

Absorption et adsorption des matériaux d'emballage

Quelles interactions contenu / contenant ?

Revue sur les phénomènes d'absorption et adsorption des matériaux d'emballage : interactions contenu/contenant, focus sur les matériaux d'origine synthétique, minérale, végétale ou animale.



Introduction

Ces dernières années, l'industrie cosmétique accorde une importance toute particulière au packaging, les formulations des emballages primaires sont beaucoup plus recherchées, plus complexes et en constante évolution comme avec l'apparition d'emballages biosourcés et/ou recyclés.

En 2021, l'industrie de l'emballage était le plus grand marché mondial de plastiques, représentant 44 % de l'utilisation des plastiques^[1], mais des alternatives existent telles que les emballages recyclés ou biosourcés issus de fibres végétales et/ou minérales.

Quelle que soit sa nature, l'emballage primaire peut directement affecter la stabilité du produit fini en raison des nombreuses réactions qui pourraient avoir lieu entre l'emballage et le produit (corrosion, migration chimique de composant de l'emballage vers le produit, adsorption des composants du produit dans le récipient) et entre

+ LES EXPERTS

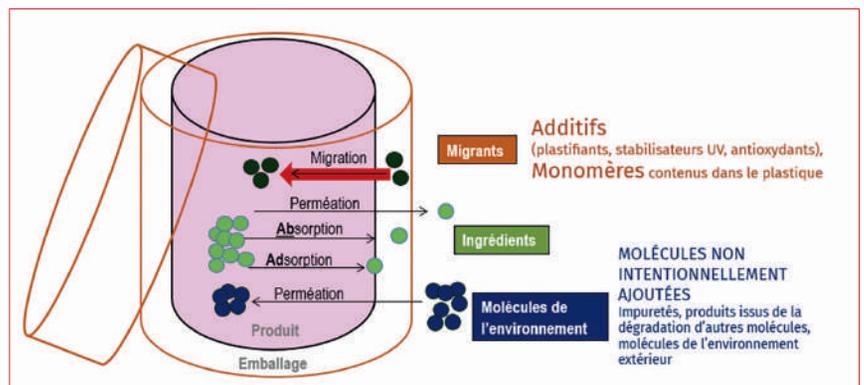


l'emballage et l'environnement avec la capacité de l'emballage à protéger ou non le contenu de l'eau et/ou des impacts de l'oxygène^[2].

Le schéma ci-dessus (cf. Figure 1) modélise les migrations chimiques concernant des molécules de différentes origines. Celles qui ont tendance à migrer le plus sont les additifs, ils sont ajoutés dans la composition de l'emballage pour améliorer ses propriétés physiques. Ce sont par exemple des plastifiants, comme les phtalates, des stabilisateurs UV ou encore des antioxydants.

Il est également possible que des molécules constitutives de l'emballage migrent dans le produit après une dégradation due aux conditions environnementales^[3,93,94]. Les molécules constituant le produit peuvent également migrer dans l'emballage voire dans l'environnement comme représenté en vert.

Enfin, des molécules non intentionnellement ajoutées, représentées en bleu, peuvent subir le phénomène de migration chimique. Ce sont par exemple des impuretés, des produits



▲ Figure 1: Représentation schématique des interactions contenu-contenant entre un produit, l'emballage et l'environnement [93,94].

issus de la dégradation d'autres molécules ou bien des molécules de l'environnement extérieur.

L'importance des études d'interaction contenu-contenant avant la mise sur le marché des produits a ainsi augmenté

au cours des dernières années en raison de l'évolution des normes réglementaires et de la prise de conscience accrue des fabricants et des consommateurs. Ces interactions sont présentes dans de nombreuses industries

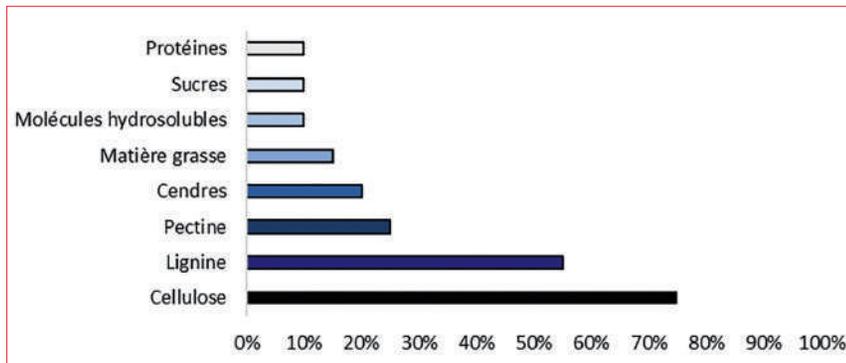
telles que l'alimentaire, la pharmacie, la chimie ou les cosmétiques^[4].

Une attention toute particulière est alors donnée à l'emballage choisi. Les matériaux, qu'ils soient biosourcés, recyclés ou non, pouvant ►►►

Figure 2: Tableau récapitulatif des familles de fibres étudiées et les différents matériaux par famille.

Catégorie	Naturelle			Chimique		
Famille	Végétale	Animale	Minérale	Artificielle	Minérale synthétique	Polymère
Différents types de matériaux	Abaca	Alpaga	Amiante	Acétate de cellulose	Acier	Acrylique
	Alfa	Angora	Argent		Alumine	Aramide (kevlar)
	Aloe vera	Araignée	Bore	Alginate (Seacell)	Carbone	Elasthanne
		Byssus	Or		Céramique	
	Baobab	Cachemire	Quartz	Ardil	Roche (laine de verre)	Microfibre
	Chanvre	Chameau	Sépiolite	Arlan		Polyamide (nylon)
	Coco	Crin	Silicate	Bambou	Verre	
	Coton	Cuir		Cannelle		Polyester
	Genet	Guanaco		Caoutchouc		Polyoléfine
	Jonc	Laine		Chitosan		Polypropylène
	Jute	Lama		Coslan		Vectran
	Kapok	Soie		Cupro		Vinalon
	Kenaf	Vigogne		Fibrolane		Zylon
	Latex	Yack		Ingeo		
	Lin			Lait (QMILK)		
	Lotus			Lanital		
	Paille			Lenpur		
	Pina			Lyocell		
	Ramie			Mérinova		
	Raphia			Modal		
	Sisal			Orange		
				Polynosique		
				Rose		
				Silcool		
			Soja			
			Triacétate de cellulose			
			Vicara			
			Viscose			

COSMÉTOLOGIE



▲ Figure 3 : Graphique exposant la composition des fibres végétales, en pourcentage [9-33].

▶▶▶ provenir du monde entier, les formulations et procédés de fabrication ne sont alors pas tous les mêmes. Selon la nature et la composition de chaque matériau, des molécules constitutives du produit ou de l'environnement peuvent migrer vers l'emballage et se retrouver absorbées par celui-ci. D'un point de vue environnemental, le développement d'emballages bioplastiques devrait permettre de réduire l'utilisation de combustibles fossiles, les déchets plastiques et ainsi les émissions de dioxyde de carbone^[5]. En 2020, le plastique d'origine végétale représentait moins de 1 % des plus de 359 millions de tonnes de plastique produites chaque année, l'avenir serait tout de même favorable aux plastiques d'origine végétale, notamment pour

les emballages alimentaires^[6]. Parmi les avancées, les emballages fabriqués à partir de fibres de bois et de papiers recyclés par exemple sont relativement très recherchés. De manière générale, les fibres sont des substances filamenteuses pouvant être tissées et assemblées en faisceaux. Elles peuvent avoir diverses origines et propriétés en fonction de leur utilisation en cosmétique, en alimentaire ou en textile. Ces produits sont intrinsèquement biodégradables et ont la capacité de présenter une résistance élevée à la traction, des performances physiques intéressantes pour les emballages alimentaires et une faible teneur en métaux lourds^[7]. Il est ainsi intéressant de se questionner sur le devenir des fibres lorsqu'elles

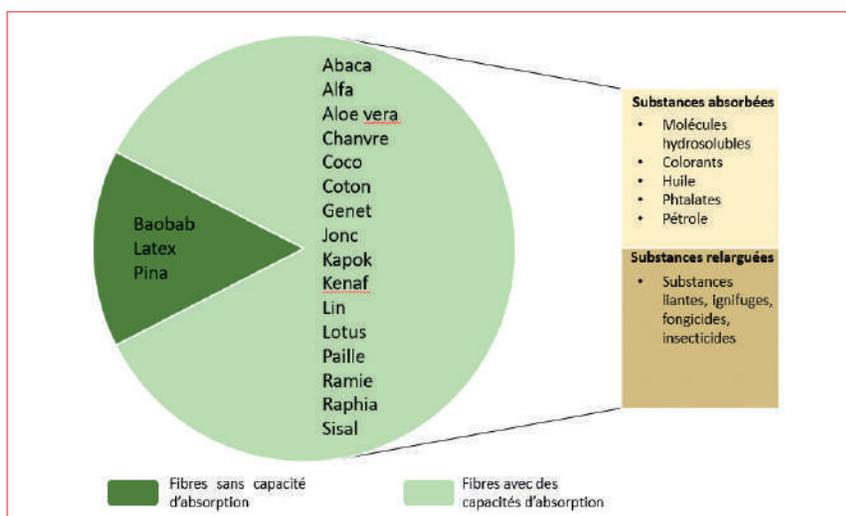
sont utilisées en tant qu'emballage, que cela soit dans le domaine cosmétique ou alimentaire, et sur les capacités d'absorption de ces dernières en fonction des matériaux et de la composition de ces fibres.

Données de la littérature

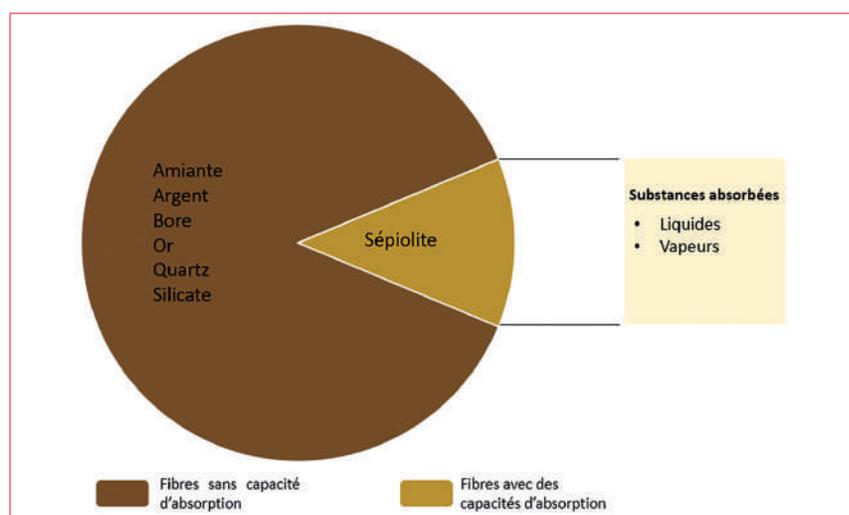
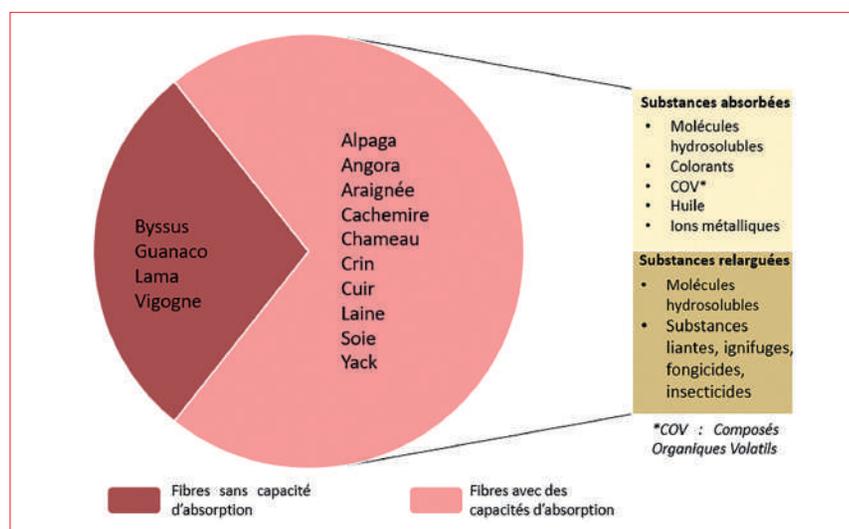
L'analyse bibliographique révèle l'existence de 6 principales familles de fibres, catégorisées en fonction de leur nature propre. Cette étude se concentre ainsi sur les fibres naturelles, englobant les fibres végétales, animales et minérales, mais également sur les fibres appartenant à la catégorie chimique, telles que les fibres artificielles, minérales synthétiques, et enfin les fibres polymères.

Analyse des matériaux

Chaque famille de fibres comporte des matériaux spécifiques, récapitulés dans le tableau ci-dessous. Par souci de redondance d'informations et d'explications, uniquement les plus grandes familles de chacune des catégories seront détaillées. La plus grande famille de fibres naturelles est celle des fibres végétales, en passant par des fibres bien connues telles que le coton, le lin ou encore la paille, en allant vers des fibres plus rares comme la fibre de Kenaf, la fibre de Ramie ou le sisal. Malgré leur aspect moins connu, ces fibres présentent des caractéristiques intéressantes, avec chacune des propriétés différentes. Par exemple, la fibre de Ramie mérite d'être connue comme l'ortie est une plante vivace, aucun produit chimique n'est employé lors de sa poussée. Elle était auparavant utilisée pour créer des cordes dues à sa résistance, mais également sa souplesse. Avec des propriétés bien différentes, les fibres de Kénaf sont ajoutées dans des matières plastiques afin d'améliorer leur résistance à la déformation thermique ainsi que la rigidité du produit^[8]. Ces dernières sont utilisées dans un grand nombre de domaines d'application, comme l'industrie automobile, l'industrie du



▲ Figure 4 : Graphique exposant la capacité d'absorption des fibres végétales avec les molécules pouvant être absorbées et relarguées [9-36].



▲ Figure 5 : Graphiques exposant la capacité d'absorption des fibres animales (A) et des fibres minérales (B) avec les molécules pouvant être absorbées et relarguées [37-51].

papier ou encore dans des films de paillage biodégradables pour le jardin. Les fibres de Kénaf sont voisines de celles du jute, et ont un atout concurrentiel par rapport aux fibres synthétiques qui est leur biodégradabilité. Le graphique ci-dessus (cf. Figure 3) expose la composition des fibres végétales en pourcentage. Il s'avère que 75 % des fibres végétales recensées contiennent de la cellulose, tandis qu'uniquement 10 % contiennent du sucre ou des protéines. La cellulose fait partie de la famille des glucides, molécule très présente dans les arbres et plantes, ce qui lui apporte un caractère

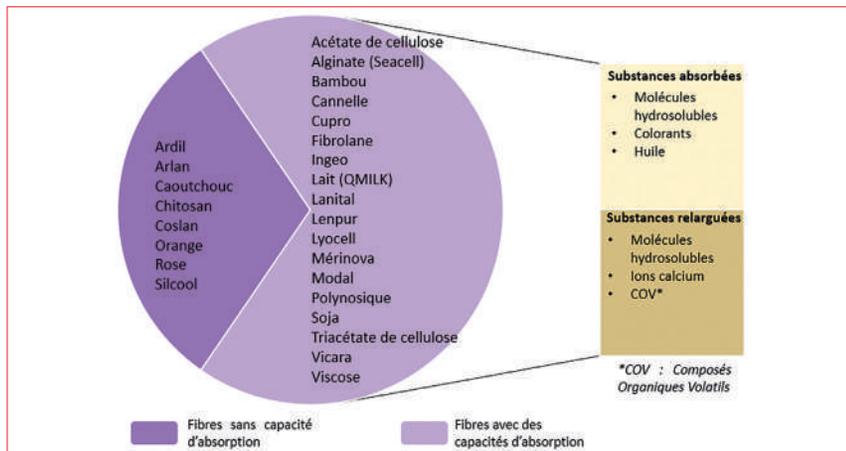
hydrophile. Cette propriété confère une grande capacité d'absorption, expliquant la forte absorption d'eau ou de molécules hydrosolubles des fibres végétales. La catégorie des fibres chimiques englobe les fibres artificielles, minérales synthétiques et polymères. La famille la plus imposante des fibres chimiques est celle des fibres artificielles. Ces dernières sont issues d'une modification chimique d'éléments naturels et se divisent en plusieurs groupes, dont deux majoritaires : les cellulosiques et les protéiniques. Les fibres cellulosiques sont caractérisées par leur forte concentration en

cellulose ce qui leur apporte des caractéristiques intéressantes en termes d'isolation, d'absorption ou encore de résistance. Les fibres protéiniques sont quant à elles composées majoritairement de protéines animales. Les propriétés ainsi exploitées sont l'hydrophilie, le potentiel antibactérien ainsi que le renouvellement cellulaire. En général, les fibres artificielles sont majoritairement utilisées dans l'industrie du textile pour l'habillement ou la fabrication de tissus très légers. Malgré leurs propriétés intéressantes, ces dernières sont moins favorisées que les fibres végétales, car elles engagent l'utilisation de beaucoup de produits chimiques néfastes pour l'Homme ainsi que pour l'environnement lors de leur fabrication.

Le choix des matériaux est une étape majeure étant donné que chacune des fibres apporte des caractéristiques particulières, qui peuvent être intéressantes en fonction du domaine d'utilisation. Néanmoins, elles peuvent présenter des capacités d'absorption qui impacteraient potentiellement l'efficacité de l'emballage.

Analyse du phénomène d'absorption et de relargage

Parmi l'importante famille des fibres végétales, sur 20 types de fibres étudiées, 17 présentent des capacités d'absorption. Selon la littérature, les fibres de baobab, de latex et de pina ne présentent pas de capacité d'absorption. Pour celles qui présentent des capacités d'absorption, l'eau est la principale molécule pouvant être absorbée. On peut également citer l'huile et le pétrole qui peuvent être absorbés respectivement par le raphia et le kapok ou encore le coton qui, lui, présente des capacités d'absorption et d'adsorption pour les colorants et les phtalates. La paille présente également des capacités d'absorption et d'adsorption pour les molécules hydrosolubles^[31]. Selon la littérature, toutes les fibres végétales étudiées peuvent être capables de relarguer des substances telles que ▶▶▶



▲ Figure 6 : Graphique exposant la capacité d'absorption des fibres artificielles avec les molécules pouvant être absorbées et relarguées [34][42][52-68].

▶▶▶ des substances liantes, ignifuges, fongicides ou insecticides, dans leur environnement. Pour le coton, des informations supplémentaires indiquent que ce type de fibre peut également relarguer de l'eau.

Pour les fibres animales, plus de la moitié sont capables d'absorber des substances (cf. Figure 5), majoritairement de l'eau. Pour la laine, des études mettent en avant sa capacité à absorber et à adsorber des COV (composés organiques volatils) comme le formaldéhyde, mais également des nanoparticules ou encore des composants hydrophobes comme l'huile^[40-42]. Pour la soie, il a été mis en évidence l'absorption possible d'ions métalliques. En termes de relargage, ces fibres présentent des données qui attestent d'une migration possible depuis les fibres vers leur environnement, surtout pour l'eau. En comparaison avec les fibres végétales, il a été démontré que les fibres d'alpaga, de cachemire, de laine et de soie peuvent également relarguer des substances liantes, ignifuges, fongicides ou insecticides.

La littérature apporte peu d'informations sur les capacités d'absorption des fibres minérales. Seules les fibres de sépiolites (cf. Figure 5) possèdent une importante capacité d'absorption des substances liquides ou gazeuses (vapeurs et odeurs)^[49].

Concernant le relargage des fibres minérales, pour l'amiant et l'argent, il semblerait qu'elles soient capables de relarguer respectivement des particules de poussière et des particules d'argent dans leur environnement. Cependant, peu de données sont représentatives de ces phénomènes de relargage concernant ces fibres. Un manque de données et d'études sur le sujet concerne également les autres fibres minérales.

Dans la catégorie dite chimique des fibres, les fibres artificielles se distinguent par leur diversité. Sur 26 fibres artificielles étudiées, 19 types présentent des données intéressantes sur leur capacité d'absorption (cf. Figure 6). L'eau est la principale substance absorbée pour ces fibres ainsi que les molécules hydrosolubles. Selon la littérature, seule la fibre de bambou n'absorbe pas de molécules hydrosolubles, mais plutôt des COV. Pour l'acétate de cellulose, de potentiels agents contaminants peuvent être absorbés par ces fibres et pour l'alginate, il s'agit d'absorption d'exsudat de plaie qui a été mise en évidence. Des colorants acides et de l'huile peuvent également être absorbés respectivement par la fibrolane et la viscose. Les fibres composées de viscose peuvent également réaliser un processus d'adsorption pour l'eau et l'huile^[42].

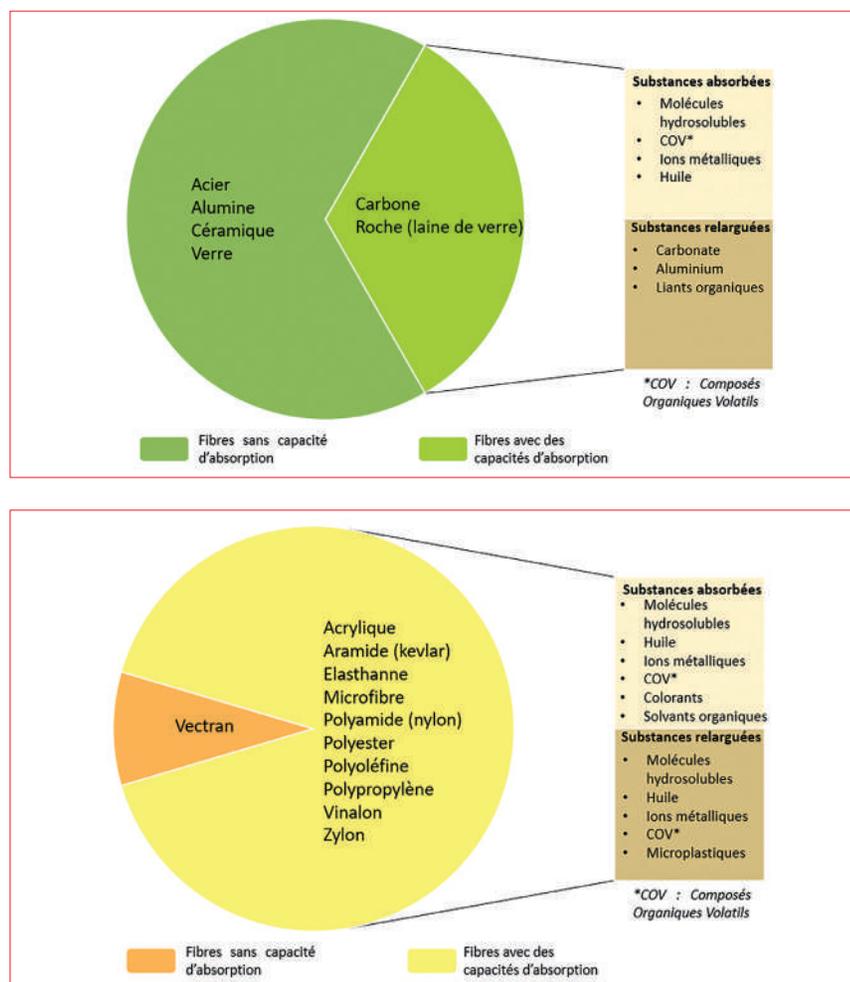
De l'eau et des ions calciums ont été mis en évidence comme substances relarguées par l'acétate de cellulose et l'alginate. Concernant les fibres de bambou, elles possèdent également la capacité de relarguer les substances telles que les COVs, avec le formaldéhyde et la mélamine.

Cependant, la littérature apporte peu d'informations sur le phénomène de relargage pour les autres types de fibres artificielles.

La littérature atteste que les fibres minérales synthétiques que sont les fibres de roche et de carbone (cf. Figure 7A), sont capables d'absorption, majoritairement de l'eau ou encore des COV, des ions de métaux lourds et de l'huile par les fibres de carbone. Les fibres de carbone peuvent également réaliser un processus d'adsorption pour ces mêmes substances^[71-74]. L'acier, l'alumine ou encore la roche peuvent respectivement relarguer des matériaux dans leur environnement tels que du carbonate, de l'aluminium ou encore des liants organiques (résine phénolique).

Enfin pour les fibres polymères, 10 types de fibres sur les 11 étudiées présentent des capacités d'absorption, majoritairement pour les molécules hydrosolubles, selon la littérature (cf. Figure 7B). Certaines, comme l'acrylique, le polyamide (nylon), le polyester et le polypropylène peuvent également absorber l'huile. Les fibres d'acryliques peuvent également absorber des ions métalliques. Le polyester et le polyamide (nylon) présentent des capacités d'absorption respectivement pour les colorants ou encore pour des solvants organiques. Il a également été démontré que les fibres d'élasthanne sont en mesure d'absorber des COV, mais également d'en relarguer^[81].

Concernant le relargage de substances à partir de ces fibres, il a été mis en évidence que le polyamide (nylon) et le polyester sont capables de relarguer certaines substances telles que l'eau, mais également de l'huile ou encore des traces d'antimoine pour le



▲ Figure 7 : Graphiques exposant la capacité d'absorption des fibres minérales synthétiques(A) et des fibres polymères (B) avec les molécules pouvant être absorbées et relarguées [69-90].

polyester. Les polymères dits microfibrés pourraient également relarguer de faibles taux de microparticules. Quant aux fibres de polypropylène, il a été démontré qu'elles ont la capacité de relarguer des microplastiques dans leur environnement^[90].

Les capacités d'absorption des fibres sont relativement variables en fonction de leur composition. Le type de substances pouvant être absorbées par ces dernières peut être similaire dans une même famille de fibres voire complètement différents.

Les conséquences de cette capacité d'absorption

Le transfert de certaines substances préoccupantes du produit vers le

matériau d'emballage, avec un focus sur les différentes fibres, nommé également phénomène d'absorption par l'emballage, peut affecter la sécurité et la santé des consommateurs.

Une dénaturation du produit peut être en effet une des conséquences observées dues à l'absorption de molécules et de substances dans l'emballage. Le produit peut alors perdre en efficacité. Si l'emballage est composé de fibres pouvant absorber l'eau, comme de nombreuses fibres naturelles, la texture du produit s'en verrait affectée, moins fluide. Les actifs présents dans un produit cosmétique peuvent également s'avérer plus concentrés si de fortes concentrations d'eau sont absorbées par les fibres de l'emballage.

Pour un emballage composé intégralement ou partiellement de fibres, les capacités d'absorption de ces dernières peuvent jouer un rôle sur la robustesse de l'emballage. Il peut perdre en efficacité, être déstabilisé par l'ajout et l'absorption de composés non initialement présents dans sa formulation. Cela pourrait également engendrer la présence de microfissures et donc de microfuites pouvant modifier la perméabilité à l'oxygène et à l'humidité, et ainsi provoquer la dégradation des composés actifs^[3].

Concernant la capacité de relargage de ces fibres, les molécules migrantes issues des plastiques conventionnels sont relativement bien connues, mais celles des nouveaux matériaux d'emballage, tels que les plastiques recyclés ou biosourcés, doivent être identifiées. De nouvelles substances chimiques peuvent être formées et ajoutées à la composition du produit ou impacter les caractéristiques de l'emballage^[3]. La stabilité du produit dans son emballage de vente peut ainsi être compromise.

La recyclabilité et le devenir de ces substances absorbées

L'essor des emballages biosourcés et/ou recyclés apporte son lot de questionnement sur la sécurité de ces emballages recyclés.

Pour les fibres, il a été démontré que certaines pouvaient absorber des substances allant de la plus simple à la plus complexe, voire potentiellement nocive pour la santé des consommateurs comme des COV ou encore des métaux lourds. Si ces molécules sont absorbées, peuvent-elles être retrouvées plus tard dans d'autres produits lors des processus de recyclage ou tout simplement par relargage au cours du temps dans l'environnement ?

L'utilisation par exemple des bouteilles recyclées en PET (Polytéréphthalate d'éthylène) est réglementée. La Fédération des denrées alimentaires limite l'utilisation du PET recyclé aux applications non alimentaires du fait de la présence de petites quantités ▶▶▶

▶▶▶ de contaminants qui pourraient réduire la valeur des matières premières de recyclage^[91].

Une étude sur la pureté des matériaux à base de fibres recyclées et sur des produits contenant des fibres recyclées a été réalisée en évaluant leurs impuretés chimiques, leur toxicité et leur qualité microbiologique. Les mesures de toxicité et de mutagénicité des fibres vierges et des matériaux en fibres recyclées ont permis l'identification de différentes substances à concentration faible, bien que la variété des substances présentes soit très large. La caractérisation chimique préliminaire a également révélé que certains échantillons contenaient des composés ayant une activité mutagène ou toxique. De plus, il a été avancé que certaines catégories de fibres recyclées contenaient de grandes quantités de divers microbes, la charge microbienne étant principalement constituée de bactéries aérobies formant des spores^[92].

Lors du processus de recyclage, la mise en évidence de polluants ou d'impuretés ou même une augmentation de la concentration en impuretés pourrait ainsi s'avérer possible lorsque l'emballage se constitue de fibres.

Lorsque les fibres absorbent différents types de substances, un phénomène de relargage peut également être observé. En effet, certaines molécules constituant le produit peuvent migrer dans l'emballage certes, mais sur le long terme dans l'environnement. Des études d'écotoxicité sembleraient ainsi très intéressantes afin de constater si de potentiels impacts sur l'environnement sont mesurables et visibles après absorption et relargage de substances lorsque l'emballage est constitué de fibres.

Conclusion

Les matériaux constitutifs des emballages, qu'ils soient biosourcés, recyclés ou non, présentent une importante variabilité de composition. Les molécules constitutives du produit ou de l'environnement peuvent migrer vers l'emballage et se retrouver ainsi « absorbées » par celui-ci.

L'utilisation de fibres dans la conception des emballages de demain est en plein essor. Pour la grande majorité d'entre elles, leur capacité d'absorption est démontrée pour une importante diversité de molécules. Cependant, cette absorption est à prendre en compte

dans le choix de son emballage primaire, car cela impacte directement la stabilité du produit. L'efficacité de l'emballage peut également être affectée.

Une méthode analytique a été mise au point au sein du laboratoire Expertox afin de détecter et quantifier les substances toxiques potentielles qui pourraient migrer du produit vers l'emballage et inversement, tels que des bisphénols, phtalates et autres migrants à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. À cette analyse est également ajoutée une méthode de screening permettant d'identifier de nouvelles molécules migrantes, que cela soit sur matières premières, emballages ou produits finis.

Enfin, les phénomènes d'absorption étudiés font place également aux phénomènes de relargage qui peuvent être possibles par l'emballage^[3, 93, 94]. Le relargage de différentes substances a pu être démontré pour diverses familles de fibres et doit ainsi être pris en compte lors de la recyclabilité de ces dernières, et pour les évaluations d'écotoxicité, en fonction des propriétés physico-chimiques des substances et de leurs affinités. ●

Références bibliographiques

1. PLASTICS EUROPE, octobre 2022. Plastics – the Facts. 2022. Disponible sur : Plastics - the Facts 2022 • Plastics Europe. Consulté le 24/11/2023.
2. Piotrowski, N. Approche d'apprentissage automatique des tests de compatibilité des emballages dans le processus de développement de nouveaux produits. *J Intell Manuf* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02090-8>.
3. AGRON M, MABILOTTE R, GUILLAUME M, GUILLEMIN L, PIRNAY S. EXPERTO. Content-container interactions for recycled/bio-sourced packaging. *Annal. Fals. Exp. Chim. Tech.* N°997. 2023.
4. Conseil National de l'Emballage. Compatibilité Contenant-Contenu. 2017. <https://conseil-emballage.org/wp-content/uploads/2017/05/Compatibilit%C3%A9-contenant-contenu-Final.pdf>. Consulté le 03/11/2023.
5. Marichelvam MK, Jawaid M, Asim M. Corn and Rice Starch-Based Bio-Plastics as Alternative Packaging Materials. *Fibers*. 2019; 7(4):32. <https://doi.org/10.3390/fib7040032>
6. Périé Paul, Evon Philippe. Emballages alimentaires : vers un impact environnemental neutre ? (2020).
7. LIU, Chao, LUAN, Pengcheng, LI, Qiang, et al. Biodegradable, hygienic, and compostable tableware from hybrid sugarcane and bamboo fibers as plastic alternative. *Matter*, 2020, vol. 3, no 6, p. 2066–2079.
8. Wilhem G. Clasen, Mechta-Kenaf, 100 WGC, <https://www.wgc.de/fr/produkte/meshta-kenaf>. Consulté le 04/12/2023.
9. Punyamurthy, Ramadevi & Dhanalakshmi, Dr & Chikkol Venkateshappa, Srinivasa & Bennehalli, Basavaraju. (2012). Effect of alkali treatment on water absorption of single cellulosic abaca fiber. *BioResources*. 7. 3515–3524.
10. Dhanalakshmi, Dr & Punyamurthy, Ramadevi & Bennehalli, Basavaraju & Chikkol Venkateshappa, Srinivasa. (2012). Effect of Esterification on Moisture Absorption of Single Areca Fiber. *International Journal of Agriculture Sciences*. 4. 227–229.
11. L'aloë Vera et ses atouts pour l'habillement. Caroline. 07/05/2019. <https://www.greenybirdress.com/laloe-vera-%F0%9F%8C%BF-presente-beaucoup-datouts-pour-lTextile/>. Consulté le 04/11/2023.
12. João P. Manaia; Ana Manaia; (2021). Interface Modification, Water Absorption Behaviour and Mechanical Properties of Injection Moulded Short Hemp Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites. *Polymers*.doi:10.3390/polym13101638.
13. ABOT, Audrey. *Caractérisation des fibres longues de chanvre (Cannabis sativa) en vue de leurs utilisations dans des matériaux composites*. 2010. Thèse de doctorat. Poitiers.
14. Sudhir Kumar Saw, Khurshid Akhtar, Narendra Yadav & Ashwini Kumar Singh (2014) Hybrid Composites Made from Jute/Coir Fibers: Water Absorption, Thickness Swelling, Density, Morphology, and Mechanical Properties, *Journal of Natural Fibers*, 11(1), 39–53, DOI: 10.1080/15440478.2013.825067.
15. Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites - a review. *Journal of Composite Materials*, 46(8), 973–986. doi:10.1177/0021998311413623.
16. Saw, Sudhir Kumar; Akhtar, Khurshid; Yadav, Narendra; Singh, Ashwini Kumar (2014). Hybrid Composites Made from Jute/Coir Fibers: Water Absorption, Thickness Swelling, Density, Morphology, and Mechanical Properties. *Journal of Natural Fibers*, 11(1), 39–53. doi:10.1080/15440478.2013.825067.
17. Elena Irina Moater, Cristiana Rădulescu, Ionica Ioniță, Ana-Maria Hossu. Adsorption compétitive de surfactants et de bleu de méthylène à l'interface coton/eau. *Scientific study & research*, Vol. VII (4), 2006, ISSN 1582–540X.
18. Zhang, Xiwen; Kwek, Li Ping; Le, Duyen K.; Tan, Men Shu; Duong, Hai Minh (2019). Fabrication and Properties of Hybrid Coffee-Cellulose Aerogels from Spent Coffee Grounds. *Polymers*, 11(12), 1942–. doi:10.3390/polym11121942.
19. Tansaoui H, Bouazizi N, Behary N, Campagne C, El-Achari A, Vieillard J. Assessing Alternative Pre-Treatment Methods to Promote Essential Oil Fixation into Cotton and Polyethylene Terephthalate Fiber: A Comparative Study. *Polymers (Basel)*. 2023;15(6):1362. Published 2023 Mar 9. doi:10.3390/polym15061362.
20. Composition chimique de fibres de soie, de fibres de coton et de fibres de laine. PandaSilk. <https://www.pandasilk.com/fr/chemical-composition-of-silk-fiber-cotton-fiber-wool-fiber/>. 2016. Consulté le 27/06/2023.
21. Li, Hai-Ling; Ma, Wan-Li; Liu, Li-Yan; Zhang, Zhi; Sverko, Ed; Zhang, Zi-Feng; Song, Wei-Wei; Sun, Yu; Li, Yi-Fan (2019). Phthalates in infant cotton clothing: Occurrence and implications for human exposure. *Science of The Total Environment*, 683(0), 109–115. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.05.132.
22. BOUHANK Salim. Thèse : Elaboration de matériaux composites PVC/fibres de Genêt d'Espagne : Formulations et caractérisations. 2017.
23. Zoom sur les avantages et les inconvénients du jonc de mer. <https://www.musee-robert-tatin.fr/jonc-mer-avantages-inconvenients/>. Consulté le 04/11/2023.
24. Saw, Sudhir Kumar; Akhtar, Khurshid; Yadav, Narendra; Singh, Ashwini Kumar (2014). Hybrid Composites Made from Jute/Coir Fibers: Water Absorption, Thickness Swelling, Density, Morphology, and Mechanical Properties. *Journal of Natural Fibers*, 11(1), 39–53. doi:10.1080/15440478.2013.825067.
25. Zhang Zhao T, Chen Y, Hu X, Xu Y, Xu G, Wang F, Wang J, Shen H. A sustainable nanocellulose-based superabsorbent from kapok fiber with advanced oil absorption and recyclability. *Carbohydr Polym*. 2022 Feb 15;278:118948. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.118948. Epub 2021 Dec 1. PMID: 34973765.113

Références bibliographiques

26. Les fibres végétales. <http://laboitadoc.majeloc.ch/Page2/Docs/fibres%20vegetales.pdf>. Consulté le 28/11/2023.
27. Présentation de la fibre de lin. USRTL. <https://www.usrtl-ift.fr/Presentation-de-la-fibre-de-lin>. Consulté le 27/06/2023.
28. Zied Marzougui. Élaboration de Latex magnétique fonctionnalisée pour le traitement des eaux usées par adsorption. Polymères. Université de Lyon; Université de Sfax. Faculté des sciences, 2016. Français. ffNNT : 2016LYSE1311.
29. Apolinario Testoni, Guilherme; Kim, Sihwan; Pisupati, Anurag; Hae Park, Chung (2018). Modeling of the capillary wicking of flax fibers by considering the effects of fiber swelling and liquid absorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, (), S0021979718304491-. doi:10.1016/j.jcis.2018.04.064.
30. Le fil de lotus : le tissu du futur ? L'AFFAIRE EST DANS L'SAC. <https://www.laffaireestdanslac.com/sac-et-histoire/matieres-et-materiaux/le-fil-de-lotus-le-tissu-du-futur/>. Consulté le 28/11/2023.
31. Pourquoi et comment construire une maison avec une isolation en paille. SOLUTIONERA. <https://solutionera.com/articles/habitat-ecologique/materiaux-naturels/construire-maison-isolation-paille/>. 2020. Consulté le 23/11/2023
32. La ramie : une « soie végétale » vraiment écolo ? ExoticFibers. <https://exoticfibers.wixsite.com/accueil/post/la-ramie-une-soie-v%C3%A9g%C3%A9tale-vraiment-%C3%A9colo>. 2019. Consulté le 29/06/2023.
33. Thiagamani, Senthil Muthu Kumar; Krishnasamy, Senthilkumar; Muthukumar, Chandrasekar; Tengsuthiwat, Jiratti; Nagarajan, Rajini; Siengchin, Suchart; Ismail, Sikiru O. (2019). Investigation into mechanical, absorption and swelling behaviour of hemp/sisal fibre reinforced bioepoxy hybrid composites: Effects of stacking sequences. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140(), 637–646. doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.08.166.
34. Fuzek, John F. (1985). Absorption and desorption of water by some common fibers. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 24(1), 140–144. doi:10.1021/i300017a026.
35. PARISELLI Fabrizio. Caoutchouc. Centre de lutte contre le cancer LEON BERARD. <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/expositions-environnementales/caoutchouc/>. 2022. Consulté le 28/11/2023.
36. La prévention des risques professionnels des nouveaux matériaux de construction et d'isolation. Officiel Prévention. <https://www.officiel-prevention.com/dossier/formation/securite-btp/la-prevention-des-risques-professionnels-des-nouveaux-materiaux-de-construction-et-disolation>. 2015. Consulté le 21/06/2023.
37. K. Rajkumar et al 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2027 012006.
38. Liuxiang Zhan; Yuling Li; Feng Ji; Ni Wang; (2021). Analysis of states of water in cashmere fibers and utilizing water as molecular probe for pore size distribution. *Polymer Testing*, (), -. doi:10.1016/j.polymertesting.2021.107285.
39. David G King; Anthony P Pierlot (2009). Absorption of nanoparticles by wool. , 125(2), 111–116. doi:10.1111/j.1478–4408.2009.00182.x.
40. Cassie, A. B. D. (1945). Absorption of water by wool. *Transactions of the Faraday Society*, 41(), 458–. doi:10.1039/tf9454100458.
41. S. F. Curling; C. Loxton; G. A. Ormondroyd (2012). A rapid method for investigating the absorption of formaldehyde from air by wool. , 47(7), 3248–3251. doi:10.1007/s10853–011–6163–7.
42. Hyung-Min Choi; Jerry P. Moreau (1993). Oil sorption behavior of various sorbents studied by sorption capacity measurement and environmental scanning electron microscopy. , 25(5–6), 447–455. doi:10.1002/jemt.1070250516.
43. Kan, Chi-wai; Lam, Yin-ling (2015). The effect of plasma treatment on water absorption properties of silk fabrics. *Fibers and Polymers*, 16(8), 1705–1714. doi:10.1007/s12221–015–5034–2.
44. T. Arai; G. Freddi; G. M. Colonna; E. Scotti; A. Boschi; R. Murakami; M. Tsukada (2001). Absorption of metal cations by modified B. mori silk and preparation of fabrics with antimicrobial activity. 80(2), 297–303.
45. PILAT Julie. L'Angora : une fibre naturelle noble et chaleureuse, mais controversée. TOUTVERT. <https://www.toutvert.fr/angora-proprietes/>. 2020. Consulté le 28/11/2023.
46. PILAT Julie. Chameau : une laine naturelle aux propriétés intéressantes. TOUTVERT. <https://www.toutvert.fr/chameau-fibre/>. 2020. Consulté le 28/11/2023.
47. Òria Francès, Dana Sánchez, Elisa Barazarte. L'araignée et sa soie. <https://joelleconan.wixsite.com/tpe1s/blank-hg5cq>. Consulté le 28/11/2023.
48. Santiago J. Carralero Benítez. La laine de Yak : un fil à suivre. FIDA. ISBN 978–92–9072–990–7. 2020.
49. Naturelles minérales – SEPIOLITE. <https://www.textile-technique.com/guide-textile/matieres/naturelles-minerales/#wollastonite>. Consulté le 28/11/2023.
50. Public health goal for asbestos, September 2003 - California office of Environmental Health Hazard.
51. Enzo Lombi, Erica Donner, Kirk G. Scheckel, Ryo Sekine, Christiane Lorenz, Natalie Von Goetz, Bernd Nowack. Silver speciation and release in commercial antimicrobial textiles as influenced by washing. *Chemosphere*, Volume 111, 2014, Pages 352–358.
52. Wang, Qianqian; Zhang, Lin; Liu, Yanyan; Zhang, Gangqiang; Zhu, Ping (2019). Characterization and functional assessment

Références bibliographiques

- of alginate fibers prepared by metal-calcium ion complex coagulation bath. *Carbohydrate Polymers*, (), 115693-. doi:10.1016/j.carbpol.2019.115693.
- 53.** Yimin Qin (2008). The gel swelling properties of alginate fibers and their applications in wound management. , 19(1), 6–14. doi:10.1002/pat.960.
- 54.** ExoticFibers. Cannelle et Amande : un tricot bactériostatique est né! 2019. <https://exoticfibers.wixsite.com/accueil/post/cannelle-et-amandes-un-tricot-bact%3%A9riostatique-est-n%3%A9>. Consulté le 28/11/2023.
- 55.** CTTN-IREN. CHLOROFIBRE(S) - Fibre synthétique. 2017 https://www.cttn-iren.com/pdf/publication_138.pdf. Consulté le 28/11/2023.
- 56.** R. C. Cheetham (1953). The Dyeing of a Blend of Wool and Fibrolane for the Hand Knitting Trade. , 69(3), 76–83. doi:10.1111/j.1478-4408.1953.tb02816.x.
- 57.** Wormell, R. L. (1953). MILK CASEIN AND PEANUT PROTEIN FIBRES. *Journal of the Textile Institute Proceedings*, 44(7), P258–P271. doi:10.1080/19447015308687840.
- 58.** Peterson, R. F.; Caldwell, T. P.; Hipp, N. J.; Hellbach, R.; Jackson, R. W. (1945). Textile Fiber From Casein - Factors Affecting the Tensile Strength. *Industrial & Engineering Chemistry*, 37(5), 492–496. doi:10.1021/ie50425a029.
- 59.** Laurent Elsa. Les fibres textiles de bois : Lyocell, Modal, Tencel, Lenpur. *Textileaddict*. 2019. <https://textileaddict.me/les-fibres-textile-de-bois-lyocell-modal-tencel-lenpur/>. Consulté le 28/11/2023.
- 60.** Peterson, R. F.; Caldwell, T. P.; Hipp, N. J.; Hellbach, R.; Jackson, R. W. (1945). Textile Fiber From Casein - Factors Affecting the Tensile Strength. *Industrial & Engineering Chemistry*, 37(5), 492–496. doi:10.1021/ie50425a029.
- 61.** La Ferme du Mohair. Le modal, une fibre respirante et légère. https://www.ferme-mohair.com/blog/blog-1/le-modal-une-fibre-respirante-et-legere-28#blog_content. Consulté le 03/07/2023.
- 62.** Lee, M. (2005). Liquid Ammonia Treatment of Regenerated Cellulosic Fabrics. *Textile Research Journal*, 75(1), 13–18. doi:10.1177/004051750507500104.
- 63.** UR-TEXTILES. Combien De Types De Tissus En Fibres Recyclées Existe-T-Il ? 2022. <https://ur-textiles.com/fr/recycled-fiber-fabric-news20220104/>. Consulté le 28/11/2023.
- 64.** Quig, J. B.; Dennison, R. W. (1952). Functional Properties of Synthetics. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(9), 2176–2183. doi:10.1021/ie50513a054.
- 65.** Lawton, John W. (2002). Zein: A History of Processing and Use. *Cereal Chemistry*, 79(1), 1–18. doi:10.1094/cchem.2002.79.1.1.
- 66.** Wei, W.; Youbo, D.; Zhou, Z.; Xing, W.; Chunli, Q.; Libin, G. (2018). Preparation and characterization of protein/viscose fiber and its action in self-heating. *Journal of Applied Polymer Science*, (), 47146-. doi:10.1002/app.47146.
- 67.** Mélanie Dumont. Élaboration et caractérisation de fibres mixtes Alginate / Chitosane. *Matériaux*. Université de Lyon, 2016.
- 68.** Arrêté du 5 août 2020 relatif aux matériaux et objets en caoutchouc destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires et aux sucettes pour nourrissons et enfants en bas-âge ; Article 2 ; Article 3 ; Article 4. Mise à jour du 01 juillet 2021. Consulté le 03/07/2023.
- 69.** PHILLIPS, Duncan, SUJESAT, Jantip, TAYLOR, John A., et al. Thermal migration of selected disperse dyes on poly (ethylene terephthalate) and poly (lactic acid)(Ingeo®) fibres. *Coloration Technology*, 2004, vol. 120, no 5, p. 260–264.
- 70.** Vacula, Miroslav; Klvač, Martin; Mildner, Robert; Keprdová, Šárka (2014). Parameters of Cement Bonded Particle Boards Modified with Stone Wool Fibre. *Advanced Materials Research*, 923(), 195–201. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.923.195.
- 71.** Fallou, Hélène; Cimetière, Nicolas; Giraudet, Sylvain; Wolbert, Dominique; Le Cloirec, Pierre (2016). Adsorption of pharmaceuticals onto activated carbon fiber cloths – Modeling and extrapolation of adsorption isotherms at very low concentrations. *Journal of Environmental Management*, 166(), 544–555. doi:10.1016/j.jenvman.2015.10.056.
- 72.** Yao, Meng; Zhang, Qiong; Hand, David W.; Perram, David; Taylor, Roy (2009). Adsorption and Regeneration on Activated Carbon Fiber Cloth for Volatile Organic Compounds at Indoor Concentration Levels. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(1), 31–36. doi:10.3155/1047-3289.59.1.31.
- 73.** Wen, Zeling; Wang, Shuhua; Bao, Zhanxia; Shi, Sheng; Hou, Wensheng (2020). Preparation and Oil Absorption Performance of Polyacrylonitrile Fiber Oil Absorption Material. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(4), 153-. doi:10.1007/s11270-020-04524-y.
- 74.** Aminian, M.K.; Taghavinia, N.; Irajizad, A.; Mahdavi, S.M. (2007). Adsorption of TiO2 Nanoparticles on Glass Fibers. *Journal of Physical Chemistry C*, 111(27), 9794–9798. doi:10.1021/jp070116i.
- 75.** Bakae, Victor A.; Rivera, Lymanis Ortiz; Pantano, Carlo G. (2015). A Dynamic Volumetric Method for Measuring Adsorption of Water on Glass Fibers. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(39), 22504–22513. doi:10.1021/acs.jpcc.5b06723.
- 76.** Génie écologique. Fiche matériau : Acier. https://www.genieecologique.fr/sites/default/files/documents/biblio/fiche_acier_fin.pdf. Consulté le 04/07/2023.
- 77.** ASEF. L'aluminium, ce métal qui nous empoisonne : la synthèse de l'ASEF. 2017. <https://www.asef-asso.fr/production/laluminium-ce-metal-qui-nous-empoisonne-la-synthese-de-lasef/>. Consulté le 04/07/2023.

Références bibliographiques

78. AFSSET. Fabrication et usinage des matériaux composites à base de fibres de carbone. Saisine n°2008/002. 2010.
79. Gupta A, Sharma V, Mishra PK, Ekielski A. A Review on Polyacrylonitrile as an Effective and Economic Constituent of Adsorbents for Wastewater Treatment. *Molecules*. 2022;27(24):8689. Published 2022 Dec 8. doi:10.3390/molecules27248689.
80. ELSHEIKHI, Salah et BENYOUNIS, Khaled Y. Review of recent developments in polymer matrix composites with fiber reinforcements. 2022.
81. Scholten, Elke; Bromberg, Lev; Rutledge, Gregory C.; Hatton, T. Alan (2011). Electrospun Polyurethane Fibers for Absorption of Volatile Organic Compounds from Air. , 3(10), 3902–3909. doi:10.1021/am200748y.
82. Fuzek, John F. (1985). Absorption and desorption of water by some common fibers. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 24(1), 140–144. doi:10.1021/i300017a026.
83. Bahaa S. Metwally, A. Atef El-Sayed, E.K. Radwan, Asmaa S. Hamouda, M.N. El-Sheikh, Mohamed Salama. Fabrication, Characterization, and Dye Adsorption Capability of Recycled Modified Polyamide Nanofibers. *Egypt. J. Chem.* Vol. 61, No.5 pp. 867 - 882 (2018). 10.21608/ejchem.2018.3967.1367.
84. M. Lehocký; A. Mráček (2006). Improvement of dye adsorption on synthetic polyester fibers by low temperature plasma pre-treatment. , 56(2 Supplement), B1277–B1282. doi:10.1007/s10582-006-0362-5.
85. Dong, Ting; Xu, Guangbiao; Wang, Fumei (2015). Adsorption and adhesiveness of kapok fiber to different oils. *Journal of Hazardous Materials*, 2960, 101–111. doi:10.1016/j.jhazmat.2015.03.040.
86. TOYOBO. ZYLON®(PBO fiber) Technical Information. 2005. <https://imattec.com/brochures/technical-information-pbo.pdf>. Consulté le 04/07/2023.
87. LES DIFFÉRENTES FIBRES TEXTILES ET LEUR IMPACT ENVIRONNEMENTAL. 2023. <https://geopelie.com/blogs/journal/les-differentes-fibres-textiles-et-leur-impact-environnemental>. Consulté le 28/11/2023.
88. Dong, Ting; Xu, Guangbiao; Wang, Fumei (2015). Adsorption and adhesiveness of kapok fiber to different oils. *Journal of Hazardous Materials*, 2960, 101–111. doi:10.1016/j.jhazmat.2015.03.040.
89. BACH, Cristina. Evaluation de la migration des constituants de l'emballage en poly (éthylène téréphtalate)(PET) vers l'eau, des facteurs d'influence et du potentiel toxique des migrants. 2011. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.
90. Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nat Food* 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>.
91. Stein RS. Polymer recycling: opportunities and limitations. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1992 ; 89(3):835–8. doi: 10.1073/pnas.89.3.835.
92. Sipiläinen-Malm T, Latva-Kala K, Tikkanen L, Suihko ML, Skyttä E. Purity of recycled fibre-based materials. *Food Addit Contam*. 1997 Aug-Oct;14(6-7):695–703. doi: 10.1080/02652039709374581.