

Article

# Comparaison des performances techniques du cuir, du « *simili cuir* » et des nouvelles matières alternatives en vogue

Michael Meyer \*, Sascha Dietrich, Haiko Schulz et Anke Mondschein

**Citation originale :** Meyer, M. ; Dietrich, S. ; Schulz, H. ; et Mondschein, A. ; Comparison of the Technical Performance of Leather, Artificial leather, and Trendy Alternatives. *Coatings*, 2021, 11, 226. <https://doi.org/10.3390/coatings11020226>

Reçu le 25 janvier 2021

Accepté le 11 février 2021

Publié le 13 février 2021

**Note de l'éditeur :** MDPI ne prend position vis-à-vis ni de revendications territoriales contenues dans les cartes publiées, ni de ses affiliations institutionnelles.



**Droits d'auteur :** © 2021 les auteurs.

Titulaire de la licence : MDPI, Bâle, Suisse. Cet article est en libre accès, distribué selon les termes et conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

FILK Freiberg Institute gGmbH, Meißner Ring<sup>1</sup>, 09599 Freiberg, Allemagne ; [sascha.dietrich@filkfreiberg.de](mailto:sascha.dietrich@filkfreiberg.de) (S.D.) ; [haiko.schulz@filkfreiberg.de](mailto:haiko.schulz@filkfreiberg.de) (H.S.) ;

[anke.mondschein@filkfreiberg.de](mailto:anke.mondschein@filkfreiberg.de) (A.M.)

\* Correspondance : [michael.meyer@filkfreiberg.de](mailto:michael.meyer@filkfreiberg.de)

**Résumé :** Dans un marché en plein essor, des alternatives biogéniques et synthétiques cherche de plus en plus à remplacer les matériaux d'origine animale par des alternatives « vegan ». En parallèle, les matières premières biosourcées devraient être amenées à remplacer les matières premières synthétiques d'origine fossile. Pour cette étude, nous avons examiné un cuir de bovin à dessus de chaussure, un simili cuir et neuf matériaux alternatifs (Desserto®, Kombucha, Pinatex®, Noani®, Appleskin®, Vegea®, SnapPap®, Teak Leaf®, et Muskin®). Notre but était de comparer la structure et les performances techniques des matériaux, afin de pouvoir en évaluer les domaines d'application possibles. La structure et la composition ont été définies par microscopie et spectroscopie IRTF, et les propriétés de surface, les performances mécaniques, la perméabilité à la vapeur d'eau et l'absorption d'eau, par des essais standardisés. Aucune de ces matières alternatives ne s'est montrée aussi universellement performante que le cuir. Néanmoins, certains matériaux présentent des valeurs élevées pour certaines propriétés. Vraisemblablement, la structure multicouche du cuir, avec une surface très resserrée et une densité structurelle répartie en gradient sur l'épaisseur, serait à l'origine de cette performance universelle. À ce jour, cette structure n'a pu être obtenue ni avec des matériaux synthétiques ni avec des matériaux dits biosourcés.

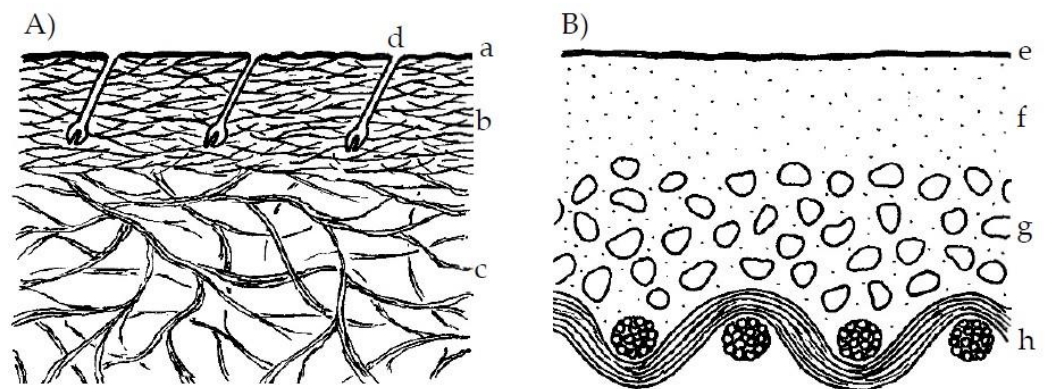
**Mots clés :** cuir ; 'cuir' synthétique ; habillement ; bien de consommation ; alternative au cuir

## 1. Introduction

L'économie circulaire vise à réutiliser les matériaux consommés et, idéalement, à refermer les cycles de vie des produits selon le principe « cradle-to-cradle » [1,2]. « Biosourcé » signifie que des matières premières biogéniques sont utilisées en lieu et place du gaz fossile, du charbon ou du pétrole pour fabriquer toutes sortes de produits dans un cadre bioéconomique. Enfin, « biodégradable » signifie qu'un matériau peut être dégradé par les effets physico-chimiques de l'environnement et par les micro-organismes présents dedans. Un fort changement de mentalité s'est récemment produit, dans le sillage de débats sur le changement climatique, la finitude des ressources, la surexploitation des écosystèmes et la pollution de l'environnement par des substances nocives ou non dégradables. L'industrie des biens de consommation étant particulièrement concernée par ce changement, les concepteurs de nouveaux matériaux cherchent à remplacer les polymères d'origine fossile

par des matériaux biogéniques et entièrement biodégradables, tout en se passant de matières premières animales et de substances nocives. Idéalement, ces nouveaux matériaux devraient être fabriqués à partir de déchets domestiques, de sciure de bois ou de déchets verts [3-5]. Le cuir est un matériau biogénique et biodégradable dont la tradition remonte quasiment aux origines de l'humanité. Il est utilisé pour sa solidité, sa durabilité et sa large gamme de propriétés depuis des millénaires. Le cuir était utilisé à la fois pour la protection et la décoration dans les vêtements et les articles de sport et comme matériau technique, notamment pour fabriquer des courroies de transmission, des seaux ou des gourdes. Jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, en tant que matériau souple, le cuir occupait un interstice laissé par les propriétés des autres matières disponibles, entre des matériaux durs comme la pierre, le métal ou le bois, et divers textiles non-imperméables. Les techniques de traitement du cuir ont permis d'ajuster ses propriétés, qui vont d'un aspect de planche dure, comme dans le cuir de semelle, par exemple, à des cuirs de gants très doux au toucher, semblables à des textiles. Il est rendu hydrophobe dans la fabrication de chaussures et, à l'inverse, peut absorber de grandes quantités de liquide quand il est préparé en « peau de chamois ». Sa structure de base est une peau animale pouvant être décrite comme un non-tissé présentant différents degrés de densité dans la fleur, la couche papillaire et la couche réticulaire (figure 1A).

Des matériaux alternatifs ont été inventés dans l'ère industrielle, avec en premier lieu des vêtements cirés fabriqués à partir de textiles (lin, coton), trempés ou enduits d'huile de lin bouillie et mêlée de charges, de siccatifs et de pigments [6]. L'utilisation du caoutchouc naturel représente l'étape suivante dans l'enduction des textiles, mais il fallut attendre la découverte de la vulcanisation pour obtenir des films non collants [7]. De plus en plus de nouveaux matériaux ont vu le jour au fil du développement des polymères synthétiques, ce qui a permis de remplacer le cuir dans de nombreuses applications. Les polymères synthétiques ont permis de mettre au point des solutions sur-mesure à haute performances, qui surpassent de loin le cuir dans les applications techniques telles que les transmissions mécaniques, les tapis roulants ou les contenants. Des alternatives ont également été développées dans des domaines où l'aspect visuel prime, comme l'ameublement, les chaussures et les vêtements. L'objectif de ces matériaux y est souvent d'imiter le cuir.



**Figure 1.** La structure principale du cuir (A) et du '*simili cuir*' (B). Le cuir reflète toujours la structure histologique de la peau avec la membrane de la fleur (a), la couche papillaire (b), la couche réticulaire (c) et les follicules pileux (d). Le '*simili cuir*' est composé d'une couche de finition (e), d'une couche compacte (f), d'une couche intermédiaire en mousse (g) et du support textile (h) (dessins d'Enno Kluever, FILK).

Le cuir présente un certain nombre de propriétés uniques et très appréciées : résistance et élasticité, perméabilité à la vapeur d'eau, résistance à l'abrasion, durabilité et longévité. Si des matériaux synthétiques le concurrençant avec des prix plus bas, des caractéristiques facilitant la confection et la possibilité d'être produits en usine par rouleaux ont pu triompher par le passé, le cuir reste un grand favori en raison de ses propriétés avantageuses, de son aspect naturel et de son toucher de matériau noble.

En règle générale, les alternatives synthétiques sont constituées d'un support textile recouvert d'au moins deux couches de polymères synthétiques (figure 1B). De nos jours,

on utilise souvent des textiles en polyester recouverts de films en PVC ou en polyuréthane, ce qui signifie que l'intégralité du matériau fini est d'origine fossile. Pour une imitation plus fidèle, un motif évoquant la structure de la fleur de cuir peut être gaufré sur leur surface. Ces matériaux sont commercialisés sous de nombreux noms, comme : 'cuir artificiel', 'cuir synthétique', 'similicuir', 'faux cuir', 'skai', 'cuir textile', 'cuir PU' ou 'cuir de polyuréthane'. Cependant, l'utilisation de ces termes est encadrée par la norme européenne EN 15987. Ici, nous utiliserons les termes « *matières alternatives au cuir* » pour décrire les matériaux synthétiques imitant l'aspect visuel du cuir.

Ces dernières années, les questions de développement durable ont conduit tous les domaines de la production industrielle à adopter une logique d'accélération urgente dans l'utilisation de matériaux naturels et le remplacement des matières premières fossiles non renouvelables. Pourtant, bien que le cuir soit renouvelable et d'origine biogénique, ces considérations n'ont pas tant conduit à une recrudescence dans son usage qu'à l'application d'une pression croissante à son égard du fait des débats actuellement en cours autour des émissions de gaz à effet de serre de l'élevage bovin, de la durabilité de la production du cuir et du bien-être animal. Dans le même temps, un nombre croissant de personnes choisissent de manger sans viande ou de se passer totalement de produits d'origine animale. Ces données représentent de nouveaux défis en matière de développement culturel et matériel [3].

La stratégie de certains acteurs consiste à développer des matériaux fibreux alternatifs, naturels et sans matière première d'origine animale. Ces matériaux sont composés de sporophores, c'est-à-dire de « chair » de champignons (comme *Fomes fomentarius* ou *Phellinus ellipsoideus*). L'extraordinaire douceur du mycélium sec en fait un matériau précieux pour les accessoires artisanaux et, il y a plus de cinq millénaires, Ötzi, l'homme de Hauslabjoch, l'utilisait déjà en combinaison avec du cuir [8,9]. Muskin®, notamment, est l'un de ces matériaux. Ces champignons sont difficiles à récolter et disponibles en quantités limitées, et leur rendement en surface de matériau est restreint. Ces matériaux semblent donc loin de pouvoir remplacer le cuir.

L'utilisation de procédés biotechnologiques pour produire des matériaux à base de fibres ouvre également de nouvelles pistes. Des organismes fongiques et la symbiose de bactéries et de levures sont utilisés pour produire des structures fibreuses visant à imiter celle d'une peau d'animal, afin de créer des matériaux utilisables seuls ou en support d'une couche de revêtement. Certaines bactéries, comme *Acetobacter xylinum*, par exemple, peuvent créer des réseaux de fibres micro-cellulosiques, tandis que les réseaux de fibres de mycélium des hyphes de champignons sont constitués de chitine, de cellulose et de protéoglycanes [5,10,11]. Ces mycéliums se développent sur des déchets organiques [11,12].

Une seconde stratégie consiste à tenter de réduire la teneur en matières non renouvelables de ces matières alternatives au cuir en remplaçant partiellement les composants synthétiques des revêtements, comme le polychlorure de vinyle (PVC) ou le polyuréthane (PUR), par des matériaux de remplissage dérivés de déchets agricoles tels que des céréales, du marc de pomme (Vegea®, Appleskin®) ou des feuilles de cactus broyées (Desserto®).

Une troisième façon de remplacer toutes les matières premières d'origine fossile dans un textile enduit a été explorée avec le Pinatex®. Les fibres renouvelables des feuilles d'ananas sont transformées en un support non-tissé, qui est enduit d'acide polylactique (PLA) produit à partir d'amidon de maïs [13].

Quel que soit le type de matériau, que ce soit du cuir, du 'similicuir' ou une nouvelle matière alternative en vogue, quelques seuils de résistance physique et mécanique sont généralement définis et doivent être atteints. Ces limites doivent être évaluées en fonction des contraintes associées à la production, au traitement et à l'utilisation des matériaux. De manière générale, les examens visant à qualifier les matériaux et à quantifier leurs propriétés doivent suivre des procédures d'essai normalisées.

Nous présentons ici une étude comparative du cuir et de ses alternatives aux applications finales similaires, axée sur les structures de ces matériaux et leurs performances physiques et mécaniques. En outre, nous avons analysé ces matériaux pour détecter la présence de substances critiques, au moyen des méthodes d'essai normalisées

d'usage pour les utilisations dans les chaussures, les gants et les vêtements. Les matériaux destinés à l'automobile et à l'ameublement sont délibérément exclus de cette étude car ils sont soumis à des exigences supérieures sur de nombreux points.

Nous nous sommes concentrés sur les performances des matériaux et ne nous pencherons pas, ici, sur d'autres aspects importants tels que l'origine de la matière première (renouvelable ou à base de pétrole), l'empreinte carbone, l'empreinte environnementale, la traçabilité et la biodégradabilité. Des matériaux alternatifs de différentes origines ont été testés contre un cuir de bovin à dessus de chaussure ordinaire, en première référence, et un textile enduit de PUR ('*similicuir*') conventionnel, tel qu'utilisé pour les chaussures, en seconde référence. Tous ces matériaux sont disponibles dans le commerce et ont déjà été utilisés dans divers types de produits finaux. Ils ont été testés conformément aux spécifications internationales harmonisées et acceptées pour les chaussures, les gants et les vêtements [14-16].

## 2. Matériaux et méthodes

Notre étude porte sur neuf matériaux proposés comme alternative au cuir, qui représentent différents types de structures principales (tableau 1). Nous les avons étudiés au microscope optique et avons mesuré leurs propriétés physiques et analysé leurs compositions chimiques. Les marques déposées sont indiquées dans le tableau. De plus, un cuir de bovin à dessus de chaussure et un textile enduit de polyuréthane ('*similicuir*') ont été testés comme références. L'échantillon de Noani® a été obtenu sous la forme d'une ceinture composée de plusieurs matériaux assemblés par couture.

La caractérisation physique comprenait des mesures normalisées de l'épaisseur, de la résistance à la traction, au déchirement et à la flexion, de l'absorption de vapeur d'eau et de la perméabilité à la vapeur d'eau [17-22]. La tranche, la surface et l'envers de chaque matériau ont été représentés par microscopie optique à différents grossissements. Leur composition chimique et les additifs qu'ils contiennent ont été étudiés par IRTF (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier) et par thermo-désorption GC/MS (chromatographie en phase gazeuse / spectroscopie de masse). Les spectres IRTF ont été mesurés en utilisant une ATR diamant (réflexion totale atténuée) avec 16 balayages dans une gamme de 4000-650  $\text{cm}^{-1}$ . L'évaluation des spectres était basée sur nos propres bases de données ainsi que diverses bases de données commerciales. Les substances volatiles et nocives ont été mesurées conformément à la norme VDA 278 [23] (VDA - Verband der Automobilindustrie, Allemagne). Au total, 5 à 10 mg de matière ont été chauffés à 120 °C pendant 60 minutes, et tous les composés volatils ont été recueillis à partir de l'évaporat par refroidissement à -100°C à l'azote liquide. Les substances piégées ont ensuite été vaporisées pendant 5 min à 280 °C, séparées et caractérisées par GC/MS (GC : 50 °C pendant 2 min, 25 K/min jusqu'à 160°C, 10 K/min jusqu'à 280, 10 min à 280 °C, colonne Ultra 2 (5% phénylméthylsiloxane), 50 m × 320  $\mu\text{m}$  × 0,52  $\mu\text{m}$ , débit 1,3 ml/min à pression constante, MS : 29- 450 m/z).

**Tableau 1.** Échantillons et leur composition.

Nom	Couleur	Composition (de la couche de finition au revers)
Cuir de bovin à dessus de chaussure	brun	Cuir bovin pleine fleur ; structure typique du cuir ; très fine couche de finition
Muskin®	brun	Matériau finement fibreux, poreux et naturellement cultivé en une seule couche ; fibres naturelles à base de polysaccharides ; sans revêtement ni support textile
Kombucha	brun	Matériau compact et dense à base de polysaccharides, contient du talc, quelques inclusions hétérogènes d'origine indéterminée
Textile enduit de PUR	gris	Textile enduit avec une fine couche de finition compacte (PUR), une couche inférieure (PUR) étoffée de particules hétérogènes en cellulose modifiée et un support textile à base de polyester, matériau obtenu par coagulation

Desserto®	beige	Textile enduit d'une couche compacte (PUR) et d'une couche partiellement moussée (PUR) étoffée de particules hétérogènes d'origine organique, support textile à base de polyester, matériau obtenu par un procédé d'enduction inverse
Appleskin®	noir	Textile enduit en fines couches compactes (PUR), une couche de mousse (PUR) étoffée de particules organiques et un support textile imprégné de PUR, matériau obtenu par coagulation
Vegea®	noir	Textile enduit avec une couche compacte (PUR), une couche partiellement moussée (PUR) étoffée de quelques particules et un support textile à base de cellulose
Teak Leaf®	auburn	Feuilles enduites et laminées, couche de finition : film transparent à base de cire de polyoléfine, feuilles, laminage sur le dos des feuilles avec deux couches de textile non tissé (fibres brun clair à base de cellulose, liant à base d'acrylate et fibres de polypropylène blanc)
Pinatex®	noir	Matériau non tissé en fibres naturelles à base de cellulose, recouvert d'une fine couche polymère (similaire à de l'acrylate de polyuréthane)
SnapPap®	brun	Matériau dense en une seule couche avec une structure non tissée faite de fibres cellulosiques et imprégnée d'un polymère à base d'acrylate
Noani®	mixte	Matériau composite en trois couches principales individuelles : Couche supérieure en microfibre de polyester, couche centrale en panneau de fibres de cuir, couche arrière en textile enduit d'une couche compacte (PUR), couche de mousse en PVC, support en textile

A titre d'évaluation, 10 panélistes dûment formés ont apprécié le toucher des matériaux. Aucune information relative aux matériaux ne leur a été fournie avant l'évaluation. Les matériaux ont été présentés dans le même ordre à tous les panélistes, soit en les posant directement sur une table, soit en les plaçant sur une mousse PUR souple de 4 mm d'épaisseur. Les surfaces des matériaux ont été touchées à l'aveugle sans aucun étirement ni pliage. Les propriétés tactiles de tous les matériaux ont été comparées à celles du cuir : température perçue (plus chaud ou plus froid), déformation dans l'axe perpendiculaire au plan (plus souple ou plus dure), rugosité, aspect glissant ou adhérent, toucher agréable ou désagréable, naturel ou artificiel, impression de bonne ou de mauvaise qualité.

### 3. Résultats de recherche

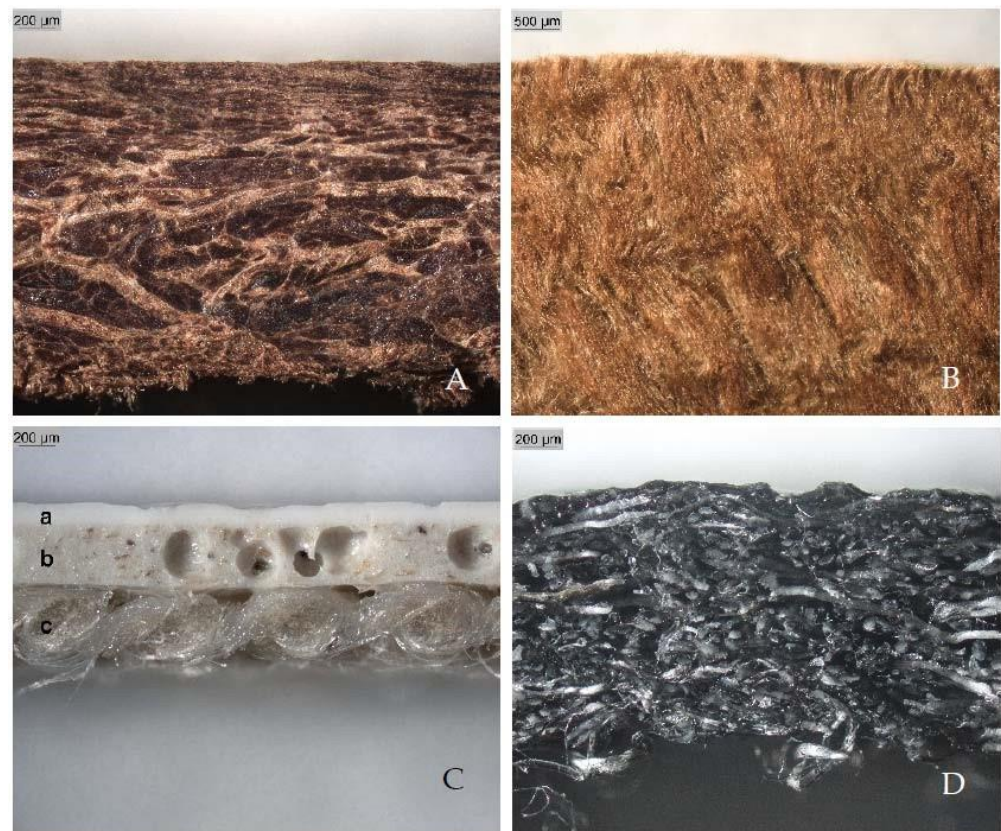
#### 3.1. Composition et structure des matériaux

Tous les matériaux sont composés de fibres. Cependant, la constitution chimique des fibres et du revêtement, leur disposition et leur taille suivent différents principes directeurs. Les résultats des examens au microscope optique et de l'analyse de désorption thermique et des spectres IRTF nous permettent d'identifier la composition des matériaux (tableau 1).

Une sélection d'images microscopiques des coupes transversales représentant les différentes structures principales est présentée en figure 2, et les différentes surfaces sont présentées en figure 3. Toutes les images microscopiques, ainsi qu'un exemple de spectre IRTF de Desserto®, un matériau revêtu de PUR (voir Matériaux supplémentaires), figurent en haute résolution en annexes.

Les structures du Desserto® (figure 2A), du Vegea® et de l'Appleskin® reflètent la composition typique de matières alternatives au cuir, revêtues de PUR utilisé, par exemple, en cordonnerie ou en tapisserie. Le support de tous les échantillons étudiés était constitué de textiles de polyester tissés ou tricotés, à l'exception de celui du Vegea®, qui était en cellulose. Les textiles étaient enduits de couches intermédiaires en mousse à base de polyuréthane rembourrées de charges organiques à base de cellulose. Les matériaux portaient en surface des couches de finition à base de polymères. Les surfaces des matériaux ont été partiellement gaufrées pour obtenir un aspect visuel et tactile semblable à celui du cuir (figure 3E-H). Même le Teak Leaf® appartient à la catégorie structurelle des textiles enduits. Ici, le support textile au revers est constitué de deux couches de non-tissé. La couche intermédiaire est à base de cellulose, les fibres sont collées ensemble avec un liant polymère à base d'acide acrylique, et le support de base au revers est à base de polyester. Sur la face supérieure, le matériau Teak Leaf® est recouvert d'un film

polyoléfine transparent et cireux. La feuille de teck sert principalement à obtenir l'effet visuel désiré (figure 3D).



**Figure 2.** Cuir (A) et matériau à structure fibreuse naturelle (Muskin®) (B) ; structure d'un textile enduit typique (Desserto® dans cet exemple) (C) ; (a) couche de finition ; (b) couche intermédiaire en mousse ; (c) support textile ; non-tissé en fibres naturelles (Pinatex® dans cet exemple) (D). Les échelles diffèrent par un facteur de 2,5 entre le Muskin® et les autres échantillons.

Le Pinatex® (figure 2D) et le SnapPap® sont constitués d'un non-tissé fibreux à base de cellulose. Les fibres du SnapPap® sont liées par un liant polymère à base d'acide acrylique. En revanche, l'échantillon de Pinatex® étudié est recouvert d'une fine couche polymère. Les structures fibreuses du non-tissé des deux matériaux sont visibles à la surface en raison de la faible épaisseur de la couche de revêtement (figure 3I,K).

Le Muskin® (figure 2B) et le Kombucha sont des matériaux monocouches sans support textile et sans couche de finition. Tous deux sont composés de polysaccharides. Le Muskin® présente une forte porosité ; il est composé de fines fibres brunes orientées en perpendiculaire de la surface. Ces fibres sont visibles à la surface, elles donnent l'apparence d'une fine pelouse sans structure distincte (figure 3B). Le Kombucha, au contraire, est constitué d'une couche compacte, qui contient quelques inclusions et du talc et présente une surface brillante et brune (figure 3C).

Il s'est avéré que le Noani® n'était pas un matériau unique, mais qu'il était constitué de trois couches distinctes. Le dessus est formé d'un matériau en microfibre gaufré, la couche intermédiaire est constituée d'un panneau de fibre de cuir et le revers est un textile enduit de PUR/PVC qui se compose des trois couches, typiquement trouvées dans une matière alternative au cuir conventionnelle. Il est surprenant d'y trouver de la fibre de cuir, car Noani® est considéré comme un produit « vegan » ; le label « PETA approved » était d'ailleurs gravé dans l'article dont vient notre échantillon. Pour cette raison et parce que l'échantillon de Noani® n'est pas constitué d'un unique matériau, il ne sera pas examiné plus avant en ce qui concerne les catégories structurelles. Quelle qu'en soit la composition réelle, tous les matériaux artificiels tentent d'imiter un aspect naturel (figure 3).



**Figure 3.** Surfaces des matériaux étudiés : Matériaux naturels (Cuir (A), Muskin® (B), Kombucha (C), Teak Leaf® (D)) ; surfaces gaufrées de textiles enduits (textile enduit de PUR (E), Desserto® (F), Appleskin® (G), Vegea® (H)) ; structures fibreuses en fibres naturelles non tissées (Pinatex® (I), SnapPap® (K)), et un matériau en microfibres (Noani® (L), gaufré).

### 3.2. Propriétés tactiles

La surface du Muskin® et la couche supérieure du Noani® sont agréables au toucher. En raison de la présence de fibres très fines, les deux matériaux créent une sensation veloutée semblable à celle du daim. Les matériaux à surface synthétique comme les « *cuirs artificiels* » (Desserto®, Appleskin®, Vegea®, textile enduit de PUR) présentent une sensation de douceur et peuvent être déformés en perpendiculaire au plan. Cependant, ils dégagent aussi une impression de matériau artificiel au toucher, avec une tendance collante. La surface du Pinatex® et du Teak Leaf® semble également synthétique. En outre, le Desserto®, le Pinatex® et le SnapPap® ont été jugés rugueux au toucher. La surface du Kombucha semblait collante.

### 3.3. Épaisseur

L'épaisseur des matériaux a été déterminée en examinant au microscope les coupes transversales préparées. L'épaisseur totale de tous les matériaux est comprise entre 0,29 mm et 6,22 mm, ce qui montre également la variété de ces types de matériaux (tableau 2). L'épaisseur du cuir, du textile enduit de PUR et des alternatives Desserto®, Appleskin®, Vegea® et Pinatex® se situent dans une gamme typique pour les matériaux utilisés pour les chaussures, les gants et les articles d'habillement. Les matériaux Kombucha, SnapPap® et Teak Leaf® semblent très fins et, en revanche, le Muskin® est très épais pour les applications mentionnées. Ces résultats de mesures d'épaisseur préfigurent des différences significatives dans les propriétés des matériaux, et notamment dans les propriétés de déformation.

Tableau 2. Propriétés physiques.

Propriétés physiques		Épaisseur	Résistance à la traction	Résistance au déchirement	WVP	WVA	Résistance à la flexion
		ISO 17186-A	ISO 3376	ISO 3377-1	ISO 14268	ISO 17229	ISO 32100
		(mm)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm)	(mg/(cm <sup>2</sup> × h))	mg/cm <sup>2</sup>	Cycles de flexion avant ≥ 2
Matériaux produits naturellement	Cuir	1.93	39.5	82.9	4.6	8.4	>200,000
	Muskin®	6.22	0.2	0.5	10.4	6.0	10,000
	Kombucha	0.29	9.7	5.1	0.1	9.2	10,000
Textile enduit	Textile revêtu PUR	1.37	10.2	17	1.1	1.4	200,000
	Desserto®	0.88	20.8	37.2	0.5	2.5	30,000
	Appleskin®	1.14	14	18.4	0.4	1.7	50,000
	Vegea®	0.95	9.4	16.6	0.6	3.0	50,000
	Teak Leaf®	0.57	12.2	30.7	0.1	0.1	100
Non-tissés de fibres végétales	Pinatex®	1.43	4.5	31	2.5	3.8	150,000
	SnapPap®	0.57	24.9	7.5	10.3	3.7	5,000

(WVP : perméabilité à la vapeur d'eau ; WVA : absorption de vapeur d'eau).

### 3.4. Résistance à la traction et au déchirement

Les propriétés mécaniques les plus importantes des matériaux utilisés pour les chaussures, les gants et les vêtements sont la résistance à la traction et la résistance au déchirement [17,18]. Les résultats pour ces deux paramètres varient sur une plage très large, dans laquelle les matériaux naturels présentent les plus grands écarts.

Le cuir, un tissu cutané naturellement produit, présente une très grande stabilité mécanique, avec les valeurs les plus élevées pour la résistance à la traction et à la déchirure trouvées dans cette étude. Sa résistance à la traction dépasse la spécification de >15 N/mm<sup>2</sup> pour le cuir de bovin à dessus de chaussure, tanné au chrome (ISO 20942) [14]. Par opposition, les valeurs de l'échantillon de Muskin® sont extrêmement faibles.

Les textiles enduits présentent une résistance à la traction allant de 9 à 20 N/mm<sup>2</sup>. Elle dépend principalement des propriétés du tissu de support. Ces résultats montrent qu'il est raisonnable d'opter pour ces matériaux dans les applications considérées ici, indépendamment de l'origine naturelle ou artificielle des fibres utilisées.

Les résistances à la traction des matériaux non tissés en fibres végétales naturelles vont de 4 à 25 N/mm<sup>2</sup>. Elle dépend des propriétés des fibres et de leur liant. Malgré une résistance à la traction satisfaisante, la résistance au déchirement du SnapPap® est faible du fait de ses fibres courtes, ce qui limite l'efficacité du liant polymère. À l'exception des matériaux non tissés, la résistance au déchirement a tendance à refléter la résistance à la traction.

### 3.5. Résistance à la flexion

Les matériaux utilisés pour les chaussures doivent résister à une flexion intensive et à une déformation convexe et concave pendant l'utilisation. Le test du flexomètre est utilisé pour évaluer la résistance à la flexion à long terme. La meilleure note est 0, indiquant que le matériau lui-même et les couches de revêtement ne présentent pas de fissures par flexion. Une note inférieure ou égale à 2 (seulement de très petites fissures dans la couche supérieure du revêtement) permet généralement de réussir ce test. Lorsqu'une note supérieure à 2 est observée, la flexion doit être arrêtée et le nombre de cycles de flexion est noté. Le cuir, le Pinatex® et le textile enduit de PUR répondent à la spécification de >80.000 cycles de flexion définie par la norme ISO 20942. La résistance à la



flexion des matériaux Teak Leaf®, SnapPap® et Muskin® a été jugée insuffisante pour les applications visées.

### 3.6. Perméabilité à la vapeur d'eau et absorption de la vapeur d'eau

Le confort des chaussures, des gants ou des vêtements est lié à la perméabilité à la vapeur d'eau (WVP) du matériau, qui permet à l'humidité du corps d'être transportée à travers le vêtement, jusqu'à sa surface. Le confort est également amélioré par la capacité des matériaux à absorber la vapeur d'eau. La norme ISO 20942 place le seuil de perméabilité à la vapeur d'eau nécessaire au confort à 0,8 mg/(cm<sup>2</sup> × h). Le cuir, le Muskin® et le SnapPap® passent très largement ce seuil, et le Pinatex® et le textile enduit de PUR satisfont sans grande marge aux exigences de la norme ISO 20942. Le WVP de tous les autres matériaux est insuffisant.

Les valeurs d'absorption de vapeur d'eau (WVA) du Kombucha, du cuir et du Muskin® sont élevées, probablement en raison de la polarité des molécules de polymères naturels. Les autres matériaux, en particulier ceux qui contiennent une quantité importante de polymère synthétique de moindre polarité, présentent une absorption de vapeur d'eau beaucoup plus faible.

### 3.7. Substances critiques

Les matériaux ont été examinés pour détecter des substances potentiellement nocives au moyen d'une analyse par thermo-désorption. Dans plusieurs échantillons (Appleskin®, Pinatex®, Desserto®, Vegea®, SnapPap®, Teak Leaf®), des matières premières synthétiques et biogéniques avaient été combinées. Cependant, le traitement des matières premières d'origine fossile nécessite souvent l'application de solvants, d'agents de réticulation ou de plastifiants pour obtenir les propriétés souhaitées.

Tous les matériaux testés ont émis des composés organiques volatils lors de l'analyse par désorption thermique. Des substances soumises à restrictions ont été identifiées dans les échantillons du textile enduit de PUR (*similicuir*), dans le Desserto®, l'Appleskin® et le Vegea®, dont la construction est similaire, mais aussi dans le Pinatex®. Le textile enduit de PUR (*similicuir*) contenait des quantités considérables de diméthylformamide (DMF) et de toluène, ainsi que des traces de N,N-diméthylacétamide (DMAC). Dans l'Appleskin®, de la butanone oxime et des traces de DMF ont été détectés. Le Desserto® contenait les cinq substances réglementées suivantes : butanone oxime, toluène, isocyanate libre, folpet (un pesticide organique) et des traces du plastifiant phtalate de di-isobutyle (DIBP). Le toluène a également été détecté dans l'échantillon de Vegea® et le DIBP dans celui de Pinatex®.

## 4. Discussion

Les matériaux testés dans le cadre de cette étude sont utilisés dans l'industrie de la mode pour fabriquer des biens tels que des chaussures, des sacs, des vêtements et des accessoires. À cet égard, il convient de décortiquer les aspects (1) des propriétés fonctionnelles et (2) de l'apparence. Si les propriétés fonctionnelles sont principalement le résultat de la construction du matériau, l'apparence, pour sa part, est clairement déterminée par les propriétés de surface. Bien que les matériaux soient proposés pour des applications finales similaires, les valeurs obtenues pour ces deux groupes de propriétés varient très largement. Les analyses de composition, de construction, des surfaces et du toucher nous permettent de comparer ces matériaux à l'aune de leurs performances possibles. C'est pourquoi nous avons utilisé des procédures d'essai standardisées utilisées dans l'évaluation du cuir, puisque ces matériaux sont proposés comme alternatives au cuir.

### 4.1. Structure

En se basant sur leur structure et au regard de leurs propriétés fonctionnelles, les échantillons étudiés peuvent être conceptuellement regroupés en trois types de matériaux complètement différents, qui sont (a) des matériaux biosourcés sans animaux, (b) des

tissus enduits multicouches à la façon du 'similicuir', combinés avec des additifs à base de plantes, et (c) des non-tissés avec ou sans finition de surface.

D'après les résultats de l'analyse IRTF, les couches fonctionnelles des tissus enduits sont principalement à base de PUR. D'un autre côté, les matériaux naturels entièrement biosourcés étudiés ici ne répondaient pas aux exigences mécaniques attendues pour les dessus de chaussures, par exemple. La question se pose de savoir pourquoi les matériaux biosourcés sans animaux (a), qui sont directement fabriqués en préservant une structure biogénique combinée à un traitement plus ou moins intensif, ne présentent qu'une faible résistance mécanique par rapport au cuir.

Les structures des matériaux naturels ainsi cultivés sont destinées à émuler la structure fibreuse de la peau animale [11,24,25]. Le matériau à base de champignon Muskin®, issu de *Phellinus ellipsoideus*, en est un représentant typique. Les images microscopiques montrent que le mycélium est composé d'hyphes, qui en sont le composant structurant. D'après nos mesures, ces structures chimiques sont principalement des polysaccharides. Il est donc raisonnable de supposer que les hyphes sont faits de chitine. Le spectre IRTF que nous avons obtenu correspond exactement à celui d'autres études [26]. Ces dernières ont interprété les spectres de manière plus détaillée et ont également identifié des protéines, des lipides et des acides nucléiques. Cependant, la stabilité mécanique du mycélium est restreinte. Il se pourrait que cette relative fragilité soit due à la stabilité limitée des hyphes elles-mêmes et du mycélium transformé, comme d'autres études l'ont montré [11,27]. Les images de la coupe transversale montrent que les fibres sont orientées perpendiculairement à la surface. Cette disposition est également un facteur de faible stabilité mécanique. Il est permis de supposer que ces performances mécaniques pourraient être améliorées en alignant les fibres dans le sens de la charge mécanique.

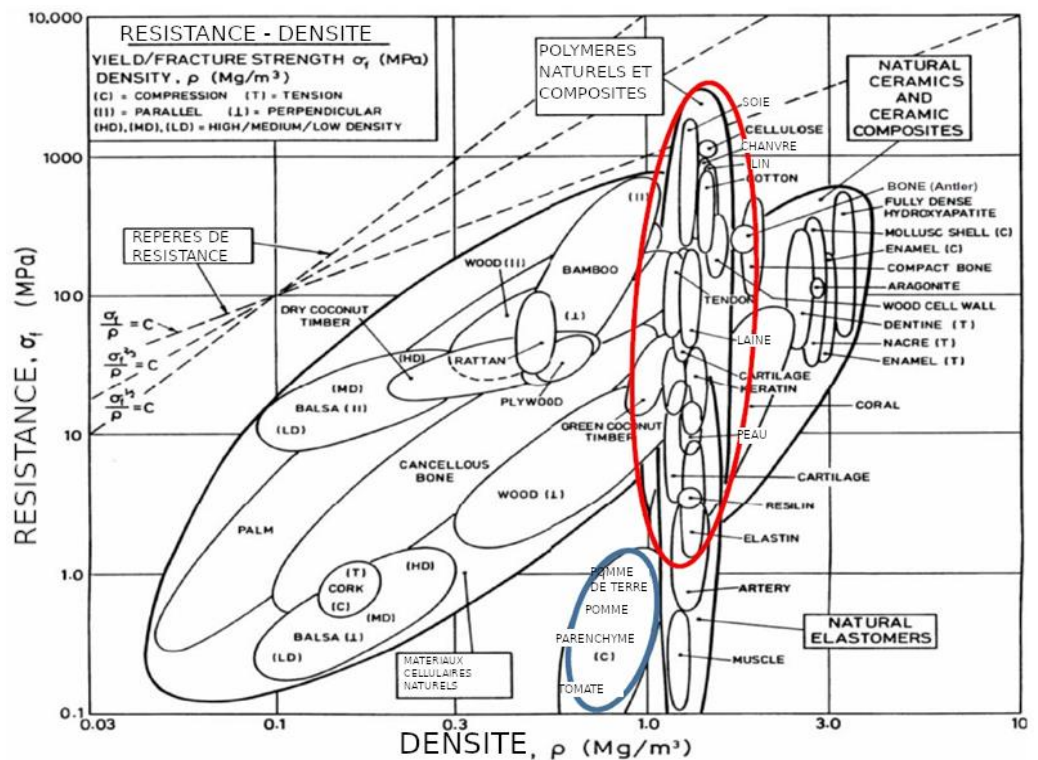
Le Kombucha, pour sa part, est une boisson traditionnelle japonaise obtenue par une symbiose de bactéries et de levures métabolisant les sucres en acides organiques, en éthanol et en dioxyde de carbone. Parallèlement, les bactéries (par exemple *Acetobacter xylinum*) sécrètent des polysaccharides de poids moléculaire élevé, qui donnent une consistance de gel. Ces microorganismes à croissance intensive peuvent être récoltés et, après une étape de séchage, les polymères sécrétés sont utilisés comme matériau de structuration biogénique [10]. La stabilité mécanique de l'échantillon de matériau Kombucha était beaucoup plus élevée que celle de Muskin®, mais ne répondait pas non plus aux exigences relatives aux matériaux des dessus de chaussures. Contrairement au Muskin®, qui présente une structure lâche et ouverte permettant à la vapeur d'eau de se diffuser à travers le matériau, le Kombucha est très étanche mais absorbe des quantités d'eau plus importantes. Ces deux matériaux à base de microorganismes semblent homogènes dans leurs sections transversales.

La peau animale, matière première du cuir, est composée de collagène, une protéine structurante. Le cuir est construit à partir de fibrilles et de fibres entrelacées, qui sont en outre réticulées au moment du tannage. En allant de la fleur au côté chair, la structure fibreuse du cuir présente un gradient de densité. La couche supérieure est composée de fibres de collagène très fines et serrées. Le tissu cutané développé présente une très grande stabilité mécanique (résistance à la traction, à la déchirure), supérieure à celle des matériaux à base de microorganismes par un facteur allant de 100 à 1000 [5,10,11,25,26,28]. La résistance du cuir peut être attribuée à la stabilité des fibres de collagène elles-mêmes et au tissage et à la réticulation des fibres.

Du point de vue biologique, les hyphes des micro-organismes et la peau animale remplissent des tâches très différentes dans leurs organismes respectifs. Les performances des matériaux naturels ont été schématisées par le passé dans les graphiques d'Ashby. La figure 4 donne un aperçu parlant de quelques matériaux naturels et de leurs limites mécaniques [29]. Les matériaux naturels flexibles à transfert de charge présentent une densité de ~1 Mg/m<sup>3</sup> et vont de 0,1 MPa à plus de 1000 MPa (marqués en rouge). La résistance à la traction des tissus végétaux parenchymateux est faible (marqués en bleu). Les matériaux à base de collagène, tels que la peau et les tendons, semblent très stables (ellipse rouge). Une grande stabilité est également observée dans les structures des plantes, qui doivent transférer des charges (bois, fibres de cellulose).

Il semble en découler que les matériaux naturels cultivés ne présenteront de flexibilité et de résilience mécanique que lorsque des structures à transfert de charge y seront utilisées. La peau animale couvre un large éventail de fonctions. Elle doit durablement protéger le corps des chocs mécaniques, elle est souple pour permettre la mobilité et doit souvent réguler la température et l'équilibre hydrique. Les fibres végétales doivent absorber le poids de la plante contre la force de la gravité, dans le sens de la charge.

Les structures tissulaires des microorganismes, en revanche, se présentent comme des matériaux parenchymateux, basés sur des réseaux de fibres qui offrent principalement aux cellules actives une matrice pour le métabolisme (bactéries, champignons) et le transport des nutriments (hyphes). C'est pourquoi elles apparaissent au bas de la figure 4. Pour pallier ces déficiences mécaniques, il a été proposé de stabiliser le réseau de fibres de Muskin® au moyen d'agents de réticulation [25,26], ou d'ajuster la souplesse des matériaux Kombucha par l'ajout d'agents plastifiants [10]. Cependant, cela contredit l'idée d'échelles multiples avec une variation dans la densité et une orientation des fibres le long de leur direction de charge, ce qui serait probablement un meilleur moyen de surmonter les limites observées.



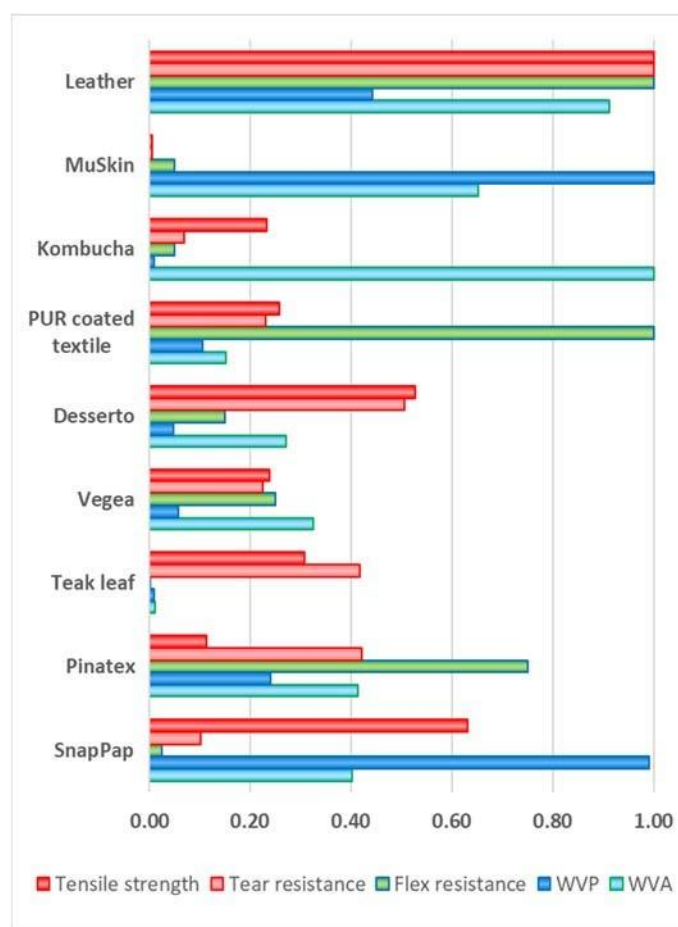
**Figure 4.** "Un diagramme des propriétés des matériaux naturels, représentant la résistance en fonction de la densité. (...) Les matériaux efficaces sur le plan structural sont légers et résistants". Réimpression avec l'autorisation de [29] Copyright 2021 Taylor & Francis (mentions traduites en français par nous-mêmes). Les matériaux flexibles naturels à transfert de charge présentent une densité d'environ 1 Mg/m<sup>3</sup> et vont de 1 MPa à plus de 1000 MPa (marqués en rouge). La résistance à la traction des tissus végétaux parenchymateux est faible (marqués en bleu).

Le deuxième concept, qui vise à obtenir des matériaux très fonctionnels ressemblant au cuir avec une forte teneur en composants d'origine biologique, reprend le principe de 'similicuir'. Etant multicouches, ces matériaux émulent la structure du cuir. Les fonctions sont réparties entre le support textile, qui doit remplir la fonction mécanique (résistance à la traction, résistance à la déchirure), la couche intermédiaire, par laquelle le toucher et la souplesse sont ajustés, et la couche de finition, qui prend en charge l'aspect visuel final. Une structure imitant celle de la fleur de cuir est généralement obtenue par gaufrage. Par conséquent, pour augmenter la part biogénique des matériaux, il serait efficace de remplacer le support en polyester par des fibres naturelles. Comme le montre la figure 4, les fibres naturelles peuvent présenter une excellente stabilité mécanique. Pourtant, seuls Vegea® et Teak Leaf® utilisent un tissu à base de cellulose comme support. La part des

matières premières renouvelables dans ces matériaux multicouches pourrait également être augmentée en remplaçant les polymères synthétiques des couches de revêtement. C'est le principe qu'ont adopté Desserto® et Appleskin®. Une partie du PUR est remplacée par des résidus agricoles, qui sont utilisés comme charges. Toutefois nous n'avons pas pu analyser de manière détaillée l'origine du composant naturel, ni la proportion dans laquelle il avait été utilisé par rapport au reste (la majeure partie) du matériau. Il n'en reste pas moins que ces matériaux sont principalement constitués de polyuréthane. Dans le cas de Teak Leaf®, une surface d'aspect naturel est créée en ajoutant de la feuille naturelle, qui est recouverte de cires synthétiques. Cependant, sa résistance à la flexion est réduite par l'absence de la couche de mousse élastique utilisée dans cette matière et son remplacement par la feuille de teck, et semble mal ajustée d'un point de vue fonctionnel.

La troisième stratégie consiste à remplacer le cuir par des matériaux ne venant pas d'animaux, à base de non-tissés d'origine végétale. Le support textile en polyester d'origine fossile est remplacé par des alternatives en fibres naturelles comme le coton, le lin, etc. Idéalement, le tissu serait fini avec un polymère biosourcé. Le Pinatex®, par exemple, est fabriqué à partir de fibres de feuilles d'ananas, qui sont laborieusement traitées avant d'être recouvertes d'un mince film polymère, qui sert à rendre le matériau plus utilisable et peut être soit d'origine fossile, soit issu de ressources renouvelables. Le Pinatex® se targue d'utiliser une finition polylactide, qui peut être produite entièrement à partir de matières biosourcées [13,30-32]. Cependant, notre analyse a révélé une teneur pour le moins notable en PUR/acrylate dans la finition. Le revêtement de surface très fin ne recouvre pas complètement le non-tissé fibreux, ce qui donne une surface dure, d'aspect fibreux, mais qui résiste pourtant à l'essai de résistance à la flexion. Le matériau semble plus semblable à un non-tissé textile et sa faible résistance mécanique peut être directement corrélée à la faible teneur en liant dans les fibres du support non-tissé. Le SnapPap® est également à base de fibres cellulosiques, mais contrairement au Pinatex®, leur matrice est liée par des polymères à base d'acide acrylique. Aucun de ces deux matériaux n'émule la structure de cuir ni ne présente une surface similaire à celle du cuir. Il convient donc de les considérer comme des textiles enduits ou imprégnés plutôt que comme des « *cuirs artificiels* » ou des alternatives au cuir.

La figure 5 montre les impressionnants écarts de performances entre les différents matériaux et les références. Les matériaux alternatifs présentent des avantages spécifiques, mais, contrairement au cuir, aucun d'entre eux ne combine une résistance mécanique et une résistance à la flexion élevées avec une excellente perméabilité à la vapeur d'eau.



**Figure 5.** Comparaison des propriétés physiques des matériaux. Les valeurs sont normalisées par paramètre à la valeur maximale mesurée dans cette enquête. (*Leather* : cuir ; *PUR coated textile* : Textile à revêtement PUR ; Légende de gauche à droite : Résistance à la traction, Résistance au déchirement, Résistance à la flexion, Perméabilité à la vapeur d'eau, Absorption de vapeur d'eau).

#### 4.2. Surfaces et apparence

Les surfaces des matériaux sont leur « reflet ». L'usage des feuilles dans le Teak Leaf® en font une preuve éclatante : il saute aux yeux. Les structures ainsi obtenues semblent visuellement intéressantes mais ne remplissent pas la même fonction que la couche de mousse des textiles revêtus. Il existe d'autres matériaux végétaux, qui sont utilisés dans des constructions similaires pour obtenir des propriétés visuelles intéressantes, comme certains à base de liège, par exemple. Ces matériaux, sur lesquels nous ne nous sommes pas penchés dans cette étude, doivent également être soutenus par des textiles pour obtenir des propriétés physiques adéquates [33-35]. La solution Teak Leaf® semble donc répondre avant tout à des préoccupations esthétiques, au détriment de la fonctionnalité.

Afin d'obtenir de la surface de matériaux flexibles des propriétés fonctionnelles satisfaisantes, une couche de finition est souvent ajoutée. Celle-ci détermine ensuite les propriétés optiques et une partie des propriétés tactiles des matériaux, ainsi que d'autres propriétés fonctionnelles comme la résistance à la flexion, le comportement à l'abrasion et le comportement à la salissure. La perméabilité à la vapeur d'eau dépend également de l'étanchéité de la couche de finition ou d'éventuelles couches intermédiaires étanches. Plus cette couche est épaisse, moins le matériau est perméable à la vapeur et aux gaz [36].

Le cuir tel que nous l'avons étudié ne présente généralement qu'une très fine couche de finition pour améliorer le comportement à la salissure. Sa résistance à la flexion est très élevée. La perméabilité à la vapeur d'eau se situe dans une fourchette appropriée. Muskin® et SnapPap® présentent des structures très ouvertes, qui permettent à la vapeur d'eau de se diffuser parfaitement. Cependant, leurs caractéristiques de performance, en particulier leur faible résistance à la flexion, limitent leur utilisation à long terme. Tous les autres matériaux étudiés sont très imperméables à la vapeur d'eau. Utilisé comme matériau de chaussure, cela entraînerait une transpiration des pieds et réduirait le confort

[37,38] mais les matériaux seraient imperméables à la pluie s'ils étaient utilisés comme sac ou comme veste de pluie, par exemple.

Les images microscopiques de la surface du SnapPap® et du Pinatex® montrent le non-tissé fibreux, qui est responsable des propriétés mécaniques du matériau. Le SnapPap® et le Pinatex® n'ont pas l'aspect du cuir. Ils présentent des surfaces dures et une structure fibreuse non tissée exposée. L'application d'un revêtement polymère plus épais et le gaufrage d'une structure granulaire conduirait probablement à une présentation visuelle semblable à celle du cuir. Dans ce cas, il faudrait prendre en compte les considérations relatives à la perméabilité à la vapeur d'eau des textiles enduits.

## 5. Conclusions

Bien que beaucoup des matériaux alternatifs, mis à l'essai ici, soient proposés comme alternative au cuir, aucun d'entre eux n'a égalé propriétés du cuir selon les valeurs de référence appliquées (figure 5). Les différentes fonctions biologiques des matériaux utilisés peuvent expliquer qu'il soit difficile d'obtenir ces propriétés avec des matériaux naturels alternatifs. Le cuir est un matériau à échelles multiples, qui est naturellement conçu pour remplir des fonctions de transfert de charge et des fonctions métaboliques. Il présente un gradient dans l'étanchéité de la structure composée de fibres protéiques hydrophiles de différentes finesses. Chaque partie de la structure prend en charge une fonction spécifique. La couche réticulaire du cuir, qui se compose de faisceaux de grosses fibres, assure sa résistance mécanique élevée (résistance à la traction et au déchirement). La destruction du réseau de fibres des tissus cultivés divise leurs indicateurs de stabilité mécanique par 10 [28]. Celle-ci ne peut être que légèrement améliorée lorsque les fibres sont réassemblées par des agents liants (comme dans la couche intermédiaire en panneau de fibres de cuir du Noani®). Les fibres plus compactes et plus fines de la couche papillaire du cuir et de la membrane de la fleur créent une structure serrée en surface, qui donne au cuir son aspect visuel. Néanmoins, la perméabilité à la vapeur d'eau est élevée si aucune couche de finition synthétique étanche n'est appliquée. Les fibres hydrophiles du cuir peuvent absorber beaucoup d'eau, ce qui assure un confort élevé par rapport aux alternatives synthétiques. Les textiles non tissés biogéniques Pinatex®, SnapPap® et Kombucha présentent des valeurs d'absorption d'eau similaires à celles du cuir, mais manquent de résistance mécanique et de résistance à la flexion. Par conséquent, à ce jour, la reproduction des fonctions de la structure bionique de la peau au moyen de techniques biologiques alternatives est un défi et un objectif – la remarque était déjà faite il y a quelques années est resté toujours aussi juste [29]. L'ajout de résidus agricoles aux couches polymères de « *cuirs artificiels* » augmente la teneur en matières biosourcées de ces matériaux mais ne leur confère aucun avantage physique mesurable par rapport au matériau de référence. Seule une analyse complète du cycle de vie de ces produits permettrait d'évaluer leurs éventuels avantages.

**Annexes :** Les documents suivants sont disponibles en ligne à l'adresse [www.mdpi.com/2079-6412/11/2/226/s1](http://www.mdpi.com/2079-6412/11/2/226/s1), figure S1 : échantillon de cuir de la tige d'une chaussure ; (a) vue en coupe, (b) surface, figure S2 : échantillon de Muskin® ; (a) vue en coupe (grossissement 25 fois), (b) surface, figure S3 : Échantillon de Kombucha ; (a) vue en coupe (grossissement 100 fois), (b) surface, figure S4 : Échantillon de textile enduit de PUR ; (a) vue en coupe, A : couche supérieure compacte mince, B : couche de mousse, C : support textile, (b) surface, Figure S5 : Échantillon de Desserto® ; (a) vue en coupe, A : couche supérieure compacte, B : couche de mousse, C : support textile, (b) surface, Figure S6 : Échantillon AppleSkin® ; (a) vue en coupe, A : couches supérieures compactes, B : couche de mousse, C : couche imprégnée d'un support textile, (b) surface, Figure S7 : Échantillon Vegea® ; (a) vue en coupe, A : couche supérieure compacte, B : couche de mousse, C : support textile (b) surface, Figure S8 : Exemple de feuille de teck® ; (a) vue en coupe, A : feuille avec une couche supérieure transparente, B : couche textile 1, C : couche textile 2, (b) surface, Figure S9 : Exemple de Pinatex® ; (a) vue en coupe, non tissé avec une couche supérieure compacte, (b) surface, Figure S10 : Echantillon SnapPap® ; (a) vue en coupe, (b) surface, Figure S11 : Echantillon Noani® ; (a) vue en coupe (grossissement 25 fois), A : couche de microfibres, B : couche de cuir, C : support textile, D : couche de mousse, E : couche compacte, (b) surface, région gaufrée, Figure S12 : spectre IRTF de Desserto® comme exemple de matériau revêtu de PUR avec des vibrations moléculaires typiques (3359 NH ; 3931 CH<sub>2</sub> ; 2862 CH<sub>2</sub> ; 1744 C=O ; 1635 O=C-NH ; 1554 Amid ; 1464 CH<sub>2</sub> ; 1257 C-O-C).

**Contributions des auteurs :** Conceptualisation, S.D., H.S., et M.M. ; méthodologie, H.S. et S.D. ; validation, S.D. et H.S. ; enquête, S.D. et H.S. ; conservation des données, S.D., A.M., H.S., et M.M. ; préparation du projet d'écriture original, A.M. et M.M. ; révision et édition, H.S., A.M. et M.M. Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

**Financement :** Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

**Déclaration de la Commission de révision institutionnelle :** Sans objet.

**Déclaration de consentement éclairé :** Sans objet.

**Déclaration de disponibilité des données :** Les données sont contenues dans l'article et ses annexes conformément aux déclarations de disponibilité des données contenues dans la section "MDPI Research Data Policies" à <https://www.mdpi.com/ethics>.

**Remerciements :** Nous remercions l'Association allemande du cuir (VDL) de nous avoir gracieusement donné tous les échantillons.

**Conflits d'intérêts :** Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt.

## Bibliographie

1. Braungart, M.; McDonough, W.; Bollinger, A. Cradle-to-cradle design : Creating healthy emissions—a strategy for eco-effective product and system design. *J. Clean. Prod.* **2007**, *15*, 1337–1348.
2. McDonough, W.; Braungart, M.; Anastas, P.T.; Zimmerman, J.B. Applying the principles of green engineering to cradle-to-cradle design. *Environ. Sci. Technol.* **2003**, *37*, 434A–441A.
3. Peters, S. Sustainable Multipurpose Materials for Design. In *Materials Experience : Fundamentals of Materials and Design*, Karana, E., Pedgley, O., Rognoli, V., Eds.; Elsevier : Amsterdam, The Netherlands, 2014; pp. 169–179 ISBN 978-0-08-099359-1.
4. Peters, S. *Materialrevolution II : Neue Nachhaltige Und Multifunktionale Materialien Für Design Und Architektur*; Walter de Gruyter : Berlin, Germany, 2014; ISBN 3-03821-000-5.
5. Goh, W.; Rosma, A.; Kaur, B.; Fazilah, A.; Karim, A.; Bhat, R. Microstructure and physical properties of microbial cellulose produced during fermentation of black tea broth (Kombucha). II. *Int. Food Res. J.* **2012**, *19*, 153–158.
6. Tuttle, F.J. The story of coated fabrics : I-development of oilcloth. *Text. Res.* **1944**, *14*, 228–232, doi :10.1177/004051754401400709.
7. Tuttle, F.J. The story of coated fabrics : II-rubber and pyroxylin coatings. *Text. Res.* **1944**, *14*, 260–269.
8. Peintner, U.; Pöder, R.; Pümpel, T. The iceman's fungi. *Mycol. Res.* **1998**, *102*, 1153–1162.
9. Papp, N.; Rudolf, K.; Bencsik, T.; Czégényi, D. Ethnomycological use of *Fomes Fomentarius* (L.) Fr. and *Piptoporus Betulinus* (Bull.) P. Karst. in Transylvania, Romania. *Genet. Resour. Crop Evol.* **2017**, *64*, 101–111, doi :10.1007/s10722-015-0335-2.
10. Domskiene, J.; Sederaviciute, F.; Simonaityte, J. Kombucha bacterial cellulose for sustainable fashion. *IJCST* **2019**, *31*, 644–652, doi :10.1108/IJCST-02-2019-0010.
11. Haneef, M.; Ceseracciu, L.; Canale, C.; Bayer, I.S.; Heredia-Guerrero, J.A.; Athanassiou, A. Advanced materials from fungal mycelium : Fabrication and tuning of physical properties. *Sci Rep* **2017**, *7*, 41292, doi :10.1038/srep41292.
12. Cerimi, K.; Akkaya, K.C.; Pohl, C.; Schmidt, B.; Neubauer, P. Fungi as source for new bio-based materials : A patent review. *Fungal Biol Biotechnol* **2019**, *6*, 17, doi :10.1186/s40694-019-0080-y.
13. <https://www.ananas-anam.com>, consulté le 30 décembre 2020.
14. ISO 20942 :2019 Cuir — Cuir à dessus entièrement chromé — Spécifications et méthodes d'essai. ISO : Genève, Suisse, 2019.
15. ISO 14930 :2012 Cuir — Cuir pour gants de cérémonie — Spécifications. ISO : Genève, Suisse, 2012.
16. ISO 14931 :2015-06 Guide pour la sélection des cuirs pour vêtements (à l'exclusion des fourrures). ISO : Genève, Suisse, 2015.
17. ISO 3376 :2020 Cuir — Essais physiques et mécaniques — Détermination de la résistance à la traction et du pourcentage d'allongement. ISO : Genève, Suisse, 2020.
18. ISO 3377-1 :2011 Cuir — Essais physiques et mécaniques — Détermination de la force de déchirement — Partie 1 : Déchirement d'un seul bord. ISO : Genève, Suisse, 2011.
19. ISO 17186 :2011 Cuir — Essais physiques et mécaniques — Détermination de l'épaisseur du revêtement de surface. ISO : Genève, Suisse, 2011.
20. ISO 32100 :2018 Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique — Essais physiques et mécaniques — Détermination de la résistance à la flexion à l'aide d'un flexomètre. ISO : Genève, Suisse, 2018.
21. ISO 17229 :2016 Cuir — Essais physiques et mécaniques — Détermination de l'absorption de vapeur d'eau. ISO : Genève, Suisse, 2016.
22. ISO 14268 :2012 Cuir — Essais physiques et mécaniques — Détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau. ISO : Genève, Suisse, 2012.
23. VDA 278 Test d'émission des COV et FOG par thermodésorption. VDA : Berlin, Allemagne, 2011.
24. Jones, M.; Bhat, T.; Kandare, E.; Thomas, A.; Joseph, P.; Dekiwadia, C.; Yuen, R.; John, S.; Ma, J.; Wang, C.-H. Thermal degradation and fire properties of fungal mycelium and mycelium—Biomass composite materials. *Sci Rep* **2018**, *8*, 17583, doi :10.1038/s41598-018-36032-9.

25. Jones, M.; Gandia, A.; John, S.; Bismarck, A. Leather-like material biofabrication using fungi. *Nat Sustain* **2021**, *4*, 9–16, doi :10.1038/s41893-020-00606-1.
26. Bustillos, J.; Loganathan, A.; Agrawal, R.; Gonzalez, B.A.; Perez, M.G.; Ramaswamy, S.; Boesl, B.; Agarwal, A. Uncovering the mechanical, thermal, and chemical characteristics of biodegradable mushroom leather with intrinsic antifungal and antibacterial properties. *Acs Appl. Bio Mater.* **2020**, *3*, 3145–3156, doi :10.1021/acsabm.0c00164.
27. Islam, M.R.; Tudryn, G.; Bucinell, R.; Schadler, L.; Picu, R.C. Morphology and mechanics of fungal mycelium. *Sci Rep* **2017**, *7*, 13070, doi :10.1038/s41598-017-13295-2.
28. Meyer, M. Processing of collagen based biomaterials and the resulting materials properties. *Biomed. Eng. Online* **2019**, *18*, 1–74, doi :10.1186/s12938-019-0647-0.
29. Wegst, U.G.K.; Ashby, M.F. The mechanical efficiency of natural materials. *Philos. Mag.* **2004**, *84*, 2167–2186.
30. Sureshkumar, P.S.; Thanikaivelan, P.; Phebe, K.; Krishnaraj, K.; Jagadeeswaran, R.; Chandrasekaran, B. Investigations on structural, mechanical, and thermal properties of pineapple leaf fiber-based fabrics and cow softy leathers : An approach toward making amalgamated leather products. *J. Nat. Fibers* **2012**, *9*, 37–50, doi :10.1080/15440478.2012.652834.
31. Jose, S.; Salim, R.; Ammayappan, L. An overview on production, properties, and value addition of pineapple leaf fibers (PALF). *J. Nat. Fibers* **2016**, *13*, 362–373, doi :10.1080/15440478.2015.1029194.
32. Kannojiya, R.; Gaurav, K.; Ranjan, R.; Tiyyer, N.; Pandey, K. Extraction of pineapple fibres for making commercial products. *J. Environ. Res. Dev.* **2013**, *7*, 1385.
33. Gil, L. Cork composites : A review. *Materials* **2009**, *2*, 776–789, doi :10.3390/ma2030776.
34. Silva, S.P.; Sabino, M.A.; Fernandes, E.M.; Correlo, V.M.; Boesel, L.F.; Reis, R.L. Cork : Properties, Capabilities and Applications. *Int. Mater. Rev.* **2005**, *50*, 345–365, doi :10.1179/174328005x41168.
35. Gil, L. Cork : Sustainability and new applications. *Front. Mater.* **2015**, *1*, 38, doi :10.3389/fmats.2014.00038.
36. Lomax, G.R. The Design of Waterproof, Water Vapour-Permeable Fabrics. *J. Coat. Fabr.* **1985**, *15*, 40–66, doi :10.1177/152808378501500105.
37. Satsumoto, Y.; Piao, S. Effects of shoe fit and moisture permeability of a leather shoe on shoe microclimate and air exchange. *J Ergon.* **2016**, *6*, 1–7, doi :10.4172/2165-7556.1000171.
38. Gulbiniene, A.; Jankauskaite, V.; Kondratas, A. Investigation of the water vapour transfer properties of textile laminates for footwear linings. *Fibres Text. East. Eur.* **2011**, *19*, 86.