de chromaticité et luminosité pour un même échantillon décanté et mélangé

3.3.6 INFLUENCE DES SUCRES

Le dosage est réalisé afin de déterminer la forte présence ou non des sucres dans les extraits en poudre de Couleur de plantes® ainsi que sur le dépôt après décoction. Le but étant de connaître la concentration totale des sucres afin d'analyser sa relation avec la viscosité et l'agglomération des extraits végétaux. La loi de Beer-Lambert met en correspondance l'absorbance et la concentration. Ainsi, les résultats présents sur la Figure 169 montrent une forte quantité de sucres dans les extraits de châtaigner et bourdaine testés ici.

Lors de la mise en solution des poudres, celle du châtaignier a réagi avec les solvants. En effet, à la surface des précipités jaune-ocre se sont formés. Après agitation, ces derniers ont disparu.

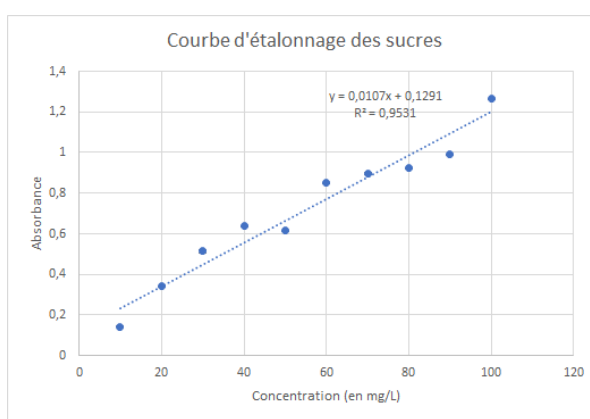


Figure 171 : Courbe d'étalonnage du dosage des sucres

Comme le montre la courbe d'étalonnage dans la figure ci-dessus, les deux essences présentent une très forte teneur en sucres comprise entre 53 et 46%. Néanmoins, l'extrait de châtaignier présente 1,5 fois moins de sucres. La quantité de phénols reste, entre les deux types de poudres de bourdaine, encore très proche. Contrairement au châtaignier qui possède un facteur 1,4. Les résultats des pourcentages des sucres et des phénols contenus dans les poudres sont donnés dans le Tableau ci-dessous.

Tableau 22 : Pourcentage des sucres et des phénols dans les extraits de bourdaine et de châtaigner

	Teinture Bourdaine initiale	Teinture Bourdaine décantée	Teinture Châtaigner initiale	Teinture Châtaigner décantée
Sucres	53,41 %	53,78 %	33,69 %	46,81 %

La forte concentration de sucres peut être influencée par l'ajout de maltodextrine pour un meilleur stockage. La maltodextrine permet d'avoir une action d'anti-agglomérat sans aucune influence sur la solubilité. Entre les deux essences comparées, une forte quantité de phénols est observée avec un facteur d'environ quatre. Cette différence peut également être due à l'origine de la poudre. A noter que, selon les fiches descriptives de l'entreprise (Annexe 4), une quantité de cuivre est présente également dans les deux essences. La complexation de ce métal pourrait augmenter la réactivité des phénols. De plus, le kaempférol réagit fortement avec le cuivre. [156]

La bourdaine est riche en dérivés anthracéniques qui sont des molécules aromatiques polycycliques. Ceci alors que les extraits de châtaigniers sont composés de tanins hydrolysables composés de molécules d'acides gallique et ellagiques fixés sur une molécule de glucose. [157-158] La bourdaine ne diffère que très marginalement pour les phénols ou les sucres entre les deux sortes de poudres. Contrairement au châtaignier qui a une augmentation de la quantité de sucres dans le dépôt. Cela indique qu'il existe une précipitation des sucres. Cette précipitation peut être liée à la composition chimique des ellagitanins qui contiennent un sucre dans leur structure moléculaire. De plus, une diminution de la concentration des phénols de la poudre de châtaignier est observée. Cela peut être dû à leur transformation liée à des mécanismes d'oxydation/polymérisation bien connus chez les phénols. [159]

Malgré le fait que le cuivre est susceptible d'augmenter les interactions avec les phénols, la poudre de châtaignier ne permet pas de confirmer cette hypothèse. L'absence de kaempférol chez la bourdaine et la forte teneur en cuivre va de ce sens. Le châtaignier n'a pas une accentuation de phénols. Le kaempférol est potentiellement sensible à la chaleur causant sa dégradation. En effet, au-delà de 85 °C de nombreuses molécules se dégradent notamment les tanins hydrolysables qui sont thermo labiles et qui peuvent être hydrolysés à la chaleur en composés colorés et de poids moléculaire élevé [159]

3.3.7 INFLUENCE DES PHÉNOLS

La forte quantité de phénol contenue dans la poudre de châtaignier, est un indicateur d'inhibition de la croissance des champignons. Si les propriétés biocides des tanins sont bien connues au regard de leur intervention dans les mécanismes de défense des arbres contre les agressions extérieures, les travaux menés sur les tanins du bois chêne qui sont de la même famille que les tanins de châtaignier, ont montré la relation directe entre concentration en tanins et la résistance aux champignons lignivores de référence. [160]

A l'inverse, la forte teneur en sucres dans la bourdaine peut expliquer l'augmentation de la croissance pour le champignon « *Trametes versicolor* ». Il serait important de quantifier la maltodextrine. Ce dernier est ajouté en tant que support de séchage et influe possiblement sur la vraie teneur en sucres de la poudre. Les carences ou les excès de métaux lourds peuvent influencer fortement la croissance des végétaux. En effet, la forte teneur en zinc peut entrer en compétition avec le cuivre. De nombreux mécanismes physiologiques des végétaux sont dépendants de métaux tels que la photosynthèse et le métabolisme des glucides. Ces deux oligoéléments peuvent également jouer un rôle dans la couleur de certains tissus végétaux. [161–162] De nombreuses études ont montré la grande variabilité des extractibles. [163] Selon les essences et la partie du bois étudiée, cette teneur est hétérogène. Dans ce cas, les extractibles du bois de châtaignier semblent présents en plus grande quantité que ceux de l'écorce de bourdaine.

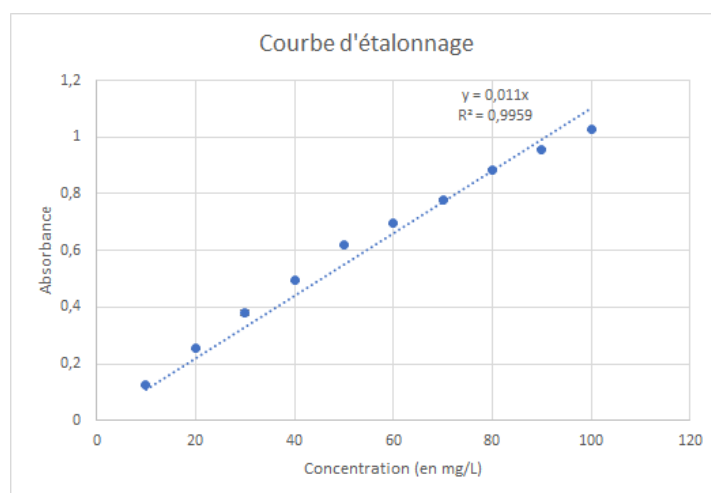


Figure 172 : courbe d'étalonnage du dosage des phénols totaux

La figure ci-dessus montre la courbe d'étalonnage obtenue. Les concentrations de phénols totaux en pourcentage par rapport à la matière sèche sont les suivants :

Tableau 23 : Pourcentage des phénols totaux obtenus

	Teinture Bourdaine initiale	Teinture Bourdaine décantée	Teinture Châtaignier initiale	Teinture Châtaignier décantée
Phénols	17,24 %	15,12 %	67,39 %	48,91 %

Comme le montre le tableau ci-dessus, le châtaignier possède une plus grande quantité de groupements phénoliques. [164] A noter qu'il existe une différence entre les poudres initialement vendues et la décantation. Ainsi, il existe une complexation entre molécules une fois en solution et

en présence de chaleur. De plus, la poudre de châtaignier possède, normalement, du kaempférol, ce dernier étant très réactif avec le cuivre. En effet, le kaempférol, présent dans le châtaignier, réagit avec la teneur en cuivre. Cette différence peut également être due à l'origine des poudres. La fixation du cuivre sur le bois a été étudiée par de nombreux auteurs. Il a été observé notamment que le cuivre pouvait se fixer sur les groupes carboxyles et hydroxyle phénoliques des polyphénols et des hémicelluloses.[165-166]

3.3.8 INFLUENCE DU NUANÇAGE

Les résultats du nuancement réalisé par système pyramidal avec 3 teintes de bases mélangées proportionnellement les unes aux autres ont permis la création de nouvelles teintes et d'analyser leurs facilités de mélange entre elles. Dans ce cas précis seules trois « pyramides » ont été réalisées, avec 6 teintes de bases afin de créer 36 nouvelles nuances.

Voici les teintures utilisées en bases :

- Pyramide n°1 : A = Coréopsis C4 ; B = Brou de noix C1 ; C = sorgho C3
- Pyramide n°2 : A = Indigo C4 ; B = Chlorophylle C3 ; C = Garance C2
- Pyramide n°3 : A = Coréopsis C2 ; B = Raisin d'Amérique pur ; C = Indigo C2

Ces choix ont été réalisés avec les étudiantes afin que ce travail puisse rentrer dans le cadre de leurs recherches chromatiques pour leurs sujets de Master. Il a été choisi l'option pyramidal mais cette technique de mélange peut également se faire en carré avec 4 teintes de bases. La répartition des concentrations peut varier en fonction du nombre total d'échantillons souhaités. Exceptionnellement, l'application a été effectuée sur des échantillons de sapin et non de pin maritime mais ce sont tous deux des résineux de bois clairs, ce qui rend la différence mineure.

Il a été observé que la teinture de brou de noix n'était pas été assez concentrée et qu'elle n'a donc pas eu un impact majeur sur les mélanges avec le coréopsis et le sorgho dans la pyramide n°1. Dans la deuxième pyramide c'est la chlorophylle qui a pris le dessus sur l'indigo et la garance, il aurait fallu utiliser une solution légèrement moins concentrée. La pyramide n°3 est plutôt bien équilibrée même si l'indigo a pris un peu le pas sur le coréopsis. Il serait plus pertinent d'utiliser la concentration en dessous (C1) afin de créer plus de nuances de mélanges entre la teinte jaune et la teinte bleue et d'obtenir différents verts.

Ces résultats sont donc très intéressants d'un point de vue chromatique et très utiles pour le travail de création de gammes par exemple.

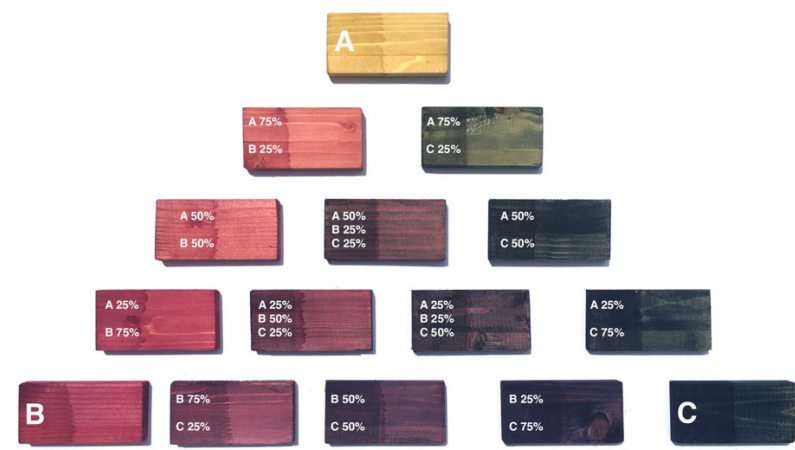
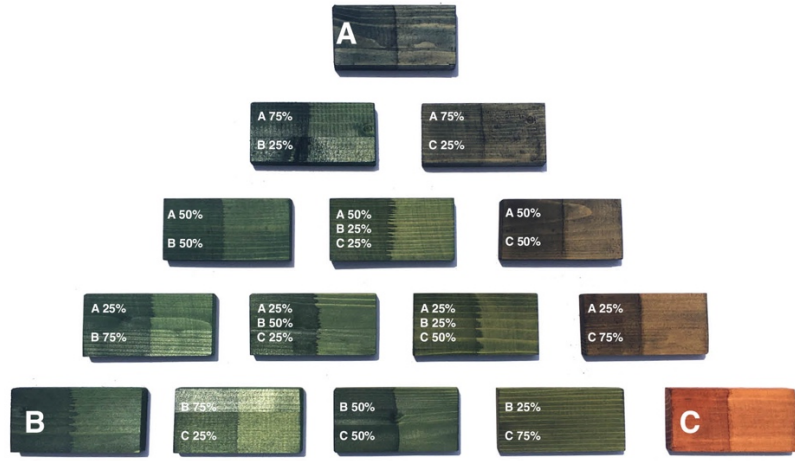
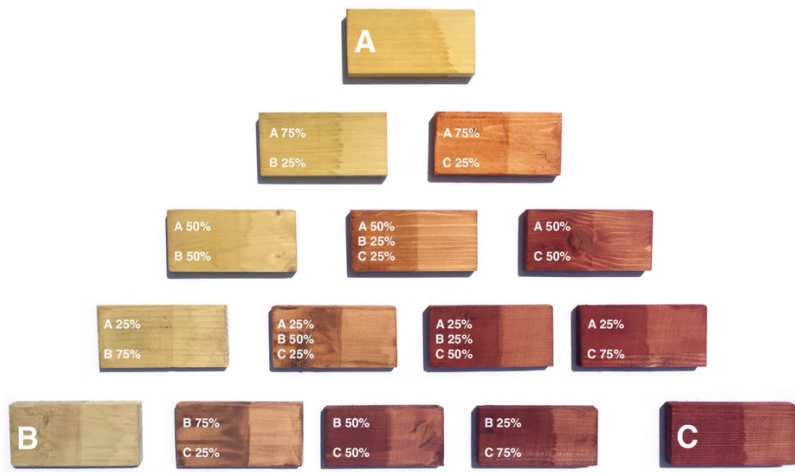


Figure 173 : Nuançages réalisés par système pyramidal (pyramide 1, 2 et 3)

C 4	Alun	Sulfate de fer	Carbonate de soude	Sulfate de cuivre	Acide citrique	Carbonate de sodium	Chaux	
								Brou de noix Pâche - Couleur Garance
								Camomille Broyé - Couleur Garance
								Chataigniers Extrait - Couleur Garance
								Chlorophylle Extrait - Couleur Garance
								Coreopsis Extrait - Couleurs de plantes
								Garance Standard Extrait - Couleur Garance
								Indigo Tropical Pigment - Couleurs de plantes
								Rainis d'Amérique Baies - Sauvages
								Réséda Extrait - Couleurs de plantes
								Réséda Broyé - Couleurs Garance
								Sorgho Extrait - Couleurs de plantes
								Tanaisie Broyé - Alysse Créations

Figure 174 : Planche de nuançage des teintures avec réactifs sur papier

3.3.9 INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT LUMIÈRE

VIEILLISSEMENT NATUREL

Un premier vieillissement naturel en intérieur a été réalisé. Les 4 concentrations ayant des résultats similaires, seules les concentrations les plus élevées (C4) sont présentées ici.

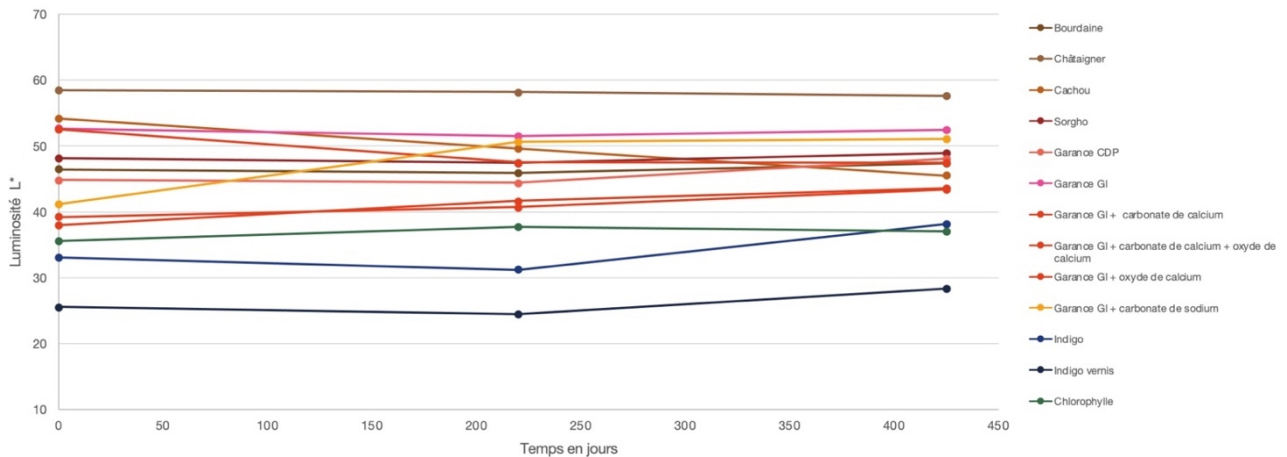


Figure 175 : Vieillissement à la lumière naturelle en intérieur des échantillons de concentration n°4

Globalement, les couleurs de l'ensemble des échantillons sont restées stables après 425 jours, même si 3 échantillons se démarquent : La garance Gi Ph+ s'est nettement éclaircie durant la première période puis elle s'est stabilisée, tandis que les deux échantillons d'indigo se sont légèrement éclaircis durant la deuxième période, au contraire de l'extrait de cachou qui lui est devenu plus foncé au fil du temps. Les prélèvements ont permis d'observer l'état de conservation des échantillons de bois teinté au cours du temps (figure 173). Ces premiers résultats ont été satisfaisants. Pour la commercialisation, les mobiliers seront protégés par une finition de type vernis naturel qui aura également pour but de protéger le support bois et d'agir sur la préservation des teintures.

VIEILLISSEMENT ARTIFICIEL

Un test de vieillissement a été réalisé sous lumière artificielle pour simuler un vieillissement à plus long terme. Ci-dessous le résultat des échantillons après passage au *Suntest*.

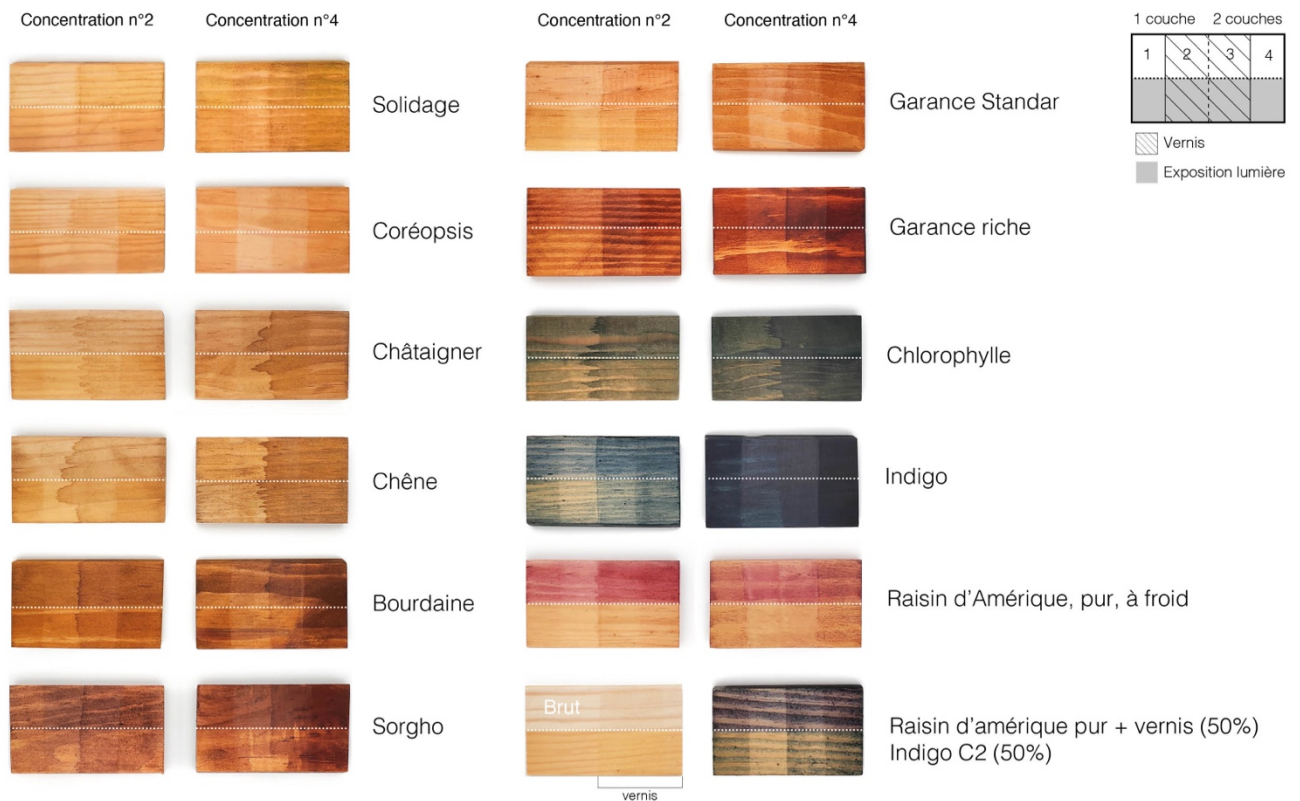


Figure 176 : Echantillons après vieillissement artificiel au Suntest

L'observation visuelle des échantillons après leur passage au *Suntest* permet d'établir un premier bilan sur la résistance ou non à la lumière des teintures et de l'influence du vernis utilisé par Api'Up.

Chaque échantillon est divisé en 8 zones distinctes. 4 zones de gauche à droite et séparées dans le sens de la hauteur avec les parties basses irradiées. Les zones 1 et 2 sont recouvertes d'une couche de teinture et les zones 3 et 4 de deux couches de teintures. Une couche de vernis a été appliquée au centre de l'échantillon et recouvre les zones 2 et 3. Le pin maritime est connu pour son jaunissement, ce qui est confirmé par l'échantillon brut et sur lequel le vernis n'a eu aucune incidence à l'œil nu. Les teintes dans les tons jaune, orangé et marron clair montrent nettement un jaunissement ainsi qu'un assombrissement.

On constate également sur la partie vernis un effet de blanchiment, notamment sur la zone 3 (1 couche de teinture + 1 couche de vernis). Étonnement la teinture de chlorophylle a plutôt bien résisté alors que cet extrait est connu pour sa faible solidité à la lumière. Dans ce cas ici présent, plus

sa concentration est élevée mieux elle résiste à la lumière. L'indigo quant à lui, dû à sa non-solubilité puisque c'est un pigment et non un colorant, a été directement mélangé au vernis, puis la couche centrale de vernis a été ajoutée comme sur les autres échantillons. Il est lui aussi plus résistant lorsqu'il est utilisé en plus grande concentration. Sans surprise, le raisin d'Amérique lui n'a pas résisté, étant une extraction à froid provenant de baies, sa solidité à la lumière est très fragile. Sur l'échantillon violet qui est un mélange de raisin d'Amérique et d'indigo, on voit nettement que la teinte rose a disparu du mélange pour laisser apparaître uniquement le bleu après l'irradiation.

Ci-dessous les résultats des mesures colorimétriques sont présentés avec le calcul des Delta L*, Delta C* et Delta E*. Comme expliqué précédemment, les mesures d'échantillons de pin maritime peuvent engendrer d'importants écarts-types dus au veinage du bois.

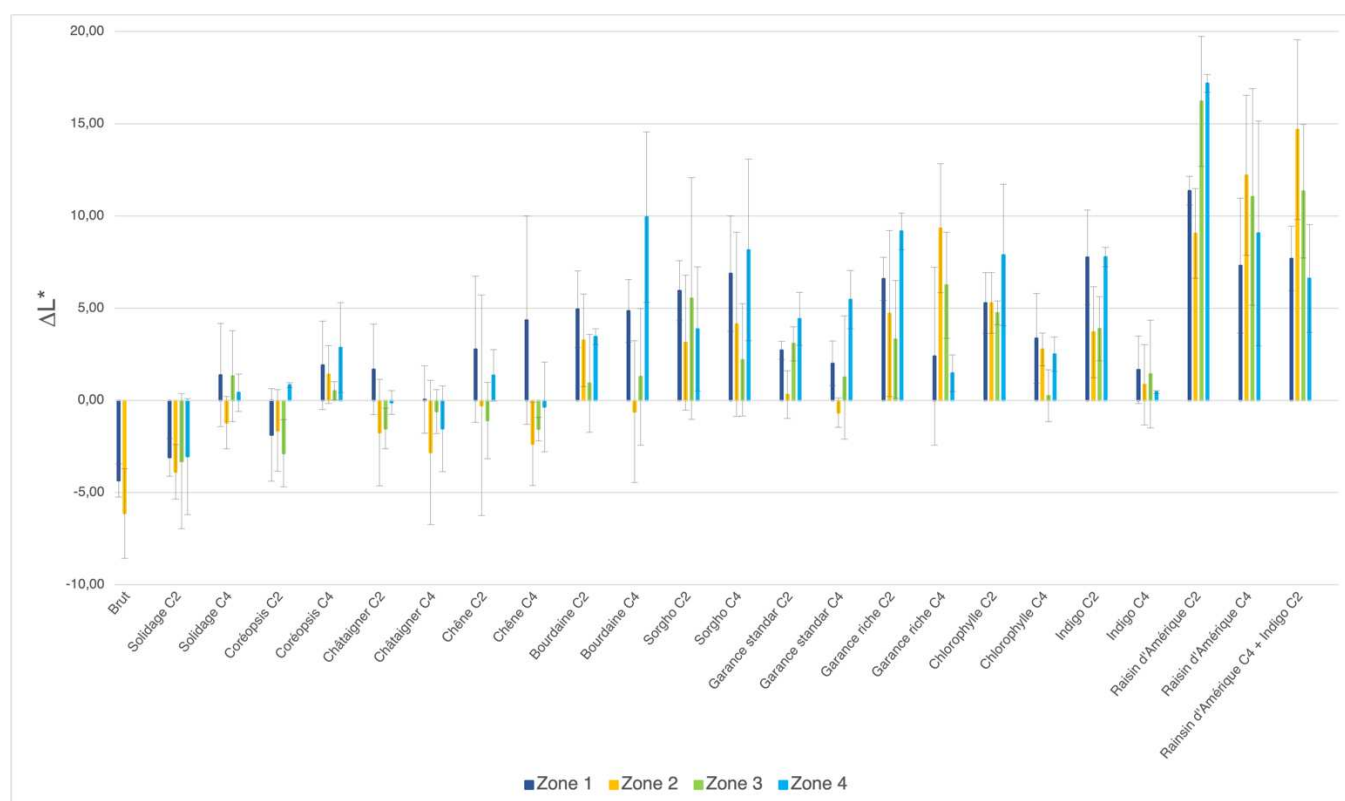


Figure 177 : Comparaison du Delta L* entre les zones irradiées et celles non irradiées

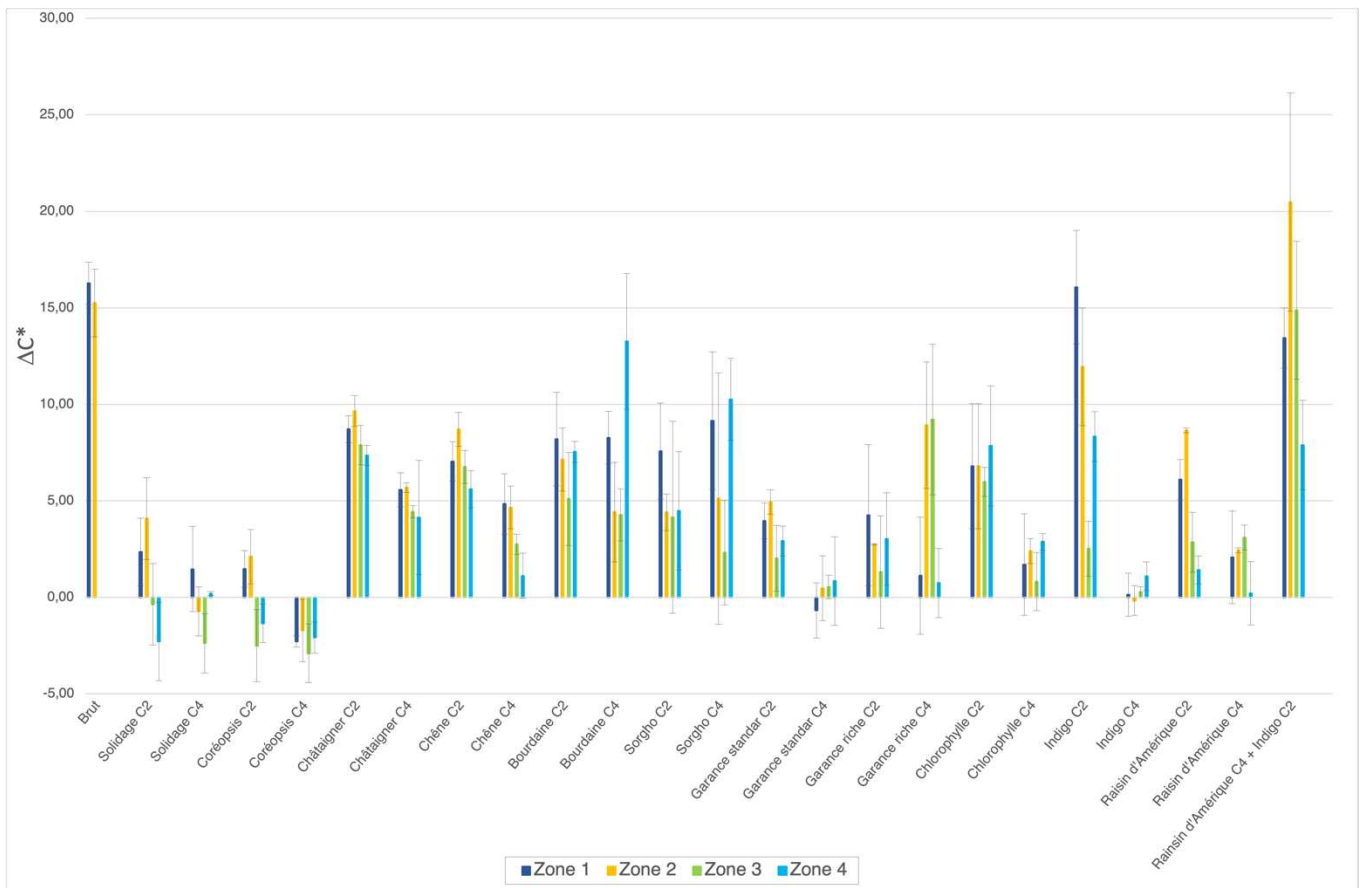


Figure 178 : Comparaison du Delta C* entre les zones irradiées et celles non irradiées

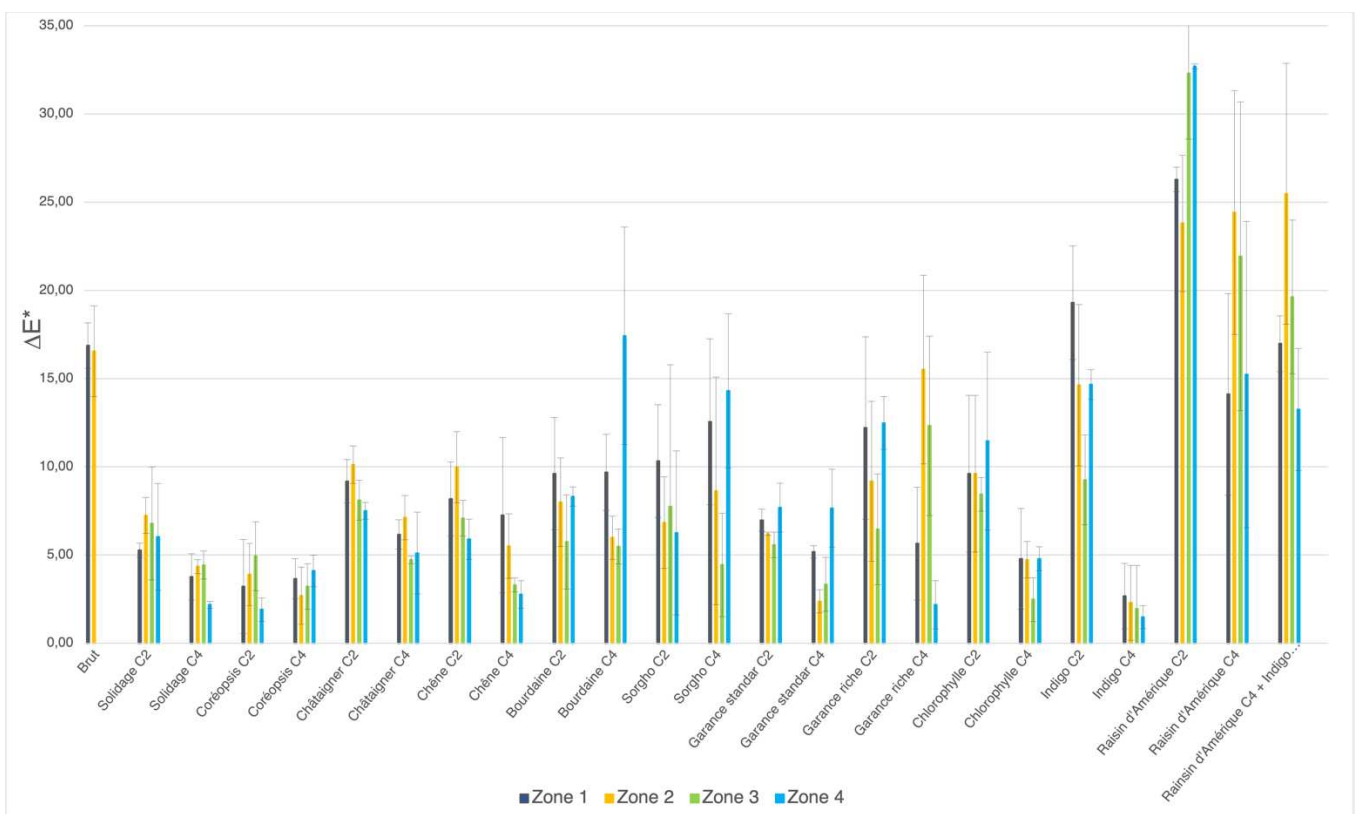


Figure 179 : Comparaison du Delta E* entre les zones irradiées et celles non irradiées

3.3.11 INFLUENCE DU SUPPORT

Une expérimentation de teinture sur panneaux de cuir rigides a été réalisée lors du workshop effectué avec les étudiants de Master Couleur à Montauban. 6 teintures (garance, sorgho, coréopsis, chlorophylle et indigo) ont été testées avec les 4 concentrations différentes (C1, C2, C3, C4), identiques à celles utilisées sur les échantillons de bois. Étant donné la particularité du support, si la teinte est trop claire ou trop proche de la couleur du panneau, le résultat sera peu visible. C'est le cas du coréopsis par exemple, qui se distingue à peine pour sa concentration la plus élevée. La garance, le sorgho, la chlorophylle quant à eux donnent des résultats plutôt satisfaisants. L'indigo étant un pigment, on peut apercevoir des traces de dépôts qui peuvent être perçues comme moins esthétiques pour les concentrations n°2, 3 et 4. La concentration n°1 est trop faible et la solution à froid n'a pas fonctionné. Il faudrait revoir l'application de l'indigo en modifiant la répartition des concentrations. Faute de temps des essais de teinture dans la masse n'ont pu être réalisés, mais ces premiers essais de coloration de surface montrent des résultats positifs et une possibilité de faire varier l'esthétique de ce nouveau matériau.

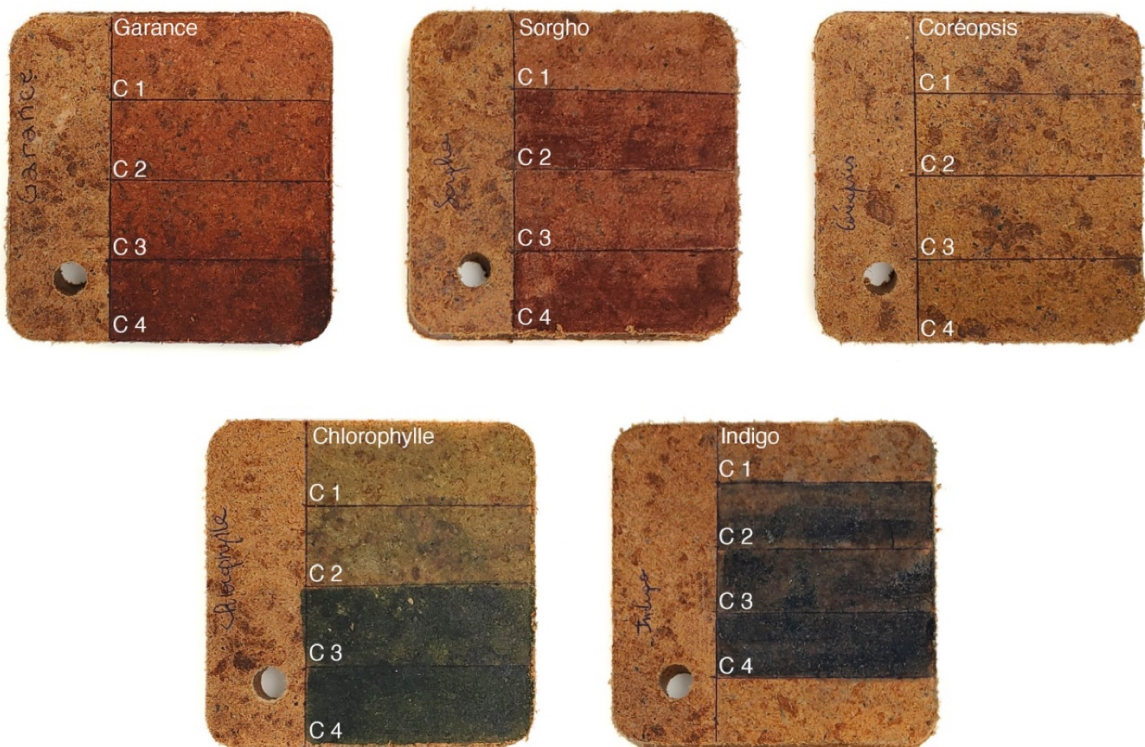


Figure 180 : Panneaux échantillons de cuir rigide teintés

Les mesures colorimétriques sont présentées dans le graphique ci-dessous, avec comme indicateur les Delta L*, C* et E* par rapport à l'échantillon brut pour les 4 concentrations.

Comme pour le pin maritime, ces panneaux de cuir présentent des inhomogénéités dans la constitution du matériau qui impacte sa perception chromatique. Ici, ce sont des petits agglomérats de fibres de cuir qui se sont imprégnés différemment du mélange collant à base d'eau et forment des tâches de couleur plus sombre. Cela explique la variabilité des écarts types que peuvent avoir les mesures sur ce matériau.

Il a été choisi de ne pas présenter les mesures en résultats absolus afin de pouvoir identifier si le ΔL^* correspond bien à un éclaircissement et dans ce cas le résultat est positif (+) ou à un assombrissement, et dans ce cas le résultat est négatif (-). De même pour le ΔC^* , si la saturation est plus élevée le résultat est positif (+) mais si la mesure montre une baisse de saturation il sera négatif (-). (cf chapitre introduction sur la colorimétrie).

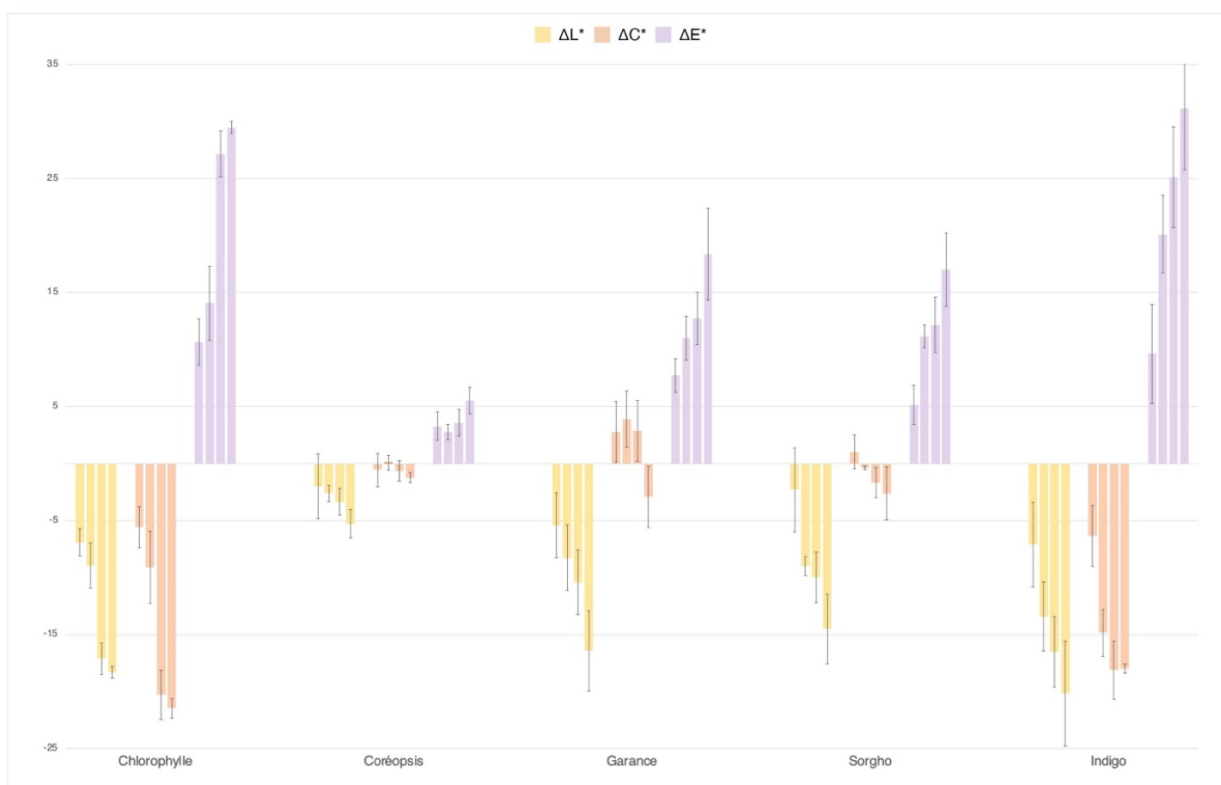


Figure 181 : Graphique des delta L^* , C^* et E^* des échantillons de cuir teintés

3.4 CONCLUSION SUR L'ÉTUDE ET LE DÉVELOPPEMENT D'UNE TEINTURE VÉGÉTALE

Ce projet de recherche s'est inscrit dans une démarche de valorisation du bois, en cherchant à élargir la palette de teintes biosourcées disponibles pour ce matériau, en harmonie avec des matériaux innovants issus de déchets de cuir et de textile.

L'objectif était dans un premier temps de connaître le pouvoir colorant des teintures naturelles et de mieux comprendre les phénomènes chimiques. Les essais se sont focalisés précisément sur l'analyse des extraits en poudre de châtaigner et de bourdaine. Le but étant de proposer à l'entreprise un panel de teintes pouvant être adaptées au mobilier API'UP. Le choix s'est porté en premier lieu sur des teintes naturelles imitant des teintes de bois existantes avant de tester la commercialisation de couleurs plus vives.

Ce projet a montré la faisabilité de l'élaboration d'une teinture naturelle végétale pour valoriser différemment le bois upcyclé. Le procédé de l'infusion fonctionne bien avec l'extrait de châtaigner mais la quantité d'insolubles reste importante. Pour le transfert technologique de ces résultats, il sera préférable d'opter pour la méthode d'extraction par décoction. L'ensemble des premiers essais réalisés aura permis d'obtenir des résultats satisfaisants. Ils sont prometteurs pour la phase d'industrialisation. Ces résultats auront permis également de mieux comprendre le fonctionnement et les propriétés des teintures naturelles car ces dernières sont impactées par de nombreux facteurs environnants. En effet, l'essence de bois de l'échantillon, la qualité du papier, l'état de surface, la quantité de dépôt, la filtration et l'exposition à la lumière sont autant de facteurs influençant le résultat et la tenue des teintes dans le temps.

Ces recherches ont également permis de mettre en lumière l'importance du bois comme matériau à la fois traditionnel et innovant, capable de répondre aux enjeux contemporains de durabilité, ainsi que pour ses vertus envers le bien-être et la santé humaine. Ses qualités intrinsèques, qu'il s'agisse de ses propriétés thermiques, acoustiques, tactiles ou même olfactives, en font un matériau privilégié pour des aménagements intérieurs propices au confort et à la détente. Les recherches montrent que le bois favorise des réactions physiologiques positives, telles que la réduction du stress et de la pression artérielle, et peuvent avoir des effets bactéricides intéressants. De plus, son aspect visuel et sa texture naturelle lui confèrent une chaleur et une « personnalité » qui le distinguent des matériaux plus industrialisés.

L'utilisation de bois teinté ou naturel dans divers projets démontre le potentiel de ce matériau pour intégrer des démarches écoresponsables en recyclant des matériaux et en proposant des solutions esthétiques et fonctionnelles aux industries du design et de l'ameublement. En élargissant la palette de teintes et de types de bois, notamment grâce à des colorants biosourcés, ce projet offre aux entreprises des possibilités diversifiées pour répondre à une demande croissante pour des produits plus naturels et plus respectueux de l'environnement.

Les multiples études analysées confirment les bienfaits physiologiques et psychologiques associés à la présence du bois dans notre environnement. Qu'il s'agisse d'effets relaxants et stimulants en lien avec la biophilie, de l'apport de confort thermique et acoustique, ou de ses propriétés antibactériennes, le bois se distingue par une capacité unique à améliorer la qualité de vie. En tant que matériau renouvelable aux vertus prouvées, il devient pertinent pour des applications dans le domaine de la santé, dans les espaces intérieurs ou encore dans des environnements urbains en quête de connexion avec la nature. La diversité des essences de bois et leurs caractéristiques singulières permettent d'envisager des usages adaptés pour chaque projet, que ce soit pour leur esthétisme, leur durabilité ou leurs bienfaits sur la santé humaine. La valorisation de ces atouts par des recherches continues favorise une vision élargie du bois, non seulement comme ressource industrielle, mais comme élément essentiel de bien-être dans nos environnements modernes.

Bien au-delà de son rôle esthétique, la couleur aussi joue un rôle essentiel sur des aspects physique et psychologique. Elle révèle des vertus profondes et thérapeutiques qui influencent notre corps, notre santé et notre bien-être. Les exemples explorés au sein du réseau « *Color The Life* » témoignent des effets positifs que les nuances de couleurs peuvent avoir sur la santé et le bien-être, que ce soit par des thérapies anciennes comme la chromothérapie, des teintures végétales aux propriétés thérapeutiques en design textile, ou encore par la conception novatrice d'environnements de soins ou de lieux de vie adaptés aux besoins spécifiques de chacun tout en favorisant le confort et la sérénité des patients.

Les recherches et initiatives présentées démontrent que la couleur dépasse largement le simple aspect esthétique et participe activement à des pratiques de soin et d'amélioration de la qualité de vie. Qu'il s'agisse d'environnements médicaux, de projets textiles écologiques ou de la création d'espaces accueillants pour des publics fragiles. La couleur se révèle être un puissant outil thérapeutique, capable de susciter des émotions, de faciliter la guérison, et d'apporter confort et sérénité. Les avancées interdisciplinaires entre design, médecine et sciences humaines ouvrent ainsi la voie à de nouvelles pratiques, telles que le « color care » et le « care design », qui redéfinissent la

couleur comme un acteur à part entière dans notre environnement quotidien. Ces recherches, menées dans divers domaines, témoignent du pouvoir des couleurs à apaiser, stimuler et même soigner.

Tout cela démontre à quel point la couleur est un outil puissant, et que ses effets sur le corps et l'esprit ne cessent de susciter l'intérêt des chercheurs et des designers. Ce projet de teinture végétale est donc un bon moyen de combiner ces deux aspects du bois : la couleur et ses impacts positifs sur la santé, à travers un projet de mobilier ou d'agencement intérieur qui utiliserait du bois teinté naturel.

PERSPECTIVES

L'étude pourrait se poursuivre afin de discriminer la nature des molécules qui induisent l'insolubilité et d'accentuer les recherches sur les phénomènes naturels de coloration afin de caractériser les molécules rendant les solutions plus stables dans le temps comme la lutéoline et la quercitrine. Des recherches plus approfondies sur la température idéale de chauffe des teintures et l'ajout ou non de gomme arabique pourraient également être envisagées. Il serait également intéressant de comparer les teintures réalisées avec des recettes d'encre végétales.

D'autres mesures de couleurs pourraient permettre de quantifier, voire de rendre prévisible la différence de teinte entre les différentes concentrations.

Les résultats de vieillissement à la lumière seraient intéressants à comparer avec des résultats de vieillissement de textiles teints avec les mêmes teintures végétales. Les méthodes de fixation des couleurs en teinture textiles pourraient être testées sur les échantillons de bois.

Un test de résistance aux frottements permettrait de connaître le taux de transfert des couleurs du bois teinté brut, sans application de vernis. Ce test se réalise à l'aide du crockmètre. Un échantillon de tissu est frotté avec un tissu de coton blanc sous une pression définie (9 Newton). Cela se fait en déplaçant le tissu d'avant en arrière en ligne droite. La résistance au frottement est également testée à l'état humide, car les textiles teints libèrent généralement plus de colorant à l'état humide. En raison de l'abrasion mécanique, des parties du colorant sont transférées du tissu de couverture au tissu de coton blanc et le décolorent. L'intensité de la coloration est évaluée à l'aide d'une échelle à cinq niveaux (appelée échelle de gris).

La palette de bois teinté obtenue n'a pas été nommée. La quantité de nuances possibles est infinie, mais pour la création d'un nuancier à commercialiser, la nomination des teintes sera primordiale. Une fois les couleurs obtenues mesurées, le logiciel conçu par monsieur Robert Sève pourra être d'une grande aide pour la représentation et la nomination des couleurs. [38]



Figure 182 : Cercle chromatique d'échantillons de bois teintés

CHAPITRE 4 : ACTUALISATION DE LA POSTURE DU DESIGNER CHERCHEUR EN R&D

La présente thèse a été réalisée dans le champ du génie des procédés. Mais le profil initialement porté par cette recherche est celui du design. En tant que designer de formation et suite à l'immersion dans le champ des sciences et génie des matériaux, j'ai dû faire évoluer mon approche du design. En effet, si ce dernier a pour habitude de partir du terrain pour revenir à la question des modèles, dans le cadre d'une recherche menée sur le développement de nouveaux produits upcyclés innovants, la méthode est inversée. On part d'hypothèses et de modèles scientifiques (analyses, mesures, etc.) ; on éprouve ces derniers en laboratoire ; après la formulation d'une problématique on effectue des hypothèses ; puis des tests sont effectués *via* l'expérimentation. Les résultats sont présentés généralement sous forme de modèles (graphiques ou autre) pour en tirer des prédictions, des conséquences encore non observées sur le sujet ; puis s'en suit la communication « revue par les pairs » pour contrôler la démarche scientifique. Si cette démarche permet de définir ce que l'on appelle « la recherche », dans le champ des recherches en design, la méthodologie et les objectifs ne sont pas tout à fait identiques.

C'est pourquoi il semble ici intéressant de revenir aux origines de cette recherche en y posant un regard de designer couleur, suite à son immersion dans l'approche Art & Sciences, Génie des procédés et design.

4.1 DU DESIGN COULEUR AUX SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

4.1.1 PORTRAIT GÉNÉRAL DU DESIGNER COULEUR

Nous prêtons rarement attention à la couleur dans ses fonctions et ses utilisations. Pourtant cette dernière entoure notre quotidien et renseigne sur l'histoire, la culture, la technique ou la santé des individus tout autant que de leurs environnements. Le design au service de la couleur, la couleur au service du design, le design-couleur engendre, c'est-à-dire invente et conçoit des projets et des produits tournées vers les « justes » besoins des hommes et des femmes. C'est ainsi par le *dessein* et le *dessin* que débute un projet ou une recherche en design (*disegno*), un dessein comme projet tourné vers les humains (au service de) et un dessin comme représentation et modélisation d'une intention, d'un projet. Si le design prend différentes formes et s'applique à différents domaines (design

graphique, design d'espace, design sensoriel, etc.), le design-couleur est un champ d'une trentaine d'année maintenant qui se concentre sur la partie chromatique, texturielle, subjective et sensorielle des artefacts.

Le designer couleur agit comme vecteur d'expérimentations, pour valoriser des objets ou des services tout autant que des matériaux hétérogènes. La couleur, vecteur de sens et de sensations est ici choisit pour sa matérialité : « Pour le coloriste, la matière se caractérise par sa surface ; cette surface présente notamment deux caractéristiques visuelles bien différentes : l'aspect tactile et la couleur » note Jacques Fillacier dans l'ouvrage « La pratique de la couleur ». [167]

Ainsi, l'expérimentation des surfaces et des matières, ainsi que la pratique de colorations de ces derniers représentent des phases primordiales pour favoriser la création de nouvelles couleurs dans un projet de R&D. En cela, l'un des rôles du designer-couleur dans un projet interdisciplinaire est de faire le lien entre les différents acteurs du processus de création et d'industrialisation, et de faire des propositions susceptibles d'apporter une valeur différenciante au projet (valeur ajoutée technique, symbolique et esthétique). Il crée aussi une forme de « passerelle » entre le consommateur et le fabricant, le bureau de recherche et le laboratoire de production, l'ingénieur et le marketing... Les missions propres au travail du designer-couleur permettent d'aboutir généralement à la création d'outils (Aide au développement ou de communication) et à des propositions de gammes qui permettent, ici plus particulièrement, de faire connaître la démarche innovante de l'upcycling ; de démocratiser cette dernière en la rendant plus accessible et familière ; et de mettre en avant l'aspect pédagogique et pragmatique présent dans travail du designer couleur et matière pour faire comprendre les enjeux du design même, à savoir : traiter et apporter des solutions aux problématiques de tous les jours, petites et grandes, liées aux enjeux économiques, sociaux ou environnementaux.

Outre un processus intellectuel créatif, pluridisciplinaire et humaniste, le design est une pratique des enjeux, des contextes et des situations, qui met en avant la créativité, de la valorisation, et l'apport de sens lors de la commercialisation. Il peut concevoir une teinte ou une gamme ; donner un sens signalétique fort à un objet ; favoriser l'affordance ou encore nommer les couleurs créées en adéquation avec le terrain d'application et l'usage. La désignation d'une teinte peut, en effet, avoir des conséquences sur la perception et réception du produit auprès du consommateur, et il en est de même sur l'effet donné aux nuances, aux matériaux ou aux formes. Pour tout individu, la relation entretenue avec les couleurs est déterminée par la teinte (perception), la saturation et la luminosité, mais aussi le nom (interprétation) souvent symbolique qui la désigne, ce qui conditionne nos perceptions et nos choix en matière de produits ainsi que d'autres critères selon le projet. « Les

couleurs que j'emploie sont référencées par des chiffres, j'aime cette déconnexion avec la réalité, cela permet à chacun de nommer son émotion car je pense que la couleur est une émotion individuelle. »^[10]

Finalement, avec toutes ces entrées, nous pourrions dire que le designer-couleur est comparable à un dénicheur de matières insolites au sein du processus du projet et au-delà. Accompagner et surprendre sont les meilleures façons d'intéresser et de questionner l'innovation dans un produit issu de la R&D. Le designer-couleur opère à cette « surprise » en portant différentes casquettes concernant, pour exemples, l'association de matière, le panachage des gammes de couleurs, l'esthétique et la fictionnalité / fonctionnalité mais aussi, en matière de transferts de connaissances, la nomination et donc la communication. Il favorise selon le terrain et l'usage, les éléments qui, une fois assemblés, offriront une qualité visuelle, sensorielle, fonctionnelle et un imaginaire social dans, et par l'objet conçu. [3]

4.1.2 DES QUALITÉS VISUELLES EXPÉRIMENTÉES

Ce travail s'inscrit dans une posture dont l'objectif est la création de gammes et relève d'une position écrivain, à travers les couleurs, les matières et leurs finitions, une esthétique fonctionnelle « en lien avec le marché » visé.

L'expérimentation et la pratique sont au cœur du travail du designer couleur et matière. Cet espace pratiqué souvent en atelier-laboratoire est un espace où le réel est à la fois exploré et réinventé. L'expérimentation permet de relever les caractéristiques fondamentales du monde tout en les contretypant, c'est-à-dire en proposant des variations qui interrogent et transforment notre perception. L'expérimentation et la pratique sont un processus de recherche et de contretypage qui ne se limitent pas à l'observation : ils s'enrichissent d'un travail subtil de combinaisons, notamment à travers les couleurs (recherche d'harmonie). Les teintes, assemblées par la logique de la combinatoire et guidées par la quête d'harmonie, deviennent des outils pour fabriquer du sens sur ou au travers d'un artefact. Dans cette optique, la couleur joue un rôle fondamental. Elle devient la matière première que l'expérimentation manipule pour explorer des combinaisons inédites et des interactions harmonieuses. La combinatoire des couleurs dépasse alors la simple esthétique pour devenir un code, un langage, une façon de construire du sens en plus de la technicité ou des savoir-faire propres aux objets créés. Les choix chromatiques permettent en cela de véhiculer des idées, d'évoquer des émotions, ou encore de traduire des symboles.

L'expérimentation, par ses combinaisons chromatiques, transforme le réel en un processus visant à créer des harmonies et des significations inédites, tout en réfléchissant à leur impact émotionnel. Notre perception de la couleur, profondément conditionnée par des codes culturels tels que l'opposition chaud/froid ou chromatique/achromatique, constitue un défi pour le designer, dont l'enjeu est de questionner et faire évoluer ces représentations vers de nouvelles perspectives esthétiques, socio-culturelles et symboliques.

Aujourd'hui, les objets sont souvent définis par des tendances et des modes qui façonnent leur design et leur popularité. Dans le cadre de l'upcycling, l'enjeu réside dans la création de nouveaux codes, en démontrant que, bien que les couleurs varient (habitudes socioculturelles données aux couleurs naturelles versus couleurs artificielles qui ne peut s'appliquer à l'upcycling), elles peuvent également suivre des cycles de modes et de tendances, offrant ainsi une seconde vie aux matières tout en réinventant leur esthétique.

4.1.3 DES QUALITÉS SENSORIELLES DE LA COULEUR-MATIÈRE

Le lien entre la matérialité et le savoir-faire s'inscrit au cœur de l'expérience sensible, révélant comment les propriétés des matériaux interagissent avec les pratiques et les connaissances techniques d'une communauté. La matière n'est jamais neutre : elle est façonnée, transformée et investie de significations par le geste et l'habileté humaine. Ce dialogue entre la main, l'outil et la matière témoigne d'un savoir-faire spécifique, souvent transmis de génération en génération, qui dépasse le simple acte technique pour devenir une forme de mémoire collective. Depuis toujours, la sensibilité aux matériaux (souvent locaux dans l'histoire de la couleur) s'est transmise par le biais de savoirs familiaux autour de besoins quotidiens (enduits, badigeons, cuisine, etc.) faisant que les individus prêtaient attention aux qualités sensorielles et sensibles de leurs environnements. Avec l'hyperconsommation, cette sensibilité a progressivement disparue au profit de l'obsolescence des matériaux et donc des sensibilités. Pourtant, la matérialité participe non seulement à la construction d'un univers sensoriel commun, mais aussi à l'affirmation d'identités culturelles et sociales. (Cf. 3.1.5 Teindre comme un artisan designer).

C'est donc avec une approche de l'artisanat de la matière et de l'atelier que le designer conçoit des effets sensoriels aux produits et aux services qui nous entourent. Il est là pour rappeler combien notre lien à la matière permet de créer de la singularité au produit et de l'affection envers lui.

Les différents registres sensoriels révèlent de nombreuses interactions entre la vue, l'odorat, l'ouïe, le toucher et le goût. Ces phénomènes physiologiques mais aussi lexicaux, représentés par des métaphores inter-sensorielles, sont qualifiés de « synesthésies ».

Il existe deux approches scientifiques du concept de synesthésie : d'un côté, les études littéraires le considèrent comme un procédé stylistique, relevant de la métaphore ; de l'autre, les neurosciences l'interprètent comme une particularité cérébrale propre à certains individus. Toutefois, en se référant à l'étymologie grecque du terme, composé de *syn* (« avec ») et *aesthesis* (« perception, sensation »), on peut envisager la synesthésie comme une forme d'expérience sensorielle partagée par certains individus, constituant ainsi ce que l'on pourrait appeler une « communauté sensorielle », un terme inspiré de celui d' « *emotional community* » utilisé par l'historien Angelos Chaniotis. [168]

Comment se forme un sens commun de l'expérience sensible à l'intersection entre l'individu et la société ? Dans les années 1990, des travaux en histoire et en anthropologie, ont exploré des perspectives enrichissantes, révélant les interactions des sensations et la manière dont chaque société construit son propre « ordre sensoriel ». [169]

Dans le but d'apporter un nouveau regard sur les études consacrées aux modes de perceptions polysensoriels dans le champ des sciences cognitives, David Howes [170] met en avant le fait que l'ethnologue peut identifier des phénomènes de croisements et de correspondances inter-sensoriels qui ne se limitent pas à une singularité individuelle, mais se retrouvent partagés au sein d'une communauté entière. En effet, bien que la distribution du sensible s'appuie sur des bases biologiques incontestables, elle demeure propre à chaque société, en lien avec les pratiques culturelles qui la définissent et évoluent avec elles.

Le Professeur Howes propose d'explorer ce qu'il nomme les « synesthésies culturelles », afin d'apporter un nouveau regard aux études sur les modes de perception polysensoriels menées dans le domaine des sciences cognitives. Il met en évidence le fait que l'ethnologue peut identifier des phénomènes de croisements et de correspondances intersensoriels, qui ne se limitent pas à des particularités individuelles, mais sont partagés collectivement au sein d'une communauté. En effet, bien que la perception sensible repose sur des bases biologiques incontestables, elle demeure intrinsèquement liée aux pratiques de chaque société, influencée par ses pratiques culturelles distinctives. [170]

Les catégories élaborées par la science occidentale moderne sont imprégnées du paradigme aristotélicien, notamment par la classification des cinq sens, établie selon une hiérarchie (vue-ouïe-odorat-toucher-goût) décrite dans le traité « De l'âme » par Aristote. Certaines matières, grâce à leurs propriétés polysensorielles semblent jouer un rôle essentiel dans l'expérience sensible collective, au point d'acquérir une dimension référentielle. [168]

Pour les spécialistes des matériaux, ceux-ci sont avant tout le produit final d'un processus de recherche. Tandis que les designers considèrent généralement les matériaux comme des éléments fondamentaux de leur processus de conception.

Ces différences de perspectives se reflètent dans les rôles distincts que les matériaux jouent dans chaque discipline et dans les façons dont ils sont traditionnellement conceptualisés. Cela transparaît dans les méthodes de classification propres à chaque domaine :

- La science des matériaux adopte une approche hiérarchique et un modèle centré sur la composition et les structures moléculaires des matériaux.
- L'ingénierie privilégie un modèle pragmatique, focalisé sur l'optimisation des performances physiques dans des contextes spécifiques, indépendamment de leur composition.
- La conception design se concentre sur une approche plus générique, axée sur l'expression esthétique et l'adéquation au contexte d'usage.

Ainsi, là où la science des matériaux explore les structures moléculaires pour comprendre ce qui différencie un matériau d'un autre, l'ingénierie évalue leur performance fonctionnelle à l'échelle de l'objet dans un environnement donné. Le designer, quant à lui, perçoit les matériaux à travers leurs propriétés sensorielles et émotionnelles, il privilégie leur pertinence dans un contexte d'utilisation de l'environnement quotidien. [171]

Qu'il s'agisse de science ou de design, l'humain éprouve un besoin constant de nouveauté, un désir insatiable de renouveler ses expériences, ses possessions et ses repères. Cette quête de nouveauté est ancrée dans une volonté de se réinventer, de s'adapter à un monde en perpétuelle évolution et de trouver de nouvelles sources de stimulation et de plaisir. Ce besoin, à la fois intrinsèque et culturel, pousse à la recherche de changement, de nouveauté et de diversité dans tous les aspects. Mais dans la nouveauté perpétuelle, le design-couleur opère et veille pour favoriser l'approche sensorielle dans une forme pédagogique et de transmission. En cela, la matière possède un sens qui se doit de mettre en valeur à la fois l'objet qui le porte mais aussi l'usage que l'on en fait.

4.1.4 DES QUALITÉS FONCTIONNELLES, QUALITÉS PERÇUES ET IMAGINAIRES

Le lexique des couleurs, via la nomination des matériaux, des effets et des teintes elles-mêmes, participent à la singularisation d'un objet ou d'un service. En cela, les noms de couleurs par exemple sont des vecteurs d'attrance, d'approbation, d'adhésion ou de jugement voire de rejet pour l'inconscient collectif. Outre la création de formes et d'ergonomies, le designer prend ainsi en compte dans son travail, un regard qui pourrait parfois s'apparenter à celui des sciences de la communication (qui nomment les couleurs dans certains secteurs).

Si la couleur peut informer, servir de mode d'emploi ou de signalétique, elle joue également un rôle en accompagnant la technique ou la technologie du produit, devenant ainsi un repère facilement compréhensible pour l'utilisateur. De plus, la couleur possède un pouvoir sémantique et contribue à créer des ambiances particulières. Elle façonne ainsi des imaginaires en s'appuyant sur la signification du produit ou de la marque. Concevoir des gammes de produits et de couleurs revient donc à construire des univers et à plonger l'utilisateur dans un monde imaginaire.

Exemple ci-dessous de création de gammes en lien avec un univers pour le workshop de teinture végétale sur bois animé à l'ISCID de Montauban en 2022. Ce workshop s'est articulé autour de l'analyse du phénomène d'ennoblissement d'un déchet via le terrain d'application du bois et d'un nouveau matériau à base de cuir. Le travail a été mené à travers le processus de teinture végétale et à partir d'une palette de couleurs « locales ». Les étudiantes ont réalisé des recettes de teintures afin de colorer le bois et de recolorer des échantillons de « Granispher ». La phase d'expérimentation s'est suivie d'un travail de nuancement via la technique pyramidale pour développer des gammes de couleurs en lien avec des thématiques de leur travail en cours pour un projet de Master.



Figure 183 : Inspiration chromatique pour la réalisation de gammes à partir de 3 teintes de bases

4.2. DU DESIGN AU LABORATOIRE, DE L'ATELIER A L'ENTREPRISE : TRANSFERT ET COMPLÉMENTARITÉ

4.2.1 LES ÉTAPES DU PROJET DESIGN

Produire un travail de design de qualité répondant aux besoins d'un client est une tâche exigeante. La plupart des designers savent qu'il est essentiel de structurer leur démarche pour gérer leur temps efficacement. Bien que ce processus puisse être abordé de différentes manières, certaines étapes restent clés. La partie qui suit propose une présentation du processus design. Elle se base sur une approche synthétisée par les grandes étapes. Ces étapes varient en fonction du projet. Il s'agit donc d'une brève formulation afin de permettre au lecteur de comprendre les modes de faire et de penser du designer, afin d'appréhender, dans un second point, l'apport de l'ingénierie sur le design puis l'approche interdisciplinaire de cette recherche.

Dans ce cadre, le projet design connaît sept étapes clefs qui sont :

1. Les Enjeux : Analyse et cadrage

Identifier et comprendre les besoins fondamentaux du projet et son contexte afin de clarifier les attentes des parties prenantes et évaluer les problématiques clés (marché, utilisateurs, impact). Les études de marché et l'analyse concurrentielle permettent de cibler l'analyse stratégique. Le designer a la responsabilité de rédiger le « briefing » pour cadrer les enjeux et s'interroger sur le message à transmettre, et par quels moyens.

2. Définir les objectifs

Établir des critères de réussite clairs et mesurables pour guider le projet, tout en alignant les attentes des parties prenantes avec les besoins des utilisateurs. La coordination et la communication sont primordiales pour faire évoluer le brief en fonction des retours des parties prenantes et mettre en place la vision stratégique et valider les objectifs. Les domaines de recherches initiaux doivent inclure l'histoire et la culture de l'entreprise du client, l'environnement compétitif local (voire international), et les tendances du secteur.

3. Les Priorités : Idéation et exploration

Explorer des solutions créatives et établir des concepts préliminaires pour générer des idées innovantes tout en respectant les contraintes identifiées au travers d'ateliers collaboratifs et d'outils de brainstorming. Après avoir rassemblé leurs recherches, les designers explorent un large éventail de solutions et de gestion des contraintes grâce à leur créativité

4. Les Ressources : Développement des concepts

Affiner les solutions retenues et matérialiser les concepts sous forme de prototypes pour assurer la faisabilité technique et répondre aux attentes des utilisateurs via l'utilisation de logiciels de conception et la connaissance des matériaux. Réaliser des croquis pour définir les éléments visuels. La maîtrise de différentes compétences peut nécessiter une collaboration pluridisciplinaire.

5. Le Budget : Planification et validation

Planifier les étapes finales en fonction des ressources financières disponibles et respecter les contraintes budgétaires tout en garantissant la qualité. L'évaluation des coûts fait partie de la gestion du projet pour respecter le budget. Développer différents concepts pour proposer du choix au client et permettre de créer la proposition finale idéale.

6. Les Échéances : Prototypage et tests

Identifier les points d'amélioration avant la mise en œuvre finale avant d'effectuer des tests auprès des utilisateurs dans le respect du planning établi et du brief initial. Utiliser des outils de gestion de projet afin de maîtriser la gestion du temps, la collecte et l'analyse des retours utilisateurs. Le designer doit coordonner les échéances pour intégrer les différents retours. Il faut parfois plusieurs étapes de changement avant d'arriver au design final.

7. Les Compétences : Mise en œuvre et suivi

Assurer une transition fluide entre conception et production afin de finaliser, produire et déployer la solution tout en assurant un suivi post-lancement. La coordination et la supervision des équipes techniques et la communication avec les parties prenantes permet d'orchestrer les étapes finales, pour la mise en œuvre et le lancement.

Ces étapes permettent de formuler le cheminement d'un projet de design. En ce sens, le designer est impliqué sur différents niveaux de la chaîne du projet et parfois, il peut même participer à toutes les étapes. Le propre du design étant de modéliser son dessein par le dessin (*disegno*), son travail est global, c'est-à-dire considérant les étapes situées entre l'idée et l'usage. Pour une approche upcyclée, soit d'un design écoconçu, le designer doit endosser plusieurs rôles. Ces rôles permettent de suivre le projet (politiques du projet, techniques, idéologiques, communicationnelles, etc.) en lui garantissant une ligne directrice, une posture qui lui est propre.

4.2.2 MODÈLE DE TRAVAIL DE L'INGÉNIEUR AU DESIGNER

Bruno Latour, sociologue et anthropologue des sciences, a modélisé en 2001, le travail réalisé par le chercheur, dans un ouvrage de référence aujourd'hui. Son schéma (Figure 182) explique, étapes par étapes, le processus engendré par une recherche tournée vers le projet. Lors d'une conférence devant des ingénieurs, le public ayant reçu l'intervention de B. Latour a notifié se reconnaître dans le modèle, mais il a noté aussi que peu, voire pas d'ingénieurs se situaient à toutes les étapes du schéma projeté. En effet, en sciences, chaque étape semble portée par différentes personnes à la différence des sciences humaines et du design. Le modèle de Latour est alors intéressant car, dans le cadre d'une pratique design, c'est souvent un seul individu qui réalise toutes les tâches et toutes les tâches présentées dans le schéma suivant (figure 182). La posture du créatif, créateur ou designer dans une pensée technico-économique hétérogène où le designer, comme le chercheur « ne peut donc absolument pas soutenir la fiction absurde de l'existence séparée d'un monde social et d'un monde scientifique : nous avons affaire à un collectif qui se modifie sans cesse, au sein duquel les scientifiques même s'ils jouent un rôle particulier, ne sont absolument pas isolés ». (Latour, 2001) [172]

Bruno Latour propose un schéma (figure 182) présentant les horizons d'une recherche pensée « Ce schéma distingue d'une part quatre grandes catégories de tâches, qui constituent pour les scientifiques quatre horizons professionnels bien distincts » et un cinquième horizon nommé « liens et liants ». [172]

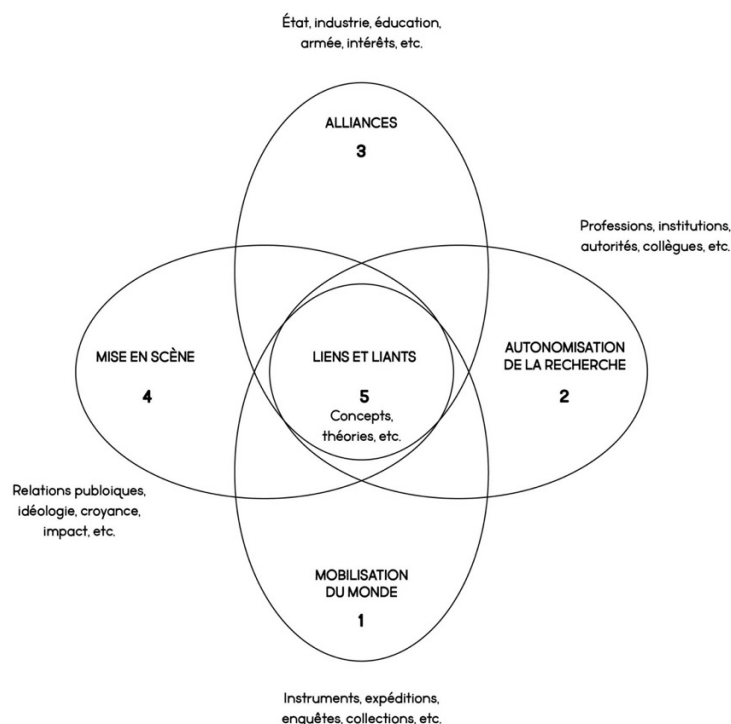


Figure 184 : Modèle des cinq horizons de la recherche selon Bruno Latour, 2001 [172]

Ce schéma offre une vision synthétique des pratiques en sociologie au cours des vingt dernières années. Il met en évidence, d'une part, quatre grandes catégories de tâches correspondant à quatre horizons professionnels distincts pour les scientifiques, et d'autre part, un cinquième horizon intitulé « liens et liants ».

A. Mobiliser le monde : Le premier horizon est une catégorie des tâches scientifiques qui consiste en une « mobilisation du monde », commune à toutes les disciplines. Cette mobilisation peut prendre diverses formes, comme l'instrumentation, la collecte de spécimens, la constitution de collections pour les sciences d'observation, ou encore la création de bases de données à partir d'enquêtes pour les sciences sociales. L'objectif est de structurer le monde en le rendant manipulable, lisible et re-combinable, afin de soutenir les activités propres à chaque discipline. Cette mobilisation est essentielle et constitue un aspect fondamental du travail scientifique.

B. Autonomiser la recherche : Le second horizon « autonomisation de la recherche » évoque la nécessité de s'entourer et de produire « des gens capables de comprendre ce que l'on fait et ce que l'on dit » [172] La collaboration entre collègues est essentielle pour concevoir et mener à bien des projets. Le partage d'idées, la complémentarité des compétences et le soutien mutuel permettent de surmonter les défis et d'enrichir les solutions. Ensemble, les chances de réussite sont maximisées en unissant les forces et les expertises.

C. Trouver des alliés : Le troisième horizon s'appuie sur une intelligence stratégique permettant de « s'allier avec des gens que l'on peut intéresser à la réalisation des opérations précédentes, mobilisation du monde (création et financement d'instruments idoines) et constitution-autonomisation des collègues ».

D. Mettre en scène : Ceci mène alors au quatrième horizon, « il s'agit des activités qui portent sur les relations publiques au sens très large, de la « mise en scène » de l'activité scientifique en général ».

Le rôle du chercheur est de penser ces quatre horizons ensemble et non séparément. Celui qui étudie la pratique de laboratoire et la construction des instruments est le même que celui qui étudie l'autonomisation de la recherche.

E. Lier et relier : Le cinquième horizon est celui précisément qui « va permettre de tenir tous les « acteurs » mobilisés ».

Finalement comment définir la démarche du chercheur-designer-couleur ?

« La réponse, c'est évidemment qu'elle est tout cela à la fois : elle tient précisément de l'ensemble du dispositif, et cet exemple montre bien pourquoi il est impossible de rendre correctement compte des idées scientifiques si on les détache du réseau de relations dans lequel elles prennent sens pour essayer d'en rendre compte elles-mêmes. Donc, pleins feux sur les concepts ! Bien loin de nous désintéresser du concept, apprenons à le considérer pour ce qu'il est : une entité stratégique » [172]

La question de la « fabrication de la demande » est, de mon point de vue, intrinsèque au chercheur et au designer coloriste. Elle relève en effet de la méthodologie du projet, méthodologie de la recherche. « un laboratoire d'autant mieux doté, faisant une recherche d'autant plus fondamentale qu'il va être relié par davantage de liens à davantage d'intérêts, à un contexte social et économique d'autant plus grand ». [172]

Dans le cadre de l'upcycling, le modèle de Latour est très utile car il montre comment on peut, dans un projet pluridisciplinaire, favoriser les relations entre différentes sciences mais aussi formuler un discours pour les usagers. Les éléments exposés ci-dessus démontrent que le designer se doit d'avoir une vision globale, c'est-à-dire une vision capable de partir de l'idée, de former une équipe capable d'en comprendre les enjeux, puis de travailler ensemble ; enfin, de se positionner à différentes échelles du projet et d'engager, tel un traducteur, différents langages.

La présente thèse relève du modèle formulé par Latour. L'un de ses enjeux a donc été de rechercher les différentes définitions propres au fonctionnement des chercheurs (entre art et sciences) et de l'entreprise (entre chercheurs et entrepreneur, chercheurs et marketing), mais finalement aussi des usagers (chercheur-designer et usages).

4.2.3 L'INTERDISCIPLINARITÉ COMME NOUVEAU MODÈLE

L'organisation du CNRS, structurée en blocs disciplinaires regroupés dans ses instituts, tels que l'INSIS, est naturellement multidisciplinaire. L'interdisciplinarité y est désormais omniprésente, que ce soit dans les trajectoires individuelles, les projets collaboratifs ou les unités de recherche. Face à cette réalité, des questions se posent sur la définition, l'évaluation, et la promotion de ces pratiques, ainsi que sur l'accompagnement des chercheurs dans leurs parcours interdisciplinaires. Ces problématiques complexes ont conduit à des recommandations issues de trois années de travail collectif et d'analyses de cas, visant à évaluer la pertinence et la valeur ajoutée de l'interdisciplinarité par rapport à une approche disciplinaire. [173]

Bien que cela puisse sembler évident, aborder la question de l'interdisciplinarité nécessite d'abord de réfléchir à la notion même de discipline. L'article de L. Endrizzi [174] se révèle

particulièrement pertinent, car il montre qu'une discipline ne se limite pas à sa dimension épistémologique, c'est une interprétation intuitive. D'autres facteurs jouent un rôle tout aussi déterminant, bien que souvent inconscients dans la pratique quotidienne des chercheurs. [173]

Deux citations de cet article qui éclairent cet aspect :

- « Pour Besnier et Perriault (2013), chaque discipline possède « un langage propre, des méthodes, des programmes, une organisation, mais aussi une base sociale et institutionnelle, des moyens d'assurer une continuité et de préserver ou d'étendre une influence, et enfin une capacité à se donner une image et une légitimité en écrivant sa propre histoire » ».

- « Les disciplines présentent ainsi une unité à la fois épistémologique (lois et principes, ontologies...), cognitive (méthodologies, pratiques, critères d'évaluation...) et sociologique (dynamique du système de publications, groupes au sein desquels les chercheurs se connaissent, se reconnaissent, se cooptent, ouverture sur la société civile...) (Kleinpeter, 2013). »

La définition de la discipline est donc à la fois variée et complexe, tout comme celle de l'interdisciplinarité. Il nous a semblé pertinent de proposer trois termes : multidisciplinarité (aussi appelée polydisciplinarité ou pluridisciplinarité, considérées comme synonymes), interdisciplinarité et transdisciplinarité. Ces trois concepts, qui désignent des activités de recherche impliquant plusieurs disciplines et souvent plusieurs acteurs issus de ces disciplines, sont classés selon les niveaux d'interaction et d'intégration qu'ils génèrent.

A. Multi, Pluri ou Poly disciplinarité : Les disciplines sont mises côte à côte. L'effort multidisciplinaire consiste essentiellement à expliquer aux partenaires les concepts et le vocabulaire propres à sa discipline, afin de clarifier les attentes spécifiques à chacune d'elles.

B. Inter disciplinarité : Les disciplines s'entrelacent. Dès le début du projet, au moins un des participants s'engage à enrichir, par des actions communes, les connaissances, techniques ou théories propres à la discipline de son partenaire. À l'issue du projet, chacun a contribué à faire progresser sa propre discipline tout en enrichissant celles des autres. Ce type de collaboration ouvre la voie à de nouvelles questions fondamentales, méthodologiques ou applicatives, impossibles à concevoir avant le lancement du projet.

C. Trans disciplinarité : L'activité interdisciplinaire a su générer une masse critique de problématiques transcendant les frontières des disciplines considérées séparément. Chaque acteur a apporté de nouveaux questionnements dans sa propre discipline, issus de la convergence avec l'autre discipline, établissant ainsi une véritable réciprocité interdisciplinaire. Les succès obtenus

inspirent d'autres acteurs à suivre cette voie. Un vocabulaire inédit émerge, une communauté se forme, et des avancées significatives se manifestent sous la forme de nouvelles techniques, nouveaux modèles et outils de simulation innovants. Des centres de recherche dédiés voient le jour. L'activité devient alors transdisciplinaire, ouvrant potentiellement la voie à la création d'une discipline entièrement nouvelle. La figure 183 illustre, de façon simplifiée, l'évolution entre ces trois concepts.

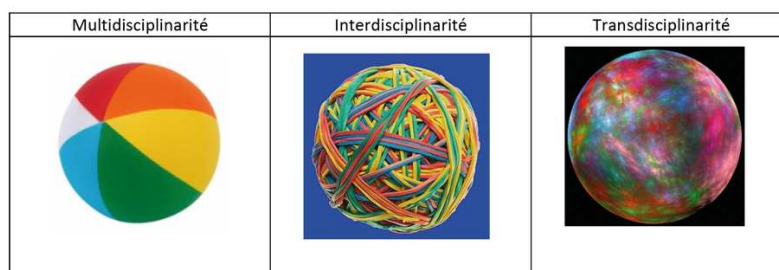


Figure 185 : Illustration des concepts de multi-, inter- et trans- disciplinarité [173]

La définition de ces concepts n'est pas seulement une démarche intellectuellement enrichissante, elle est également indispensable pour établir dès le début d'une collaboration les ambitions communes. En effet, une approche interdisciplinaire exige un effort supplémentaire pour harmoniser les concepts, les outils, les méthodologies, ainsi que les pratiques de publication et de diffusion des connaissances souvent variées. Il est donc essentiel d'évaluer le rapport d'équilibre entre les efforts investis et les bénéfices attendus. Au CNRS, aucune définition claire ne fait consensus, malgré des tentatives comme celle proposée en 2011 par la Mission pour l'Interdisciplinarité, qui reste floue et proche de la multidisciplinarité. Des appels à projets illustrent ce manque de précision en qualifiant des projets de transdisciplinaires sans les définir précisément. Ce manque de précision dans les définitions est d'autant plus étonnant que l'interdisciplinarité est une préoccupation majeure du CNRS depuis plusieurs décennies. Les premiers programmes de recherche interdisciplinaires (PRI) datent de 1975. [173] L'appel à proposition de la Mission MITI pour l'Interdisciplinarité du CNRS de 2017/2018 [175] marque une certaine évolution.

Une définition précise de l'interdisciplinarité est indispensable pour structurer la démarche scientifique : clarifier les efforts, les interactions, les modalités d'échange, les objectifs et les résultats attendus. Sans cela, l'interdisciplinarité risque de rester une simple intention ou de générer un déséquilibre entre disciplines, l'une devenant l'outil de l'autre. Une définition claire permettrait également d'aborder la question essentielle de l'évaluation de l'interdisciplinarité, tant en amont qu'en aval des projets. [173]

Le chercheur interdisciplinaire existe-il ?

L'interdisciplinarité peut être abordée à l'échelle d'un projet impliquant plusieurs chercheurs ou à celle d'un individu. La question de l'existence et de l'identification des chercheurs interdisciplinaires est légitime. Un rapport de la direction des ressources humaines du CNRS explore cette problématique, proposant des critères pour les identifier systématiquement à partir des bases de données. Bien que l'étude porte sur les chercheurs, ses conclusions peuvent également s'appliquer aux ingénieurs soutenant la recherche. D'après les recommandations du CNRS [173] ces critères sont :

- un chercheur dont la section d'évaluation ne correspond à aucune section de rattachement de l'unité d'affectation.
- un chercheur dont la section d'évaluation est différente de la section principale de l'unité d'affectation mais qui figure dans les sections secondaires de rattachement.
- un chercheur ayant fait des candidatures multi-instituts lors du concours de recrutement.
- un chercheur ayant fait une mobilité inter-institut.

Les auteurs de l'étude soulignent deux principaux défauts des bases de données : l'absence de granularité au niveau des équipes et l'absence de mots-clés liés aux thématiques de recherche. Bien que l'identification systématique via ces bases puisse être pratique, elle semble peu pertinente. Un chercheur peut mener une recherche interdisciplinaire au sein de son laboratoire d'origine, sans mobilité ni candidatures multiples. Inversement, un chercheur rattaché à une autre section d'évaluation peut conduire une recherche strictement monodisciplinaire. Ce travail pourrait, en revanche, être réalisé de manière plus efficace par les sections du comité national, qui sont en mesure d'évaluer les thématiques de recherche au cas par cas, à condition de disposer d'une définition commune de l'interdisciplinarité.

L'étude sur l'interdisciplinarité dans la gestion des personnels chercheurs de 2014 [176] identifie deux profils de chercheurs interdisciplinaires : le senior expert capable de prendre des risques, et les juniors, formés dans une discipline mais réalisant leur thèse dans une autre. Les principaux risques pour ces chercheurs incluent l'isolement disciplinaire, la technicisation (réduit au rôle de prestataire), la baisse de reconnaissance de leur activité, pouvant entraîner un retard de carrière dû à la prise de risques. La réussite de l'interdisciplinarité repose sur la réciprocité des bénéfices entre disciplines, car en l'absence de cette réciprocité, les résultats peuvent être perçus comme superficiels et être dévalorisés. L'étude recommande au CNRS de créer un environnement favorable à l'interdisciplinarité, soit par le recrutement de profils interdisciplinaires dans des équipes existantes, soit par l'ouverture de chercheurs confirmés à de nouvelles collaborations. Cependant, ces initiatives nécessitent souvent des moyens importants. Malgré les défis, il existe des exemples

réussis d'interdisciplinarité au CNRS, démontrant qu'une approche bien soutenue peut porter ses fruits et pourraient servir de modèle.

Dans le cadre de cette thèse, l'interdisciplinarité a été revendiquée dès le départ. L'enjeu était de combiner le design et la recherche pour d'avoir une vision globale sur l'étude du développement de nouveaux matériaux afin d'intégrer dès le départ de la conception les aspects esthétiques et sensoriels. La pensée design a la capacité à intégrer diverses perspectives et favorise des approches interdisciplinaires.

Et pour l'entreprise, collaborer avec ces deux disciplines avait pour enjeu d'aboutir à de nouvelles pièces de mobilier qui répondent à la fois à des critères d'innovation et de performances techniques tout en suivant les codes des tendances afin de mieux s'adresser aux usagers. Les avancées scientifiques peuvent soulever des questions éthiques ou sociétales complexes, en impliquant les utilisateurs finaux et en adoptant une approche centrée sur l'humain, les designers aident à anticiper et identifier ces impacts éthiques et sociaux ainsi qu'à concevoir des solutions responsables.

La collaboration entre scientifiques et designers n'est pas qu'un simple partenariat technique : c'est un dialogue entre deux approches complémentaires. Cela permet de rendre la science plus accessible, utile et humaine. Pour réussir, il faut construire une compréhension mutuelle et s'engager dans une co-création respectant les objectifs de chaque discipline.

4.3 FAVORISER UNE APPROCHE ESTHÉTIQUE ET MATÉRIOLOGIQUE

Les modèles sont des systèmes développés au fil du temps pour renforcer l'argumentation dans les projets humains. Une grande variété de modèles existe, chacun étant conçu pour s'inscrire dans un domaine spécifique. Un modèle scientifique constitue une représentation simplifiée, et souvent idéalisée, d'un phénomène réel. Le modèle joue un rôle essentiel dans la communication et l'explication des théories aux autres. Il sert également de support à la réflexion et à l'examen critique de sa propre pensée. En somme, un modèle est une représentation d'une théorie et chaque terrain d'application a sa propre culture.

En arts et en design, la couleur fait modèle selon différentes approches mais en se situant toujours à l'intermédiaire du général et du local, entre la science et le terrain, c'est-à-dire en poïétique (en construction) en regard des usages.

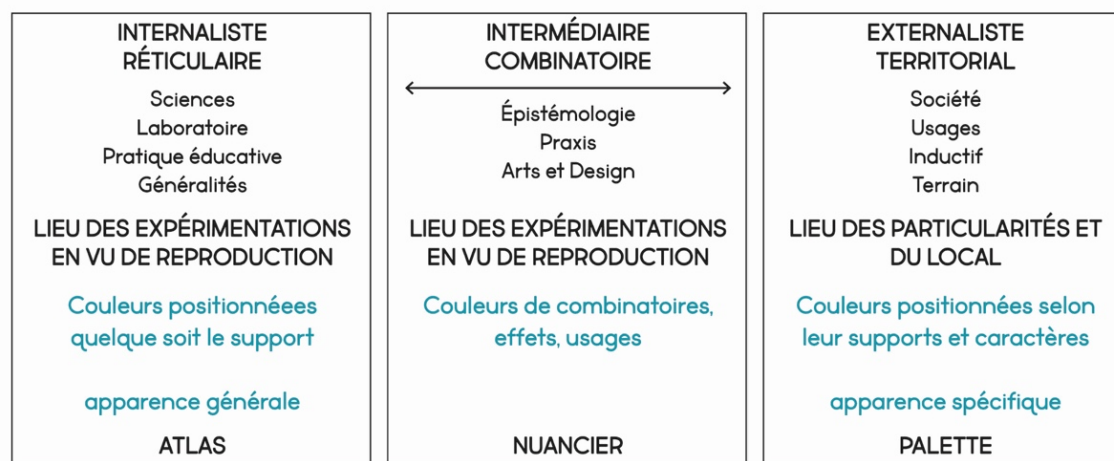


Figure 186 : Schématisation des différents types de modèles

On retrouve ainsi les modèles de la couleur autour de deux aspects principaux :

Réticulaire : C'est mettre en place des systèmes qui présentent une « universalité de la couleur » (espace de la géométrie analytique et de la quantification), qui cherche à montrer quelque chose de général pour fabriquer de l'universel. Exemple : la colorimétrie, les atlas, etc.

Territorial : C'est mettre en place des systèmes qui considèrent les particularités d'un lieu ou d'un terrain d'application, qui cherche à montrer quelque chose de spécifique pour fabriquer du sensible (sensoriel) et du singulier (typique à). Exemple : la palette, les savoir-faire

4.3.1 OUTILS DU DESIGNER CHERCHEUR : L'ATLAS COMME MODÈLE GÉNÉRAL

« Un peintre doit consciemment éprouver l'effet de chaque coup de pinceau sans quoi il n'aura pas conscience de ce qu'il fait ni du sens dans lequel s'oriente son œuvre. En outre, il doit considérer un à un chaque lien entre phase d'action et phase de réception, en relation avec l'ensemble qu'il désire produire » Citation de John Dewey, « L'art comme expérience », 2006, p.97 [177]

Pour le designer-couleur, l'outil de type atlas est le pinceau du peintre. C'est grâce à l'atlas que le lien entre ingénieurs et designers peut se faire. L'atlas est à la fois un nuancier d'une grande précision et un système de classification des couleurs, un outil visuel regroupant des échantillons ou nuanciers de couleurs. C'est un modèle colorimétrique innovant où pour la première fois les couleurs sont classées systématiquement selon un ou plusieurs critères, tels que la teinte, la saturation et/ou la luminosité.

Le « Natural Colour System » (NCS), conçu par Anders Hard et Lars Sivik en 1968, est un système de classification des couleurs qui repose sur la perception visuelle humaine. Il permet une communication universelle sur les couleurs en utilisant un référentiel logique. Le NCS s'appuie sur les six couleurs élémentaires identifiées par Léonard de Vinci comme étant « pures », ainsi que sur la théorie des complémentaires d'Ewald Hering.

Les chercheurs suédois ont développé le système NCS dans le but de permettre à toute personne ayant une vision normale des couleurs d'analyser les couleurs sans recourir à des instruments de mesure ou des tableaux de référence. L'espace colorimétrique NCS est tri-dimensionnel et englobe toutes les couleurs du monde ainsi que notre perception de celles-ci, initialement avec 1950 nuances. Contrairement aux méthodes approximatives comme le « *Colour matching system* », le NCS permet une évaluation précise des couleurs pour diverses applications, telles que choisir la couleur d'un mur, déterminer la teinte du feuillage ou d'une surface peinte présentant des contrastes, ou encore évaluer une couleur sur un écran de télévision. Il se concentre uniquement sur la couleur elle-même, éliminant ainsi les inconvénients des systèmes précédents comme Munsell et Ostwald. Le système des couleurs naturelles prend la forme d'un double cône, avec les quatre couleurs élémentaires et deux non chromatiques disposées sur un cercle de base, et

toutes les autres couleurs peuvent être définies en fonction de leur ressemblance. Le cercle de tonalité représente une coupe horizontale de l'espace chromatique NCS, avec les quatre couleurs élémentaires réparties uniformément autour du cercle avec dix divisions entre chacune.

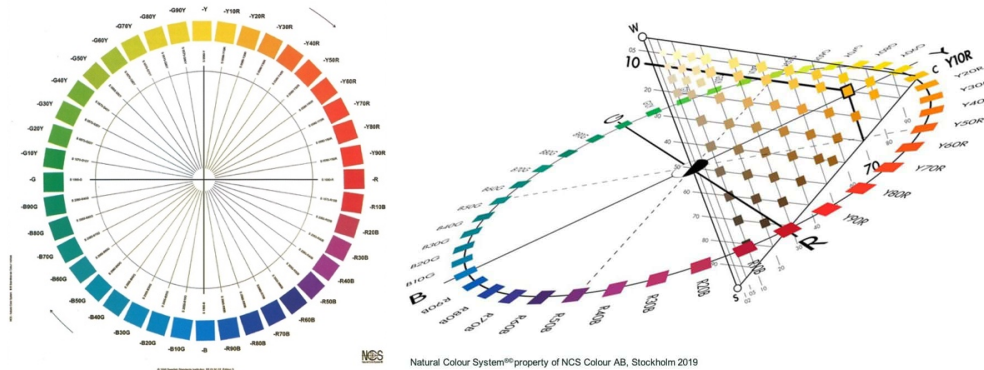


Figure 187 : Cercle chromatique et coupe verticale du système NCS [178]

La coupe verticale de l'espace chromatique NCS prend une forme triangulaire (Figure 182 à droite), avec le blanc en haut et le noir en bas, formant des triangles équilatéraux reliant ces deux points à chaque couleur du cercle de base. Chacun de ces triangles donne les nuances d'une couleur, définies par trois variables indiquant la proportion de blanc (W), de noir (S) et de couleur (C) et dont la somme est égale à 100. A droite, la couleur la plus éloignée de l'axe, est toujours définie par les valeurs $W=10$, $S=10$, $C=80$.

Pour la classification, chaque espace entre deux couleurs fondamentales est divisé selon une échelle qui indique la proportion relative de chacune des deux couleurs. Par exemple, « Y40R » désigne un jaune avec 40% de rouge (donc 60% de jaune), « B20G » un bleu avec 20% de vert (donc 80% de bleu), etc. Cette classification se fait selon le principe de la similitude, en fonction duquel une couleur, outre sa proportion relative de noir et de blanc, se rapproche plus ou moins des deux couleurs fondamentales qui l'encadrent. La précision de l'approximation est de l'ordre de 5% ce qui est à la portée d'un observateur moyen, même peu avisé dans le domaine des couleurs.

Le système chromatique naturel n'est évidemment pas considéré comme parfait et son extension aux couleurs lumineuses exigerait par exemple, de nouvelles connaissances sur la vision et la perception. La multiplicité ouverte des couleurs dépasse tout système fermé, quel que soit le raffinement et la sophistication de sa construction. [17-178-179]



Figure 188 : Nuancier NCS [179]

Le NCS est une forme d'atlas utilisé dans le champ du design-couleur. Il se complète d'approches de physique (colorimétrie et spectrométrie) qui valent pour valeurs universelles de la couleur. Le problème de ce type d'outils et de modélisations, est la rationalisation de la couleur sensible. En effet, dans ces approches, la couleur perd de sa matérialité au profit du référencement permettant la reproduction. Si cela est indispensable dans un projet d'industrie, la perte de la valeur sensible et sensorielle ne permet pas une satisfaction complète dans l'usage de ce type de modèle.

4.3.2 LES OUTILS DU DESIGNER DE TERRAIN : LA PALETTE COMME TERRITOIRE

A contrario des modèles globaux comme l'atlas, le designer opère souvent son travail sur la base de subjectivités. Dans le cadre de cette thèse, un travail de terrain est rattaché à l'entreprise Api'Up pour le tri couleur des déchets de cuir et de textile. On peut donc parler d'un modèle plus local, propre à l'entreprise et donc d'une approche territoriale, qui consiste à mettre en place des systèmes qui considèrent les particularités d'un lieu ou d'un terrain d'application. C'est un système qui cherche à montrer quelque chose de spécifique pour fabriquer du sensible (sensoriel) et du singulier (typique à).

Le modèle territorial du coloriste Jean Philippe Lenclos est un bon exemple. Professeur à l'ENSAD, Il est l'auteur avec sa femme, de nombreux ouvrages sur l'analyse chromatique du terrain sur la thématique « La géographie de la couleur ». Il est également à l'origine de la création d'une agence consacrée à la recherche et l'étude des couleurs appliquées à l'architecture nommée Atelier 3D Couleur afin de créer des palettes et de proposer des chartes colorées adaptées pour la réhabilitation ou la reconstruction. Par la suite, ce concept de « géographie de la couleur » donnera lieu à toute une arborescence d'applications, en particulier dans le marketing des produits industriels. Aujourd'hui, cette méthode est mondialement connue et appliquée.[180]

J.P. Lenclos part d'une analyse de terrain, il prélève des échantillons (minéraux, fragments, végétaux etc.) et il réalise des dessins. De retour dans son atelier il tri les échantillons collectés et réalise des contretypes à l'aide de nuanciers (NCS, Pantone, RAL etc.). Il simplifie la représentation (passage du terrain à l'atelier) et sélectionne les éléments chromatiques (la matérialité est progressivement laissée de côté) et passe de l'image à la codification. Lenclos part du terrain mais le dématérialise au fur et à mesure en proposant des palettes prescriptives pour permettre la reproductibilité des couleurs. Dans ce sens, il passe de la matière à la photo puis à l'aplat de couleur et au contretype. Ce modèle peut montrer ses limites, notamment avec sa particularité de ne pas prendre en compte la matérialité ni la nomination. Cela est dû au fait que Lenclos met son travail en perspective pour un industriel de la peinture au profit du spécifique. La couleur locale devient, chez Lenclos, progressivement dématérialisée et finalement, de plus en plus proche de l'atlas.

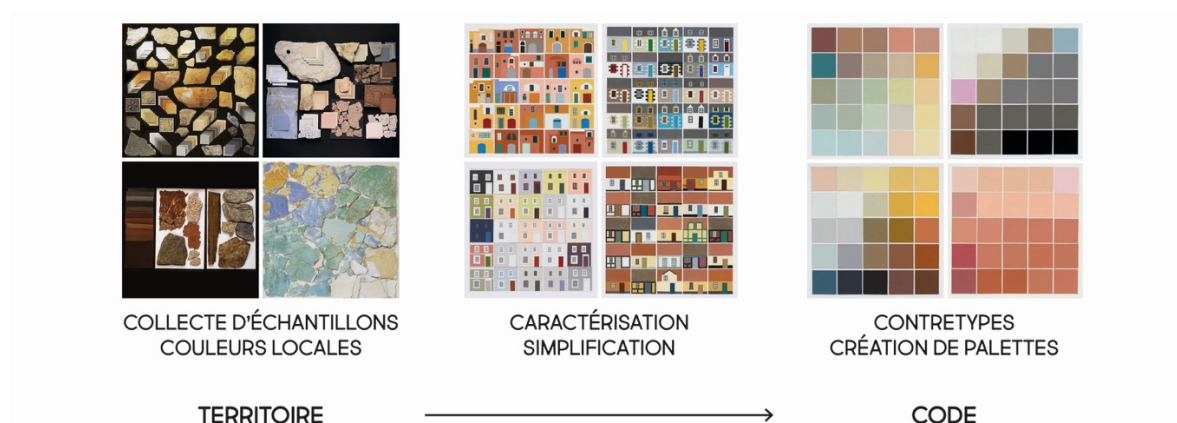


Figure 189 : Schématisation de la méthode de travail de Jean Philippe Lenclos [180]

Le parallèle de la démarche de Lenclos peut donc être fait avec le travail de tri couleur qui a été effectué sur les déchets de cuirs et de textiles (cf Chapitre 1 et 2, Tri couleurs et Nuanciers). Le cuir et le textile sont soumis aux phénomènes de vieillissement à la lumière, ce qui confronte les opérateurs à des modifications chromatiques dans le temps, ce qui complique le tri des déchets collectés. Des choix se sont alors imposés afin de réaliser des sélections, ce qui peut parfois éloigner du territoire de départ pour rationaliser et simplifier cette complexité des couleurs. Cette rationalisation a permis de transformer le sensible en aplat de couleurs, ce qui facilite également la communication.

On pense donc par famille de couleurs pour réduire le nombre conséquent des couleurs collectées et faciliter le tri au sein de l'entreprise. Ce regroupement permet également de s'affranchir de certaines variations chromatiques du gisement (nouvelle collection, altération etc.). Les nuanciers proposés gardent une part de variabilité dû à cette particularité de travailler une matière upcyclé déjà

colorée. Ici le passage se fait donc du terrain (territorial) au combinatoire (intermédiaire) sans forcément aller jusqu'au code (réticulaire) comme le fait J.P. Lenclos. Les nuanciers sont établis à partir de photographies de panneaux de cuir ou de textile, ce qui permet de conserver une part du sensible.

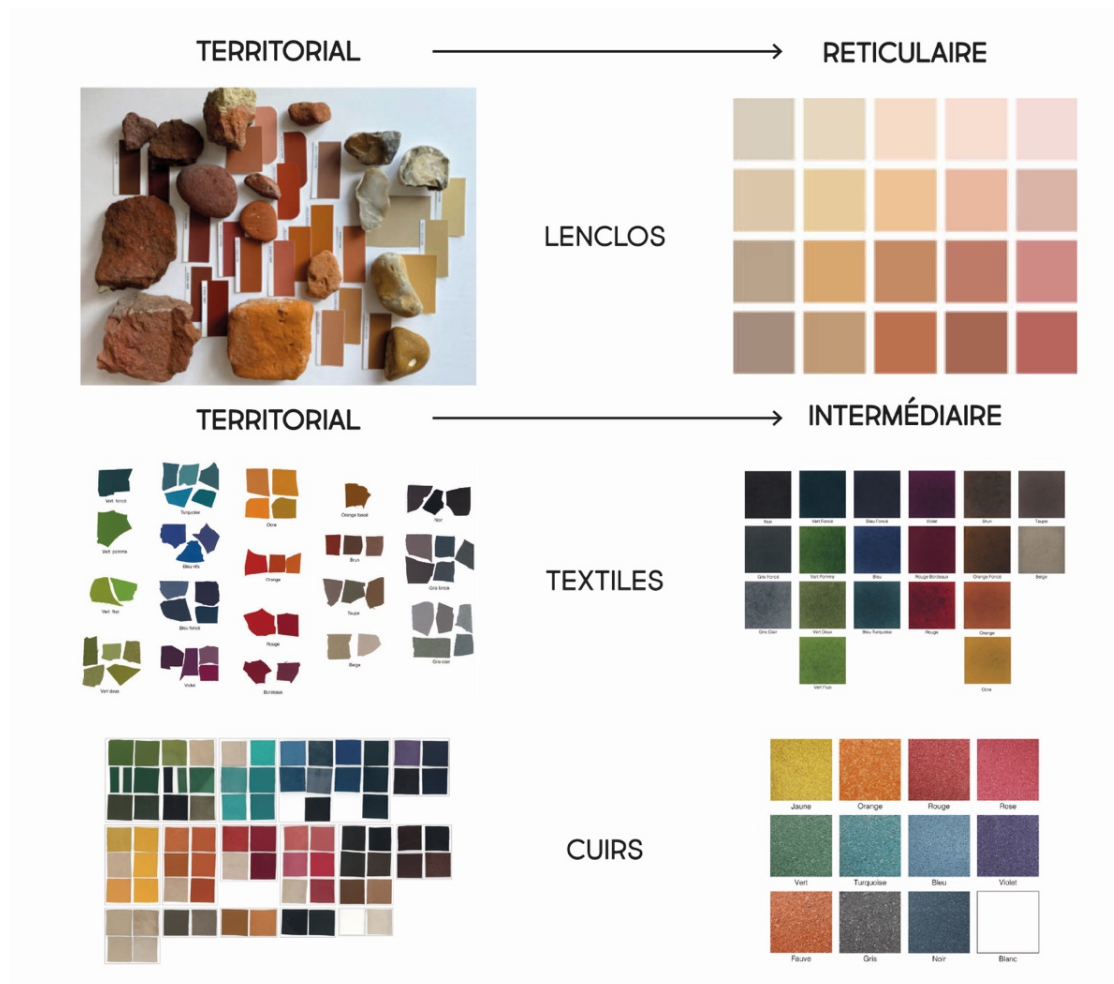


Figure 190 : Comparaison entre la méthode de Lenclos et celle utilisé dans le travail de thèse

Dans le cadre d'une expérimentation nécessitant une mesure, cette fois ci le sensible a été transformé en aplat de couleur numérique pour une simplification et une meilleure évaluation visuelle des résultats.



Figure 191 : Exemple du passage du territoire au code avec une expérimentation textile

C'est en s'inspirant du modèle de Lenclos et des outils réticulaires comme l'Atlas NCS que le designer opère des choix. En effet, il part du terrain ou du laboratoire pour concevoir un projet singulier d'entreprise. En cela, il opère dans les deux espaces (local/global) et invente, au cas par cas du projet, une sorte de modèle intermédiaire, c'est-à-dire d'outils spécifiques au projet sur lequel il travaille.

4.3.3 LES OUTILS DU DESIGNER COULEUR INTERMÉDIAIRE : LA CARTOGRAPHIE COMME PARTAGE ENTRE SCIENCES USAGES

Les terrains de pratiques ont leurs propres codes ou symboliques de la couleur. Une position intermédiaire, entre le global et le local, entre le réticulaire et le territorial est possible. L'exemple du modèle de Kobayashi va dans ce sens.

Shigenobu Kobayashi, est un coloriste japonais expert en psychologie des couleurs. Il est largement reconnu pour son approche systématique de l'harmonie des couleurs. Sa méthode repose sur une compréhension approfondie de l'interaction entre les couleurs et leurs impacts émotionnels sur les individus. Kobayashi a développé un système d'indexation des couleurs qui repose sur des enquêtes approfondies et des observations psychologiques, ce qui permet de classer les couleurs en fonction des sentiments et des émotions spécifiques qu'elles évoquent. Son approche permet d'articuler ce qui vient du réticulaire (les associations de couleurs comme codes généraux) et ce qui vient du territorial (les représentations locales propres aux terrains de pratiques), lié à l'évolution de la société et des représentations sociales. [181-183]

Méthode :

1. Analyse d'un domaine, collecte des échantillons, positionnement des couleurs dans une grille et attribution de déterminants pour les axes ordonnées/abscisses.
2. Contretyper les couleurs, créer des associations et identification des domaines ou termes clés.
3. Sens des accords et combinatoires = sémantique



Figure 192 : Cartographie de vêtements par Kobayashi [181]

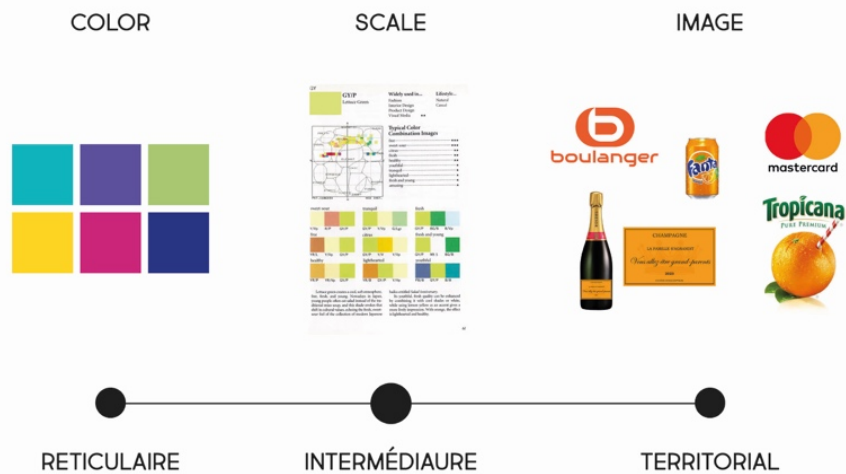


Figure 193 : Méthode Kobayashi, entre territorial et réticulaire (Céline Caumon)

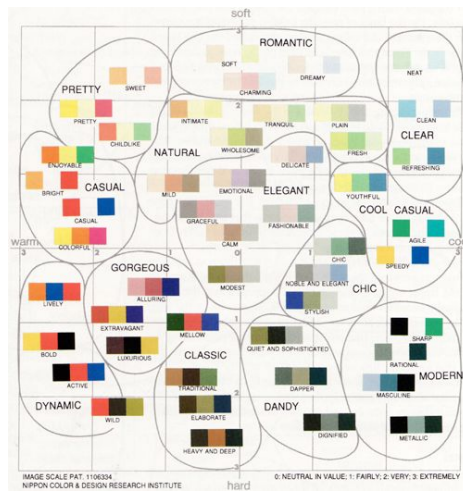


Figure 194 : exemple de cartographie par Kobayashi, « Colorist », 1999 [181]

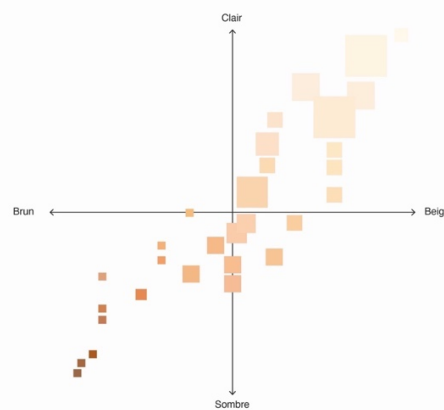


Figure 195 : Exemple de la cartographie réalisé pour l'analyse du pin maritime

Le travail de S.Kobayashi est intéressant car il modélise à la fois un terrain d'application et son impact en termes d'associations de couleurs avec les sens que la société leur attribue à un moment donné et dans une culture donnée. En cela, dans l'étude de l'upcycling, le modèle des cartographies permet de comprendre, en profondeur, quelles sont les couleurs dominantes, celles toniques ou moins présentes ainsi que leurs attributs sémantiques. Ainsi, on comprend les clichés portés par le domaine d'application mais aussi ses potentialités. La carte est un outil qui génère, d'un côté, une application et analyse locale (particularités propres à un terrain d'application) et de l'autre, un outil qui référence (à l'aide des atlas et autres modèles généraux) les combinaisons capables d'être reproduites dans le champ industriel. En positionnant les combinaisons dans la carte, on découvre comment pense et produit une société et un terrain, on recherche les zones non investies pour pouvoir décliner de nouvelles combinaisons et de nouveaux sens. Ce travail a été à la base de notre manière de penser/classer/modéliser la couleur et la carte est l'outil de dialogue entre les disciplines qui a permis de mener le travail.

4.4 PERCEPTIVE D'UN DESIGNER COULEUR POUR L'UPCYCLING

4.4.1 L'ANTI CLICHÉ DES COULEURS DU RECYCLAGE

Le rôle des designers est de proposer des solutions concrètes permettant de transformer nos déchets actuels en ressources pour l'avenir, car l'upcycling est non seulement une tendance actuelle mais aussi une perspective d'avenir. Depuis toujours, l'homme évolue dans un environnement coloré, ce qui a façonné une culture autour de la couleur avec des significations symboliques. Aujourd'hui, certains de ces symboles historiques subsistent et restent ancrés dans les cultures et les civilisations. Par conséquent, les préférences des adultes ne sont plus purement spontanées, mais influencées par les dynamiques sociales et imprégnées des traditions culturelles. [184] Comme dirait Michel Pastoureau : “ C'est la société qui fait la couleur, et non pas l'œil, le cerveau, la nature, la lumière, le pigment. ” [185]

La société d'aujourd'hui est structurée par les tendances saisonnières des diktats de la mode. Cependant, dans le domaine du recyclage, et plus particulièrement de l'upcycling, il est difficile de suivre ces types de prescriptions. L'observation de ces secteurs montre que les tendances y sont encore presque inexistantes. Au contraire, ce sont les pratiques de recyclage et d'upcycling qui se sont imposées comme des tendances à part entière. Le recyclage est devenu à la mode grâce à la prise de conscience éthique des consommateurs, qui choisissent ces produits pour leur aspect responsable plutôt que pour leur esthétique. L'aspect matière rentre en jeu car souvent mat, les gammes colorées de ces produits sont restreintes et cloisonnées dans l'idée de couleur “naturelle”, des “couleurs recyclées”. L'upcycling vise à revaloriser la matière, le travail de la couleur a donc une place primordiale car c'est la couleur de l'objet qui attire d'abord notre attention et suscite la première impression et la première émotion. Dans ce contexte, la couleur peut être considérée comme "recyclée", tout comme le matériau, souvent de teinte neutre, qui évoque le "naturel".

Par le biais des modèles et des cartes, le travail a permis de repérer les identités chromatiques portées par l'upcycling. C'est ainsi que nous pouvons maintenant comprendre le regard porté sur les couleurs de ce domaine.

• GAMME ET PALETTE DES COULEURS RECYCLES

La plupart de ces couleurs sont souvent jugées non-tendance ou perçues comme démodées, car elles proviennent de rébus ou de déchets. Des onze champs chromatiques (modèle linguistique porté par Annie Mollard-Desfour entre autres), c'est la palette des bruns qui trône dans ce domaine. Cependant, certaines teintes, comme le "brun naturel", sont spécifiquement choisies pour jouer sur des clichés et influencer le consommateur de manière subliminale, presque comme une forme de

manipulation. Par exemple, dans l’imaginaire collectif, le vert est souvent associé à l’idée d’écologie. En analysant les couleurs utilisées dans le recyclage à partir de la palette observée, on remarque qu’elles occupent une zone restreinte sur le cercle chromatique, allant du vert au brun, en passant par le vert-jaune.

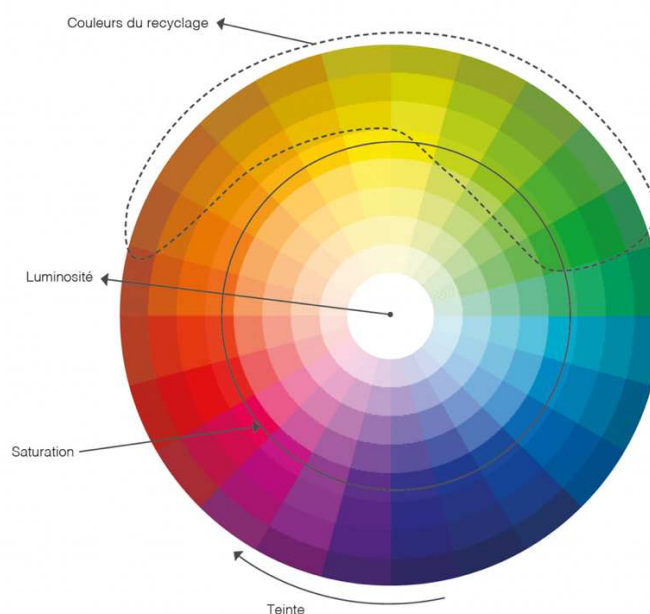


Figure 196 : Représentation des couleurs du recyclage [3]

Afin de répondre aux tendances du marché et aux enjeux environnementaux, de nombreuses alternatives au plastique ont émergé, telles que les bio-matériaux ou l’utilisation des matières naturelles. Ces matériaux permettent ainsi de réduire l’impact environnemental des produits finis. Toutefois, bien que des avancées notables aient été réalisées sur le plan des matériaux, on observe que la palette de couleurs reste encore très limitée et déconnectée des tendances actuelles.

Les couleurs de l’upcycling sont donc de plusieurs formes. D’abord issues d’une pensée des « couleurs naturelles » qui s’opposeraient à des couleurs dites artificielles et chimiques. Dans ce sens, la gamme identitaire se poserait sur la famille des bruns. Mais par l’usage de bio-matériaux et de matières naturelles complémentaires, on se rend compte qu’il serait réducteur de dire que l’upcycling se contenterait de couleurs neutres ou peu teintées. En effet, la palette peut être réellement élargie et comporte des caractères visuels spécifiques.

• LES COULEURS ANTI-TENDANCE

L'analyse de la palette des "couleurs clichés" du recyclage montre clairement qu'elles sont perçues comme "anti-tendance". Le gobelet en carton recyclé en est un exemple emblématique. L'upcycling et le recyclage partagent une problématique commune concernant la couleur. Les couleurs de l'upcycling sont celles du passé. Les matériaux utilisés ayant déjà une histoire, ils conservent souvent la couleur qu'ils avaient lorsqu'ils étaient à la mode. Cependant, une fois transformés en objets upcyclés, ces objets ne suivent pas les tendances actuelles ; ils forment des palettes de couleurs qui leur sont propres. Il semble que les objets issus de l'upcycling créent une sorte de tendance à part, mais pas une tendance esthétique : plutôt une "tendance morale" ou "éthique", née d'une démarche de responsabilité et de conscience environnementale. Le consommateur n'est pas attiré par la couleur en soi, mais par l'image de responsabilité que véhicule le produit. Quelles que soient les tendances en matière de couleurs et de motifs, elles sont rarement présentes sur les objets recyclés. Ces derniers semblent être contraints de rester fidèles à une certaine identité, en affichant des couleurs jugées "naturelles", comme s'ils étaient condamnés à rester dans une catégorie à part, marquée par leur caractère recyclé.

• DES DOMAINES CHROMATIQUES DITS « NATURELS »

Dans l'imaginaire collectif, les couleurs associées au recyclage et à l'upcycling sont souvent perçues comme des teintes "naturelles". L'impact d'une couleur est toujours influencé par le contexte dans lequel elle est perçue, car chaque couleur porte une signification. Ce contexte joue un rôle déterminant pour savoir si une couleur est jugée agréable et appropriée, ou au contraire, décalée et de mauvais goût. Toute symbolique est culturelle, car chaque société développe ses propres modes de vie et ses codes. Notre palette d'émotions est bien plus complexe que celle des couleurs, ce qui explique qu'une même couleur puisse évoquer des effets multiples, parfois contradictoires. Les couleurs sont porteuses de codes et de symboles auxquels nous réagissons de manière inconsciente, influençant nos comportements et notre façon de penser.

Le vert est une couleur ambivalente, se situant entre les teintes "chaudes" et "froides". À la fois naturelle et toxique, elle incarne des dualités comme le "vert sain" ou le "vert toxique". Autrefois, le vert était difficile à stabiliser en teinture, car il était chimiquement instable et se délavait rapidement. Cette symbolique s'est ancrée dans l'histoire européenne, notamment depuis l'époque romantique. En latin, viridis évoque l'énergie, la virilité et la sève. Les premières pharmacies ont adopté le vert pour leur croix, car les remèdes de l'époque étaient à base de plantes. Chez les Romains, le vert était déjà associé à Vénus, déesse des jardins, des légumes et des vignes.

Pour nous, occidentaux, le vert représente la nature, le printemps, la fraîcheur, la jeunesse, la propreté, la vivacité et la croissance. C'est aussi la couleur de l'espoir, de la chance, de la confiance et de la « transparence ». Dans les pays désertiques, tout endroit verdoyant évoque une oasis, un véritable paradis vert. Dans notre culture, le vert va au-delà de la simple couleur : il incarne l'essence même de la nature et symbolise le respect de l'environnement et l'écologie. Aujourd'hui, dans la société de consommation, l'adjectif "vert" est utilisé pour donner une connotation naturelle à de nombreux produits, suggérant qu'ils sont fabriqués à partir de composants écologiques ou biologiques. En 2017, le vert a été élu couleur de l'année par Pantone, avec le vert "Greenery", un vert frais légèrement teinté de jaune, symbolisant le désir de retour à la nature. Ainsi, le vert est devenu une couleur à la mode.

Le vert est également associé à des symboles plus négatifs, tels que l'immaturité, la toxicité, le poison, la moisissure, la putréfaction, ainsi que les créatures fantastiques et surnaturelles, qu'elles soient démoniaques ou mythologiques. Ce registre englobe des figures comme les "petits hommes verts", les nymphes, les sorcières, les elfes, les sirènes, les dragons, et bien d'autres créatures qui échappent à la nature humaine. Nombre d'animaux du bestiaire du Diable évoluent dans des milieux aquatiques, souvent associés à la couleur verte depuis le Moyen Âge. Ce vert est généralement perçu comme aqueux et visqueux, et est souvent décrit comme "verdâtre", une nuance jugée inquiétante et mortifère. Dans la Rome antique, les yeux verts étaient associés à une réputation négative, symbolisant la perversité et la débauche. À l'aube de l'industrie textile, le vert était une couleur instable, difficile à fixer sur les tissus, et avait tendance à devenir terne et délavée. Dans les bandes dessinées, le vert est fréquemment utilisé pour représenter le "mauvais" : il évoque les potions magiques, le poison, la moisissure, le vomi ou encore la puanteur. Le vert, ainsi, incarne des présages aussi bien positifs que négatifs. Il oscille entre périodes de mode et d'oubli, parfois admiré, souvent méprisé.

Le marron est une couleur peu appréciée, bien qu'omniprésente dans notre environnement et abondante dans la nature. Dans le langage courant, les objets de couleur marron ne sont pas souvent identifiés par leur nuance exacte. Le terme « marron » est apparu au XVIIIe siècle et tire son origine du fruit du marronnier, dérivé de la châtaigne. Il désigne un brun chaud légèrement teinté de rouge. Aujourd'hui, il est couramment utilisé pour désigner diverses nuances de brun, mais reste la couleur la moins prisée. Les concepts associés au marron sont souvent perçus de manière négative : il est fréquemment jugé « laid » et évoque un effet répulsif.

Le marron fait référence à des symboles contradictoires. Il renvoie à la terre et à des matériaux bruts comme le bois, le liège, le cuir ou le métal oxydé. Toutefois, il est davantage lié à des connotations

négatives, telles que la laideur, l'antipathie, le manque de sensualité, le non-comestible, le lugubre, le démodé, la vieillesse, la pauvreté et la précarité. Dans la nature, le marron est la couleur de la terre, mais aussi de ce qui se flétrit ou se décompose ; en pourrissant, les choses prennent une teinte marron. Cette couleur évoque presque instantanément la saleté, voire les excréments.

Au Moyen Âge, le marron était la couleur des vêtements des paysans et des mendiants, déjà perçue comme la plus laide. Ces vêtements étaient fabriqués à partir des déchets de laine de chèvre, de poils d'animaux comme le chevreuil ou le lièvre, ainsi que de chanvre brun. À une époque où la couleur des vêtements était fortement associée au statut social, le marron était sans équivoque un signe de faiblesse, de pauvreté et de précarité. Plus tard, ce sont les moines des ordres monastiques qui l'adoptèrent, en raison de leur vœu de pauvreté et d'humilité.

Autrefois, une peau « blanche » était perçue comme un signe de richesse et de beauté, tandis que les paysans, exposés au soleil, avaient la peau hâlée, synonyme de pauvreté. Ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale que le bronzage devient un symbole de statut social et d'idéal de beauté, représentant la possibilité de partir en vacances au soleil et au ski. Depuis, le bronzage est resté une norme esthétique, toujours valorisé aujourd'hui.

Malgré ses associations négatives, le marron est très apprécié en mode pour sa praticité, car il s'accorde facilement avec d'autres couleurs étant donné qu'il est issu d'un mélange de teintes variées. Il reste une valeur sûre dans l'habillement et l'ameublement. En décoration intérieure, le marron évoque des connotations positives telles que la chaleur et le naturel. Il renvoie aux matériaux bruts et rustiques, créant une atmosphère confortable et rassurante.

Dans le domaine de la mode, malgré ses connotations négatives dans d'autres contextes, le marron peut mettre en valeur un teint hâlé, rendant la peau encore plus bronzée, ce qui le rend populaire en été. En revanche, il n'est pas adapté aux tenues formelles ou de cérémonie, où il est perçu comme inélégant et trop ordinaire.

Dans le domaine capillaire, le brun est la couleur de cheveux la plus courante et n'a pas de connotation négative. C'est également la couleur des yeux la plus répandue, ce qui lui donne un caractère banal. En cosmétique, le marron est une couleur « neutre » et « naturelle », utilisée pour le teint, les yeux et même les lèvres. En cuisine, il évoque des saveurs intenses, comme le craqué, le grillé ou le caramélisé, et plus la nuance de marron est marquée, plus le goût de l'aliment semble prononcé.

Le marketing a contribué à ancrer dans l'esprit collectif l'idée que les couleurs liées au recyclage et à l'upcycling sont "naturelles". Cependant, leur passé, chargé de connotations et de références négatives, continue de les hanter. En général, le marron est une couleur d'origine, très

peu d'objets sont teints en brun, à l'exception de certains plastiques, où cette teinte est utilisée pour leur conférer un aspect plus naturel, mais cette uniformité de couleur reste rapidement identifiable. Dans la nature, les couleurs ne sont jamais uniformes : elles sont souvent tachetées, mouchetées ou veinées, ce qui leur confère un caractère unique et particulier.

Il est évident que les préférences pour les couleurs évoluent avec l'âge. Les enfants, par exemple, sont souvent attirés par des couleurs que les adultes n'apprécient pas ou qu'ils associent à des connotations négatives, comme le marron ou le noir. Malgré les croyances historiques qui marquent les couleurs au fil du temps, ces codes et symboles permettent une compréhension collective. Toutefois, il est aussi essentiel de savoir appréhender les couleurs avec spontanéité et une certaine innocence. Ainsi, il est crucial que le designer, qu'il soit spécialiste des couleurs ou des matériaux, soit conscient de l'histoire et des significations des couleurs. Cela lui permet de développer son travail de manière éclairée et d'apporter une innovation cohérente dans son domaine, en particulier dans l'upcycling.

4.4.2 CRÉER AVEC LES COULEURS DU RECYCLAGE

La couleur est si ancrée dans l'expérience humaine qu'elle s'impose comme un moyen naturel d'expression, que chacun emploie selon ses besoins. Bien qu'elle soit scientifiquement définie comme de la lumière, elle se manifeste dans la pratique, et particulièrement dans le design, comme une matière tangible. [3] “ Plus encore que de déterminer les valeurs d'une couleur en pot à préserver dans son application, la peinture industrielle est, avant d'être un film de recouvrement, “ une matière ”, “ une chose ” à restituer telle quelle ; non pas une couleur choisie en fonction d'une théorie de la couleur, mais une couleur matière dont l'usage est d'ordre de l'emprunt et de l'appropriation. ” [10]

• LA POSTURE ECONOMIQUE OBLIGEE

Les crises économiques qui frappent les sociétés de consommation, combinées aux conséquences de la surexploitation des ressources naturelles et à l'urgence d'un développement durable, ont encouragé l'essor de pratiques de récupération et de réutilisation d'objets ou de matériaux usagés. La fragilité de l'environnement s'impose peu à peu comme une préoccupation majeure, alors qu'il n'y a pas si longtemps encore, il était perçu comme une "terre nourricière" aux ressources infinies, capable de se régénérer indéfiniment, d'absorber tous les excès et de poursuivre son développement sans limites. [186]

Aujourd'hui, les études révèlent une vulnérabilité croissante des océans, de l'air, de la terre, de la faune et de la flore. Pourtant, les entreprises continuent de fonctionner selon des modèles établis bien avant la prise de conscience écologique. Elles se contentent de produire et de livrer des produits aux clients, sans s'interroger davantage sur les impacts. Ce modèle industriel repose sur une logique linéaire dite "du berceau au tombeau". Il est urgent d'opérer un changement, mais il doit cibler les véritables leviers, car se contenter de "faire moins pire" n'est pas une solution. "Plaçons des filtres dans nos esprits plutôt qu'à la sortie des tuyaux." [184]

C'est dans ce contexte économique et social qu'a émergé la notion d'upcycling. Cependant, souvent assimilé au recyclage classique, il souffre d'une image négative, perçu comme "moins qualitatif" et associé à une esthétique peu élaborée. Pour qu'un produit upcyclé soit reconnu comme un véritable produit de consommation attractif, un objet "tendance" ou attrayant, le rôle du designer couleur est crucial : l'enjeu est de séduire tout en sensibilisant. L'upcycling peut ainsi être valorisé et adopté de manière similaire à une marque populaire, tout en s'alignant sur les tendances actuelles. [3]

• CONTRAINTES ENTRE ANTI-TENDANCE ET TENDANCES DE MARCHÉ

Le monde de la mode n'est pas resté insensible au renouveau de cette tendance du recyclage et s'en est même emparé. Des sacs conçus à partir de chambres à air ou de voiles de bateaux, des ceintures de sécurité transformées en accessoires vestimentaires, ou encore des troussees réalisées à partir de vieux ballons de sport illustrent cette approche. Une démarche initiée par des créateurs qui insufflent une nouvelle vie aux matériaux et aux déchets, en les sublimant à travers des créations diverses, mais souvent en séries limitées voire en pièces uniques. Contrairement aux produits standards, les articles recyclés ne suivent pas systématiquement un "travail-couleur" aligné sur les tendances. Ils doivent jongler entre préserver l'aspect brut du matériau pour en souligner l'origine recyclée ou le retravailler afin de l'intégrer dans les codes de la mode actuelle.

• REPENSER LES CODES PAR LE « PROCESSUS INVERSE » :

LE MATÉRIAU-COULEUR COMME POINT DE DÉPART

« Jamais je n'ai vu la couleur seule, jamais. Je peux m'en représenter l'idée en imaginant la couleur comme si elle était une sorte de lumière sortant d'un projecteur de faisceaux colorés qui peindrait les objets du monde en même temps qu'elle les éclaire. Mais quand je rouvre les yeux, ou que je peins, la couleur est une partie insécable de l'objet ou de la matière que je vois. » citation de Dominique Figarella. [10]

En upcycling, il existe deux approches pour travailler la couleur. La première consiste à préserver l'apparence du matériau récupéré, en conservant à la fois sa surface brute et sa couleur d'origine. Ce choix peut être motivé par la volonté de maintenir l'authenticité du matériau, en respectant son histoire et son vécu. Cela implique de s'adapter aux caractéristiques et aux contraintes du matériau afin d'optimiser sa valorisation et de concevoir un nouveau produit.

La seconde approche pour traiter la couleur en upcycling consiste à transformer le matériau récupéré afin de mieux l'adapter à son nouvel usage et aux tendances actuelles. Dans ce processus de valorisation, il est essentiel d'intégrer des principes d'éco-conception pour éviter d'ajouter des impacts négatifs au nouveau produit. L'objectif est qu'à la fin de son cycle de vie, le produit puisse entamer un nouveau cycle, perpétuant ainsi une boucle durable. Il est donc crucial de valoriser le matériau de manière réfléchie, en maintenant une cohérence avec la démarche globale. Pour la recoloration, il existe des alternatives comme l'utilisation de produits naturels, plus respectueux de l'environnement et de la santé humaine. Quel que soit le procédé choisi, il doit s'inscrire dans une stratégie de valorisation durable et globale.

Quoi qu'il en soit, cette matière ou cet objet, tout en bénéficiant d'une "nouvelle vie", doit également pouvoir servir de matière première pour de futurs cycles et réintégrer la biosphère sans la polluer. Cet aspect doit être pris en considération lors du travail sur la couleur, car il va de soi que l'utilisation de produits toxiques pour l'ennoblissement, compromettrait les principes du développement durable. Une entreprise française s'est d'ailleurs penchée sur le développement de colorants écologiques via des procédés hybrides alliant fermentation industrielle et chimie organique. Parce que les colorants et pigments sont aujourd'hui majoritairement dérivés du pétrole, l'entreprise Pili développe des alternatives décarbonées à partir de ressources renouvelables, offrant ainsi des nouvelles solutions industrielles plus respectueuses de l'environnement.

Dans la pratique de l'upcycling, il est essentiel de repenser la matière et de considérer la couleur comme une composante intrinsèque du matériau. Ce matériau-couleur, considéré comme une ressource à part entière, est capable de devenir la base même de la création d'une forme. Gaetano Pesce, le célèbre designer plasticien, architecte, peintre, sculpteur, styliste et scénographe italien, incarne cette vision avec son goût affirmé pour l'innovation et son utilisation de matériaux inattendus. Reconnu pour son audace et pour bousculer les conventions, il a exploré de manière originale les possibilités offertes par des matériaux recyclés tels que le papier et le plastique. Partisan

des formes libres, il transforme les imperfections et les défauts de fabrication en signature d'authenticité, s'opposant à l'uniformisation des modèles standardisés de son époque.

« Pourquoi se cantonner aux matériaux traditionnels alors qu'il en existe tant d'autres à explorer ? » s'interroge-t-il. Pour lui, travailler la matière est comme un jeu, il aime la laisser évoluer de manière aléatoire et nous surprendre. Contrairement à la vision traditionnelle où la matière est dominée et maîtrisée, il la considère comme intelligente. En la manipulant, il découvre et perçoit des informations qu'il n'aurait pas saisies sans une véritable interaction avec elle. Il apprécie particulièrement de se laisser surprendre par les réactions de la matière. Dans l'upcycling, cette valorisation de la matière prend tout son sens et se retrouve dans l'importance accordée à la matière. Le « matériau-déchet » est souvent choisi dans sa globalité, sans distinction entre sa texture, sa couleur ou sa surface : il est intégré dans son ensemble. Ici, le matériau joue un rôle actif dans le processus créatif, plutôt que de se limiter à un rôle passif.

4.4.3 VALORISER LA POSTURE DE DESIGNER COULEUR DANS LE DOMAINE DE L'UPCYCLING

Le rôle du designer couleur est crucial dans le domaine de l'upcycling, car il intervient sur un enjeu fondamental : la valorisation de la matière première. Pour réussir cette mission, il est essentiel de comprendre pleinement la notion de "valoriser". Ce terme implique l'attribution d'une valeur ajoutée à un objet ou une matière. En économie, il désigne l'augmentation de la valeur marchande d'un produit. En esthétique, il évoque l'idée de mettre en valeur, de présenter sous un angle avantageux pour souligner les qualités ou d'accorder une importance particulière à un élément ou une personne. Étymologiquement, « valoriser » dérive du verbe « valoir », qui signifie avoir une certaine valeur, un certain prix ou intérêt. Valoriser revient donc à légitimer, à justifier cette valeur. Par extension, la notion de "valeur" peut se définir comme ce qui est digne d'estime, qu'il s'agisse d'un aspect moral, intellectuel, physique, ou encore du prix attribué à un objet. Dans un sens plus large, la valeur reflète également ce qui est perçu comme vrai, beau ou bon selon des critères individuels ou sociaux, devenant une référence ou un principe moral. L'expression « mettre en valeur » illustre l'idée d'accorder de l'importance, de faire ressortir ou fructifier un élément.

En économie, la valeur est souvent associée au prix d'échange ou de vente d'un bien, et le concept de "valeur ajoutée" désigne la différence entre la valeur d'un produit final et celle des ressources utilisées pour le créer. La valeur s'évalue par le prix d'échange ou de vente d'un objet, et le concept de « valeur ajoutée » désigne la différence entre la valeur finale d'un produit et celle des ressources utilisées pour le fabriquer. L'adjectif « valorisant » qualifie ce qui apporte ou augmente une valeur,

tandis que la « valorisation » se réfère à l'action d'accroître la valeur d'un bien, que ce soit par une intervention économique, esthétique ou philosophique.

Dans le contexte technique, la valorisation concerne aussi l'utilisation de déchets comme matière première, d'où découle le terme "revaloriser", qui signifie redonner ou accroître une valeur initiale. Le préfixe « re » évoque ici une idée de renouveau, tout comme dans le mot "recyclage", qui renvoie au fait d'intégrer un objet ou une matière dans un nouveau cycle. Le recyclage est aujourd'hui une pratique bien connue : qu'il s'agisse de verre, papier, plastique ou carton, ces matériaux se prêtent facilement à cette démarche. Les gestes de tri et la valorisation des déchets permettent ainsi de préserver les ressources naturelles tout en économisant de l'énergie. [3]

Lorsque l'on intègre une matière dans un nouveau cycle, est-elle nécessairement valorisée ? C'est précisément ici qu'intervient le rôle du designer couleur et matière, dont la mission est d'agir dans le processus de création pour déconstruire les idées reçues et les stéréotypes associés à l'univers chromatique du recyclage. Ce travail vise à repenser les codes en tenant compte des caractéristiques du matériau et de son « histoire ». L'upcycling, ou sur-cyclage, va au-delà du simple recyclage : il valorise ce qui est perçu comme un déchet en le transformant en un objet de valeur supérieure, alors que le recyclage se concentre sur la production de matériaux neufs à qualité équivalente à celle d'origine. Valoriser une matière usagée ne se limite pas à lui offrir une seconde vie ; il s'agit également de la rendre désirable aux yeux de son utilisateur. Le sur-cyclage est avant tout une philosophie porteuse de sens, qui insuffle une nouvelle vie à l'objet tout en revisitant ou détournant sa fonction initiale. Ce mouvement, à la fois solidaire, écologique et éthique, se veut aussi fédérateur, laissant une empreinte à la fois avant-gardiste et respectueuse de l'environnement. Il favorise les collaborations variées, mettant en lumière à la fois le savoir-faire des artisans et la créativité des designers. Le designer couleur et matière devient alors un explorateur de matériaux insolites, révélant des trésors d'inventivité. [3]

Marc de café, carlingues d'avion, papier journal recyclé, aujourd'hui, les designers s'inspirent de déchets industriels ou agroalimentaires pour créer de nouveaux objets. Cette approche innovante vise à limiter le gaspillage et la pollution tout en sublimant des matières premières souvent perçues comme banales. Les laboratoires de recherche et développement des grandes entreprises innovent également dans les techniques de recyclage. Chez Peugeot, par exemple, les ingénieurs travaillent sur un prototype haut de gamme révolutionnaire : un tableau de bord élégant fabriqué en papier recyclé. Baptisé « Newspaperwood » [187], ce matériau est fabriqué à partir de feuilles de journaux encollées et compressées autour d'un cylindre.

Le showroom de MateriO' [188], véritable caverne d'Ali Baba, abrite plus de 7000 matériaux extraordinaires. Cette matériauthèque en perpétuelle évolution explore des matières singulières et innovantes, avec pour objectif de réinventer la perception des déchets en leur offrant une seconde vie en tant qu'objets. La valorisation des matériaux commence ici, de manière concrète : les matériaux y sont exposés, référencés, présentés et photographiés pour accroître leur potentiel d'utilisation et sensibiliser les professionnels à leur diversité d'applications dans différents secteurs.

La notion de « valorisation » prend tout son sens lorsqu'il s'agit de réutiliser des matières généralement associées à une perception négative. Ces matériaux, souvent dépréciés dès l'origine, deviennent alors un point de départ idéal pour leur conférer une valeur ajoutée supérieure. Cette transformation, qui permet de révéler leur potentiel caché, s'accompagne d'une dimension morale en sensibilisant à l'importance de la réutilisation et de la métamorphose des matières banales. L'un des défis majeurs du designer couleur et matière est précisément de faire émerger cette prise de conscience, incitant les professionnels à engager des recherches approfondies sur ces opportunités. Une fois ces matériaux reconsidérés, leur image s'en trouve transformée, véhiculant une perception plus positive grâce à la reconnaissance de leur potentiel. Toutefois, il ne s'agit pas simplement de prolonger le cycle de vie d'une matière pour qu'elle finisse inexorablement en déchet (« du berceau à la tombe »), mais de repenser son usage pour en faire une ressource durable et réutilisable (« du berceau au berceau »). [3-186]

Le travail du designer couleur et matière consiste également à déshabiller couleurs et matériaux des connotations sociales ou des attentes mercantiles et publicitaires qui les limitent. Chaque matériau et chaque couleur semblent en effet enfermés dans une perception dictée par leurs usages initiaux, souvent déterminés par l'industrie. Pourtant, un simple changement de contexte peut suffire à révéler leurs qualités esthétiques, longtemps occultées par leur fonction courante. L'utilisation de matériaux détournés ouvre ainsi un champ élargi de possibilités, permettant de repenser les usages et de transformer notre regard sur des matières autrefois négligées. [3]

NOUVELLE MATERIOLOGIE

La société consumériste, marquée par les révolutions industrielles, a vu évoluer le métier de designer, qui est désormais confronté à une accélération des productions et des désirs matériels. Cette dynamique soulève la question de l'impact de l'environnement productiviste sur les pratiques créatives en design, remettant en cause les repères du concepteur dans un monde saturé d'objets et d'innovations.

Le design, bien qu'encore souvent perçu comme un simple embellissement ou un style artistique, doit être reconnu pour sa capacité à stimuler l'innovation industrielle. Il représente une possibilité de refonder une économie de la création axée sur les besoins réels de l'individu. Face aux crises écologiques, sanitaires et sociales, le design, notamment le design-couleur, devient un enjeu majeur pour l'avenir, en tant qu'outil pour "reprendre" le monde, en assurant la durabilité à travers des actions concrètes comme la maintenance, la réparation et l'innovation axée sur le bien-être.

Le design puise ses matériaux dans la terre, qui offre une vaste palette pour créer des produits et services durables, bénéfiques à la fois pour l'homme et la planète. Les couleurs bio-ressourcées, dérivées des minéraux, végétaux ou matières animales, trouvent leur origine dans cette terre, constituant une continuité entre nature et création. Les plantes, les éléments biologiques et les biodéchets, en plus de représenter un patrimoine historique et culturel, offrent des savoirs et des pratiques traditionnelles. Ainsi, la terre et ses ressources, cultivées comme un savoir, inspirent une approche du design qui pourrait redéfinir la conception de demain, en mettant l'accent sur la durabilité, la santé et le bien-être, en particulier dans le domaine du design-couleur.

La couleur influence divers domaines, fabriquée en petites ou grandes quantités selon les besoins et l'époque. Elle joue un rôle clé dans le marketing en influençant souvent l'acte d'achat, tout en symbolisant des culturalisations qui façonnent nos croyances et représentations. Par exemple, le « vert bio » est devenu une référence dans l'univers bio. Nous pensons la couleur par oppositions (couleurs chaudes/froides, chromatiques/achromatiques, naturelles/artificielles), mais cette vision doit être repensée, car de nombreuses palettes naturelles existent dans le monde animal et microbien. Enfin, la couleur normalise et codifie, servant de référence dans les sciences et les productions humaines, avec un grand potentiel pour les économies de consommation.

La couleur est un matériau de pensée et d'innovation clé pour le design biosourcé et la bioéconomie, contribuant au bien-être des citoyens et à l'ancrage des ressources locales. Elle joue un rôle à la fois poétique, symbolique, économique et dans la création d'emplois, tout en répondant aux défis mondiaux de demain. Le design-couleur utilisant les bio-ressources fait déjà ses preuves à

travers des méthodes de conception et de production circulaires, souvent menées par des start-up, des PME et des laboratoires de recherche, comme la Plateforme d'Innovation en Couleur-Design-Matière (PI-CDM) à Montauban et Toulouse. Ces circulations croisent savoirs anciens et innovations, en lien avec des enjeux écologiques, sociologiques et psychologiques, et prennent en compte les usagers. Le design-couleur intervient à deux niveaux : en « post-consommation » (après la production) pour maintenir et réparer, et en « pré-consommation » (avant la production) pour réutiliser les sous-produits et déchets industriels de manière plus « ingénierique ».

A. Post-consommation

Le design-couleur basé sur les bio-ressources, tel que le recyclage ou « réusage », valorise la réutilisation créative de matériaux existants, souvent dans une approche « *do it yourself* ». Des exemples incluent la teinture de textiles avec des pigments naturels, la fabrication d'objets ménagers à partir de vêtements usagés ou l'utilisation de déchets organiques pour des usages alternatifs. Ces pratiques, bien que souvent artisanales, se sont progressivement professionnalisées et industrialisées.

Le recyclage n'est pas simplement une mode éphémère, mais comme une manière de penser qui s'inspire de pratiques ancestrales adaptées aux technologies modernes. Si les couleurs du recyclage sont encore associées à une esthétique "naturelle", cette perception pourrait évoluer avec le développement des matières premières de seconde main. Pour favoriser cette transition, une éducation au goût et une révision des codes esthétiques devront être mises en place, engageant tant les consommateurs que les marques dans cette démarche innovante.

B. Pré-consommation

Le surcyclage ou upcycling est un régime de conception né dans les années 1980 et repris en 2002 dans le livre *Cradle to Cradle*. Il consiste à transformer des objets usagés ou inutilisables en de nouveaux produits, non seulement en récupérant leurs matériaux mais en réinventant leur fonction à travers des procédés innovants. Cette approche permet de créer des filières circulaires, alliant techniques anciennes et nouvelles technologies, pour générer des objets fonctionnels à partir de matières premières quotidiennes, comme le marc de café transformé en arts de la table.

L'upcycling dépasse le recyclage traditionnel souvent perçu comme du bricolage en offrant une re-conception totale des matériaux et de leurs usages, entraînant une métamorphose de la couleur et de la matière. Bien que les couleurs issues de l'upcycling puissent sembler altérées, la technologie permet de recréer des nuances innovantes, enrichissant ainsi notre perception de la couleur. Ce processus remet en question les normes traditionnelles de couleur et de fonction, perturbant les oppositions classiques entre couleur et non-couleur.

L'upcycling interroge aussi nos pratiques de consommation, de création et de commercialisation, appelant à une nouvelle pédagogie pour sensibiliser les consommateurs aux couleurs et matériaux du futur. Il pousse les designers à repenser leurs approches, en prenant en compte les inégalités chromatiques, les matériaux irréguliers et les valeurs sociales et écologiques associées à ces innovations.

C. Enjeux de la nouvelle-consommation

L'innovation en design-couleur nécessite une approche collaborative et interdisciplinaire. Un designer seul ne peut créer une véritable innovation, car le processus de brevetage exige souvent des compétences technologiques que le design seul ne peut fournir. Pour réussir à introduire une nouvelle couleur-matière sur le marché, il est essentiel de travailler avec des experts comme des chimistes et des ingénieurs. Le design biosourcé, qui implique des matériaux provenant de la nature, est de plus en plus exploré par des étudiants, chercheurs, collectivités et industriels du monde entier. Cependant, pour que ces innovations atteignent le marché, le designer doit surmonter des obstacles juridiques, économiques et politiques en s'associant à divers partenaires. Les nouvelles couleurs et matériaux biosourcés, provenant d'algues, de micro-organismes et d'autres ressources naturelles, imposent une refonte de nos pratiques et de nos représentations culturelles de la couleur, afin de réinventer la création et de rendre ces innovations accessibles aux usagers et consommateurs.

Le design, et en particulier le design-couleur, est souvent perçu comme un simple embellissement ou un moyen d'inventer pour la masse, mais dans sa forme biosourcée, il représente un moteur d'innovation et de recherche industrielle. Il offre une vision pour repenser une économie créative centrée sur les besoins réels de l'individu. Le design-couleur joue un rôle clé dans la redéfinition de nos usages et habitudes, en intégrant des pratiques plus durables. Pour que la couleur biosourcée pénètre les marchés, elle doit être testée à grande échelle, et une approche globale, collaborative entre designers et partenaires, est essentielle pour relever les défis écologiques, techniques et structurels tout en développant une pédagogie de création-recherche.

4.5 CONCLUSION SUR LA POSTURE DU DESIGNER CHERCHEUR

Le designer-couleur joue un rôle fondamental dans la création et la valorisation de matériaux innovants, en repoussant les limites de l'expérimentation pour générer des solutions esthétiques et fonctionnelles. À travers son approche créative, il tisse des liens entre les différents acteurs du processus de conception, tout en contribuant à la démocratisation de pratiques telles que l'upcycling. En intégrant la couleur et la matière dans un dialogue cohérent, il influence non seulement la perception sensorielle, mais aussi les codes culturels et symboliques associés aux produits. L'expérimentation chromatique, loin de se limiter à l'esthétique, devient un langage porteur de sens et d'émotion, redéfinissant les représentations traditionnelles et contribuant à une nouvelle vision de la durabilité. En jouant avec les matériaux et leurs propriétés, le designer crée des objets qui éveillent les sens et stimulent l'imaginaire collectif, tout en répondant aux défis écologiques et sociétaux contemporains.

Le design-couleur se développe au carrefour de nombreuses disciplines, où la collaboration et l'intégration des savoirs permettent d'atteindre une vision plus globale et cohérente. L'interdisciplinarité, en particulier au sein d'instituts du CNRS, a pris une place centrale dans la recherche, influençant tant les projets que les parcours des chercheurs. Toutefois, cette pratique suscite encore des interrogations sur sa définition, son évaluation et sa promotion.

Les disciplines, bien qu'ancrées dans des bases épistémologiques spécifiques, sont aussi façonnées par des facteurs sociaux et institutionnels. La clarification des concepts de multidisciplinarité, interdisciplinarité et transdisciplinarité permet d'établir des objectifs partagés dès le début des projets, mais les frontières restent floues malgré les efforts du CNRS depuis les années 70. L'absence d'une définition précise de l'interdisciplinarité complique la structuration et l'évaluation de la recherche dans ce domaine. La création d'un environnement propice à l'interdisciplinarité, par le recrutement de profils variés et l'ouverture des équipes de recherche à de nouvelles collaborations, est essentielle pour encourager cette dynamique.

En dépit des défis rencontrés, des exemples réussis montrent que l'interdisciplinarité, lorsqu'elle est soutenue et bien intégrée, elle peut être une véritable source d'innovation et d'avancées scientifiques, servant ainsi de modèle pour les futures pratiques de recherche collaborative.

Ce processus, comme le souligne Bruno Latour, nécessite un travail collectif, où le designer-couleur s'impose comme un acteur central, capable de naviguer entre les mondes sociaux, scientifiques et économiques. Ainsi, la couleur, portée par une démarche de création collaborative et

inclusive, devient un outil puissant pour repenser la consommation, l'innovation et les rapports entre l'homme, l'objet et son environnement.

Les modèles sont des outils essentiels pour simplifier, structurer et clarifier les processus complexes dans de nombreux domaines, y compris en arts et design. La couleur, en tant qu'élément central dans la création, peut être abordée de deux manières distinctes mais complémentaires : la réticulaire, qui cherche à établir des systèmes universels comme la colorimétrie et les atlas, et la territoriale, qui s'intéresse aux spécificités locales et matérielles, créant ainsi des systèmes sensibles et singuliers.

Les travaux de terrain, comme ceux réalisés avec Api'Up, illustrent comment ces approches peuvent être mises en œuvre dans des contextes pratiques, en équilibrant la précision scientifique et la dimension sensorielle. Le modèle territorial de Jean-Philippe Lan clos et la méthode de Shigenobu Kobayashi apportent également une réflexion plus approfondie sur la manière dont la couleur peut être perçue et utilisée de manière contextuelle, en fonction des cultures, des matériaux et des émotions qu'elle suscite.

Ainsi, ces approches offrent des perspectives variées et riches, permettant au designer-couleur d'interroger et d'enrichir sa pratique, tout en créant des systèmes qui allient universalité et singularité. La couleur devient alors un langage à la fois scientifique et sensible, un vecteur d'émotion et d'identité, façonné par les contextes et les pratiques.

Le rôle du designer aujourd'hui dépasse largement celui de créateur esthétique : il est un acteur clé dans la transformation des pratiques de consommation et de production, en particulier dans le domaine de l'upcycling. À travers cette approche, les designers cherchent à donner une nouvelle vie aux matériaux et objets usagés, en les revalorisant et en les réintégrant dans des cycles de consommation durables. En s'appuyant sur des principes éthiques et écologiques, l'upcycling devient une alternative non seulement à la production de masse, mais aussi aux tendances éphémères dictées par la mode, où la couleur joue un rôle crucial.

Les couleurs associées aux produits recyclés et upcyclés, souvent perçues comme "naturelles" ou "anti-tendance", portent des connotations négatives, parfois liées à une histoire et des symboliques culturelles profondes. Toutefois, ces couleurs peuvent être repensées et réinventées par les designers pour rendre les objets recyclés non seulement fonctionnels mais également désirables et contemporains. Cette démarche implique une transformation des perceptions culturelles et des codes chromatiques traditionnels, redéfinissant l'esthétique du recyclage et de l'upcycling dans un cadre moderne.

L'innovation dans le domaine de la couleur et du design, notamment à travers des matériaux biosourcés et des colorants écologiques, s'inscrit dans une démarche de durabilité et de responsabilité sociale. Ces innovations, en lien avec la bioéconomie, proposent des solutions qui respectent les principes du recyclage et de l'upcycling tout en créant de nouvelles possibilités créatives. Le designer-couleur devient alors un acteur essentiel dans la transition vers une économie circulaire, en transformant non seulement les matériaux mais aussi la manière dont la société perçoit et valorise la couleur et la matière.

Ainsi, le design-couleur se positionne comme un catalyseur d'innovation, où la couleur, loin d'être un simple outil esthétique, devient un levier puissant pour imaginer un avenir plus durable et responsable. L'enjeu est désormais de repenser les relations entre matière, couleur et société, pour offrir des produits qui soient à la fois esthétiques, fonctionnels et respectueux de l'environnement, tout en contribuant à un changement profond des pratiques de consommation et de production.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet de thèse s'inscrit dans une démarche ambitieuse, visant à repositionner les pratiques de l'upcycling au sein de l'industrie de manière écoresponsable et innovante. En s'appuyant sur une approche interdisciplinaire combinant physico-chimie, design et ingénierie, cette recherche met en avant l'importance d'une valorisation poussée des matières premières récupérées, et ce, grâce à une collaboration entre chercheurs, designers et entreprises. La mise en valeur des matériaux recyclés, du cuir au textile, et leur transformation en objets esthétiques et fonctionnels témoignent de l'avancée de cette recherche vers des solutions industrielles viables, répondant à la fois aux exigences environnementales et aux attentes du marché.

À travers un partenariat solide avec l'entreprise Api'Up et la plateforme Xylomat IPREM, cette recherche a non seulement permis de développer des procédés novateurs pour l'industrialisation de matériaux recyclés, mais elle a aussi contribué à faire évoluer les perceptions autour de l'upcycling, en enrichissant la démarche d'une esthétique contemporaine et écoresponsable.

Le projet met également en valeur le rôle du designer couleur et matière, qui s'avère central dans ce processus, comme médiateur et innovateur, capable de donner une seconde vie aux déchets en les transformant en produits attractifs et valorisés. En tissant des liens entre les aspects scientifiques, techniques et esthétiques du matériau, il permet la création de produits à forte valeur ajoutée. Il contribue à faire évoluer la perception des matériaux issus de déchets et à intégrer ces matières dans une économie circulaire viable.

L'upcycling, loin d'être une simple tendance, constitue une véritable stratégie industrielle et culturelle. L'étude des propriétés de nouveaux matériaux et le développement de teintures naturelles dans cette thèse, démontrent que l'upcycling est un levier puissant pour promouvoir une économie circulaire et collaborative. Ce projet s'inscrit ainsi dans une démarche d'amélioration continue, en anticipant les défis techniques et en optimisant les procédés pour une production durable. Il pose les bases d'une réflexion durable et esthétique pour le design industriel de demain, où le déchet n'est plus une fin mais un point de départ pour des créations porteuses de sens et de valeur ajoutée.

Cette approche, inspirée par le célèbre adage de Lavoisier, « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme », nous invite à réévaluer notre relation aux matériaux et aux objets. Elle nous rappelle que l'avenir de la création et de la consommation durable repose sur la capacité de valoriser les ressources existantes, en conjuguant innovation, esthétisme et respect de l'environnement.

La désignation des couleurs par des mots est un domaine vaste et complexe, illustrant une profonde interconnexion entre perception sensorielle, linguistique et symbolisme culturel. Les

couleurs ne se limitent pas à des impressions visuelles ; elles incarnent une pluralité de significations, influencées par des contextes historiques, culturels et sociaux. L'étude de la terminologie des couleurs met en lumière la subjectivité intrinsèque à la nomination des couleurs et la difficulté de les classer de manière universelle. La nomination des couleurs révèle non seulement notre perception du monde visible, mais aussi la manière dont nos sociétés attribuent des valeurs symboliques aux teintes, en fonction des matériaux, des émotions ou des archétypes culturels. Cette pluralité rend la dénomination difficile à normer, car chaque culture et chaque époque s'approprie les couleurs différemment, enrichissant le lexique chromatique de termes qui échappent souvent aux codifications scientifiques. L'approche systématique, bien qu'indispensable pour la précision, est souvent entravée par la subjectivité inhérente à la perception humaine.

La nomenclature des couleurs est donc à la fois une science et un art, un champ où la rigueur des classifications côtoie la richesse des expériences humaines. Dans ce domaine, le langage devient non seulement un outil de description, mais aussi un véhicule d'émotions, d'identité et de compréhension collective, illustrant à quel point notre relation avec les couleurs est aussi variée que complexe.

En explorant cette interaction entre langage et couleur, nous découvrons que la perception chromatique est profondément ancrée dans notre expérience collective, tout en restant singulière pour chaque individu. Ce phénomène souligne l'importance d'une approche interdisciplinaire pour appréhender les relations entre couleur, langage et culture. Les défis posés par la diversité des dénominations et des classifications illustrent la nécessité d'une réflexion continue sur notre façon de nommer et de ressentir la couleur dans un monde en constante évolution.

La richesse lexicale entourant les couleurs témoigne de leur place centrale dans notre culture, révélant comment les dénominations peuvent porter des significations variées selon les contextes sociaux et historiques. L'influence des pratiques commerciales et des médias sur l'évolution des termes chromatiques démontre que la langue des couleurs est en perpétuelle transformation, s'adaptant aux tendances sociétales et technologiques.

En fin de compte, nommer une couleur est bien plus qu'une simple désignation : c'est un acte de communication qui relie des expériences individuelles à une compréhension collective, illustrant la richesse de notre interaction avec le monde chromatique.

Le projet d'optimisation du recyclage des déchets de cuir pour la création de panneaux acoustiques et rigides présente des avancées prometteuses, notamment avec l'introduction du matériau GRANISPHER dans la gamme de produits API'UP. Les panneaux réalisés ont démontré des performances satisfaisantes en termes de résistance mécanique, d'acoustique et d'esthétique,

tout en permettant la création de nouveaux éléments de mobilier. Les modules EQUINOX, commercialisés sous la marque OSPHER, témoignent de son potentiel en tant que produit fini. L'obtention du brevet FR3110485 (B1) confirme l'originalité de la méthode et ouvre la voie à une exploitation industrielle élargie.

Les nombreuses expérimentations et optimisations ont permis de relever des défis techniques, et de démontrer le potentiel de ces panneaux en termes de performances mécaniques, acoustiques et esthétiques, ouvrant ainsi la voie à des produits innovants et écoresponsables. Ces expérimentations ont permis d'optimiser certains aspects du processus, comme le tri des couleurs, qui s'est avéré crucial pour garantir une reproductibilité chromatique et faciliter l'intégration de nouveaux coloris. Les résultats ont également mis en évidence des défis techniques liés aux variations de densité, aux pressages à haute température, et aux conditions d'encollage, en particulier pour les panneaux rigides où la formation de bulles d'air reste une contrainte à maîtriser. Par ailleurs, les essais à différentes températures et les formulations de colle montrent des pistes pour améliorer la résistance mécanique et la stabilité des panneaux, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour optimiser les paramètres de fabrication et stabiliser la production à grande échelle.

En poursuivant les recherches sur les formulations et les procédés, le contrôle de l'humidité, la gestion des températures ainsi que la réduction d'énergie, il devrait ainsi être possible de renforcer la qualité des panneaux. Notamment en matière de durabilité et de robustesse pour des applications plus exigeantes, tout en réduisant l'impact environnemental du procédé.

La prochaine étape consistera à explorer davantage les applications structurelles du matériau en créant des prototypes d'éléments de mobilier et en adaptant les formulations pour optimiser la durabilité et l'esthétique des panneaux dans divers contextes. Les autres pistes envisagées pour l'avenir, telles que l'étude acoustique en chambre, les mesures colorimétriques et la coloration naturelle, pourraient étendre les usages de ces panneaux et affiner leur attrait esthétique.

Ce projet pose les bases d'un modèle innovant de valorisation des déchets de cuir, alliant performance et durabilité dans une approche circulaire, et contribuant à élargir les possibilités d'utilisation de matériaux upcyclés dans l'industrie du design et de l'ameublement. Le projet de développement des panneaux composites textiles pour API'UP a permis d'atteindre les objectifs du cahier des charges, avec un matériau capable de répondre aux exigences mécaniques et esthétiques nécessaires. Cependant, des marges de progression subsistent, en particulier sur les paramètres de fabrication. Les essais effectués ont mis en évidence l'importance d'un contrôle rigoureux de la température et de la pression pour éviter les défauts de surface et garantir l'homogénéité du matériau.

Bien que les premiers prototypes, intégrés dans une chaise présentée à la Paris Design Week, aient prouvé la faisabilité du procédé, l'optimisation des conditions de pressage et de refroidissement, ainsi que la recherche de solutions pour minimiser les imperfections, restent nécessaires. Des ajustements sur la fabrication, la densité optimale ainsi que l'étude approfondie de la cinétique de coloration sont essentiels pour garantir des performances de résistance et un aspect visuel conformes aux standards souhaités. Pour le contrôle des variations de couleur et la prévention des tâches, une étude plus approfondie des températures de pressage et de l'ordre des étapes d'usinage sera nécessaire. Enfin, l'intégration d'un moule adapté et d'un nuancier de teintes pourra renforcer la précision et l'uniformité des produits futurs, en vue d'une éventuelle production à plus grande échelle.

Le projet de recherche sur le bois teinté a démontré le potentiel des teintures biosourcées pour valoriser le bois dans une démarche novatrice et durable. Les essais, basés notamment sur des extraits de châtaigner et de bourdaine, ont permis de mieux cerner les processus chimiques en jeu et de valider l'efficacité de la méthode de décoction, prometteuse pour une application industrielle. Ce travail a également souligné la complexité de la teinture naturelle, en raison des nombreuses variables qui influencent la stabilité et la durabilité des couleurs, comme la nature du bois, l'exposition à la lumière, et les procédés d'application.

Les résultats obtenus, bien que préliminaires, sont prometteurs pour une future industrialisation de ce procédé, notamment par des améliorations comme l'optimisation des méthodes d'extraction et la réduction des résidus insolubles. Les résultats obtenus ne se limitent pas à la couleur : ils mettent en lumière les multiples qualités du bois, un matériau traditionnel dont les propriétés thermiques, acoustiques et sensorielles répondent aux besoins contemporains en matière de bien-être et de confort. En intégrant des teintures végétales sur du bois upcyclé, ce projet contribue également à la santé humaine en explorant les bienfaits de la couleur sur le plan physique et psychologique, comme en témoigne le concept de « care design ».

La création d'un nuancier commercialisé permettra par ailleurs de répondre aux attentes croissantes de consommateurs en quête de produits esthétiques et respectueux de l'environnement. Ainsi, ce projet jette les bases d'une nouvelle approche de la teinture végétale appliquée au bois, offrant des perspectives prometteuses pour des aménagements intérieurs harmonieux et durables, qui allient esthétique, bien-être et responsabilité environnementale.

Le designer couleur va au-delà de l'esthétique en devenant un acteur clé de l'innovation durable et culturelle. Par son approche collaborative et ses expérimentations, il réinvente la relation entre couleur, matière et société, créant des objets alliant fonctionnalité, émotion et responsabilité écologique. Il intègre des pratiques comme l'upcycling et explore des dimensions sensorielles et

symboliques, réinventant les codes traditionnels face aux enjeux contemporains. Ainsi, il façonne un avenir plus harmonieux et durable.

Croisant différentes disciplines pour favoriser l'innovation et la transformation des pratiques, le design chercheur incarne l'interdisciplinarité. Des initiatives collaboratives, comme celles du CNRS, démontrent que ce domaine stimule la recherche et les nouvelles approches, contribuant à une vision globale des enjeux actuels. Bruno Latour souligne le rôle crucial du designer couleur en tant que médiateur entre les dimensions sociales, scientifiques et économiques, en intégrant la couleur dans une démarche collaborative. Elle devient un outil stratégique pour transformer la consommation, stimuler l'innovation et réinventer les relations entre l'humain, les objets et leur environnement.

Les modèles réticulaire et territorial illustrent l'équilibre entre universalité et spécificité contextuelle dans l'exploration de la couleur, facilitant la structuration des processus créatifs. Des projets comme ceux d'Api'Up, permettent au designer-couleur de créer des systèmes où la couleur est à la fois universelle et singulière, porteuse d'émotions et de sens.

Dans l'upcycling, le designer dépasse le rôle esthétique pour devenir un acteur de la transition vers des pratiques durables, en réinventant les usages des matériaux usagés et en redonnant vie à des objets. Grâce à un travail sur les couleurs, souvent stigmatisées culturellement, il réinvente l'esthétique du recyclage, rendant ces objets désirables et adaptés aux exigences modernes.

L'innovation dans la couleur et le design répond aux défis de durabilité et de responsabilité sociale. En intégrant des matériaux écologiques et biosourcés, le designer-couleur allie créativité, respect de l'environnement et économie circulaire, transformant la perception de la matière et de la couleur en leviers de changement culturel et économique. Il devient ainsi un catalyseur d'innovation, façonnant un avenir où les produits allient esthétique, fonctionnalité et respect des ressources.

Ce travail de recherche est un exemple parmi d'autres, qui ouvre la voie à de nouvelles pratiques interdisciplinaires. L'accent mis sur l'optimisation du recyclage et sur l'amélioration des formulations souligne un engagement à développer des matériaux toujours plus performants et respectueux de l'environnement. API'UP dispose ainsi des fondations pour innover davantage et élargir l'application de ses matériaux dans l'ameublement, l'acoustique et potentiellement l'isolation thermique, contribuant ainsi à une économie circulaire exemplaire dans le secteur de l'upcycling industriel.

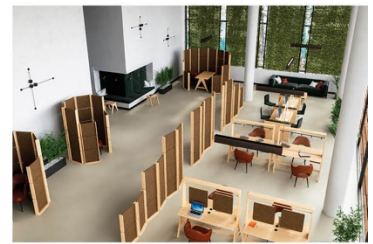


Figure 197 : Présentation globale de la marque Ospher

VALORISATION DES TRAVAUX

ARTICLES

- Revue ISTE, Colorants biosourcés pour une industrie de la couleur textile plus verte : cas de la synthèse enzymatique pili©, Estelle Guerry ¹, Léa Diaz², Juin 2024
- Actes des 9èmes journées scientifiques du GDR 3544 sciences du bois, Développement d'un nouveau matériau composite à base de déchets industriels de cuir et de colle à bois, Diaz Léa¹, LEROYER Léo¹, CHARRIER Bertrand¹, FERNANI Valérie², Novembre 2020
- Actes des 10èmes journées scientifiques du GDR 3544 sciences du bois, Développement d'une teinture naturelle pour le bois à base de colorants végétaux, Diaz Léa¹, LEROYER Léo¹, CHARRIER Bertrand¹, FERNANI Valérie², Novembre 2021
- Actes des 11èmes journées scientifiques du GDR 3544 sciences du bois, Optimisation et étude de vieillissement de teintures végétales pour le bois, Diaz Léa¹, LEROYER Léo¹, CHARRIER Bertrand¹, FERNANI Valérie², Novembre 2022

POSTERS ET CONFÉRENCES

- Journée d'étude « Tonalité bleu, blanc rouge...universalité ou singularité(s) du terrain », présentation orale « Recherche et développement de nouveaux matériaux à partir de déchets industriels upcyclés », Université Toulouse Jean Jaurès, Mai 2024
- 11^e journées scientifiques du GDR 3544 sciences du bois, présentation d'un poster « Optimisation et étude de vieillissement de teintures végétales pour le bois », Université de Nice, Novembre 2022
- 10^e journées scientifiques du GDR 3544 sciences du bois, présentation d'un poster « Développement d'une teinture naturelle pour le bois à base de colorants végétaux », Université de Montpellier, Novembre 2021
Récompense : Prix du meilleur poster
- 9^e journées scientifiques du GDR 3544 sciences du bois, présentation d'un poster « Développement d'un nouveau composite à base de déchets industriels de cuir et de colle à bois », Novembre 2020

Tous les articles et posters sont présentés en annexe n°5 et n°6.

FORMATIONS

- Formation à la recherche documentaire et à la publication scientifique, septembre 2020, 12h
- Ma thèse en 180 secondes, 2020/2021, 40h

Finale régionale du concours à La Rochelle

- Cours d'anglais - Campus de Mont de Marsan, novembre 2021-janvier 2022, 17 heures
- Stage voix et gestes - Pau Session SEA, 21- 23 juin 2022, 20 heures
- Enseignement mode d'emploi, 5-6 juillet 2022, 14 heures
- Intégrité scientifique dans les métiers de la recherche, 01-02 décembre 2022, 15 heures
- Gestion du temps, 27 janvier 2023, 6 heures
- Comment valoriser son doctorat, 11 juillet 2024, 4 heures

ENSEIGNEMENTS ET ENCADREMENT

- 180 heures d'enseignement à IUT des Pays de l'Adour de Mont de Marsan
- Animation d'un workshop e 24 heures à l'ISCID de Montauban

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Les déchets plastiques - notre-environnement. (n.d.). <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/les-dechets-ressources/article/les-dechets-plastiques> (accessed October 24, 2024).
2. Graphique: Le monde est inondé de déchets plastiques | Statista. (n.d.). <https://fr.statista.com/infographie/32378/production-mondiale-dechets-plastiques/> (accessed October 25, 2024).
3. L. Diaz, *Upcycling : Enjeux et posture du designer couleur et matière* (2019).
4. Pôle éco-conception, La démarche d'éco-conception. (n.d.). <https://www.eco-conception.fr/static/une-demarche-deco-conception.html> (accessed October 11, 2023).
5. Wikipédia, Développement durable. (n.d.). https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9veloppement_durable (accessed October 11, 2023).
6. Pôle éco-conception, L'éco-conception. (n.d.).
7. Humberto et Fernando Campana — Wikipédia. (n.d.). https://fr.wikipedia.org/wiki/Humberto_et_Fernando_Campana (accessed September 5, 2023).
8. L'Eco design par Fernando et Humberto Campana - Blog Esprit Design. (n.d.). <https://blog-espritdesign.com/maison/exterieur/leco-design-par-fernando-et-humberto-campana-370> (accessed September 5, 2023).
9. Rencontre avec Gaetano Pesce, designer libre - YouTube. (n.d.). <https://www.youtube.com/watch?v=6bqHSALdbcc> (accessed September 5, 2023).
10. C. BRIAND-PICARD & A. Perrot, *La couleur importée*, Positions (2002).
11. C. Salmon-Legagneur, *Les leviers technologiques pour mettre en oeuvre une mode circulaire* (2020).
12. M. Dérivé, *Que Sais-je ? La couleur* (Presses universitaires de France, 2014).
13. Comment fonctionne la vision ? - Hôpital ophtalmique Jules-Gonin. (n.d.). <https://blog.ophtalmique.ch/2020/12/02/comment-fonctionne-vision/> (accessed July 13, 2023).
14. Théorie de Young–Helmholtz — Wikipédia. (n.d.). https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_de_Young%E2%80%93Helmholtz (accessed October 6, 2024).
15. J. Albers, *L'interaction des couleurs*, Hazan (2021).
16. R. Sève, M. Indergrand, & P. Lanthony, *Dictionnaire des termes de la couleur*, Sepia-Terra Rossa (2007).
17. Farbsysteme in Kunst und Wissenschaft « colorsystem. (n.d.). https://www.colorsistem.com/?page_id=551 (accessed June 23, 2023).
18. E. (1786-1889). A. du texte Chevreul, De la loi du contraste simultané des couleurs et de l'assortiment des objets colorés, considérés d'après cette loi dans ses rapports avec la peinture, les tapisseries... / par M. E. Chevreul ; avec une introd. de M. H. Chevreul fils. (1889).
19. R. Sève, *Science de la couleur, aspects physiques et perceptifs*, Chalagam (2009).
20. Colorimètre ou spectrophotomètre ? | X-Rite. (n.d.). <https://www.xrite.com/fr-fr/blog/colorimeter-vs-spectrophotometer> (accessed September 1, 2023).
21. Qu'est-ce qu'un spectrophotomètre ? | X-Rite. (n.d.). <https://www.xrite.com/fr-fr/learning-color-education/other-resources/what-is-a-spectrophotometer> (accessed October 11, 2023).

22. Ci62 | Spectrophotomètres à sphère portables | X-Rite. (n.d.). <https://www.xrite.com/fr-fr/categories/portable-spectrophotometers/ci6x-family/ci62> (accessed October 11, 2023).
23. G. Janin, J. Goncalvez, R. Ananías, B. Charrier, G. F. Da Silva, & A. Dilem, Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry : Part 1. colorimetry theory for the CIELab system. *Maderas. Ciencia y tecnología*, **3** (2001) 03–13. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100001>.
24. R. Sève, *Physique de la couleur, de l'apparence colorée à la technique colorimétrique*, Masson (1996).
25. I. Brémaud, D. Cardon, B. Bernadette, P. Cabrolier, D. Guibal, & P. Langbour, *Colorimétrie des bois : diversité du matériau et complexité de son apparence* (2021).
26. M. R. Luo, Development of colour-difference formulae. *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, **32** (2002) 28–39. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2002.tb00248.x>.
27. M. Hauptmann, H. Pleschberger, C. Mai, J. Follrich, & C. Hansmann, The potential of color measurements with the CIEDE2000 equation in wood science. *European Journal of Wood and Wood Products*, **70** (2012) 415–420. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0575-6>.
28. B. Buchelt & A. Wagenführ, Evaluation of colour differences on wood surfaces. *European Journal of Wood and Wood Products*, **70** (2012) 389–391. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0545-z>.
29. W. Mokrzycki & M. Tatol, *Color difference Delta E-A survey Colour difference $\Delta E-A$ survey* (2014).
30. C. Caumon, *Lumière sur la couleur*, Edition de Monza (2010).
31. Collectif, *Couleur mouvement couleurs locales*, Rouergue (2004).
32. K. Azzouz, *Esthétique et poétique de la coloration dans l'architecture traditionnelle et contemporaine dans les villes du sud tunisien* (2014).
33. Collectif, *Couleur et mouvement, couleurs locales*, Rouergue (Seppia Couleur et Design, 2004).
34. M. Foucault, *Les mots et les choses; une archéologie des sciences humaines*. (Gallimard, 1966).
35. C. Caumon, *Nommer la couleur : Usages et pratiques prospectives en cosmétiques*. (2007).
36. B. Berlin & P. Kay, *Basic Color Terms: Their Universality and Evolution*. (1969).
37. A. Mollard-Desfour, *Le Bleu - Le Dictionnaire des mots et expressions de couleur.*, CNRD editions (1998).
38. Robert Sève, *Donner leur nom aux couleurs Dénomination des couleurs évaluées par colorimétrie*, Lexitis (2016).
39. CTC, *Le cuir dans tous ses états*, CTC (2016).
40. D. Bregnbak, J. D. Johansen, M. S. Jellesen, C. Zachariae, T. Menné, & J. P. Thyssen, Chromium allergy and dermatitis: Prevalence and main findings. *Contact Dermatitis*, **73** (2015) 261–280. <https://doi.org/10.1111/COD.12436>.
41. J. K. Kanagaraj, R. C. Panda, & M. V. K. Vinodh Kumar, Trends and advancements in sustainable leather processing: Future directions and challenges—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8** (2020) 104379. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.104379>.
42. B. Zywicki, T. Reemtsma, & M. Jekel, Analysis of commercial vegetable tanning agents by reversed-phase liquid chromatography–electrospray ionization–tandem mass spectrometry and its application to wastewater. *Journal of Chromatography A*, **970** (2002) 191–200. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)00883-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(02)00883-X).

43. La fabrication du cuir en 5 min. (2021). <https://artisan-cuir.fr/cuir/la-fabrication-du-cuir-en-5-min.html> (accessed August 10, 2023).
44. Biology - Yael Avissar, Jung Ho Choi, Connie Rye, Jean DeSaix, Vladimir Jurukovski, Robert R. Wise - Google Livres. (n.d.). https://books.google.fr/books/about/Biology.html?id=iG4sngEACAAJ&redir_esc=y (accessed April 11, 2024).
45. E. Izquierdo, Caractérisation des effets de la chaleur sur des cuirs de tannage végétal et développement d'une stratégie de restauration par voie enzymatique. (2015).
46. La structure des protéines - Labster. (n.d.). <https://theory.labster.com/fr/protein-structure/> (accessed April 11, 2024).
47. Amino-acides - Média - Encyclopædia Universalis. (n.d.). <https://www.universalis.fr/media/V060087B/> (accessed April 11, 2024).
48. Le cuir : une matière d'avenir ? Histoire et analyse contemporaine du cuir. (n.d.). <https://www.lesrhabilleurs.com/2020/10/cuir-ecologie-avenir/#optin-modal> (accessed April 11, 2024).
49. Z. Sebestyén, E. Jakab, E. Badea, E. Barta-Rajnai, C. Şendrea, & Z. Czégény, Thermal degradation study of vegetable tannins and vegetable tanned leathers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **138** (2019) 178–187. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2018.12.022>.
50. Authentic Material. (n.d.). <https://www.authentic-material.com/> (accessed October 9, 2024).
51. Norme NF EN 622-5. (n.d.). <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-6225/panneaux-de-fibres-exigences-partie-5-exigences-pour-panneaux-obtenus-par-p/fa159003/34617> (accessed October 9, 2024).
52. Recherche - Data INPI. (n.d.). <https://data.inpi.fr/search?advancedSearch=%2522%257B%257D%2522&displayStyle=List&filter=%257B%257D&nbResultsPerPage=20&order=asc&page=1&q=api%27u p&sort=relevance&type=brands> (accessed April 12, 2024).
53. Norme NF EN ISO 2813. (n.d.). <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-iso-2813/peintures-et-verniss-determination-de-lindice-de-brillance-a-20-60-et-85-/fa168911/1460> (accessed October 9, 2024).
54. Comment la brillance est-elle mesurée? | Labomat. (n.d.). <https://labomat.eu/fr/faq-brillance/769-comment-la-brillance-est-elle-mesuree.html> (accessed November 5, 2024).
55. Quelle différence d'unités de brillance est visible à l'œil humain? | Labomat. (n.d.). <https://labomat.eu/fr/faq-brillance/774-quelle-difference-d-unites-de-brillance-est-visible-a-l-oeil-humain.html> (accessed November 5, 2024).
56. Y. Zhang, Z. Chen, X. Liu, J. Shi, H. Chen, & Y. Gong, SEM, FTIR and DSC Investigation of Collagen Hydrolysate Treated Degraded Leather. *Journal of Cultural Heritage*, **48** (2021) 205–210. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2020.11.007>.
57. L. Grassi, L. Gonçalves, V. Queiroz, M. Gutterres, & C. Agustini, Influence of Different Products on Wet Finishing for Leather Properties and Waste Generation. *Journal of the American Leather Chemists Association*, **119** (2024) 132–138. <https://doi.org/10.34314/383NTK96>.
58. M. F. Ali, M. Kamal, & M. S. Islam, Comparative Study on Physical Properties of Different Types of Leather in Bangladesh. *Mahbub Kamal Journal of Engineering Research and Application www.ijera.com*, **10** (2020) 55–63. <https://doi.org/10.9790/9622-1002035563>.
59. D. Weidmann, *Technologies des textiles, de la fibre à l'article*, Dunod (2017).

60. Une comparaison des fibres textile au microscope – La boîte verte. (n.d.). <https://www.laboiteverte.fr/une-comparaison-des-fibres-textile-au-microscope/> (accessed June 14, 2023).
61. F. Awaja & D. Pavel, Recycling of PET. *European Polymer Journal*, **41** (2005) 1453–1477. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2005.02.005>.
62. S. FÜZESSÉRY, Polyéthylènetéréphthalates (PET) pour films et feuilles. *Ref: TIP100WEB - "Plastiques et composites,"* (1997). <https://doi.org/10.51257/A-V1-A3375>.
63. K. Zdiri, *Synthèse de composites à base de PP recyclé-Argile pour des applications textiles* (2022).
64. Société Française de Chimie, Polymérisation du propylène - Fiche 30. (1991).
65. inrs, *Plastiques, Risque et Analyse Thermique : Polypropylène PP*.
66. C. DUVAL, Polypropylènes (PP). *Plastiques et composites*, (2004). <https://doi.org/10.51257/A-V1-AM3320>.
67. Polypropylènes (PP) : Préparation | Techniques de l'Ingénieur. (n.d.). <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/matieres-thermoplastiques-monographies-42147210/polypropylenes-pp-am3320/preparation-am3320niv10001.html> (accessed September 19, 2023).
68. C. M. C. Bonelli, A. F. Martins, E. B. Mano, & C. L. Beatty, Effect of recycled polypropylene on polypropylene/high-density polyethylene blends. *Journal of Applied Polymer Science*, **80** (2001) 1305–1311. <https://doi.org/10.1002/APP.1217>.
69. H. R. Nafchi, M. Abdouss, S. K. Najafi, R. M. Gargari, & M. Mazhar, Effects of nano-clay particles and oxidized polypropylene polymers on improvement of the thermal properties of wood plastic composite. *Maderas. Ciencia y tecnología*, **17** (2015) 45–54. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000005>.
70. CEN, NF EN 622-5 Exigences pour panneaux obtenus par procédé à sec (MDF). **15** (2009).
71. H. Latappy, Étude des COV issus de la dégradation thermique et oxydative des matériaux polymères. (2014).
72. L. Ballice & R. Reimert, Classification of volatile products from the temperature-programmed pyrolysis of polypropylene (PP), atactic-polypropylene (APP) and thermogravimetrically derived kinetics of pyrolysis. *Chemical Engineering and Processing*, **41** (2002) 289–296. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(01\)00144-1](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(01)00144-1).
73. Sokoa : Fabricant de sièges de bureau et de collectivités - Hendaye - Pays Basque - 64. (n.d.). <https://www.sokoa.com/> (accessed September 15, 2023).
74. E. Dumont, *Teindre avec les plantes*, Ulmer (2019).
75. Quelle est la différence entre un pigment naturel et un pigment synthétique ? (n.d.). <https://www.ocres-de-france.com/fr/faq/questions-techniques-sur-les-produits/difference-pigments-naturels-et-synthetique.html?category=questions-techniques-sur-les-produits&question=difference-pigments-naturels-et-synthetique&module=faqs> (accessed November 3, 2023).
76. Définitions : colorant - Dictionnaire de français Larousse. (n.d.). <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/colorant/17307> (accessed November 7, 2023).
77. Marie. Marquet & D. Cardon, *Guide des teintures naturelles : plantes à fleurs*, Belin (2021).
78. T. Bechtold, T. Pham, & A. P. Manian, Sources for Natural Colorants in Europe. *Handbook of Natural Colorants*, (2023) 45–61. <https://doi.org/10.1002/9781119811749.CH4>.
79. D. Cardon, *Le monde des teintures naturelles*, Belin (2014).

80. *Rubia tinctorum* – repartition – eFlore – Tela Botanica. (n.d.). <https://www.tela-botanica.org/bdtdfx-nn-57890-repartition> (accessed November 7, 2023).
81. Accueil | Couleurs de Plantes Couleurs de Plantes Fournisseur de colorants et pigments végétaux. (n.d.). <https://www.couleurs-de-plantes.com/> (accessed November 23, 2023).
82. Pigments végétaux | Parlons sciences. (n.d.). <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/pigments-vegetaux> (accessed November 8, 2023).
83. Wavelengths of light and photosynthetic pigments (article) | Khan Academy. (n.d.). <https://www.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments> (accessed November 8, 2023).
84. G. A. F. Hendry & O. T. G. Jones, Haems and chlorophylls: comparison of function and formation. *Journal of Medical Genetics*, **17** (1980) 1. <https://doi.org/10.1136/JMG.17.1.1>.
85. ONF, Comprendre la forêt : de la forêt au bois. (2023). <https://www.onf.fr/onf/forets-et-espaces-naturels/+1f::comprendre-la-foret.html> (accessed March 24, 2023).
86. Aola et la teinture bleu indigo | Le blog d'UMAMI Paris. (n.d.). <https://blog.umamiparis.com/chroniques-dumami/produits-producteurs/aola-et-la-teinture-bleu-indigo-6803.html> (accessed January 9, 2024).
87. Crème creates indigo-dyed wooden furniture for Stellar Works. (n.d.). <https://www.dezeen.com/2017/05/30/exchange-collection-creme-stellar-works-icff-nycxdesign-2017/> (accessed January 12, 2024).
88. Stellar Works. (n.d.). <https://www.stellarworks.com/news/special-edition-indigo-exchange-chair-launch> (accessed January 12, 2024).
89. MADERA | Seamless Wood Design. (n.d.). <https://www.maderasurfaces.com/> (accessed January 17, 2024).
90. Introducing the Color Collection hardwood floors by Madera | PRISM. (n.d.). <https://prismpub.com/introducing-color-collection-hardwood-floors-madera/> (accessed January 12, 2024).
91. CAUE de Loire Atlantique, Arbres, Guide technique : fiche n°3 L'arbre est un être vivant. (2009).
92. M.-C. Trouy, *Anatomie du bois : Formation, fonctions et identification*, QUAE (2015).
93. P. Gay, *L'atlas du bois*, Monza (2001).
94. T. Cabaret, L'exudation de la résine dans le bois de pin maritime : étude et mise en place d'un système de prévention, physico-chimie des matériaux, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2018.
95. J. Pérez, J. Muñoz-Dorado, T. de la Rubia, & J. Martínez, Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International Microbiology*, **5** (2002) 53–63. <https://doi.org/10.1007/s10123-002-0062-3>.
96. M. Ioelovich, Cellulose as a nanostructured polymer: A short review. *BioResources*, **3** (2008) 1403–1418. <https://doi.org/10.15376/BIORES.3.4.IOELOVICH>.
97. J. Mehats, Différence de couleur entre duramen et aubier du bois de Pin maritime : Identification moléculaire, homogénéisation et évolution, 2020.
98. W. Vermerris & R. Nicholson, Biosynthesis of Phenolic Compounds. *Phenolic Compound Biochemistry* (Dordrecht: Springer Netherlands), pp. 63–149. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5164-7_3.
99. M. Vidal, *Optimisation des stratégies d'amélioration génétique du pin maritime grâce à l'utilisation de marqueurs moléculaires* (2016).
100. V. Cucchi, C. Meredieu, A. Stokes, S. Berthier, D. Bert, M. Najar, A. Denis, & R. Lastennet, Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus*

- pinaster Ait.) growing in different podzolic soil conditions. *Trees - Structure and Function*, **18** (2004) 460–466.
101. A. Morel, Physiologie moléculaire du développement des embryons somatiques de pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) : approches transcriptomique et protéomique, Université d'Orléans, 2014.
 102. ONF, Pin maritime, le bien nommé. (2023). http://www1.onf.fr/activites_nature/sommaire/decouvrir/arbres/resineux/20071025-083844-82532/@@index.html (accessed March 24, 2023).
 103. ONF, La grande Histoire des forêts (#Episode 3) - Landes de Gascogne, Sologne : contre le paludisme, des forêts pour assainir. (2023). <https://www.onf.fr/onf/+ff5::la-grande-histoire-des-forets-episode-landes-de-gascogne-sologne-contre-le-paludisme-des-forets-pour-assainir.html> (accessed March 24, 2023).
 104. R. Rosa, P. Soares, & M. Tomé, Evaluating the Economic Potential of Uneven-aged Maritime Pine Forests. *Ecological Economics*, **143** (2018) 210–217. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2017.07.009>.
 105. Ministère de l'agriculture & CRGF, *Pin Maritime, fiche technique pour la conservation* (2003).
 106. T. Sardin, *Forêts littorales atlantiques dunaires* (Office National des Forêts, 2009).
 107. A. Colin, C. Meredieu, T. Labbé, T. Belouard, & S. Batifol, *Étude rétrospective et mise à jour de la ressource en pin maritime du massif des Landes de Gascogne après la tempête Klaus du 24 janvier 2009* (2010).
 108. R. KELLER, Caractéristiques du bois de pin maritime variabilité et transmission héréditaire. *Annales des Sciences Forestières*, **30** (1973) 31–62. <https://doi.org/10.1051/forest/19730102>.
 109. Gascogne Bois, Le Pin Maritime. (n.d.). <https://www.gascognebois.com/pin-maritime/> (accessed April 28, 2023).
 110. AFNOR, *Norme NF EN 335 Durabilité du bois et des matériaux à base de bois* (2013).
 111. D. Hon & G. Ifju, Measuring penetration of light into wood by detection of photo-induced free radicals. *Wood science*, (1978).
 112. S. Zahri, C. Belloncle, F. Charrier, P. Pardon, S. Quideau, & B. Charrier, UV light impact on ellagitannins and wood surface colour of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*). *Applied Surface Science*, **253** (2007) 4985–4989. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2006.11.005>.
 113. P. G. Burtin, Origine Biochimique de la Couleur du Bois de Noyer (*Juglans* sp.). (1999).
 114. G. Janin, *Mesure de la couleur du bois. Interet forestier et industriel* (1987).
 115. J. C. Pew & W. J. Connors, Color of coniferous lignin. *Tappi*, vol.54, n°2, (1971) 245.
 116. P. Navi & F. Heger, *Comportement thermo-hydrromécanique du bois - Applications technologiques et dans les structures*, Presse Polytechnique (2005).
 117. O. Colot, R. Devinoy, A. Sombo, & D. de Brucq, A colour image processing method for melanoma detection. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, **1496** (1998) 562–569. <https://doi.org/10.1007/BFB0056241>.
 118. A. Hanbury, A quantitative description of wood texture. (2001) 451–460.
 119. R. G, M.-M. P, O. M, & M. P, *Real-time detection of appearance defects of turkey carcasses by color histogram analysis. In SPIE Machine Vision Application in Industrial Inspection VII* (San Jose, USA, 1999).
 120. D. Lafon & T. Ramanantoandro, Color images. *Image Analysis and Stereology*, **21** (2002) s61–s74. <https://doi.org/10.5566/IAS.V21.PS61-S74>.

121. T. Nishimura & M. P. Ansell, Fast fourier transform and filtered image analyses of fiber orientation in OSB. *Wood Science and Technology*, **36** (2002) 287–307. <https://doi.org/10.1007/S002260100114>.
122. K. Fujii, S. Sugi, & Y. Ando, Textural properties corresponding to visual perception based on the correlation mechanism in the visual system. *Psychological Research*, **67** (2003) 197–208. <https://doi.org/10.1007/S00426-002-0113-6>.
123. T. Ramananantoandro, Implication tactiles et visuelles de la rugosité du bois et des matériaux dérivés du pin maritime, 2005.
124. A. Lavalette & A. Dupleix-Marchal, Bois et santé : Rôle du matériau bois sur la santé humaine. *Techniques de l'ingénieur*, (2022).
125. O. Sanchez-Badini -John & L. Innes, *La forêt et les arbres : Une perspective de la santé publique* (2018).
126. M. M. Hansen, R. Jones, & K. Tocchini, Shinrin-yoku (Forest bathing) and nature therapy: A state-of-the-art review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **14** (2017). <https://doi.org/10.3390/ijerph14080851>.
127. Q. Li, Effets des forêts et des bains de forêt (shinrin-yoku) sur la santé humaine : une revue de la littérature. **70** (2018) 273–285. <https://doi.org/10.4267/2042/70001i>.
128. L. S. Franco, D. F. Shanahan, & R. A. Fuller, A review of the benefits of nature experiences: More than meets the eye. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **14** (2017). <https://doi.org/10.3390/ijerph14080864>.
129. E. Matsubara, N. Matsui, & T. Ohira, Evaluation of the psychophysiological effects of the Cupressaceae family wood odor. *Wood Science and Technology*, **54** (2020) 269–286. <https://doi.org/10.1007/s00226-019-01151-7>.
130. E. Matsubara & S. Kawai, VOCs emitted from Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) interior walls induce physiological relaxation. *Building and Environment*, **72** (2014) 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.023>.
131. O. Jonsson, P. Candidate, S. Lindberg, A. Roos, P. Researcher, & M. Lindström, *CONSUMER PERCEPTIONS AND PREFERENCES ON SOLID WOOD, WOOD-BASED PANELS, AND COMPOSITES: A REPERTORY GRID STUDY* Mårten Hugosson (2008).
132. K. Strobel, A. Q. Nyrud, & K. Bysheim, Interior wood use: linking user perceptions to physical properties. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **32** (2017) 798–806. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1287299>.
133. G. Berger Fachhochschule Salzburg, H. Katz, F.-P. Günter Berger, & A. Johannes Petutschnigg, *What Consumers Feel and Prefer-Haptic Perception of Various Wood Flooring Surfaces*.
134. G. Poirier, C. M. H. Demers, & A. Potvin, Experiencing Wooden Ambiences with Nordic Light: Scale Model Comparative Studies under Real Skies. *BioResources*, **12** (2017). <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.1924-1942>.
135. G. Poirier, C. M. H. Demers, & A. Potvin, Wood perception in daylight interior spaces: An experimental study using scale models and questionnaires. *BioResources*, **14** (2019) 1941–1968. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.1941-1968>.
136. Artek - The Aaltos at Villa Mairea: A More Human Light. (n.d.). <https://www.artek.fi/en/stories/the-aaltos-at-villa-mairea-a-more-human-light> (accessed April 23, 2024).
137. Alvar Aalto, plus célèbre architecte et designer finlandais - IDEAT. (n.d.). <https://ideat.fr/alvar-aalto/> (accessed April 23, 2024).
138. T. Alapieti, R. Mikkola, P. Pasanen, & H. Salonen, The influence of wooden interior materials on indoor environment: a review. *European Journal of Wood and Wood Products*, **78** (2020) 617–634. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01532-x>.

139. H. Ohta, M. Maruyama, Y. Tanabe, T. Hara, Y. Nishino, Y. Tsujino, E. Morita, S. Kobayashi, & O. Shido, Effects of redecoration of a hospital isolation room with natural materials on stress levels of denizens in cold season. *International Journal of Biometeorology*, **52** (2008) 331–340. <https://doi.org/10.1007/s00484-007-0125-4>.
140. T. Vainio-Kaila, X. Zhang, T. Hänninen, A. Kyyhkynen, L.-S. Johansson, S. Willför, M. Österberg, A. Siitonen, & L. Rautkari, Antibacterial compounds. *BioResources*, **12** (2017) 7601–7614.
141. A. Mourey & N. Canillac, Anti-*Listeria monocytogenes* activity of essential oils components of conifers. *Food Control*, **13** (2002) 289–292. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(02\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(02)00026-9).
142. A. Milling, R. Kehr, A. Wulf, & K. Smalla, Survival of bacteria on wood and plastic particles: Dependence on wood species and environmental conditions. *Holzforschung*, **59** (2005) 72–81. <https://doi.org/10.1515/HF.2005.012>.
143. FCBA, Rapport de synthèse City Zen Wood 2 - Etude bois, confort et santé. (2020).
144. V. Kotradyova, E. Vavrinsky, B. Kalinakova, D. Petro, K. Jansakova, M. Boles, & H. Svobodova, Wood and its impact on humans and environment quality in health care facilities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16** (2019). <https://doi.org/10.3390/IJERPH16183496>.
145. C. Thibault & Architecture Bois Magazine, 10 bienfaits du bois sur la santé et le bien-être - Architecture Bois Magazine. (2021). <https://www.architecturebois.fr/batiments-bois-sante-bien-etre/> (accessed December 19, 2023).
146. Le bois, une arme contre les bactéries ? Les chercheurs se penchent sur la question • Réseau CHU. (n.d.). <https://www.reseau-chu.org/article/le-bois-une-arme-contre-les-bacteries-les-chercheurs-se-penchent-sur-la-question/> (accessed December 21, 2023).
147. J. Chevallier, *Histoire des sciences médicales Tome IV - Niels Ryberg Finsen, Pris Nobel 1903, inventeur de la photothérapie* (2022).
148. Coralie Pittet - Le soin par la lumière/matière colorée - YouTube. (n.d.). <https://www.youtube.com/watch?v=btmcQXVOFGs> (accessed October 29, 2024).
149. Delphine Talbot - Le soin par les plantes tinctoriales - YouTube. (n.d.). <https://www.youtube.com/watch?v=oIHmoyicAeo> (accessed October 29, 2024).
150. Isabelle Rodier, Le bénéfice de la couleur dans un environnement de soin - YouTube. (n.d.). <https://www.youtube.com/watch?v=pEVdFIP2woU> (accessed October 30, 2024).
151. E. Guerry, La couleur dans l'environnement visuel : perception(s), lecture(s), interprétation(s) et impact(s) sur l'utilisateur âgé. De l'approche de l'ingénieur lumière (science et technologies des systèmes d'éclairage) et du designer-coloriste (arts-appliqués, design). (2022).
152. Santé - La couleur au service de notre santé - YouTube. (n.d.). <https://www.youtube.com/watch?v=3pnY8ygTJ80> (accessed October 29, 2024).
153. *ISO 105-B02 Textiles, essais de solidité des coloris* (2014).
154. SUNTEST CPS + | Appareils de vieillissement au xénon pour produits et matériaux - Atlas. (n.d.). <https://www.atlas-mts.fr/products/standard-instruments/xenon-arc-weathering-test/suntest/cps> (accessed February 27, 2024).
155. ISO 105-B02:2014(F) ii DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT. (2014).
156. S. Achat, Polyphénols de l'alimentation : extraction, pouvoir antioxydant et interactions avec des ions métalliques, université d'Avignon, Université Abderrahmane Mira - Bejaïa Algérie, 2013.
157. O Dumonceau & B. Thibaut, *Etude du traitement de durabilité du bois de châtaignier par immersion dans l'huile à basse température : compte rendu final de l'étude*. (2003).

158. V. Colas, Compléments alimentaires à base de plantes : » l' « arrêté plantes » en questions Doctorat en Pharmacie, UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD - LYON 1 FACULTÉ DE PHARMACIE INSTITUT DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES ET BIOLOGIQUES, 2016.
159. B. Charrier, J. P. Haluk, & M. Metche, Characterization of European Oakwood Constituents Acting in the Brown Discolouration during Kiln Drying. *Holzforschung*, **49** (1995) 168–172.
<https://doi.org/10.1515/HFSG.1995.49.2.168/MACHINEREADABLECITATION/RIS>.
160. F. Aloui, N. Ayadi, F. Charrier, & B. Charrier, Durability of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) against white rot fungi (*Coriolus versicolor*): Relations with phenol extractives. *Holz als Roh - und Werkstoff*, **62** (2004) 286–290.
<https://doi.org/10.1007/S00107-004-0489-7>.
161. E. Bloodnick, Rôle du zinc en horticulture | Premier Tech Producteurs et Consommateurs. (2014). <https://www.pthorticulture.com/fr-ca/zone-du-savoir/role-du-zinc-en-horticulture#> (accessed June 13, 2024).
162. E. Bloodnick, Le rôle du cuivre en horticulture | Premier Tech Producteurs et Consommateurs. (2014). <https://www.pthorticulture.com/fr-ca/zone-du-savoir/le-role-du-cuivre-en-horticulture> (accessed June 13, 2024).
163. E. Guilley, J. P. Charpentier, N. Ayadi, G. Snakkers, G. Nepveu, & B. Charrier, Decay resistance against *Coriolus versicolor* in Sessile oak [*Quercus petraea* Liebl.: Analysis of the between-tree variability and correlations with extractives, tree growth and other basic wood properties. *Wood Science and Technology*, **38** (2004) 539–554.
<https://doi.org/10.1007/S00226-004-0250-8>.
164. O. Dumonceau, Utilisation de petits bois naturellement durables dans des usages extérieurs (aire de jeux, mobilier urbain...) en substitution aux bois traités par des pesticides comme les solutions cuivre-chrome-arsenic, Université de Montpellier, 2001.
165. C. Ravat, F. Monteil-Rivera, & J. Dumonceau, Metal Ions Binding to Natural Organic Matter Extracted from Wheat Bran: Application of the Surface Complexation Model. *Journal of Colloid and Interface Science*, **225** (2000) 329–339.
<https://doi.org/10.1006/JCIS.2000.6782>.
166. X. Guo, S. Zhang, & X. quan Shan, Adsorption of metal ions on lignin. *Journal of Hazardous Materials*, **151** (2008) 134–142.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.05.065>.
167. J. Fillacier, *La pratique de la couleur*, Presses des Mines (2017).
168. A. Grand-Clément & AC. Rendu Loisel, *À la croisée des sens. Synesthésies et polysensorialité dans les sociétés anciennes : approche comparée* (Toulouse, 2015).
169. C. Classen, La perception sauvage. Étude sur les ordres sensoriels des enfants " sauvages ". *Anthropologie et Sociétés*, **14** (1990) 47–56.
<https://doi.org/10.7202/015127AR>.
170. D. Howes, Cultural Synaesthesia: Neuropsychological versus Anthropological Approaches to the Study of Intersensoriality. *Intellectica*, **2011/1** (2015) 139–158.
<https://doi.org/10.3406/INTEL.2011.1164>.
171. M. Addington & D. Schodek, Smart materials and new technologies—For the architecture and design professions. *Architectural Press*, **241** (2005).
172. B. Latour, *Le métier de chercheur regard d'un anthropologue*, INRA (Paris, 2001).
173. CNRS CSI INSIS, Recommandation Interdisciplinarite_CSI INSIS. **21** (2018).
174. L. Endrizzi, L'avenir de l'université est-il interdisciplinaire ? (2017).
175. CNRS, La Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI). <https://miti.cnrs.fr/>, (n.d.).

176. F. Bouyer, S. Cousin, B. Simpson, & V. Tocut, *Etude sur l'interdisciplinarité dans la gestion des personnels chercheurs* (2014).
177. J. Dewey, *L'art comme expérience*, Verdier (2006).
178. Système NCS | Comprendre le système couleur NCS 1950. (n.d.). <https://couleurncs.fr/comprendre-le-systeme-ncs/> (accessed July 17, 2023).
179. NCS France - Boutique NCS - Natural Color System. (n.d.). <https://www.ncsfrance.fr/> (accessed July 17, 2023).
180. Géographie de la couleur - le concept — Jean-Philippe Lenclos. (n.d.). <https://www.jeanphilippelenclos.com/fr/concept> (accessed January 3, 2025).
181. S. Kobayashi, *Colorist: A Practical Handbook for Personal and Professional Use*, Kodansha (1999).
182. S. Kobayashi, *Color Image Scale*, Kodansha (1992).
183. S. Kobayashi, *A Book of Colors*, Kodansha (1987).
184. W. McDonough & M. Braungart, *L'upcycle au delà de la durabilité, concevoir pour l'abondance*, Galimard (2016).
185. M. Pastoureau, *Dictionnaire des couleurs de notre temps*, Benneton (1999).
186. W. McDonough & M. Braungart, *Cradle to Cradle, créer et recycler à l'infini*, Gallimard (2015).
187. Peugeot Onyx conceptcar – NewspaperWood. (n.d.). <https://newspaperwood.com/portfolio/peugeot-onyx/> (accessed January 7, 2025).
188. materiO' | materiO'. (n.d.). <https://materio.com/fr> (accessed January 7, 2025).

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : ÉVOLUTION MONDIALE DE LA PRODUCTION DE DECHETS PLASTIQUES EN MILLIONS DE TONNES [1]	1
FIGURE 2 : PRODUCTION MONDIALE DE DECHETS PLASTIQUES SELON LE DOMAINE D'UTILISATION, EN MILLIONS DE TONNES METRIQUES [2]	1
FIGURE 3 : EXPERIENCE DU PRISME DE NEWTON © GETTY - ARTPARTNER-IMAGES	6
FIGURE 4 : ÉCHELLE DE TEMPERATURE DE LA LUMIERE EN KELVIN	6
FIGURE 5 : SCHEMA DU SPECTRE VISIBLE (LEA DIAZ D'APRES 123RF)	7
FIGURE 6 : DIFFERENCIATION DES COULEURS SELON LA LONGUEUR D'ONDE [12]	8
FIGURE 7 : SCHEMA DE L'ŒIL ET DE LA VISION HUMAINE [13]	9
FIGURE 8 : PRINCIPES DES MELANGES ADDITIFS ET SOUSTRACTIFS	10
FIGURE 9 : EXEMPLE DU PHENOMENE DE METAMERISME	11
FIGURE 10 : EXPERIENCE DU CITRON SOUS DIFFERENTS ECLAIRAGES COLORES	11
FIGURE 11 : EXEMPLE DE CONTRASTE SIMULTANE [16]	12
FIGURE 12 : TRAVAUX DE MICHEL EUGENE CHEVREUL, 1939 [17-18]	12
FIGURE 13 : TRAVAUX D'ALBERT HENRY MUNSELL EN 1915 [17]	13
FIGURE 14 : TRAVAUX DE LA C.I.E [17]	13
FIGURE 15 : TRAVAUX DU SYSTEME LAB (1976) [17]	15
FIGURE 16 : SCHEMA DES DIFFERENTS FONCTIONNEMENTS DES SPECTROPHOTOMETRES A ANGLE FIXE (A), A ANGLE VARIABLE (B) ET A SPHERE (C) [21]	17
FIGURE 17 : SPECTROPHOTOMETRE PORTABLE X-RITE PANTONE Ci62 [22]	17
FIGURE 18 : COURBES DE SENSIBILITE DES OBSERVATEURS STANDARDS CIE DE REFERENCE [23]	19
FIGURE 19 : ESPACE CIELAB © X-RITE INCORPORATED WWW.XRITE.COM (A GAUCHE)	20
FIGURE 20 : TRAVAUX DE K. L. KELLY ET D. B. JUDD POUR LA DENOMINATION DES COULEURS [17]	23
FIGURE 21 : NORME AFNOR X08-010 « CLASSIFICATION METHODOLOGIQUE DES COULEURS »	27
FIGURE 22 : CORRESPONDANCE DES QUALIFICATIFS DES NOMS DE COULEURS	27
FIGURE 23 : LOGOS DES ACTEURS DE LA THESE	29
FIGURE 24 : SCHEMA DES AXES DE RECHERCHES DU PROJET MATERIA	31
FIGURE 25 : QUANTITE DE DECHETS DE CUIR ET TEXTILE COLLECTES PAR API'UP EN TONNES PAR ANNEE (API'UP)	32
FIGURE 26 : ÉTAPES DE LA FABRICATION DU CUIR [43]	39
FIGURE 27 : LES DIFFERENTES STRUCTURES DE PROTEINES [46]	40
FIGURE 28 : SCHEMA DE LA CONSTITUTION D'UNE PEAU [48]	42
FIGURE 29 : SCHEMA BILAN DE L'IMPACT DU PROCESSUS DE TRANSFORMATION D'UNE PEAU EN CUIR	43
FIGURE 30 : EXEMPLES DES REALISATIONS DE VALORISATION DE CUIR PAR AUTHENTIC MATERIAL	44
FIGURE 31 : CHUTES DE PRODUCTION DE CUIR RECOLTEES PAR API'UP EN TONNES PAR ANNEES	46
FIGURE 32 : COLLECTE DES CUIRS ET TRAVAIL D'ETAT DES LIEUX AU SEIN D'API'UP	48
FIGURE 33 : BROYEUR A COUTEAUX D'API'UP	49
FIGURE 34 : MELANGEUR A PALES CONÇU SUR MESURE POUR LA SOCIETE API'UP	50
FIGURE 35 : PRESSE A THERMOCOMPRESSION PAGNIONI MONZA / 3R	51
FIGURE 36 : MODELISATION D'UN MOULE EN POM	52
FIGURE 37 : MOULE EN POM V2 AVEC DOUBLE PISTON (MODELISATION A GAUCHE ET MOULE FINI A DROITE)	52
FIGURE 38 : MODELISATION DU MOULE EN ALUMINIUM	53
FIGURE 39 : EXEMPLES DE COURBES DE PRESSAGE DES PANNEAUX AVEC DIFFERENTS PALIERS DE DECOMPRESSION	54
FIGURE 40 : PRESSE PROPOSEE PAR SUTEAU-ANVER POUR L'INDUSTRIALISATION	54
FIGURE 41 : MACHINE UNIVERSELLE SYNTAX 3R	57
FIGURE 42 : TUBE DE KUNDT	59
FIGURE 43 : BRILLANCOMETRE	60
FIGURE 44 : NUANCIER DU GISEMENT DES CUIRS LAFFARGUE (RECTO/VERSO)	61
FIGURE 45 : NUANCIER DU GISEMENT DES CUIRS EPIDAURE	62
FIGURE 46 : COMPARAISON D'ECHANTILLONS SOUS DIFFERENTES SOURCES LUMINEUSE POUR METTRE EN EVIDENCE LE PHENOMENE DE METAMERISME	63
FIGURE 47 : EXEMPLE DU TRAVAIL DE GROUPES COULEURS A PARTIR DES ECHANTILLONS DE CUIR	64
FIGURE 48 : NUANCIER DE PANNEAUX AVEC LES CUIRS LAFFARGUE	64
FIGURE 49 : PANNEAU OBTENU AVEC LE MOULE V1 A GAUCHE, ET LE MOULE V2 A DROITE	65
FIGURE 50 : BETONNIERE MODIFIEE EN COURS D'UTILISATION	66

FIGURE 51 : PLANS DES ELEMENTS DE PARAVENTS PROPOSES PAR LE STUDIO LA RACINE	68
FIGURE 52 : PROTOTYPES DES ELEMENTS DE MOBILIER AVEC LES PANNEAUX DE CUIR.....	68
FIGURE 53 : ANALYSE THERMO GRAVIMETRIQUE D'ECHANTILLONS DE CUIR, A) CUIR EPIDAURE B) CUIR LAFFARGUE.....	69
FIGURE 54 : SUIVI DE L'HUMIDITE DES PANNEAUX AU COURS DU TEMPS LORS DU SECHAGE EN ENCEINTE CLIMATIQUE.....	70
FIGURE 55 : ANALYSE DE L'ABSORPTION ACOUSTIQUE DE TROIS ECHANTILLONS DE PANNEAUX DE CUIR COMPARE A UN ECHANTILLON DE LIEGE	71
FIGURE 56 : EXPERIMENTATION CHROMATIQUE AVEC DIFFERENTES TYPOLOGIES ET DE GRANULOMETRIES DE CUIR.....	73
FIGURE 57 : RECHERCHES CHROMATIQUE POUR LA TEINTE MARRON DU NUANCIER OSPHER.....	74
FIGURE 58 : NUANCIER GRANISPHER POUR LA MARQUE OSPHER.....	75
FIGURE 59 : NUANCIER DE PANNEAUX REALISES AVEC LE CUIR EPIDAURE EN 5MM.....	76
FIGURE 60 : MESURES DE COULEURS SUR 15 PANNEAUX DE COULEUR DIFFERENTE AVEC 5 MESURES PAR PANNEAU.....	76
FIGURE 61 : CONTROLE DE LA REPRODUCTIBILITE DES COLORIS DES PANNEAUX GRANISPHER	77
FIGURE 62 : MESURE DE BRILLANCE DES PANNEAUX DE CUIR EPIDAURE EN 5 MM.....	78
FIGURE 63 : MESURE DE BRILLANCE DES PANNEAUX DE CUIR (MELANGE DE GRANULOMETRIE).....	78
FIGURE 64 : MELANGE DE GRANULOMETRIE DES PANNEAUX DE CUIR PRESENTES DANS LES MESURES DE BRILLANCE.....	79
FIGURE 65 : PANNEAUX RECYCLES.....	80
FIGURE 66 : TEST D'USINAGE SUR LA PREMIERE PLAQUETTE EN CUIR "RIGIDE" OBTENUE	83
FIGURE 67 : ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUES D'ECHANTILLONS DE DIFFERENTS CUIR DESTINES AUX PANNEAUX RIGIDES	84
<i>FIGURE 68 : RESULTATS DES ANALYSES DE CALORIMETRIE DIFFERENTIELLE SUR QUATRE ECHANTILLONS DE CUIR A DESTINATION DES PANNEAUX RIGIDES. A) CUIR DE SELLERIE SOUS AZOTE ; B) CUIR DE SELLERIE BROYE SOUS OXYGENE ; C) CUIR EPIDAURE 3MM SOUS AZOTE ; D) CUIR EPIDAURE SOUS OXYGENE.....</i>	<i>86</i>
FIGURE 69 : COURBES D'ESSAIS DE FLEXION 3 POINTS.....	87
FIGURE 70 : PANNEAUX DE « LIEGE DE CUIR ».....	90
FIGURE 71 : RESULTATS DES PANNEAUX OBTENUS A PARTIR DE DIFFERENTS MELANGES CUIR/FIBRES.....	92
FIGURE 72 : PANNEAUX DE DERAYURES OBTENUS DANS DES CONDITIONS STANDARS	93
FIGURE 73 : COMPARAISON DE FIBRES NATURELLES ET DU POLYESTER AU MICROSCOPE [60]	101
FIGURE 74 : FORMULE CHIMIQUE DU POLYESTER	101
FIGURE 75 : POLYMERISATION DU POLYPROPYLENE	103
FIGURE 76 : COMPORTEMENT DE DEUX POLYMERES DIFFERENTS PAR ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE (ATG).....	104
FIGURE 77 : EXEMPLES DE PLANS DE COUPE.....	105
FIGURE 78 : CHUTES DE PRODUCTION DE TEXTILE COLLECTEES PAR API'UP EN TONNES PAR ANNEES (API'UP).....	109
FIGURE 79 : ÉVOLUTION DU NUANCIER SOKOA ENTRE 2020 ET 2022 [73].....	110
FIGURE 80 : ÉVOLUTION DES COMPOSITIONS DES REVETEMENTS DU NUANCIER SOKOA [73].....	110
FIGURE 81 : STOCKAGE DES TEXTILES TRIÉS PAR COULEUR	111
FIGURE 82 : COURBE DE PRESSAGE D'UN PANNEAU TEXTILE.....	112
FIGURE 83 : CARDEUSE A CRIN ELBA	113
FIGURE 84 : SCHEMAS DU PRESSAGE D'UN PANNEAU POLYSPHER EN 2 TEMPS (A GAUCHE) ET EN 3 TEMPS (A DROITE).....	115
FIGURE 85 : MOULE FABRIQUE AU LABORATOIRE POUR LE PRESSAGE DES PANNEAUX TEXTILES.....	116
FIGURE 86 : MOULE DE CEINTRAGE DU POLYESTER AVEC UN GRAND RAYON DE COURBURE	116
FIGURE 87 : PREMIER TRI COULEUR DES TEXTILES EN 9 GROUPES	120
FIGURE 88 : PREMIER NUANCIER DE PANNEAUX TEXTILES AVEC 9 GROUPES COULEURS	121
FIGURE 89 : NUANCIER TEXTILE DES 19 GROUPES COULEURS	122
FIGURE 90 : SECOND NUANCIER DE PANNEAUX TEXTILES AVEC 19 GROUPES COULEURS	123
FIGURE 91 : COMPARAISON DE LA COHESION EN FONCTION DE LA DENSITE SURFACIQUE	124
FIGURE 92 : HOMOGENEISATION DE LA COULEUR PAR LE CARDAGE DES FIBRES	125
FIGURE 93 : HOMOGENEISATION DE FIBRES DE 3 MM ET 10 MM PAR LE CARDAGE	126
FIGURE 94 : CINETIQUE DSC DU PET BLEU ET NOIR	127
FIGURE 95 : CINETIQUE DSC DU PP NOIR	127
FIGURE 96 : OBSERVATION DE LA COHESION DE LA COUCHE INTERNE NON CARDE (GAUCHE) ET CARDE (DROITE)	128
FIGURE 97 : CONTRAINTES MAXIMALES MOYENNES EN FLEXION 3 POINTS DES DIFFERENTES PROPORTIONS.....	129
FIGURE 98 : CONTRAINTES MAXIMALES MOYENNES EN TRACTION TRANSVERSALE DES DIFFERENTES PROPORTIONS	129
FIGURE 99 : MODELISATION DE LA REPARTITION DE LA TEMPERATURE A L'INTERIEUR D'UN PANNEAU PET/PP.....	130
FIGURE 100 : BORURE DU PANNEAU MOULE 6-PE-7	130
FIGURE 101 : RESULTAT DES ESSAIS DE CINTRAGE DANS LE MOULE A PETIT RAYON DE COURBURE.....	131
FIGURE 102 : ESSAIS D'USINAGES SUR UN PANNEAU EN POLYESTER.....	132
FIGURE 103 : ESSAIS DE GRAVURE LASER SUR PANNEAUX TEXTILES	132

FIGURE 104 : ÉCHANTILLONS DES ESSAIS DE RESISTANCE CHROMATIQUE DES TEXTILES A LA CHALEUR.....	133
FIGURE 105 : RELEVÉ CHROMATIQUE DES ÉCHANTILLONS TEXTILES AILLANT REAGIT A LA CHALEUR	134
FIGURE 106 : DETAIL DE LA PROCEDURE DE COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES VARIATIONS DE TEINTES D'UN MEME ÉCHANTILLON TEXTILE	134
FIGURE 107 : GRAPHIQUE DE COMPARAISON DES DE* ENTRE L'ÉCHANTILLON DE BASE ET LES TEMPERATURES EXPOSEES	135
FIGURE 108 : COMPARAISON DE LA BRILLANCE DES PANNEAUX TEXTILES AVEC LE PAPIER KRAFT ET LA PLAQUE TEFLON	136
FIGURE 109 : MODELISATION 3D ET PROTOTYPES DE LA CHAISE TERRIA ET DU TABOURET URANO IMAGINE PAR LE STUDIO LA RACINE	137
FIGURE 110 : DESSINS DE DEFINITIONS DE PLANTES TINCTORIALES [74]	141
FIGURE 111 : REPARTITION DES PLANTES A INDIGO (GAUCHE) ET DES RUBIACEES (DROITE) DANS LE MONDE [79]	142
FIGURE 112 : CARTOGRAPHIE DE LA RUBIA TINCTORUM PAR DEPARTEMENT EN FRANCE (TELA BOTANICA 2018) [80] ...	142
FIGURE 113 : MOLECULE DE LA FAMILLE DES QUINONES : NAPHTHOQUINONE ET ANTHRAQUINONE	143
FIGURE 114 : PRINCIPALES MOLECULES DU GROUPE DES FLAVONOÏDES : FLAVONE, FLAVANOL ET FLAVONOL	144
FIGURE 115 : MOLECULE D'ANTHOCYANIDINE	145
FIGURE 116 : MOLECULE DE BETA-CAROTENE @2022 PARLONS SCIENCES.....	145
FIGURE 117 : MOLECULE DE LICOPENE @2022 PARLONS SCIENCES	145
FIGURE 118 : MOLECULE DE ZEAXANTHINE @2022 PARLONS SCIENCES	146
FIGURE 119 : MOLECULE DE LUTEINE @2022 PARLONS SCIENCES.....	146
FIGURE 120: MOLECULE D'INDIGOTINE	146
FIGURE 121 : PRINCIPALES MOLECULES DES TANINS HYDROLYSABLES : L'ACIDE GALLIQUE ET L'ACIDE ELLAGIQUE.....	147
FIGURE 122 : MOLECULES DE CHLOROPHYLLE « A » ET « B ».....	148
FIGURE 123 : COURBES D'ABSORBANCES DES DIFFERENTES MOLECULES COLORANTES [82]	149
FIGURE 124 : PHOTOGRAPHIE DU TRAVAIL D'AOLA, ARTISAN PRODUCTEUR D'INDIGO AU JAPON [86]	154
FIGURE 125 : COLLECTION « INDIGO EXCHANGE CHAIR », STELLAR WORKS	155
FIGURE 126 : EXPERIMENTATION DE TEINTURES COLORES POUR SOLS PAR L'ENTREPRISE MADERA	156
FIGURE 127 : SCHEMA DE L'ORGANISATION DES DIFFERENTES COUCHES D'UN TRONC D'ARBRE	157
FIGURE 128 : DIRECTION ET PLANS DE REFERENCES DANS LE BOIS (LEA DIAZ)	159
FIGURE 129 : FORMULE CHIMIQUE DE LA CELLULOSE (CELLOBIOSE)	160
FIGURE 130 : UNITES SACCHARIDIQUES CONSTITUANT LES HEMICELLULOSES.....	161
FIGURE 131 : COMPOSITION DE LA LIGNINE	162
FIGURE 132 : CARTE DE L'EVOLUTION DU BOISEMENT DES LANDES DE GASCOGNE	163
FIGURE 133 : CARTE DU TRIANGLE FORESTIER.....	164
FIGURE 134 : CARTE DU TAUX DE BOISEMENT EN FRANCE PAR DEPARTEMENT (IGN).....	164
FIGURE 135 : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DU PIN MARITIME DANS LE SUD-OUEST DE L'EUROPE [105].....	165
FIGURE 136 : SPECTRES D'ABSORPTION UV-VIS DU BOIS (A), DE LA LIGNINE (B) ET DE LA CELLULOSE (C)	168
FIGURE 139 : CERNES DU PIN MARITIME EN COUPE TRANSVERSALE SUR LE PLAN RT	169
FIGURE 139 : VEINAGE DU PIN MARITIME EN COUPE RADIALE SUR LE PLAN LR	169
FIGURE 139 : DIFFERENCE DE COULEUR ENTRE L'AUBIER ET LE DURAMEN DU PIN MARITIME EN COUPE TANGENTIELLE SUR LE PLAN LT	169
FIGURE 140 : RESENTI D'USAGERS DES FORETS DOMANIALES ET PARCS URBAINS D'ALENÇON, DE BLOIS ET DU MANS [124]	174
FIGURE 141 : VILLA MAIREA CONÇUE PAR ALVAR AALTO EN 1938 [136–137].....	176
FIGURE 142 : SURVIE D'E. COLI (A) ET E. FAECIUM (B) SUR DES POUSSIERES DE BOIS ET DES COPEAUX DE PLASTIQUES [142]	177
FIGURE 143 : EXTRAIT DU PROJET « COLOR & CARE » DE DELPHINE TALBOT	180
FIGURE 144 : CONCEPTION COULEUR/MATIERE DU FOYER D'ACCUEIL MEDICALISE « LA MAISON EN PLUS » PAR ISABELLE RODIER	182
FIGURE 145 : LOGOS DE L'ENTREPRISE FOURNISSEUR DES COLORANTS ET DU LABORATOIRE DE RECHERCHE ASSOCIE...	184
FIGURE 146 : HUILES PIGMENTAIRES BIOLIE®	186
FIGURE 147 : MONTAGE UTILISE POUR LES DECOCTIONS.....	187
FIGURE 148 : FOND D'EXTRACTION DE CHLOROPHYLLE (LEA DIAZ).....	187
FIGURE 149 : GAMME ETALON DU DOSAGE DES SUCRES	189
FIGURE 150 : SYSTEME DE MELANGE DE COULEURS PYRAMIDAL.....	190
FIGURE 151 : DEPOT INSOLUBLE APRES DECOCTION DU SOLIDAGE EN DEUX CONCENTRATIONS DIFFERENTES	191
FIGURE 152 : ÉCHELLE DES GRIS	194
FIGURE 153 : SUNTEST ATLAS UTILISE POUR LE VIEILLISSEMENT ACCELERE A LA LUMIERE	194
FIGURE 154 : ANALYSE CHROMATIQUE DU BOIS DE PIN MARITIME.....	196

FIGURE 155 : CARTOGRAPHIE DES COULEURS DU BOIS DE PIN MARITIME	197
FIGURE 156 : ANALYSE CHROMATIQUE DE LA LUMINOSITE DU BOIS DE PIN MARITIME	197
FIGURE 157 : APPLICATION SUR PAPIER DES SOLUTIONS D'INFUSION D'ECORCES DE CHENE.....	198
FIGURE 158 : MESURES COLORIMETRIQUES DE DEUX CONCENTRATIONS DE L'INFUSION DES ECORCES DE CHENE.....	198
FIGURE 159 : EXEMPLES DE COULEURS D'ESSENCES DE BOIS NATURELLES	199
FIGURE 160 : NUANCIER DES PREMIERS ESSAIS DE TEINTURE ET LES TEINTES RETENUES PAR API'UP.....	199
FIGURE 161 : NUANCIER DES DIFFERENTS EXTRAITS VEGETAUX UTILISES.....	200
FIGURE 162 : NUANCIER GLOBAL DES TEINTES OBTENUES A PARTIR DES DIFFERENTS COLORANTS VEGETAUX.....	200
FIGURE 163 : ÉCHANTILLONS DES ESSAIS DE L'HUILE PIGMENTAIRE BIOLIE®	201
FIGURE 164 : COLORIMETRIE DES ECHANTILLONS DE BOIS TEINTE AVEC LES HUILES PIGMENTAIRES BIOLIE®	201
FIGURE 165 : EXEMPLES D'ECHANTILLONS POUR OBSERVATION DE L'INFLUENCE DE LA 2EME COUCHE DE TEINTURE	202
FIGURE 166 : COMPARAISON DE 4 CONCENTRATIONS DE TEINTURE DE CHATAIGNER DECANTEES (A) OU MELANGEES (B) AVEC 3 APPLICATIONS PENDANT 97 JOURS	203
FIGURE 167 : ÉVOLUTION DE LA LUMINOSITE DES TEINTURES DE CHATAIGNER EN FONCTION DU TEMPS	204
FIGURE 168 : MESURES COLORIMETRIQUES APRES UN MOIS DE DECANTATION ET APRES ELIMINATION DU DEPOT, AVEC ET SANS AGITATION.....	206
FIGURE 169 : APPLICATION SUR PAPIER DES SOLUTIONS APRES DECANTATION ET APRES AGITATION	207
FIGURE 170 : DIFFERENCE DE CHROMATICITE ET LUMINOSITE POUR UN MEME ECHANTILLON DECANTE ET MELANGE.....	207
FIGURE 171 : COURBE D'ETALONNAGE DU DOSAGE DES SUCRES	208
FIGURE 172 : COURBE D'ETALONNAGE DU DOSAGE DES PHENOLS TOTAUX	210
FIGURE 173 : NUANÇAGES REALISES PAR SYSTEME PYRAMIDAL (PYRAMIDE 1, 2 ET 3)	212
FIGURE 174 : PLANCHE DE NUANÇAGE DES TEINTURES AVEC REACTIFS SUR PAPIER	213
FIGURE 175 : VIEILLISSEMENT A LA LUMIERE NATURELLE EN INTERIEUR DES ECHANTILLONS DE CONCENTRATION N°4	214
FIGURE 176 : ÉCHANTILLONS APRES VIEILLISSEMENT ARTIFICIEL AU SUNTEST.....	215
FIGURE 177 : COMPARAISON DU DELTA L* ENTRE LES ZONES IRRADIEES ET CELLES NON IRRADIEES.....	216
FIGURE 178 : COMPARAISON DU DELTA C* ENTRE LES ZONES IRRADIEES ET CELLES NON IRRADIEES	217
FIGURE 179 : COMPARAISON DU DELTA E* ENTRE LES ZONES IRRADIEES ET CELLES NON IRRADIEES.....	217
FIGURE 180 : PANNEAUX ECHANTILLONS DE CUIR RIGIDE TEINTES.....	218
FIGURE 181 : GRAPHIQUE DES DELTA L*, C* ET E* DES ECHANTILLONS DE CUIR TEINTES	219
FIGURE 182 : CERCLE CHROMATIQUE D'ECHANTILLONS DE BOIS TEINTES	223
FIGURE 183 : INSPIRATION CHROMATIQUE POUR LA REALISATION DE GAMMES A PARTIR DE 3 TEINTES DE BASES	231
FIGURE 184 : MODELE DES CINQ HORIZONS DE LA RECHERCHE SELON BRUNO LATOUR, 2001 [172].....	234
FIGURE 185 : ILLUSTRATION DES CONCEPTS DE MULTI-, INTER- ET TRANS- DISCIPLINARITE [173].....	238
FIGURE 186 : SCHEMATISATION DES DIFFERENTS TYPES DE MODELES	241
FIGURE 187 : CERCLE CHROMATIQUE ET COUPE VERTICALE DU SYSTEME NCS [178].....	243
FIGURE 188 : NUANCIER NCS [179]	244
FIGURE 189 : SCHEMATISATION DE LA METHODE DE TRAVAIL DE JEAN PHILIPPE LENCLLOS [180]	245
FIGURE 190 : COMPARAISON ENTRE LA METHODE DE LENCLLOS ET CELLE UTILISE DANS LE TRAVAIL DE THESE	246
FIGURE 191 : EXEMPLE DU PASSAGE DU TERRITOIRE AU CODE AVEC UNE EXPERIMENTATION TEXTILE	247
FIGURE 192 : CARTOGRAPHIE DE VETEMENTS PAR KOBAYASHI [181]	248
FIGURE 193 : METHODE KOBAYASHI, ENTRE TERRITORIAL ET RETICULAIRE (CELINE CAUMON).....	248
FIGURE 194 : EXEMPLE DE CARTOGRAPHIE PAR KOBAYASHI, « COLORIST », 1999 [181]	249
FIGURE 195 : EXEMPLE DE LA CARTOGRAPHIE REALISE POUR L'ANALYSE DU PIN MARITIME	249
FIGURE 196 : REPRESENTATION DES COULEURS DU RECYCLAGE [3]	251
FIGURE 197 : PRESENTATION GLOBALE DE LA MARQUE OSPHER	272

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COMPOSITION DU COLLAGENE DE TYPE I [47]	41
TABLEAU 2 : NNORME NF 622-5 "CARACTERISATION DES PANNEAUX MDF POUR USAGE EN MILIEU SEC" [51]	45
TABLEAU 3 : TYPOLOGIES ET NOTATIONS DES DECHETS DE CUIRS RECEPTIONNES PAR API'UP.....	47
TABLEAU 4 : PROTOCOLES PERMETTANT DE TESTER LA DIMINUTION DU TAUX DE COLLE.....	66
TABLEAU 5 : PROTOCOLES PERMETTANT DE TESTER LA DIMINUTION DE LA DENSITE.....	66

TABLEAU 6 : COMPOSITION DES MELANGES DE COULEURS SELECTIONNES POUR LA GAMME OSPHER.....	74
TABLEAU 7 : CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE DE PANNEAUX DE « LIEGE DE CUIR »	81
TABLEAU 8 : DESCRIPTION DES ESSAIS DE MELANGE CUIR / FIBRE.....	82
TABLEAU 9 : MODALITE DES ESSAIS DE PULVERISATION	82
TABLEAU 10 : PERFORMANCES MECANQUES DES PANNEAUX DE TYPE MDF	88
TABLEAU 11 : RESULTAT DES CONTRAINTES MAX EN FLEXION	92
TABLEAU 12 : CARACTERISTIQUES DES PANNEAUX DE TYPE MDF FABRIQUES A PARTIR DE CUIRS FIBREUX	93
TABLEAU 13 : CARACTERISTIQUES DES PANNEAUX DE TYPE MDF FABRIQUES A PARTIR DE CUIRS FIBREUX ET DE COLLE TANIN	94
TABLEAU 14 : CARACTERISTIQUES DU POLYPROPYLENE [67].....	103
TABLEAU 15 : TABLEAU DE LA NORME NF 622-5 "CARACTERISATION DES PANNEAUX MDF POUR USAGE EN MILIEU SEC" [70]	107
TABLEAU 16 : PARAMETRES DES ESSAIS D'OPTIMISATION DE LA COUCHE INTERNE	114
TABLEAU 17 : REPARTITION DES COMPOSES CHIMIQUES DU BOIS SELON DIFFERENTES ESSENCES [96]	159
TABLEAU 18 : COORDONNEES CHROMATIQUES L*, A*, B* DU PARQUET DE PIN MARITIME MESURE SOUS ILLUMINANT C, OBSERVATEUR STANDARD 2°	171
TABLEAU 19 : LISTE DES COLORANTS ET PIGMENTS DE LA PALETTE "LOCALE" SELECTIONNEE.....	185
TABLEAU 20 : SYSTEME DE MELANGE DE COULEURS EN TABLEAU A DOUBLE ENTREE	190
TABLEAU 21 : TABLEAU DES MASSES DE DEPOTS DES TEINTURES DE CHATAIGNER	205
TABLEAU 22 : POURCENTAGE DES SUCRES ET DES PHENOLS DANS LES EXTRAITS DE BOURDAINE ET DE CHATAIGNER	208
TABLEAU 23 : POURCENTAGE DES PHENOLS TOTAUX OBTENUS	210

TABLE DES ANNEXES

Annexe n°1 : Brevet « Procédé de fabrication de pièces composites à partir de cuir, produits obtenus »

Annexe n°2 : Exposition Galerie via, Paris

Annexe n°3 : Évolution du Nuancier Sokoa

Annexe n°4 : Fiches techniques des extraits végétaux

Annexe n°5 : Articles

Annexe n°6 : Posters

ANNEXE N°1 : BREVET DÉPOSÉ PAR API'UP

R É P U B L I Q U E F R A N Ç A I S E



Brevet d'invention

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

DÉCISION DE DÉLIVRANCE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle décide que le brevet d'invention n° **20 05182** dont le texte est ci-annexé est délivré à :
API'UP Association déclarée Loi 1901

La délivrance produit ses effets pour une période de vingt ans à compter de la date de dépôt de la demande, sous réserve du paiement des redevances annuelles.

Mention de la délivrance est faite au Bulletin officiel de la propriété industrielle n° 22/21 du 27.05.22 (n° de publication 3 110 485).

Fait à Courbevoie, le 27.05.22

Pour le directeur général de l'Institut National
de la Propriété Industrielle

Philippe CADRE
Directeur de la propriété industrielle

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①① N° de publication : **3 110 485**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **20 05182**

⑤① Int Cl⁸ : **B 29 C 70/00 (2019.12), B 29 C 51/02, C 08 J 5/00**

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ PROCÉDE DE FABRICATION DE PIÉCES COMPOSITES A PARTIR DE CUIR, PRODUITS OBTENUS.

②② Date de dépôt : 20.05.20.

③③ Priorité :

⑥③ Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : API'UP Association déclarée Loi 1901 — FR.

④③ Date de mise à la disposition du public de la demande : 26.11.21 Bulletin 21/47.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 27.05.22 Bulletin 22/21.

⑦② Inventeur(s) : FERNANI Valérie et LEROYER Léo.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

⑦③ Titulaire(s) : API'UP Association déclarée Loi 1901.

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦④ Mandataire(s) : AQUINOV.

FR 3 110 485 - B1



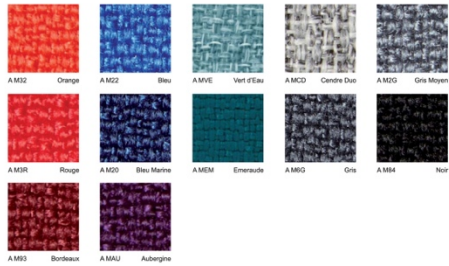
ANNEXE N° 2: EXPOSITION GALERIE VIA, PARIS



ANNEXE N° 3 : ÉVOLUTION DU NUANCIER SOKOA

A
IMAGE

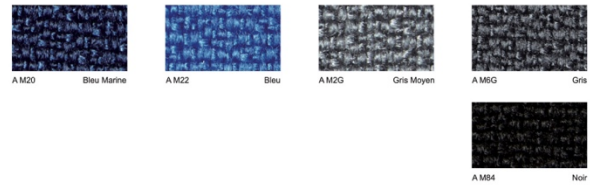
2020



A

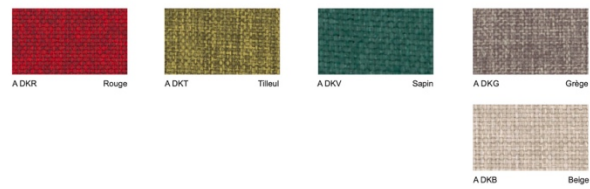
2022

IMAGE | Polyoléfine



A

DEKORA | Polyoléfine



B

X-TREVIRA M1

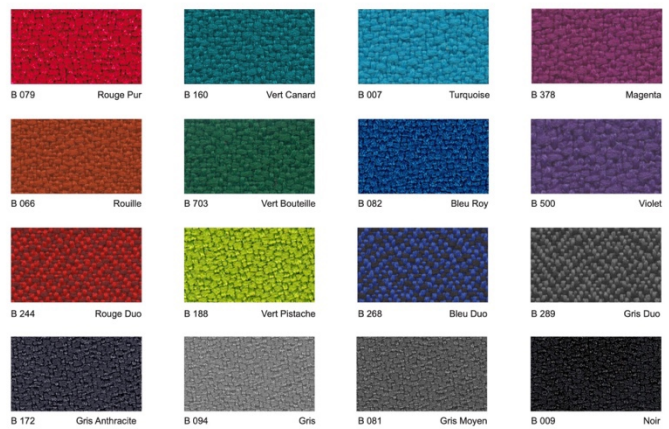
2020



B

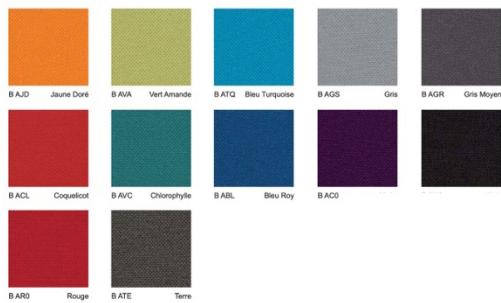
X-TREVIRA | Polyester

2022



B

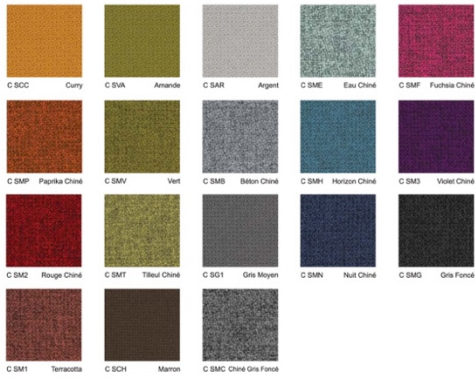
ATLANTIC & NAPEL



C

2020

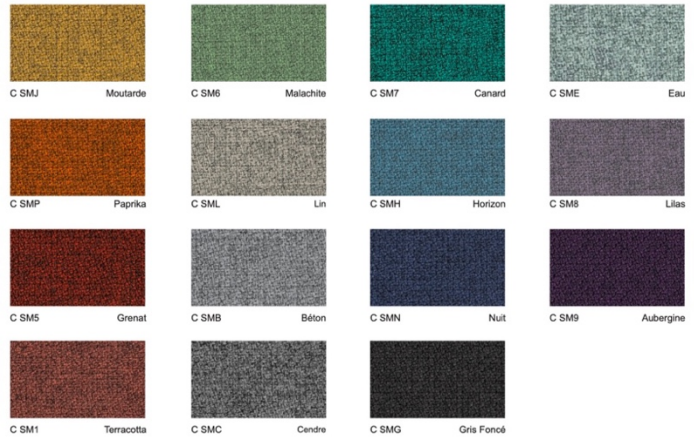
STEP & STEP Mélange M1



C

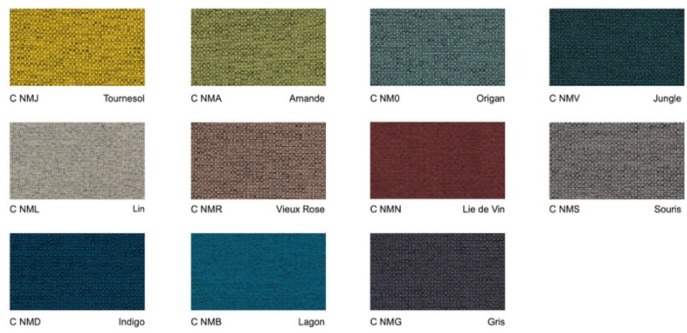
2022

STEP Mélange | Polyester



C

NOMA | 100% Polyester recyclé



C

ATLANTIC | Polyester



ANNEXE N° 4 : FICHES TECHNIQUES DES EXTRAITS VÉGÉTAUX

p 1/3



FICHE DE SPECIFICATIONS TECHNICAL SPECIFICATIONS

C25 - Extrait de Bourdaine
C25 - Alder Buckthorn extract

Rhamnus frangula L.

NOMENCLATURE / NOMENCLATURE

N° CAS	N° EINECS / EC	NOM INCI / INCI NAME
[84625-48-9]	283-418-8	Frangula alnus bark extract
[9050-36-6]	232-940-4	Maltodextrin

PROCEDE D'OBTENTION / ORIGIN AND PROCESS

Matériau première / Raw material : Ecorce sèche broyée - Produit en Europe / Dried grinded bark - produced in Europe

Procédé / Process : Extraction hydroalcoolique de la plante ; filtration ; concentration ; séchage ; traitement de décontamination - Fabriqué en France
Plant extraction in alcohol and water; filtration; concentration; drying; decontamination treatment - Produced in France

DESCRIPTION DU PRODUIT / PHYSICAL ASPECTS

Texture : Poudre
Texture : Powder
Couleur : Brun-Jaune
Color : Brown-Yellow
Odeur : Spécifique
Odor : Specific

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES / CHEMICAL AND PHYSICAL DATA

CRITERES / CRITERIA	SPECIFICATIONS / SPECIFICATIONS	METHODES / METHODS
Support de séchage / Spray drying excipient	[10-30%] maltodextrines	
Humidité / Humidity	< 15 %	105°C - 3h
Densité apparente / related density	[0,40 - 0,75]	
pH / pH	[4,0 - 5,0]	solution 1% H ₂ O 25° C
Intensité colorante / Colour intensity $E_{1\%}^{1cm}$	[30-60]	methanol 80%
Insolubles / Insolubles	< 15 %	> 8 µm, solution à 0,1 % masse dans H ₂ O à 50 °C > 8 µm, solution 0,1% in H ₂ O at 50°C
Solubilité H ₂ O / Solubility H ₂ O	Moyenne à bonne / Medium to good	à 25 °C / at 25 °C
Solubilité H ₂ O/EtOH (50/50)	Bonne / Good	
Solubilité H ₂ O/EtOH (50/50)		

Couleurs de Plantes
18, rue de l'Arсенal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Version 2 - 28/11/2018

p 2/3

p 3/3

STOCKAGE ET CONSERVATION / WAREHOUSING AND STORAGE

Produit hygroscopique. Conserver à l'abri de l'humidité et de la lumière, dans l'emballage hermétiquement fermé. Refermer les sachets hermétiquement après usage, les doubler si besoin.
Durée de conservation optimale : 36 mois à compter de la date de fabrication (ré-analyses au-delà de cette date).

Hygroscopic product. Keep away from moisture and light, in the original packaging hermetically sealed. Close the bag lightly after use, doubled if necessary.
Maximum shelf life: 36 months from the date of manufacture (reanalysis beyond that date).

MICROBIOLOGIE / MICROBIOLOGY

CRITERES / CRITERIA	SPECIFICATIONS (ufc/g) SPECIFICATIONS (ufc/g)
Germes totaux / Total aerobic flora (NF ISO 21149)	< 1000
Levures - moisissures / Yeast and Mould (NF EN ISO 16212)	< 100
Entérobactéries / Enterobacteria (P.E.2.6.13)	Absence

ANALYSES / ANALYSIS

METEAUX LOURDS / HEAVY METALS :

ELEMENTS	SPECIFICATIONS* SPECIFICATIONS
Arsenic / Arsenic	< 3 ppm
Cadmium / Cadmium	< 10 ppm
Chrome / Chromium	< 10 ppm
Cuivre / Copper	< 30 ppm
Mercure / Mercury	< 1 ppm
Nickel / Nickel	< 30 ppm
Plomb / Lead	< 20 ppm
Zinc / Zinc	< 150 ppm

*limite de quantification 0,05 ppm - méthode ICP/AES / limit of quantification 0,05 ppm - method ICP/AES

PESTICIDES / PESTICIDES :

ELEMENTS	SPECIFICATIONS* / SPECIFICATION
Analyse multi-résidus (225 molécules) / Multiresidual (225 molecules)	< 10 ppm

* limite de quantification 0,01 ppm - méthode GC-MS / limit of quantification 0,01 ppm - method GC-MS

ALLERGENES / ALLERGENS :

Recherche des 26 allergènes, selon le 7^e amendement de la Directive cosmétique 2003/15/CE
Search of 26 allergens, according to the 7th Amendment to the Cosmetics Directive 2003/15/EC

ALLERGENES* / ALLERGENS	
Amyl cinnamal CAS : 122-40-7	Anise alcohol CAS : 105-13-5
Amylcinnamyl alcohol CAS : 101-85-9	Benzyl benzoate CAS : 120-51-4
Benzylalcohol CAS : 100-51-6	Benzyl cinnamate CAS : 103-41-3
Benzyl salicylate CAS : 118-58-1	Citronellol CAS : 106-22-9
Cinnamyl alcohol CAS : 104-54-1	Farnesol CAS : 4602-84-0
Cinnamal CAS : 104-55-2	Hexyl cinnamal CAS : 101-86-0
Citral CAS : 5392-40-5	Butylphenyl methylpropional CAS : 80-54-6
Coumarin CAS : 91-64-5	Limonene CAS : 5989-27-5
Eugenol CAS : 97-53-0	Linalool CAS : 78-70-6
Geraniol CAS : 106-24-1	Methyl 2-octynoate CAS : 111-12-6
Hydroxycitronellal CAS : 107-75-5	Alpha-isomethyl Ionone CAS : 127-51-5
Hydroxyisohexyl 3 - Cyclohexene carboxaldehyde CAS : 31906-04-4	Evernia furfuracea extract CAS : 90028-67-4
Isoeugenol CAS : 97-54-1	Evernia prunastri extract CAS : 90028-68-5

*limite de quantification 1 ppm - méthode GC-MS / limit of quantification 1 ppm - method GC-MS

Couleurs de Plantes
18, rue de l'Arсенal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Version 2 - 28/11/2018

Couleurs de Plantes
18, rue de l'Arсенal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Version 2 - 28/11/2018



FICHE DE SPECIFICATIONS TECHNICAL SPECIFICATIONS

C15 - Extrait de Chataignier
C15 - Chestnut extract

Castanea sativa L.

NOMENCLATURE / NOMENCLATURE

N° CAS	N° EINECS / EC	NOM INCI / INCI NAME
[84695-99-8]	283-619-0	Castanea sativa (chestnut) extract

PROCEDE D'OBTENTION / ORIGIN AND PROCESS

Matière première / Raw material :	Bois broyé - Produit en Europe / Grinded wood – produced in Europe
Procédé / Process :	Extraction aqueuse du bois ; filtration ; concentration ; séchage Wood extraction in water; filtration; concentration; drying

DESCRIPTION DU PRODUIT / PHYSICAL ASPECTS

Texture :	Poudre	Couleur : Marron	Odeur : Spécifique
Texture :	Powder	Color : Brown	Odor : Specific

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES / CHEMICAL AND PHYSICAL DATA

CRITERES / CRITERIA	SPECIFICATIONS	METHODES / METHODS
Support de séchage / Spray drying excipient	[0-20%] maltodextrines	
Humidité / Humidity	< 10 %	105°C – 3h
Densité apparente / related density	[0,40 – 0,50]	
pH / pH	[3,0 – 4,5]	solution 1% H ₂ O 25° C
Intensité colorante / Colour intensity $E_{272}^{1\%}$	[190-260]	methanol 80%
Insolubles / Insolubles	< 10 %	> 8 µm, solution à 0,1 % masse dans H ₂ O à 50 °C > 8 µm, solution 0,1% in H ₂ O at 50°C
Solubilité H ₂ O / Solubility H ₂ O	Bonne / Good	
Solubilité H ₂ O/EtOH (50/50)	Bonne / Good	à 25 °C / at 25 °C
Solubilité H ₂ O/EtOH (50/50)		

Couleurs de Plantes
18, rue de l' Arsenal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Version 16/02/2015

p 2/3

STOCKAGE ET CONSERVATION / WAREHOUSING AND STORAGE

Produit hygroscopique. Conserver à l'abri de l'humidité et de la lumière, dans l'emballage d'origine hermétiquement fermé. Refermer les sachets hermétiquement après usage, les doubler si besoin.
Durée de conservation optimale : 36 mois à compter de la date de fabrication (ré-analyses au-delà de cette date).

Hygroscopic product. Keep away from moisture and light, in the original packaging hermetically sealed. Close the bag lightly after use, doubled if necessary.
Maximum shelf life: 36 months from the date of manufacture (reanalysis beyond that date).

MICROBIOLOGIE / MICROBIOLOGY

CRITERES / CRITERIA	SPECIFICATIONS (ufc/g) SPECIFICATIONS (ufc/g)
Germes totaux / Total aerobic flora (NF ISO 21149)	< 1000
Levures – moisissures / Yeast and Mould (NF EN ISO 16212)	< 100
Entérobactéries / Enterobacteria (P.E.2.6.13)	Absence

ANALYSES / ANALYSIS

METEAUX LOURDS / HEAVY METALS :

ELEMENTS	SPECIFICATIONS* SPECIFICATIONS
Arsenic / Arsenic	< 3 ppm
Cadmium / Cadmium	< 10 ppm
Chrom / Chromium	< 10 ppm
Cuivre / Copper	< 30 ppm
Mercur / Mercury	< 1 ppm
Nickel / Nickel	< 30 ppm
Plomb / Lead	< 20 ppm
Zinc / Zinc	< 150 ppm

*limite de quantification 0,05 ppm - méthode ICP/AES / limit of quantification 0,05 ppm - method ICP/AES

PESTICIDES / PESTICIDES :

ELEMENTS	SPECIFICATIONS* / SPECIFICATION
Analyse multi-résidus (225 molécules) / Multiresidual (225 molecules)	< 10 ppm

* limite de quantification 0,01 ppm - méthode GC-MS / limit of quantification 0,01 ppm - method GC-MS

Couleurs de Plantes
18, rue de l' Arsenal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Version 16/02/2015

ALLERGENES / ALLERGENS :

Recherche des 26 allergènes, selon le 7^e amendement de la Directive cosmétique 2003/15/CE
Search of 26 allergens, according to the 7th Amendment to the Cosmetics Directive 2003/15/EC

ALLERGENES* / ALLERGENS	
Amyl cinnamal CAS : 122-40-7	Anise alcohol CAS : 105-13-5
Amyloinnamyl alcohol CAS : 101-85-9	Benzyl benzoate CAS : 120-51-4
Benzylalcohol CAS : 100-51-6	Benzyl cinnamate CAS : 103-41-3
Benzyl salicylate CAS : 118-58-1	Citronellol CAS : 106-22-9
Cinnamyl alcohol CAS : 104-54-1	Farnesol CAS : 4602-84-0
Cinnamal CAS : 104-55-2	Hexyl cinnamal CAS : 101-86-0
Citral CAS : 5392-40-5	Butylphenyl methylpropional CAS : 80-54-6
Coumarin CAS : 91-64-5	Limonen CAS : 5989-27-5
Eugenol CAS : 97-53-0	Linalool CAS : 78-70-6
Geraniol CAS : 106-24-1	Methyl 2-octynoate CAS : 111-12-6
Hydroxycitronellal CAS : 107-75-5	Alpha-isomethyl ionone CAS : 127-51-5
Hydroxyisohexyl 3 - Cyclohexene carboxaldehyde CAS : 31905-04-4	Evernia furfuracea extract CAS : 90028-67-4
Isoeugenol CAS : 97-54-1	Evernia prunastri extract CAS : 90028-68-5

*limite de quantification 1 ppm - méthode GC-MS / limit of quantification 1 ppm - method GC-MS

p 3/3

Couleurs de Plantes
18, rue de l' Arsenal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Version 16/02/2015

Couleurs de Plantes
18, rue de l' Arsenal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Version 16/02/2015



BULLETIN D'ANALYSES / ANALYSIS REPORT

C15 – Extrait de Chataignier C15 – Chestnut extract

Lot / Batch N° 14-3	Date de fabrication / Manufacturing date	03/2014
	Date de ré-analyse / Re-analysis date	09/2019
	Nouvelle DLUO / New Optimal shelf life	09/2022

ANALYSES PHYSICO-CIMIQUES / PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS

CRITERES / CRITERIA	RESULTATS Lot N° 14-3 RESULTS Batch N° 14-3
Support de séchage/ Spray drying excipient	Maltodextrines 0 %
Humidité / Humidity	8,6 %
Densité apparente / Related density	0,416
pH / pH	3,75
Intensité colorante / Colour intensity $E_{272}^{1\%}$	224,5
Insolubles/ Insolubles	0,5 %
Solubilité H ₂ O / Solubility H ₂ O	Conforme / Conform
Solubilité H ₂ O/EtOH (50/50) / Solubility H ₂ O/EtOH (50/50)	Conforme / Conform

MICROBIOLOGIE / MICROBIOLOGY

CRITERES / CRITERIA	RESULTATS (ufc/g) Lot N° 14-3 RESULTS (ufc/g) Batch N° 14-3
Germes totaux / Total aerobic flora	< 100
Levures – moisissures / Yeast and Mould	< 10
Entérobactéries / Enterobacteria	absent

Couleurs de Plantes
18, rue de l'Arsenal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Etabli / Established - 26/09/2019

ANALYSES / ANALYSIS

METEAUX LOURDS / HEAVY METALS :

ELEMENTS / ELEMENTS	RESULTATS ppm Lot N° 14-3 RESULTS ppm Batch N° 14-3
Arsenic / Arsenic	0,17
Cadmium / Cadmium	< 0,05
Chrome / Chromium	0,78
Cuivre / Copper	1,57
Mercure / Mercury	< 0,05
Nickel / Nickel	3,06
Plomb / Lead	< 0,05
Zinc / Zinc	10,45

PESTICIDES / PESTICIDES :

ELEMENTS / ELEMENTS	RESULTATS Lot N° 14-3 RESULTS Batch N° 14-3
Analyse multi-résidus / Multiresidual analysis	< 10 ppm

ALLERGENES :

ALLERGENES (lot 02-1017) ALLERGENS (batch 02-1017)	ppm	ALLERGENES (lot 02-1017) ALLERGENS (batch 02-1017)	ppm
Amyl cinnamal CAS : 122-40-7	< 1	Anise alcohol CAS : 105-13-5	< 1
Amylcinnamyl alcohol CAS : 101-85-9	< 1	Benzyl benzoate CAS : 120-51-4	< 1
Benzylalcohol CAS : 100-51-6	< 1	Benzyl cinnamate CAS : 103-41-3	< 1
Benzyl salicylate CAS : 118-58-1	< 1	Citronellol CAS : 106-22-9	< 1
Cinnamyl alcohol CAS : 104-54-1	< 1	Farnesol CAS : 4602-84-0	< 1
Cinnamal CAS : 104-55-2	< 1	Hexyl cinnamal CAS : 101-86-0	< 1
Citral CAS : 5392-40-5	< 1	Butylphenyl methylpropional CAS : 80-54-6	< 1
Coumarin CAS : 91-64-5	< 1	Limonen CAS : 138-86-3	< 1
Eugenol CAS : 97-53-0	< 1	Linalool CAS : 78-70-6	< 1
Geraniol CAS : 106-24-1	< 1	Methyl 2-octynoate CAS : 111-12-6	< 1
Hydroxycitronellal CAS : 107-75-5	< 1	Alpha-isomethyl ionone CAS : 127-51-5	< 1
Hydroxyisohexyl 3 - cyclohexene carboxaldehyde CAS : 31906-04-4	< 1	Evernia furfuracea extract	Negative
Isoeugenol CAS : 97-54-1	< 1	Evernia prunastri extract	Negative

Couleurs de Plantes
18, rue de l'Arsenal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Etabli / Established - 26/09/2019



BULLETIN D'ANALYSES / ANALYSIS REPORT

C25 – Extrait de Bourdaine C25 – Alder Buckthorn extract

Lot / Batch N° 21-1-FP (Flash Pasteurized)	Date de fabrication / Manufacturing date	05/2021
	DLUO / Optimal shelf life	05/2024

ANALYSES PHYSICO-CIMIQUES / PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS

CRITERES / CRITERIA	RESULTATS Lot N° 21-1-FP RESULTS Batch N° 21-1-FP
Support de séchage/ Spray drying excipient	Maltodextrines 20 %
Humidité / Humidity	1,9 %
Densité apparente / Related density	0,730
pH / pH	4,9
Intensité colorante / Colour intensity $E_{272}^{1\%}$	35,8
Insolubles/ Insolubles	2,6%
Solubilité H ₂ O / Solubility H ₂ O	Conforme / Conform
Solubilité H ₂ O/EtOH (50/50) / Solubility H ₂ O/EtOH (50/50)	Conforme / Conform

MICROBIOLOGIE / MICROBIOLOGY

CRITERES / CRITERIA	RESULTATS (ufc/g) Lot N° 21-1-FP RESULTS (ufc/g) Batch N° 21-1-FP
Germes totaux / Total aerobic flora	< 100
Levures – moisissures / Yeast and Mould	< 10
Entérobactéries / Enterobacteria	absent

Couleurs de Plantes
18, rue de l'Arsenal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Etabli / Established 07/06/2021

ANALYSES / ANALYSIS

METEAUX LOURDS / HEAVY METALS :

ELEMENTS / ELEMENTS	RESULTATS ppm Lot N° 14-1 RESULTS ppm Batch N° 14-1
Arsenic / Arsenic	0,10
Cadmium / Cadmium	< 0,05
Chrome / Chromium	0,07
Cuivre / Copper	3,87
Mercure / Mercury	< 0,05
Nickel / Nickel	1,59
Plomb / Lead	0,068
Zinc / Zinc	6,89

PESTICIDES / PESTICIDES :

ELEMENTS / ELEMENTS	RESULTATS Lot N° 14-1 RESULTS Batch N° 14-1
Analyse multi-résidus / Multiresidual analysis	< 10 ppm

ALLERGENES :

ALLERGENES (lot 14-1) ALLERGENS (batch 14-1)	ppm	ALLERGENES (lot 14-1) ALLERGENS (batch 14-1)	ppm
Amyl cinnamal CAS : 122-40-7	< 1	Anise alcohol CAS : 105-13-5	< 1
Amylcinnamyl alcohol CAS : 101-85-9	< 1	Benzyl benzoate CAS : 120-51-4	< 1
Benzylalcohol CAS : 100-51-6	< 1	Benzyl cinnamate CAS : 103-41-3	< 1
Benzyl salicylate CAS : 118-58-1	< 1	Citronellol CAS : 106-22-9	< 1
Cinnamyl alcohol CAS : 104-54-1	< 1	Farnesol CAS : 4602-84-0	< 1
Cinnamal CAS : 104-55-2	< 1	Hexyl cinnamal CAS : 101-86-0	< 1
Citral CAS : 5392-40-5	< 1	Butylphenyl methylpropional CAS : 80-54-6	< 1
Coumarin CAS : 91-64-5	15	Limonen CAS : 138-86-3	< 1
Eugenol CAS : 97-53-0	< 1	Linalool CAS : 78-70-6	< 1
Geraniol CAS : 106-24-1	< 1	Methyl 2-octynoate CAS : 111-12-6	< 1
Hydroxycitronellal CAS : 107-75-5	< 1	Alpha-isomethyl ionone CAS : 127-51-5	< 1
Hydroxyisohexyl 3 - cyclohexene carboxaldehyde CAS : 31906-04-4	< 1	Evernia furfuracea extract	Absent
Isoeugenol CAS : 97-54-1	8	Evernia prunastri extract	Absent

Couleurs de Plantes
18, rue de l'Arsenal 17300 ROCHEFORT FRANCE
Tél. +33(0)5 46 99 32 49

Etabli / Established 07/06/2021

ANNEXE N° 5 : ARTICLES PUBLIÉS

Colorants biosources pour une industrie de la couleur textile plus verte : cas de la synthèse enzymatique pili©

Biosource dyes and pigments for a greener textile color industry: case of pili© enzymatic synthesis.

Estelle Guerry¹, Léa Diaz²

¹ Université de Toulouse, Laboratoire LARA-SEPPIA, France, eguerry.contact@gmail.com

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS-UMR 5254, IPREM, Mont de Marsan, France, lea.diaz@sfr.fr

RÉSUMÉ. Ce papier porte sur le procédé biotechnologique développé par l'entreprise PILI©, la synthèse enzymatique à partir de carbone renouvelable pour la production de molécules colorantes. Ce procédé innovant permet la production de colorants biosourcés, visant la réduction de l'empreinte environnementale de l'industrie de la couleur. Reposant sur les biotechnologies et des procédés hybrides alliant fermentation industrielle et chimie verte, l'entreprise produit aujourd'hui des gammes de couleurs performantes dédiées aux applications les plus polluantes : textiles, encres, polymères, peintures et revêtements. L'étude repose sur une revue de la littérature qui a permis d'établir un diagnostic des dernières innovation dans l'industrie textile française et la production de colorants biosourcés, identifiant ainsi le procédé développé par l'entreprise PILI© et de déterminer les freins, leviers et perspectives applicatives du procédé développé.

ABSTRACT. This paper deals with the biotechnological process developed by the company PILI©, the enzymatic synthesis from renewable carbon for the production of dye molecules. This innovative process allows the production of biologically based dyes and aims to reduce the environmental footprint of the dye industry. Based on biotechnology and hybrid processes combining industrial fermentation and green chemistry, the company now produces a range of high-performance dyes for the most polluting applications: Textiles, inks, polymers, paints and coatings. The study is based on a literature review that made it possible to diagnose recent innovations in the French textile industry and the production of bio-based dyes, thus identifying the process developed by the company PILI© and determining the obstacles, levers and application prospects of the developed process.

MOTS-CLÉS. innovation, savoir-faire, biotechnologie, biomatériaux, molécules colorantes.

KEYWORDS. innovation, know-how, biotechnology, biomaterials, dye molecules.

1. Introduction

L'industrie de la coloration est l'une des plus nocives pour l'environnement, 99% des colorants sont fabriqués à partir de ressources fossiles [HAS 17a]. Le secteur textile est le plus grand consommateur de colorants, utilisant chaque année près de 7 millions de tonnes de ces substances [OGU 11]. Les colorants dérivés du pétrole ont été largement utilisés jusqu'à récemment en raison de leur faible coût et de leur performance élevée, résistant à la décoloration lors de l'exposition à la sueur, à la lumière, à l'eau, à de nombreux produits chimiques, y compris les agents oxydants, et aux attaques microbiennes. Les colorants

synthétiques fournissent également une large gamme de teintes, ils présentent un profil de résistance à l'humidité élevé, une grande facilité d'application et la possibilité d'obtenir des couleurs brillantes résistantes à l'usure [WAN 09]. Mais pour obtenir un tel résultat, la production de 1 Kg de colorant pétrochimique requiert l'utilisation de 100 Kg de pétrole, 10 Kg de produits chimiques toxiques, une importante quantité d'énergie pour le chauffage à haute température et 1 000 L d'eau, les produits textiles étant généralement teints par des colorants dissous ou dispersés dans l'eau, étape appelée bain de teinture, suivie d'une étape de rinçage [KHA 14]. Les problèmes de pollution liés à la production de ces colorants n'ont commencé à être pris au sérieux que très récemment. Cette prise de conscience met au jour le fait que certaines industries, notamment le secteur textile, sont à la fois très polluantes et néfastes, tant pour les travailleurs que pour la population¹. Les grandes quantités d'eau nécessaires au procédé de fabrication précédemment évoqué, se chargent en effet de colorants non fixés sur les tissus qui se retrouvent en fortes concentrations dans les effluents textiles [HAS 17b], ainsi que d'additifs chimiques avant d'être expulsés sous forme d'eaux usées qui, à leur tour, polluent l'environnement par la chaleur des effluents, par un pH élevé et par la saturation de colorants, d'agents anti-mousse, d'agents de blanchiment, de détergents, d'azurants optiques, d'égaliseurs et de nombreux autres produits chimiques utilisés au cours du processus [HOL 16] [JUA 96]. La quantité d'eau consommée et rejetée varie également en fonction du type de tissus produits [ANA 12]. Presque 0,08 – 0,15 m³ d'eau est utilisée pour produire un kilogramme de tissu. On estime qu'environ 1 000 à 3 000 m³ d'eau sont évacués après le traitement d'environ 12 à 20 tonnes de textiles par jour [AIK 04]. Ces effluents sont donc riches en colorants et produits chimiques dont certains sont non biodégradables, cancérigènes et constituent une menace majeure pour l'environnement et la santé [ACU 04].

Concernant l'impact sanitaire des colorants, les dangers les plus courants liés aux colorants réactifs sont les problèmes respiratoires dus à l'inhalation de particules de colorants. Parfois, ils peuvent affecter le système immunitaire d'une personne et, dans des cas extrêmes, le corps peut réagir de façon spectaculaire. C'est ce qu'on appelle la sensibilisation respiratoire. Les symptômes comprennent des démangeaisons, des yeux larmoyants, des éternuements et des signes d'asthme tels que la toux et une respiration sifflante [HAS 16]. Les problèmes de santé les plus prédominants liés aux processus de teinture et de finition proviennent peut-être de l'exposition à des produits chimiques agissant comme des irritants. Ceux-ci peuvent provoquer une irritation de la peau, des démangeaisons ou un nez bouché, des éternuements et des yeux douloureux. En effet, les colorations comprennent des résines à base de formaldéhyde ; de l'ammoniac ; de l'acide acétique ; certains produits chimiques anti-rétrécissement ; certains azurants optiques comme le carbonate de soude, la soude caustique ou l'eau de Javel. Certains colorants réactif de cuve, qui ensuite se dispersent, sont également reconnus comme sensibles pour la peau [HSE n/a].

¹ Le 24 avril 2013, dans la périphérie de Dacca (Bangladesh), un événement tragique a eu lieu au Rana Plaza, entraînant de lourdes conséquences liées à la mondialisation de l'industrie textile. Cet immeuble, qui hébergeait des centaines d'ouvriers du textile, était adjacent à d'autres sweatshops où des accidents se produisaient régulièrement. Entre 2009 et 2012, selon le *Bangladesh Institute of Labour Studies*, plus de 700 personnes sont décédées au travail dans des usines textiles. Le Bangladesh est devenu le deuxième exportateur mondial de textiles, après la Chine et devant l'Inde, en employant des mères célibataires, des veuves, des femmes répudiées et de nombreux enfants, pour des salaires dérisoires et dans des conditions de travail relevant du travail forcé [FUM 13].

Il apparaît donc crucial de trouver des solutions saines et plus écologiques pour la production de colorants. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, les colorants végétaux ont été envisagés comme une alternative. Mais leur coût élevé et leur faible performance les ont empêchés d'être utilisés, jusqu'à aujourd'hui, à grande échelle [GAN 09]. En effet, l'extraction des matières premières dites naturelles prend du temps et la disponibilité des colorants naturels est limitée et très réglementée. De plus, les colorants naturels étant principalement extraits de plantes, ils dépendent des saisons de croissance contrairement aux colorants synthétiques produits en laboratoires. De plus, même si les colorants naturels produisent des couleurs vives et une variété de nuances, ils ont tendance à s'estomper plus rapidement que les colorants synthétiques. La cohérence chromatique est un problème. Il n'y a pas deux lots de teinture identiques en raison des impuretés qu'ils contiennent. Les fibres synthétiques, actuellement très populaires, ne peuvent pas être totalement fiables lorsque teintées avec des colorants naturels [TAY 08]. Enfin, certains mordants utilisés avec des colorants naturels peuvent eux-aussi être toxiques dans une certaine mesure. Quand bien même les fibres telles que la soie et la laine peuvent être teintées en les trempant directement dans un bain de teinture, d'autres matériaux comme le coton nécessitent un mordant. Une attention particulière et chronophage (difficile pour l'industrie de masse) est donc nécessaire pour pratiquer les teintures « saines ». Depuis quelques années, des recherches prometteuses concernant les couleurs et le développement de bio-mordant ont vu le jour afin de procéder à un pré-mordantage du substrat. Reste que les sources utilisées ne permettent pas la stabilisation de tous les colorants, réduisant alors la palette possible de couleurs [BAS 22]. Ces initiatives sont néanmoins prometteuses à l'heure où il est impératif d'envisager de nouveaux procédés de fabrication de colorants textiles qui soient plus respectueux des considérations sanitaires et environnementales, tout en répondant aux exigences de la production de masse que nous connaissons actuellement.

2. Matériel et méthode

Pour identifier les dernières innovations dans l'industrie textile française et la production de colorants biosourcés, la présente démarche a procédé à une revue de la littérature. Conduite manuellement, elle n'a fait l'objet d'aucune restriction langagière sur une période de 5 ans (2018 - 2023). Elle a été conduite dans un premier temps à partir de la base de données numérique Google Scholar, qui référence l'intégralité du contenu des principales bases de données scientifiques et académiques. Les mots-clés utilisés étaient : « colorant », « biosourcés », « industrie textile ». 3010 résultats ont été obtenus. Les articles dont les titres ne se référaient pas explicitement au sujet n'ont pas été retenus. Les *abstracts* des articles restants (96 résultats) ont été lus pour s'assurer qu'ils traitaient pleinement de la problématique ciblée. Mais ce ne fut le cas d'aucun d'entre eux car tous n'abordaient la problématique que partiellement. Au regard de ce constat, la recherche a été complétée par une recherche manuelle sur le moteur de recherche généraliste Google. Du fait du nombre conséquent de résultats (approximativement 7500 résultats), seuls les 150 premiers ont été examinés en raison de leur degré de pertinence. Chaque source sélectionnée (57 résultats) a fait l'objet d'une lecture approfondie pour identifier celles qui traitaient véritablement du sujet de cette étude (12 résultats).

3. Résultats et discussion

Il s'est avéré que les sources sélectionnées traitaient presque exclusivement d'un procédé développé par une jeune entreprise française : l'entreprise PILI[®]. L'étude s'est donc centrée sur l'identification de ce procédé, de ses freins, leviers et de ses perspectives applicatives.

3.1. Procédé de fabrication

La société PILI[®], *usines cellulaires de la couleur*, est à l'avant-garde du développement biochimique et se consacre au développement d'un procédé basé sur la synthèse enzymatique, exploitant des protéines puissantes qui catalysent la plupart des réactions biologiques se produisant chez tous les êtres vivants [BOI 23]. Basé à la TWB, Toulouse White Biotechnology (Toulouse, France), l'équipe conçoit des microorganismes et développe des méthodologies de synthèse et d'extraction durables. De plus, PILI[®] teste les propriétés de ses colorants issus de sources biologiques en partenariat avec le CNAM (Paris, France) et a implanté son premier site de production pilote à Roussillon, en Isère [PIL 22a].

Les colorants sont produits grâce à l'exploitation de nouvelles compétences développées à l'aide des techniques de pointe de la biologie de synthèse, en s'inspirant d'un processus de fermentation. Ce procédé historique est couramment utilisé dans la production à grande échelle d'autres composés, tels que l'insuline dans l'industrie pharmaceutique par exemple [COR 23]. Le procédé développé repose plus spécifiquement sur la conception de cascades enzymatiques pour obtenir des molécules colorantes à partir de sources de carbone renouvelable, tels que le sucre, les déchets agricoles et d'autres nutriments. Les premières souches utilisent comme matière première le sucre ; sucre produit chaque année naturellement par les plantes contrairement à d'autres composés comme le pétrole. Pour reproduire ce processus à grande échelle, les enzymes sont intégrées à des microorganismes telles que les bactéries. Ces microorganismes se développent dans de l'eau à température ambiante, utilisent le sucre comme matière première renouvelable et ne génèrent aucun sous-produit polluant. Les bactéries sont des "bio-fabriques" puissantes, car elles sont extrêmement efficaces chromatiquement sans causer de pollution [HOL 16]. Des recherches sont actuellement menées pour permettre aux microorganismes d'utiliser directement les déchets agricoles comme matière première [GLO 23]. C'est pourquoi la démarche permet la classification des colorants PILI[®] comme étant biosourcés². Ces derniers ne nécessitent ni pétrole ni produits chimiques et requièrent environ cinq fois moins d'eau et beaucoup moins d'énergie grâce à la production à température ambiante [KAT 80]. Ce n'est pas seulement un modèle efficace et durable, il permet également la production d'une large palette chromatique (fig. 1), qui comporte à ce jour plus d'une centaine de couleurs [FOR 20]. Le cas PILI[®] peut être mis en œuvre à grande échelle [GLO 23] et démontre qu'esthétique et résistance chromatique sont possibles *via* de nouvelles voies de production et de coloration.

² Le développement des colorants PILI[®] s'inscrit dans la mouvance de la chimie biosourcée en ayant recours à des matières premières issues de la biomasse végétale qui permettent de remplacer, partiellement ou en intégralité, les ressources fossiles (ici, plantes sucrières et déchets agricoles). Les produits finaux sont alors dénommés « biosourcés » dans la mesure où ils sont proviennent de cette biomasse. Elle offre à l'industrie de nouvelles opportunités pour répondre aux enjeux actuels et futurs de développement durable et de sûreté environnementale et sanitaire [APP 13].



Figure 1. Gamme initiale de couleurs PILI® (2017).

Les microorganismes reproduisent tout le savoir-faire acquis pour la production de molécules colorantes au fur et à mesure de leur reproduction. La duplication est très rapide et permet de formuler certaines couleurs capables de se reproduire toutes les 20 minutes. En une journée, il est possible d'observer des milliards de microorganismes, chacun produisant les molécules colorantes souhaitées. Une fois le processus terminé, les bactéries sont séparées des molécules colorantes par filtration, puis purifiées en les isolant des résidus du milieu de culture [HOL 16].

3.2. Bénéfices environnementaux et sanitaires

La synthèse enzymatique offre de nombreux avantages pour la production de biomatériaux, notamment par son efficacité énergétique remarquable et sa spécificité élevée dans la production de molécules. Elle constitue une alternative biosourcée aux molécules dérivées des sources fossiles, animales ou végétales [HSU 18]. Les colorants développés par la jeune entreprise PILI® présentent ainsi des bénéfices environnementaux supérieurs à ceux des colorants pétrochimiques classiques. Le processus de production mis en place est nettement plus respectueux de l'environnement, comme mentionné précédemment. De plus, ces colorants offrent des avantages pour la santé car ils ne contiennent pas de PCA³ (parachloro-aniline), substances fortement suspectées d'implications sanitaires liées aux colorants textiles. Les produits PILI® sont conformes aux réglementations européennes (REACH⁴) et ne présentent aucun risque sanitaire pour les utilisations auxquelles ils sont destinés [LAN 19]. À quand pour les marchés ?

3.3. Perspectives

Grâce à l'utilisation spécifique et efficace des enzymes, l'entreprise se consacre au développement de colorants adaptés non seulement à l'industrie textile, mais aussi à d'autres domaines d'application spécifiques. Toutefois, étant donné que l'industrie textile est le plus gros consommateur de colorants et que c'est le deuxième secteur le plus polluant après

³ La parachloroaniline (PCA) est une substance utilisée dans la fabrication de teintures rouges et oranges par l'industrie textile. Cette substance est classée comme cancérigène, toxique en cas d'ingestion, de contact avec la peau, d'inhalation et présente une toxicité aiguë pour les organismes aquatiques en cas de pollution des cours d'eau [ECH 23].

⁴ La réglementation REACH (règlement n°1907/2006) est une législation de 2007 visant la sécurité de la fabrication et de l'utilisation des substances chimiques dans l'industrie européenne. Les objectifs de REACH sont les suivants : protéger la santé humaine et l'environnement contre les risques potentiels des substances chimiques, assurer une information cohérente et transparente sur la nature et les risques des substances, qu'elles soient utilisées seules ou dans des mélanges, du fournisseur jusqu'au client final, garantir une manipulation sécurisée des substances chimiques par les travailleurs et assoir la compétitivité de l'industrie chimique. Ce règlement vise toutes les substances, y compris les substances naturelles et organiques utilisées dans des processus industriels et s'applique notamment aux produits textiles [ECH 06] [MIN 18].

l'industrie pétrolière, la priorité est accordée à ce secteur [CLA 07]. Néanmoins, des collaborations autres sont déjà en cours pour tester de nouvelles applications comme la couleur PILI[®] appliquée aux plastiques, aux encres, etc. Actuellement, les échantillons produits sont destinés à des tests internes, et l'accent est mis sur le développement de la gamme textile afin de commercialiser les premiers produits dans les deux à trois prochaines années, avant d'envisager une diversification. Deux axes principaux de travail sont développés simultanément pour surmonter les principaux obstacles : la réduction des coûts de production et la mise à l'échelle du processus [PIL 22b]. Il est également important de signaler que les colorants ne sont pas plus chers à produire, car bien que ce procédé soit radicalement nouveau dans le domaine des colorants, il repose essentiellement, comme évoqué précédemment, sur les mêmes procédés que ceux utilisés à grande échelle pour la production biologique de molécules thérapeutiques par exemple [RUT 16]. Ces procédés sont donc bien connus et les usines de production existent déjà. Ainsi, lorsque PILI[®] simule son développement (perspective personnelle de l'entreprise) et leurs développements (les couleurs innovantes) à grande échelle, les prix de vente obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux des colorants pétrochimiques. Certains de leurs produits colorés sont en cours de développement, d'autres sont en cours de validation. Ils sont tous testés dans diverses applications, et certains sont déjà à un stade pré-industriel [COL 2020].

En parallèle de ces recherches, des profils détaillés des bactéries avec lesquelles l'entreprise collabore ont été établis. Dans le but de mieux connaître le cycle de vie des bactéries, l'entreprise s'est transformée en une sorte de ferme à cultivations, produisant des *cultures in situ* de la couleur, directement sur le tissu [BAN 17]. Les ingénieurs ont alors observé que les molécules étaient capable de créer, non seulement des couleurs spécifiques, mais aussi des motifs particuliers (fig. 2). Des motifs créés par le vivant lui-même.



Figure 2. Motifs obtenus par le procédé de synthèse enzymatique PILI[®]

On peut alors se demander s'il serait possible de guider les bactéries vers l'élaboration de motifs définis. Il s'agit par ailleurs d'un questionnement en cours d'étude par l'entreprise, en marge du développement industriel du procédé initial. Cette nouvelle problématique conduit à repenser l'industrie du textile, ces molécules étant aujourd'hui capables de produire des motifs uniques, exempt de contrôle. Ce phénomène conduit à l'émergence d'un changement de paradigme dans la production textile industrielle [BRO 17],

aujourd'hui portée l'homogénéisation et la tendance. En effet, ces motifs ne répondent ni à l'un, ni à l'autre finalement.

4. Conclusion

L'utilisation de colorants biosourcés dans l'industrie textile est une tendance croissante qui répond aux préoccupations environnementales et humaines actuelles. Les colorants biosourcés sont des colorants naturels extraits de sources renouvelables tels que les plantes, les algues, les champignons, etc., qui offrent une alternative durable aux colorants synthétiques traditionnels. Les avantages des colorants biosourcés ne se limitent pas à leur origine naturelle. Ils peuvent également être produits de manière plus respectueuse de l'environnement, avec des processus de production moins énergivores et moins polluants. Les colorants ainsi créés par l'entreprise PILI[®], hérités des procédés de la chimie organique et des biotechnologies, offrent aujourd'hui une alternative à la coloration textile prétréochimique en s'exemptant des contraintes de la coloration végétale plus artisanale. De plus, la biofabrication de ces colorants offre souvent une palette plus large et plus nuancée que les colorants synthétiques. L'utilisation de ces couleurs, coloris biosourcés, dans l'industrie textile, est donc une évolution prometteuse pour un secteur qui cherche à réduire son impact sur l'environnement, tout en répondant aux attentes des consommateurs en matière de gammes, de modes et de qualité. Contrairement aux idées toutes faites, le design-couleur écologique offre de belles perspectives esthétiques et innovantes pour nos consommations futures...

Bibliographie

- [ACU 04] ACUNER, E., DILEK, F.B., « Treatment of tectilon yellow 2G by *Chlorella vulgaris* », *Process Biochemistry*, n°5, 623-631, 2004.
- [AIK 04] AL-KDASI, A., IDRIS, A., SAED, K., GUAN, C.T., « Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes - A review », *Global Nest: the Int. J.*, n° 3, p. 222-230, 2004.
- [ANA 12] ANANTHASHANKAR, R., Treatment of Textile Effluent Containing Reactive Red 120 dye using Advanced Oxidation, Thèse de doctorat, Dalhousie University, 2012.
- [APP 13] APPERT, O., ALARIO, F., « Vers une chimie biosourcée ». *Annales des Mines - Réalités industrielles*, n° 1, P. 44-53, 2013.
- [BAN 17] BANG, Y., « Microbes Might Paint Your Next Party Dress », *JSTOR Daily*, 2017.
- [BAS 22] BASERI, S., « Natural Bio-Source Materials for Green Dyeing of Cellulosic Yarns », *Journal of Natural Fibers*, n° 9, p. 3517-3528, 2022.
- [BOI 23] BOISSONNAT, G., « From an idea to a product, development and scale-up of a biobased pigment », *SCF 2023 Congress Proceedings*, Société Chimique de France, Nantes, 2023.
- [BRO 17] BROOKS, A., FLETCHER, K., FRANCIS, R.A., RIGBY, E., D., ROBERTS, T., « Fashion, Sustainability, and the Anthropocene », *Special issue: Utopia and fashion*, n° 3, p. 482-504, 2017.
- [CLA 07] CLAUDIO, L., « Waste Couture : Environmental Impact of the Clothing Industry », *Environmental Health Perspectives*, n° 9, p. 448-454, 2007.
- [COL 20] COLLECTIF, *Savoir et faire les textiles*, Actes sud, Arles, 2020.
- [COR 23] COROT, L., « Pili s'appuie sur la fermentation industrielle pour produire colorants et pigments », *L'usine Nouvelle*, <https://www.usinenouvelle.com/editorial/l-instant-tech-pili-s-appuie-sur-la-fermentation-industrielle-pour-produire-colorants-et-pigments.N2104491>, 2023.

- [ECH 06] ECHA EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. REACH n°1907/2006 legislation [Réglementation]. European Parliament and of the Council. <https://echa.europa.eu/fr/regulations/reach/understanding-reach-2006>.
- [ECH 23] ECHA EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. Substance Infocard—Chloroaniline. <https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.003.093>, 2023.
- [FOR 20] FORTIN, P., « Pili invente la couleur durable », *Les Echos*, <https://www.lesechos.fr/weekend/planete/pili-invente-la-couleur-durable-1915277>, 2020.
- [FUM 13] FUMEY, G., « Le textile dans la mondialisation malheureuse », *La Géographie*, n° 4, p. 32-33, 2013.
- [GLO 23] GLOVER, S., « Bio-based dyes startup Pili raises \$15.8m », *EcotextileNews*, <https://www.ecotextile.com/2023022830417/dyes-chemicals-news/bio-based-dyes-startup-pili-raises-15-8m.html>, 2023.
- [HAS 16] HASSAAN, M.A., Advanced oxidation processes of some organic pollutants in fresh and seawater, Thèse de doctorat, Port Said University, 2016.
- [HAS 17a] HASSAAN, M.A., & El Nemr., A., « Advanced Oxidation Processes for Textile Wastewater Treatment », *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, n° 1, p. 27-35, 2017.
- [HAS 17b] HASSAAN, M.A., & El Nemr., A. « Health and Environmental Impacts of Dyes : Mini Review », *American Journal of Environmental Science and Engineering*, n° 3, p. 64-67, 2017.
- [HOL 16] HOLKAR, C.R., JADHAV, A.J., PINJARI, D.V., MAHAMUNI, N.M., PANDIT, A.B., « A critical review on textile wastewater treatments : Possible approaches », *Journal of Environmental Management*, p. 351-366, 2016.
- [HSE n/a] *Dyes and chemicals in textile finishing: An introduction*, Dyeing and Finishing Information Sheet, HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, HSE. <https://www.hse.gov.uk/textiles/dyes-dyeing.htm>, n/a.
- [HSU 18] HSU, T., WELNER, D., RUSS, Z., CERVANTES, B., PRATHURI, R.L., ADAMS, P.D., DUBER, J.E., « Employing a biochemical protecting group for a sustainable indigo dyeing strategy », *Nature Chemical Biology*, p. 256-261, 2018.
- [JUA 96] JUANG, R., TSENG, R., WU, F., LIN, S., « Use of chitin and chitosan in lobster shell wastes for color removal from aqueous solutions », *Journal of Environmental Science and Health*, n° 2, p. 325-338, 1996.
- [KAT 80] KATZ, D.S., SOBIESKI, R.J., « Production of Pigment Precursors in *Serratia marcescens* at Elevated Temperatures », *Transactions of the Kansas Academy of Science*, n° 2, p. 91-94, 1980.
- [KHA 14] KHAN, S., MALIK, A., « Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater », dans A. MALIK, E. GROHMANN, R. AKHTAR (dir.), *Environmental Deterioration and Human Health. Natural and anthropogenic determinants*, Springer, Pays-Bas, 2014.
- [LAN 19] LANDRAIN, T., ADENIS, M., BLACHE, J., BOISSONNAT, G., Utilisation de l'actinorhodine et de ses dérivés en tant qu'agent colorant (Patent N° EP3574050A1), 2019.
- [MIN 18] MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET DE LA COHESION DES TERRITOIRES, & MINISTERE DE LA TRANSITION ENERGETIQUE. La réglementation REACH. <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-reach>, 2018.
- [OGU 11] OGUGBUE, C.J., SAWIDIS, T., « Bioremediation and Detoxification of Synthetic Wastewater Containing Triarylmethane Dyes by *Aeromonas hydrophila* Isolated from Industrial Effluent », *Biotechnology Research International*, p. n/a, 2011.
- [PIL 22a] PILI INC., « Entre Toulouse, Paris et Lyon », *French PILI Bio*. <https://french.pili.bio/1/a-propos>, 2022.
- [PIL 22b] PILI INC., « Une technologie vivante qui s'appuie sur des usines cellulaires propres et puissantes », *French PILI Bio*. <https://french.pili.bio/9/technologie>, 2022.

- [RUT 16] RUTKIN, A., « Pigment-making microbes could replace dirty synthetic dyes », *NewScientist*, https://www.newscientist.com/article/mg22930552-500-pigment-making-microbes-could-replace-dirty-synthetic-dyes/?utm_source=NSNS, 2016.
- [TAY 08] TAYLOR, G.W., « Natural Dyes in Textile Applications », *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, n° 1, p. 53-61, 2008.
- [WAN 09] WANG, H., ZHENG, X.W., SU, J.Q., TIAN, Y., XIONG, X.J., ZHENG, T.L., « Biological decolorization of the reactive dyes Reactive Black 5 by a novel isolated bacterial strain *Enterobacter* sp. EC3», *Journal of Hazardous Materials*, n° 1, p. 654-659, 2009.

Actes des 9èmes Journées Scientifiques du GDR 3544
Sciences du Bois

Yannick Sieffert, Alix Hubert, Ivan Mazel, Joseph Gril

**Développement d'un nouveau composite à base
de déchets industriels de cuir et de colle à bois**

DIAZ Léa¹, LEROYER Léo¹, FERNANI Valérie², CHARRIER Bertrand¹

¹Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM,
Mont de Marsan, France

²API'UP 108 Avenue Jean Lartigau, 40130 Capbreton
lea.diaz@etud.univ-pau.fr

Mots clés : Déchets industriels ; cuir ; upcycling ; panneaux de particules ; colle à bois ; thermocompression ; nouvelle matière

Contexte et objectifs

La société Api'Up, spécialiste en upcycling industriel, développe des activités durables autour de l'économie circulaire par le biais d'un atelier « du déchet au design », qui produit en série des objets neufs à partir de déchets collectés en région Nouvelle Aquitaine. L'entreprise propose une gamme de mobiliers qui s'appuie sur la valorisation éco-responsable et un procédé d'upcycling industriel qui permet de concevoir et de fabriquer des mobiliers neufs à partir de matières récupérées. Actuellement, les applications commerciales sont essentiellement menées sur le domaine de l'ameublement et de l'objet mais d'autres applications sont déjà à l'étude.

En 2018, la société API UP a souhaité collaborer avec l'équipe Xylomat – IPREM de Mont de Marsan, afin de valoriser des déchets industriels de cuir.

Trois partenaires se sont associés au travers du projet "MATERIA" : API'UP, l'IPREM-Xylomat et le studio de design parisien « La Racine ». Les travaux communs ont permis de créer une nouvelle gamme de produits à base de matière « upcyclée » et de colle bio-sourcée traditionnellement utilisée dans l'industrie du bois. Ceci, en mettant en place un programme d'innovation matières et design produit éco-responsable intégrant des travaux de R&D sur les matières et la stratégie marketing.

Un des objectifs était de proposer une offre sur le long terme afin d'industrialiser là où certaines initiatives restent au stade de la pièce unique. Ceci, afin de proposer des matériaux durables et garantir un mobilier conçu en France à partir d'au moins 99% de matériaux recyclés et dont l'objectif de recyclabilité visait elle aussi 100%. Lors de la phase de travail de R&D il a été retenu en premier lieu de transformer ces matières premières en panneaux par thermocompression.

Matériels et méthodes

Matières premières

La matière première principale est ici un déchet issu de l'industrie de cuir régionale. Il se présente sous forme de chutes de coupes qui proviennent d'entreprises issues de deux secteurs : la maroquinerie (avec un tannage majoritaire au chrome, plutôt souple et d'une grande diversité de couleurs) et la sellerie équestre (avec un tannage végétal majoritaire, plutôt rigide et de couleurs sombres).

Les chutes de cuir collectées ont été broyées par la société Api'Up en différentes granulométries (3 mm ; 1,5mm ; 0,5 mm) avec un broyeur industriel.

Le mélange collant utilisé est d'origine bio-sourcée et a été employé traditionnellement dans l'industrie du bois pour le collage du bois massif. Une démarche de dépôt de brevet étant en cours, la composition détaillée de la formulation est confidentielle.

Mise en œuvre

Les panneaux ont été pressés par thermocompression au laboratoire à l'aide de deux presses à plateaux chauffant :

- Presse de laboratoire Carver (20×20 cm, 24 Tonnes) utilisée pour la phase d'optimisation
- Presse pilote de marque Pagnioni Monza / 3R (60×60 cm, 100 Tonnes) employée pour la fabrication de prototypes et la pré-production

Les conditions de mise en forme (pression, durée de pressage et température des plateaux chauffant) restent confidentielles. Les panneaux en pré-production sont mis en forme par thermocompression dans un moule conçu au laboratoire.

En premier lieu, deux moules en Polyoxyméthylène (POM), de tailles réduites pour la phase d'optimisation, puis un moule en aluminium chemisé avec du POM pour le prototypage ont été conçus au laboratoire sur le logiciel Catia V5. Les moules ont été usinés par une entreprise sous-traitante.

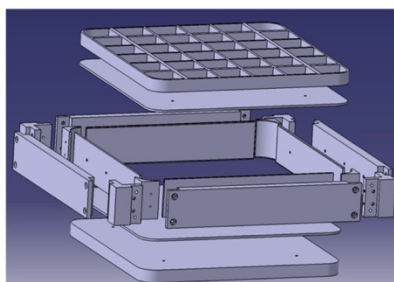


Fig. 1: Moule conçu sur le logiciel Catia V5 pour la mise en forme des panneaux

Analyse

Les mesures de couleurs ont été réalisées avec un spectrocolorimètre portable X-Rite Pantone Ci62. L'appareil a été utilisé avec le réglage du luminant D50/10 (lumière du jour) et SPEX / SPIN. Les résultats sont donnés en code couleur du système colorimétrique L*a*b*.

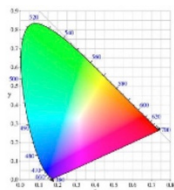


Fig. 2 : Diagramme de chromaticité

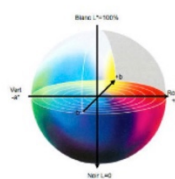


Fig. 3 : Espace colorimétrique L*a*b*

L'espace chromatique L*a*b* CIE, généralement nommé CIELAB, est un espace colorimétrique particulièrement utilisé pour la caractérisation des couleurs de surface. Trois grandeurs caractérisent les couleurs : la clarté L* dérive de la luminance de la surface ; les deux paramètres a* et b* expriment l'écart de la couleur par rapport à celle d'une surface grise de même clarté. L'espace chromatique CIELAB est défini à partir de l'espace CIE XYZ. Il présente l'avantage d'une répartition des couleurs plus conforme à la perception des écarts de

couleur par le système visuel humain. Les mesures ont été réalisées selon la norme internationale ISO 11664.

Des mesures de brillance ont été réalisées selon la norme ISO 2813, avec un brillancemètre BYK Garder, micro-tri-gloss. Les panneaux de cuir produits sont un matériau de type dit « bas brillant » ce qui nous a amené à utiliser l'angle de mesure du test à 85°.

Résultats et discussion

Réalisation des panneaux

Une phase de recherche exploratoire, après de nombreuses optimisations, nous a permis de déterminer le choix du mélange collant. Celui qui a été retenu est une colle traditionnelle utilisée pour le collage du bois massif. Une large phase de R&D sur la typologie du cuir, la granulométrie, la composition et la proportion de la colle ainsi que l'optimisation du cycle de presse (temps, température, pression) et de la densité du panneau ont permis de mettre au point le procédé. Au cours de cette phase de R&D il a été arbitré avec l'entreprise le choix de se diriger vers des panneaux d'occultation visuelle possédant des performances acoustiques avérées.

Mesures de couleurs

L'observation visuelle de la surface d'un même panneau met en évidence une différence de teinte des grains de cuir. Les mesures de couleur ont permis de confirmer la disparité chromatique, comme présenté dans la Fig. 4. Les résultats sont exprimés par leurs valeurs $L^*a^*b^*$ données par l'appareil.

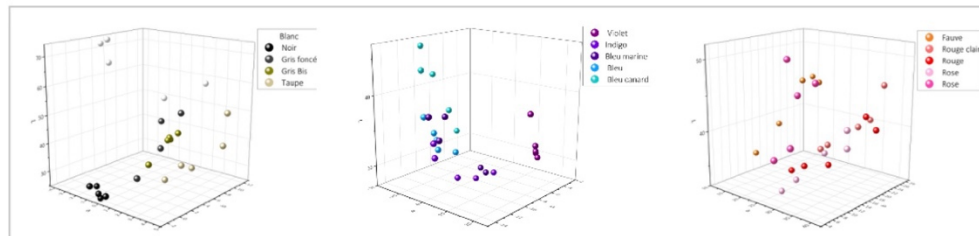


Fig.4 : Mesures de couleurs réalisées sur 15 panneaux de couleur différente à raison de 5 mesures par panneau.

Par ailleurs les couleurs analysées par le spectrocromimètre ne correspondent pas au ressenti visuel du panneau. Le fait que ceux-ci aient une homogénéité de couleur relative, est à l'origine du problème. Des recherches sont en cours sur cet aspect sensoriel. Dans le cadre de la commercialisation, cette réflexion sensorielle est importante afin de pouvoir réaliser un nuancier fidèle pour la future marque. L'élaboration de ce nuancier sera nécessaire pour optimiser le tri en amont afin de maîtriser la production. Celle-ci sera fonction des quantités disponibles tout en assurant une certaine reproductibilité nécessaire à la production de panneaux haut de gamme.

Une variation de la brillance a été observée en fonction de la granulométrie. Les grains de plus grande granulométrie ont présenté une brillance plus élevée, probablement due à une surface plus lisse. Le contrôle de la granulométrie est donc un élément essentiel pour l'aspect esthétique.

Conclusion et perspectives

Ce projet a montré la faisabilité de l'élaboration d'un nouveau matériau upcyclé à base d'une colle traditionnellement utilisée pour le bois. Plusieurs phases de prototypage ont eu lieu, pour améliorer l'aspect esthétique des panneaux (congés d'arrêtes, aspect pelucheux...). Les derniers essais réalisés en septembre 2020 ont permis d'obtenir des finitions satisfaisantes pour l'entreprise et la phase d'industrialisation est en cours. Les mesures de couleur ont permis de préciser le niveau de disparité des panneaux afin de valoriser cette nouvelle matière en opposition avec l'uniformité de matériaux industriels classiques. Le choix marketing s'est tourné vers cette mise en valeur d'une matière première upcyclé. Le travail actuel se porte sur deux achats qui seront réalisés par la société API'UP : une presse industrielle (en cours de dimensionnement) et un séchoir à panneaux. Aujourd'hui, cette nouvelle matière remplit les critères haut de gamme demandés initialement et va pouvoir être mise en avant sur le marché français de l'aménagement intérieur.

Références

Norme ISO/CIE 11664-1:2019 Colorimétrie — Partie 1: Observateurs CIE de référence pour la colorimétrie

Norme ISO 2813:2014 Peintures et vernis — Détermination de l'indice de brillance à 20 degrés, 60 degrés et 85 degrés

Actes des 10 èmes journées scientifiques du GDR 3544
Sciences du Bois

Tancrede Almeras, Delphine Jullien, Cédric Montero, Joseph Gril, Eric Badel

Développement d'une teinture naturelle pour le bois

DIAZ Léa¹, LEROYER Léo¹, FERNANI Valérie², CHARRIER Bertrand¹

¹Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM, Mont de Marsan,
France

²API'UP 108 Avenue Jean Lartigau, 40130 Capbreton
lea.diaz@etud.univ-pau.fr

Mots clés : Teinture naturelle, colorant végétal, upcycling, bois

Contexte et objectifs

La société Api'Up, spécialiste en « upcycling » industriel, développe des activités durables autour de l'économie circulaire par le biais d'un atelier « du déchet au design », qui produit en série des objets neufs à partir de déchets de bois collectés en région nouvelle Aquitaine. En 2018, la société API'UP a souhaité collaborer avec le plateau technique Xylomat – IPREM de Mont de Marsan, afin de valoriser des déchets industriels. Trois partenaires se sont associés au travers du projet "MATERIA" : API'UP, l'IPREM-Xylomat et le studio de design parisien « La Racine ».

L'entreprise propose une gamme de mobiliers qui s'appuie sur la valorisation éco-responsable et un procédé d'« upcycling » industriel qui permet de concevoir et de fabriquer des mobiliers neufs à partir de matières récupérées. Les travaux communs ont permis de créer une nouvelle gamme de produits à base de matière « upcyclée » et de colle bio-sourcée, tout en mettant en place un programme d'innovation dans les matières et le design produit de façon éco-responsable intégrant des travaux de R&D sur les matières et la stratégie marketing. Cela a permis à OSPHER de voir le jour, une nouvelle marque exposée à la galerie Via à Paris, et désormais sur le marché.

Un des objectifs était de proposer une offre sur le long terme afin d'industrialiser là où certaines initiatives restent au stade de la pièce unique. Ceci, afin de proposer des objets durables et garantir un mobilier conçu en France à partir d'au moins 99% de matériaux recyclés et dont l'objectif de recyclabilité visait elle aussi les 100%.

Actuellement, les applications commerciales sont essentiellement menées sur le domaine de l'ameublement et de l'objet mais d'autres applications sont déjà à l'étude.

Pour apporter une valeur ajoutée supplémentaire à ce bois « upcyclé », nous travaillons sur le projet d'une teinture naturelle végétale afin de pouvoir lui apporter une coloration tout en respectant la notion d'éco-responsabilité.

Matériels et méthodes

Matériels

Les matières premières principales sont ici végétales, il s'agit de colorants qui se présentent sous forme de poudre, issues de deux fournisseurs, Couleurs de Plantes en Nouvelle Aquitaine et Green'Ing en Occitanie. Il a été choisi de n'utiliser que des colorants issus de plantes cultivées en France afin de rester dans une démarche d'économie circulaire et d'éco-conception.

Le colorant utilisé dans le projet décrit dans cet article, est de l'extrait de châtaigner (*Castanea sativa*) d'Occitanie « Kingbrown » du fabricant Kingtree.

Méthodes

La méthode testée ici est celle de l'infusion, elle consiste à extraire les principes actifs d'un végétal par dissolution dans un liquide initialement bouillant que l'on laisse refroidir à température ambiante.

L'eau bouillante a été versée sur l'extrait en poudre (dont les quantités de départ sont d'environ 5 grammes) puis le mélange a été agité manuellement pendant 15 minutes. Il a été choisi d'infuser

10^{es} journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Montpellier, 17-19 novembre 2021

l'extrait de châtaigner dans 30 mL d'eau, selon 4 concentrations, au nombre de 3 solutions par concentration.

La suspension obtenue a été filtrée sur papier filtre standard en cellulose d'épaisseur 0,17mm et d'une porosité de 17 à 30 micromètres afin d'obtenir la solution de teinture.

Application bois : La solution obtenue a été appliquée au pinceau sur des échantillons de bois (pin maritime). Une fois la première couche sèche, une seconde couche a été appliquée sur la moitié de la surface de l'échantillon.

Application Papier : Une application a également été faite sur une feuille de papier blanc en un seul passage. 2 types d'application sur papier ont été réalisés : une avec la solution décantée en ne prélevant que le surnageant et une autre avec la solution agitée.

Analyse colorimétrique : Les mesures de couleurs ont été réalisées avec un spectrorimètre portable X-Rite Pantone Ci62. L'appareil a été utilisé avec le réglage du luminant D50/10 (lumière du jour) et SPIN (couleur pure). Les résultats sont donnés en code couleur du système colorimétrique $L^*a^*b^*$.

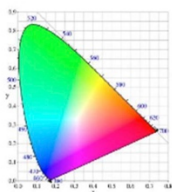


Fig. 1 : Diagramme de chromaticité

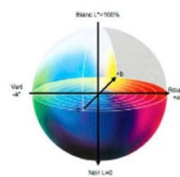


Fig. 2 : Espace colorimétrique $L^*a^*b^*$

L'espace chromatique $L^*a^*b^*$ CIE, généralement nommé CIELAB, est un espace colorimétrique particulièrement utilisé pour la caractérisation des couleurs de surface. Trois grandeurs caractérisent les couleurs : la clarté L^* correspond à la luminance de la surface ; les deux paramètres a^* et b^* expriment les axes de la couleur respectivement rouge-vert et jaune-bleu. Cet espace chromatique CIELAB est défini à partir de l'espace CIE XYZ. Il présente l'avantage d'une répartition des couleurs plus conforme à la perception des écarts de couleur par le système visuel humain (CHARRIER et al. 1992 ; ALOUI et al 2006).

Vie en pot : Les échantillons ont été recouverts de parafilm pour empêcher l'évaporation et conservés à l'abri de la lumière.

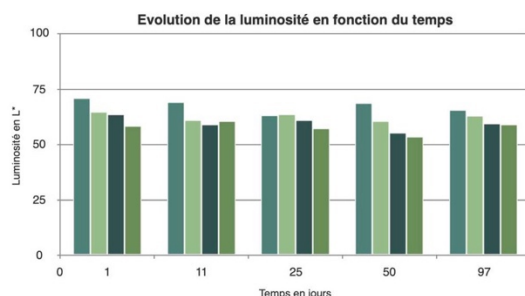


Fig 1 : Evolution de la clarté (luminance) en fonction du temps (97 jours) de quatre concentrations de teinte de châtaignier. Chaque valeur est une moyenne de 5 échantillons.

Résultats et discussion

Solubilité

Quelle que soit la concentration, l'extrait de châtaignier n'est pas totalement soluble. Même après filtration à une porosité entre 17 et 30 micromètres, il reste systématiquement un dépôt insoluble après décantation. Cette partie insoluble correspond à environ 15% de la matière de départ. Cependant, la coloration du surnageant est colorée proportionnellement à la concentration de départ, malgré la présence d'insolubles.

Les solutions ont été obtenues par infusion pour ces premiers travaux. Traditionnellement en teinture végétale, le procédé utilisé est celui de la décoction c'est-à-dire de faire bouillir les matières premières dans de l'eau. Le fait de maintenir la solution à chaud pendant un temps donné permet une meilleure extraction et une meilleure solubilité des colorants (ROSE et al 2007 ; TAGHIZADEHBORUJENIA et al. 2021). Pour un procédé d'industrialisation il sera donc préférable d'opter pour la méthode de la décoction. Cette phase de recherche exploratoire n'est pas terminée mais aura permis une première optimisation du procédé, et une première palette de couleurs.

Mesures de couleurs

L'observation visuelle des échantillons a mis en évidence une différence de teinte entre les veines tendres et les veines dures du bois. Les mesures de couleur ont permis de confirmer cette disparité chromatique, comme présenté dans la figure 1. Les mesures effectuées dans le temps ont permis d'observer l'évolution des teintes et l'état de conservation des solutions. Les observations des différences de clarté montrent que l'évolution est faible et que les teintes restent relativement stables et ce, quelque soit le support utilisé. Des mécanismes d'oxydation sur les composés extractibles solubilisés dans les solutions de teinte peuvent expliquer les différences observées (ALOUÏ et al 2006).

Conclusion et perspectives

Ce projet a montré la faisabilité de l'élaboration d'une teinture naturelle végétale pour valoriser différemment le bois upcyclé. Le procédé de l'infusion fonctionne bien avec l'extrait de châtaigner malgré une quantité d'insolubles non négligeable. Pour l'industrialisation ultérieure, il sera préférable d'optimiser le procédé, notamment en testant le système d'extraction par décoction. Ces premiers essais de formulation auront permis d'obtenir des résultats satisfaisants et sont prometteurs pour la phase d'industrialisation. Par ailleurs, des essais d'imprégnation à cœur sont en cours au laboratoire.

Bibliographie

CHARRIER, B., CHARRIER, F., BADEL, E., PERRE, P., HOUSSEMENT, C., JANIN, G. Study of industrial boiling process on walnut colour: Experimental study under industrial conditions. *Holz als Roh und Werkstoff*. 2002. 60. 259-264.

ALLOUI, F., AHAIJY, A., IRMOULI, Y., GEORGE, B., CHARRIER, B., MERLIN, A. Photostabilisation of the "wood-clearcoatings" systems with UV absorbers: correlation with their effect on the glass transition temperature. *Journal of physics: conference series*. 2006. 15 .118-123

ROSE, N.M., KHANNA, S., SING, J.S.S. Dyeing with natural colouring material- Geranium bark. *Textile Trends*. 2007. 49(10). 31-33

TAGHIZADEHBORUJENIA, R., AKBARIB,A., GHAREHBAIB, A., YUNESSNIALEHI, A.. Extraction and preparation of dye powders from *Reseda luteola L.* using membrane processes and its dyeing properties. *Environmental Technology & Innovation* 21 (2021) 10124

Actes des 11èmes Journées Scientifiques du GDR Sciences du Bois

Eric Badel, Joseph Gril, Isabelle Théry

Optimisation et étude de vieillissement de teintures végétales pour le bois

DIAZ Léa¹, LEROYER Léo¹, FERNANI Valérie², CHARRIER Bertrand¹

¹Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM, Mont de Marsan
2API'UP 108 Avenue Jean Lartigau, 40130 Capbreton
lea.diaz@etud.univ-pau.fr

Mots clés : Teinture naturelle, colorant végétal, upcycling, bois, couleur

Contexte et objectifs

La société Api'Up, spécialisée en « upcycling industriel », développe des activités durables autour de l'économie circulaire par le biais d'un atelier intitulé « du déchet au design », qui produit en série des objets neufs à partir de déchets de bois collectés en Nouvelle Aquitaine. L'entreprise propose ainsi une gamme de mobiliers qui s'appuie d'une sur la valorisation éco-responsable et d'autre part sur un procédé de standardisation des déchets de bois.

Depuis 2018, la société Api'Up a lancé un programme d'innovation matières et design produit éco-responsable, intitulé Materia, afin d'intégrer de nouvelles matières (cuir et textile) dans le processus d'upcycling. Pour cela, elle collabore avec le plateau technique Xylomat – IPREM de Mont de Marsan qui apporte son expertise autour de la mise au point de nouveaux matériaux à partir de matière premières biosourcées et/ou recyclées. Un des objectifs était de proposer une offre sur le long terme afin de mettre en place une production industrialisée là où certaines initiatives restent au stade de la pièce unique. Ceci, afin de proposer des matériaux durables et garantir un mobilier conçu en France à partir d'au moins 99% de matériaux recyclés et dont l'objectif de recyclabilité viserait lui aussi 100%. Actuellement, les applications commerciales sont essentiellement menées sur le domaine de l'ameublement et de l'objet mais d'autres applications sont déjà à l'étude. Cela a conduit à la création de la nouvelle marque « OSPHER » il y a un an par Api'Up.

Pour apporter une valeur ajoutée supplémentaire à ce bois « upcyclé », le travail de développement d'une teinture végétale est en cours de réalisation afin de pouvoir apporter une coloration au mobilier en bois tout en respectant la notion d'éco-responsabilité.

Matériels et méthodes

Matières premières

Les extraits végétaux ont été fournis en poudre et proviennent de l'entreprise « Couleurs de Plantes » (CDP), située en Nouvelle Aquitaine ou de Green'ing (GI) pour un extrait de garance. Les végétaux sont extraits à l'eau chaude ou l'éthanol, et les extraits sont stérilisés pour garantir leur pérennité. Il a été choisi de n'utiliser que des colorants issus de plantes cultivées et extraites en France, à l'exception du polygonum (Inde, Indonésie, Afrique ou Amérique centrale), afin de rester dans une démarche d'économie circulaire et d'éco-conception.

Les colorants utilisés ont été les suivants : solidage (*Solidago canadensis*), réséda (*Reseda luteola*), genêt des teinturiers (*Genista tinctoria*), coréopsis (*Coreopsis*), bourdaine (*Frangula alnus*), chêne (*Quercus*), garance standard (*Rubia tinctorum*), sorgho des teinturiers (*Sorghum bicolor*), raisin d'Amérique (*Phytolacca decandra*), polygonum (*Chlorophyllines cuivriques*).

Les teintures ont été appliquées sur des échantillons de pin maritime provenant de l'entreprise Gascogne Bois.

Préparation des teintures

Les poudres commerciales ont été extraites par décoction, tandis que le raisin d'Amérique a été extrait par pression à froid, et le liquide obtenu a été filtré à 45µm. Certaines décoctions de garance ont été modifiées par ajout de « mordants » (oxyde ou carbonates).

Il a été choisi de réaliser les extractions dans 30 mL d'eau, selon 4 concentrations différentes. La composition détaillée de la formulation reste confidentielle.

Application

La solution obtenue a été appliquée au pinceau sur les échantillons de bois. Une fois la première couche sèche, une seconde couche a été appliquée sur la moitié de la surface de l'échantillon. Une application a également été faite sur une feuille de papier Canson avec un grammage de 180g/m², effectué en un seul passage. Deux types d'application sur papier ont été réalisés : une avec la solution décantée en ne prélevant que le surnageant et une autre avec la solution réhomogénéisée par agitation mécanique afin de pouvoir les comparer entre-elles.

Analyse colorimétrique

Les mesures de couleurs ont été réalisées avec un spectrocolorimètre portable X-Rite Pantone Ci62. L'appareil a été utilisé avec le réglage du luminant D65/2 SPIN. Les illuminants D « daylight » constituent la classe d'illuminants modélisant la lumière du jour de manière plus précise. L'illuminant D65 correspond à une lumière du jour à midi.

L'espace chromatique L*a*b* CIE, généralement nommé CIELAB, est un espace colorimétrique particulièrement utilisé pour la caractérisation des couleurs de surface. Trois grandeurs caractérisent les couleurs : la clarté L* dérive de la luminance de la surface ; les deux paramètres a* et b* expriment l'écart de la couleur par rapport à celle d'une surface grise de même clarté. L'axe a* correspond à l'axe « vert / rouge » et l'axe b* à celui des « bleu / jaune ».

Cet espace chromatique CIELAB est défini à partir de l'espace CIE XYZ. Il présente l'avantage d'une répartition des couleurs plus conforme à la perception des écarts de couleur par le système visuel humain. Les mesures sont effectuées en valeurs L*a*b* données par l'appareil, puis a* et b* sont converties en chromaticité nommée C* pour présenter les résultats.

Les échantillons ont été conservés à l'abri de la lumière dans un premier temps, pendant 220 jours, pour observer si la couleur appliqué au matériau bois pouvait être altérée. Puis dans un second temps les échantillons ont été exposés à la lumière du jour indirectement, en intérieur pendant 205 jours.

5 mesures de colorimétrie ont été faites sur la partie présentant 2 couches afin d'obtenir une valeur moyenne suivant chaque axe chromatique et en évaluer l'écart type. Pour une meilleure représentation des résultats, le paramètre de la luminosité (L*) qui a été sélectionné, afin de caractériser la luminance des surfaces testées, sur une échelle de 0 à 100 (zéro étant le plus sombre).

Résultats et discussion

Mesures de couleurs

Quelle que soit la concentration, les extraits ne sont pas totalement solubles et un dépôt plus ou moins important a été observé. Après décantation, le surnageant est resté bien coloré et

l'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration en extraits. L'application sur papier a permis d'observer un premier résultat qui montre que les solutions décantées ont une coloration proche de la solution après agitation. Cette dernière est très légèrement plus foncée, comme l'indique les résultats après mesures colorimétriques.

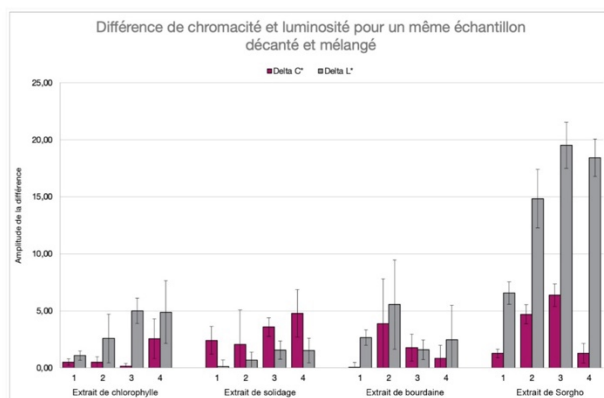


Fig. 1 : Graphique de comparaison de la coloration des solutions avant et après agitation.

Sur les 4 extraits présentés (Fig. 1), seul le sorgho a présenté une différence de couleur significative avant et après agitation. De toute évidence il sera préférable d'agiter les solutions avant utilisation même si la partie soluble dans l'eau des extraits apporte une coloration a priori suffisante. Le dépôt semblant donc peu responsable de la teinte, il pourra être retiré si nécessaire par filtration ou décantation lors de la phase d'industrialisation.

L'observation visuelle des échantillons a mis en évidence une différence de teinte entre les veines tendres (bois de printemps) et les veines dures (bois d'été) du bois. Le calcul des écarts types des mesures de couleur a permis de confirmer cette disparité chromatique. C'est pour cette raison qu'ils ne sont pas présentés sur le graphique de la Fig. 2 pour une meilleure lisibilité. Les 4 concentrations ayant des résultats similaires, seule la concentration la plus élevée est présentée ici.

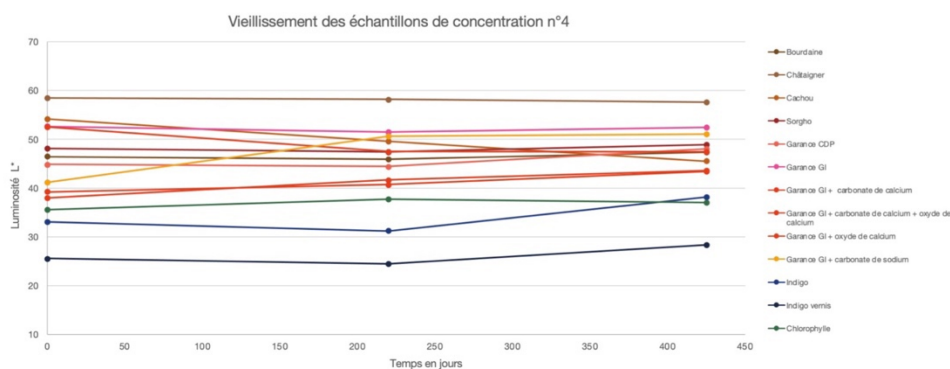


Fig. 2 : évolution du L* des échantillons de bois teintés au cours de 425 jours.

Globalement, les couleurs de l'ensemble des échantillons sont restées stables après 425 jours, même si 3 échantillons se démarquent : La garance GI s'est nettement éclaircie durant la première période puis elle s'est stabilisée, tandis que les deux échantillons d'indigo se sont

légèrement éclaircis durant la deuxième période, au contraire de l'extrait de cachou lui est devenu plus foncé au fil du temps.

Les prélèvements ont permis d'observer l'état de conservation des échantillons de bois teinté au cours du temps (Fig 2). Ces premiers résultats ont été satisfaisants mais d'autres mesures seront faites sur un temps d'exposition plus long. Pour la commercialisation, les mobiliers seront protégés par une finition de type vernis naturel qui aura également pour but d'agir sur la préservation des teintures.



Fig. 3 : Échantillon d'une partie de la deuxième palette obtenue en utilisant certains des colorants cités.

Conclusion et perspectives

Ce projet montre la faisabilité de l'élaboration d'une teinture naturelle végétale pour valoriser différemment les déchets de bois upcyclés. Le procédé de la décoction fonctionne bien avec les extraits végétaux mais la quantité d'insolubles reste importante. Cependant, les résultats présentés ci-dessus montrent que la solution reste bien colorée même après décantation. Cette phase de recherche exploratoire n'est pas terminée mais a permis une première optimisation du procédé, et une première palette de couleurs. Les premiers essais réalisés ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour l'entreprise et sont prometteurs pour la phase d'industrialisation.

Il serait également intéressant d'identifier les molécules à l'origine des couleurs obtenues, ceci afin de mieux comprendre la relation entre leur structure chimique et leur aptitude à la coloration d'un support tel que le bois.

Références

- Sève R. (2009) Sciences de la couleur : aspect physiques et perceptifs, Chalagam édition.
- Coué M., (2016) La colorimétrie : comprendre la couleur et sa mesure, Ellipses éditions.
- Charrier B., Charrier F., Badel E., Perre P., Houssement C., Janin G., (2002), Study of industrial boiling process on walnut colour: Experimental study under industrial conditions. Holz als Roh und Werkstoff, 60. 259-264.
- Aloui F., Ahajiy A., Irmouli Y., George B., Charrier B., Merlin A., (2006), Photostabilisation of the "wood-clearcoatings" systems with UV absorbers: correlation with their effect on the glass transition temperature, Journal of physics: conference series, 15 ; 118-123
- Rose N.M., Khanna S., Sing J.S.S., (2007), Dyeing with natural colouring material- Geranium bark, Textile Trends, 49(10). 31-33
- Taghizadehborujenia R., Akbarib A., Gharehbaiib A., Yunessnialehi A., (2021), Extraction and preparation of dye powders from Reseda luteola L. using membrane processes and its dyeing properties. Environmental Technology & Innovation 21, 10124.

ANNEXE N° 6 : POSTERS PRÉSENTÉS LORS DES GDR

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU COMPOSITE À BASE DE DÉCHETS INDUSTRIELS DE CUIR ET DE COLLE À BOIS

B 12

DIAZ Léa¹, LEROYER Léo¹, FERNANI Valérie², CHARRIER Bertrand¹

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM, 40000 Mont de Marsan, France

² API'UP, 108 Avenue Jean Lartigau, 40130 Capbreton, France



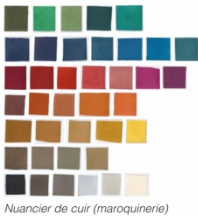
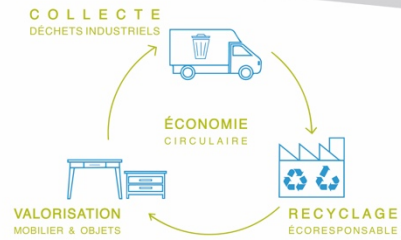
CONTEXTE

Société Api'Up

- spécialiste en upcycling industriel
- conception et fabrication de mobilier neufs à partir de déchets
- économie circulaire
- éco-conception

Projet "MATERIA"

- valorisation des déchets industriels (bois, textile, cuir)
- innovation et R&D matières
- design produit éco-responsable
- stratégie marketing



Nuancier de cuir (maroquinerie)



Broyat de cuir (3 granulométries différentes)

MATIÈRE PREMIÈRE

Déchets de cuir

- Industrie régionale du cuir :
- maroquinerie
 - sellerie équestre

→ Broyage industriel des chutes de cuir par Api'Up

Mélange collant

- origine bio-sourcée
- employé traditionnellement pour le collage industriel du bois massif.

La composition détaillée de la formulation est confidentielle.

MISE EN ŒUVRE

Thermocompression

- Presses à plateaux chauffant :
- presse de laboratoire Carver (20x20 cm, 24 T) → phase d'optimisation
 - presse pilote Pagnioni Monza / 3R (60x60 cm, 100 T) → phase de pré-production

Les conditions de pressage (pression, durée et température) restent confidentielles.

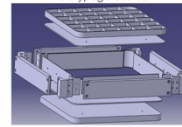
Le moulage

- Moules conçus au laboratoire sur le logiciel Catia V5 :
- deux moules en Polyoxyméthylène (POM) → optimisation
 - un moule en aluminium chemisé avec du POM → prototypage

Une entreprise sous-traitante a été en charge de l'usinage des moules.



Prototypage couleur

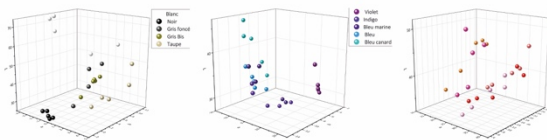


Moule conçu sur le logiciel Catia



Presse Pagnioni Monza / 3R

MESURE DE COULEUR



Mesures de couleurs (5 mesures x 15 panneaux)

Colorimétrie

Mesures au spectrocolorimètre portable X-Rite Pantone Ci62 → réglage du luminant D50/10 (lumière du jour), SPEX / SPIN.

Observations : disparité chromatique de chaque panneau de cuir.



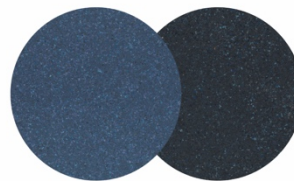
vision de l'œil

Résultats des mesures L*a*b*

Rendu des couleurs

Relevés des données : → codes L*a*b* retranscrits

Observations : Résultats ≠ ressenti visuel Aspect sensoriel important pour la reproductibilité de panneaux haut de gamme.



Zoom matière

PROTOTYPAGE



Panneaux de cuir prototypes

DÉVELOPPEMENT D'UNE TEINTURE NATURELLE POUR LE BOIS À BASE DE COLORANTS VÉGÉTAUX

A 16

DIAZ Léa¹, LEROYER Léo¹, FERNANI Valérie², CHARRIER Bertrand¹

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM, 40000 Mont de Marsan, France

² API'UP, 108 Avenue Jean Lartigau, 40130 Capbreton, France



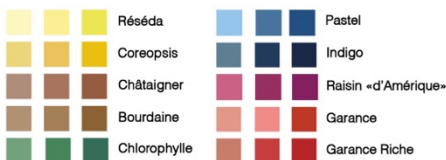
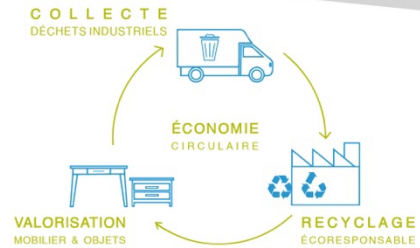
CONTEXTE

Société Api'Up

- spécialiste en **upcycling industriel**
- conception et fabrication de mobilier neufs à partir de déchets
- **économie circulaire**
- éco-conception

Projet "MATERIA"

- valorisation des déchets industriels (bois, textile, cuir)
- innovation et R&D matières
- **design** produit éco-responsable
- stratégie marketing



Palette locale

Extraits végétaux

- Choix de la palette de couleur en fonction de la provenance :
→ cultivés en Nouvelle aquitaine et Occitanie
- Colorants en poudre

MATIÈRE PREMIÈRE



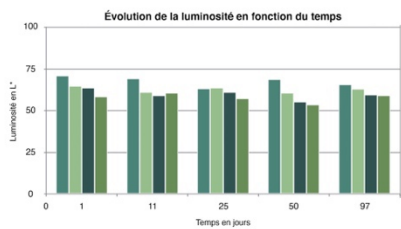
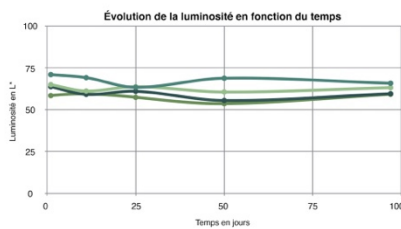
MISE EN ŒUVRE

Extraction et Application

- Procédé par **décoction** :
→ **extraction** des principes actifs d'un végétal par dissolution dans l'eau
- Application au **pinceau**
- Observation de la **stabilité de la couleur** des solutions dans le temps
- **Mesure de couleur** et observation du vieillissement
- **Industrialisation** du procédé



Premier nuancier de bois teinté



Concentrations : ● n°1 ● n°2 ● n°3 ● n°4

Colorimétrie

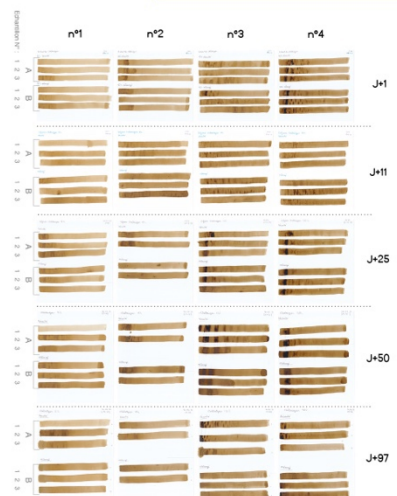
Mesures au **spectrocolorimètre** portable X-Rite Pantone Ci62
→ réglage du luminant D50/10 (lumière du jour), SPEX.

Stabilité dans le temps

Relevé des données :
évolution de la luminosité dans le temps
• 4 concentrations
• 3 échantillons de chaque
→

Observations : La solution en pot est relativement stable sur 97 jours.

MESURE DE COULEUR



OPTIMISATION ET ÉTUDE DE VIEILLISSEMENT DE TEINTURES VÉGÉTALES POUR LE BOIS

XX

DIAZ Léa¹, LEROYER Léo¹, FERNANI Valérie², CHARRIER Bertrand¹

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM, 40000 Mont de Marsan, France

² API'UP, 108 Avenue Jean Lartigau, 40130 Capbreton, France



CONTEXTE

Projet "MATERIA"

- Valorisation des déchets industriels (bois, textile, cuir)
- Innovation et R&D matières
- Design produit éco-responsable
- Économie circulaire
- Éco-conception



Société Api'Up

- Spécialiste en upcycling industriel
- Conception et fabrication de mobilier neufs à partir de déchets de bois

(Solidago canadensis) Solidage		Cosmos (pigment) (<i>Cosmos sulphureus</i>)
(Reseda luteola) Réséda		Garance (<i>Rubia tinctorum</i>)
(Genista tinctoria) Genêt		Garance riche (<i>Rubia tinctorum</i>)
(Coreopsis) Coréopsis		Sorgho des teinturiers (<i>Sorghum bicolor</i>)
(Frangula alnus) Bourdaine		Raisin «d'Amérique» (<i>Phytolacca americana</i>)
(Castanea) Châtaigner		Polygonum (indigo, feuilles) (<i>Polygonum</i>)
(Quercus) Chêne		Chlorophylle de Luzerne (<i>Chlorophylle</i>)

Palette des «couleurs locales»

Extraits végétaux

- Choix en fonction de la provenance
→ Cultivés et extraits en Nouvelle Aquitaine
- Extraits en poudre
→ Extraction naturelle

MATIÈRE PREMIÈRE



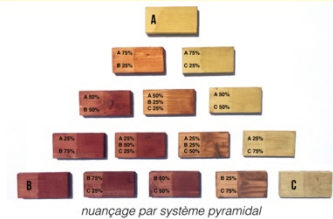
MISE EN ŒUVRE

Extraction et Application

- Extraction par décoction dans l'eau
- 4 concentrations
- Application au pinceau
1 couche / 2 couches
- objectif : Industrialisation du procédé



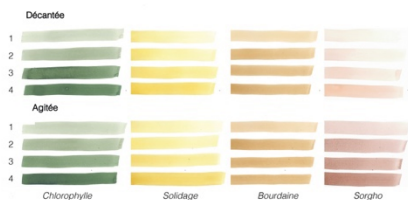
nuancier de bois teinté



nuancier par système pyramidal

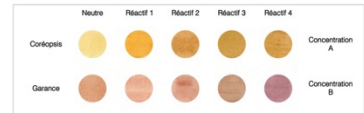
Décantation

- Observation de la stabilité de la couleur des solutions avant et après agitation

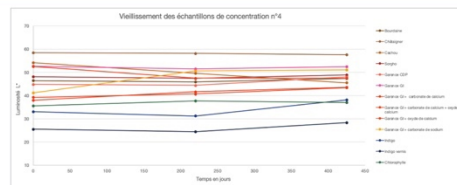
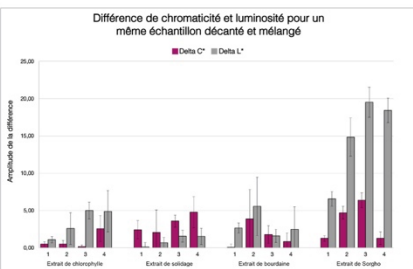


Nuancier

- Mélange de couleurs par système pyramidal
3 Couleurs de base → Nouvelles nuances
- Modification de la couleur par ajout d'un réactif



nuancier par ajout de réactifs



Conclusion

- Faisabilité de l'élaboration d'une teinture naturelle végétale sur bois
- Bonnes propriétés colorantes des solutions décantées hormis l'extrait de sorgho qui nécessite une agitation avant utilisation.
- Le système pyramidal et l'ajout de réactifs permettent d'augmenter la palette des nuanciers en respectant le critère éco-conçu
- Les échantillons sur bois ont un vieillissement acceptable au bout de 425 jours

MESURE DE COULEUR

Vieillessement

- Observation de l'évolution de la couleur des échantillons de bois dans le temps

Colorimétrie

- Mesures au spectrophotomètre portable X-Rite Pantone Ci62
→ réglage de l'illuminant D50/2, SPIN
- Mesure et analyse de couleur à partir des résultats L*a*b*
→ calcul de la chromaticité C*

RÉSUMÉ

Ce projet de thèse explore une revalorisation novatrice de l'upcycling industriel en combinant formulation, étude physico-chimique, design couleur et mise en œuvre. Il met en lumière toute la chaîne de transformation de déchets industriels en produits esthétiques et fonctionnels répondant aux besoins du marché. En collaboration avec l'entreprise Api'Up, des procédés innovants ont été développés pour industrialiser des matériaux upcyclés. Les recherches menées sur de nouveaux matériaux conçus à partir de déchets de cuir et de textile, ainsi que l'élaboration de teintures naturelles pour le bois, montrent que l'upcycling peut transformer les déchets en ressources à haute valeur ajoutée. Ainsi, nous avons pu développer un panneau à base de cuir dénommé « Ganispher », qui a démontré des performances mécaniques, acoustiques et esthétiques tout à fait satisfaisantes, et qui a également permis la création d'un mobilier commercialisé via la création de la marque « Ospher ». Un brevet confirme l'originalité et le potentiel industriel du procédé. Des défis techniques, tels que les variations de densité et la formation de bulles d'air, ont été identifiés et surmontés. Le développement de panneaux à partir de déchets textiles a abouti à un nouveau matériau nommé « Polyspher ». Après analyse, ces panneaux ont pu répondre aux critères mécaniques et esthétiques du cahier des charges, ce qui a permis la conception et la fabrication d'une chaise qui fut présentée à la Paris Design Week. Des ajustements techniques sur la densité, l'adaptation des moules, le pressage et le nuancier seront cependant nécessaires pour une production à grande échelle. Le tri des couleurs a également été crucial pour assurer une reproductibilité chromatique de ces deux nouveaux matériaux.

Ce projet s'est également inscrit dans une démarche de valorisation du bois, en harmonie avec les matériaux développés pour la nouvelle marque. Les recherches ont montré le potentiel de colorants biosourcés pour une valorisation esthétique du pin maritime. Les essais ont validé l'efficacité de la décoction comme méthode prometteuse pour l'industrie. Un premier nuancier ainsi que des méthodes de nuancement ont montré l'étendue de la multitude de teintes possible. Des améliorations dans les procédés d'extraction et la réduction des résidus sont envisagées. Ce travail met en évidence les avantages du bois, un matériau aux propriétés thermiques, acoustiques et sensorielles remarquables. L'intégration de teintures végétales sur du bois upcyclé répond à la demande croissante de produits esthétiques et respectueux de l'environnement.

Le travail central du designer couleur et matière est également souligné via ce projet où il joue un rôle clé dans l'innovation durable et culturelle en réinventant la relation entre couleur, matière et société. En réinventant l'esthétique du recyclage, il redonne vie à des matières usagées et les

transforme en produits attractifs, adaptés aux exigences modernes. Les couleurs se voient attribuer des significations et des valeurs symboliques distinctes selon les cultures et les époques, enrichissant ainsi un lexique chromatique qui s'éloigne souvent des normes scientifiques. Ce langage est en constante évolution sous l'influence des pratiques sociales, commerciales et médiatiques. Les recherches sur de nouveaux matériaux à partir de déchets de cuir et de textile, ainsi que l'élaboration de teintures naturelles pour le bois renforcent l'idée que l'upcycling est un levier puissant, où les déchets deviennent des ressources créatrices de valeurs.

Ce projet de thèse ouvre la voie à de nouvelles pratiques interdisciplinaires et à l'innovation dans des secteurs comme l'ameublement, contribuant ainsi à une économie circulaire exemplaire dans l'upcycling industriel.

Mots clés : Upcycling, Matériaux, Design couleur, Déchets industriels, Mobilier

ABSTRACT

This thesis project explores an innovative approach to industrial upcycling by combining formulation, physicochemical studies, colour design, and implementation. It highlights the entire transformation chain of industrial waste into aesthetic and functional products that meet market demands. In collaboration with the company Api'Up, innovative processes have been developed to industrialize upcycled materials. Research on new materials made from leather and textile waste, as well as the development of natural dyes for wood, demonstrates that upcycling can transform waste into high-value-added resources. For instance, we developed a leather-based panel called "Ganispher," which exhibited highly satisfactory mechanical, acoustic, and aesthetic performance. This material also enabled the creation of furniture marketed under the newly established brand Ospher. A patent confirms the originality and industrial potential of the process. Technical challenges, such as density variations and the formation of air bubbles, were identified and successfully addressed. The development of panels from textile waste led to a new material named "Polyspher." After thorough analysis, these panels met the mechanical and aesthetic requirements of the design specifications, allowing for the creation and production of a chair that was showcased at Paris Design Week. However, technical adjustments related to density, mold adaptation, pressing, and colour chart refinement will be necessary for large-scale production. Color sorting also proved crucial to ensure the chromatic reproducibility of these two new materials.

This project also embraced an initiative to enhance the value of wood, in harmony with the materials developed for the new brand. Research demonstrated the potential of bio-based dyes for the aesthetic enhancement of maritime pine. Trials validated the effectiveness of decoction as a promising method for industrial applications. An initial color palette and shading techniques showcased the wide range of possible hues. Improvements in extraction processes and residue reduction are planned. This work highlights the benefits of wood, a material with remarkable thermal, acoustic, and sensory properties. The integration of plant-based dyes on upcycled wood addresses the growing demand for aesthetic and environmentally friendly products.

The central role of the color and material designer is also highlighted through this project, where they play a key role in sustainable and cultural innovation by reinventing the relationship between color, material, and society. By redefining the aesthetics of recycling, the designer breathes new life into used materials, transforming them into attractive products tailored to modern demands. Colors are assigned distinct meanings and symbolic values depending on cultures and eras, enriching a chromatic lexicon that often deviates from scientific norms. This language evolves

continuously under the influence of social, commercial, and media practices. Research on new materials from leather and textile waste, along with the development of natural dyes for wood, reinforces the idea that upcycling is a powerful driver where waste becomes a resource, creating added value.

This thesis project paves the way for new interdisciplinary practices and innovation in sectors such as furniture design, thereby contributing to an exemplary circular economy in industrial upcycling.

Keywords : Upcycling, Materials, Color design, Industriel waste, Furniture