

Revue de littérature - Textile industriel

Réalisée par l'équipe étudiante:

Elisabeth Fournier, Daphné Gagnon-Fee, Ariane Nadeau et Cynthia Wong

**Université de Sherbrooke - Centre universitaire de formation en
environnement et développement durable (CUFE)**

15 avril 2024

Table des matières

TEXTILE INDUSTRIEL : REJETS DE RECouvreMENT	1
RÉUTILISATION ET RECYCLAGE EN BOUCLE OUVERTE DES TEXTILES PRÉCONSUMMATION	3
APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE MÉCANIQUE DES TEXTILES MIXTES.....	4
APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE DES TEXTILES D'ACRYLIQUE.....	6
APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE CHIMIQUE DES TEXTILES DE VISCOSE	9
PROCÉDÉS DE SÉPARATION DU POLYESTER ET DU COTON (CELLULOSE POUR LE RECYCLAGE DES FIBRES TEXTILES)	12
TECHNOLOGIES POUR RETIRER LE COTON D'UN MÉLANGE POLYESTER-COTON	14
TECHNOLOGIES POUR RETIRER LE POLYESTER D'UN MÉLANGE POLYESTER-COTON	17
TEXTILE INDUSTRIEL : VOILES DE PARACHUTE, DE VOILIER ET DE KITE.....	19
RÉUTILISATION DES VOILES DE PARACHUTE ET DE KITE.....	20
RECYCLAGE EN BOUCLE OUVERTE DU TEXTILE DE PARACHUTE POUR FABRIQUER D'AUTRES OBJETS DE PLASTIQUE.....	21
RÉUTILISATION DU TISSU DE VOILES POUR EN FAIRE DES ACCESSOIRES	22
APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE DU TEXTILE DE NYLON	23
RECYCLAGE DE TISSU ARAMIDE POUR PRODUIRE DES NANOFIBRES D'ARAMIDE.....	25
APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE DU TEXTILE DE POLYESTER.....	26

TEXTILE INDUSTRIEL : REJETS DE RECOUVREMENT

Les rejets de recouvrement correspondent à des retailles et à des surplus de textiles issus de la fabrication de meubles. Ces textiles sont dits post-industriels ou préconsommation, ce qui signifie que le tissu récupéré est neuf. Dans les Laurentides, les fabricants de meubles utilisent principalement des tissus synthétiques (polyester et polyester recyclé post-consommation, viscose, acrylique) et des mélanges de fibres (fibres synthétiques et 10 à 30 % de fibres naturelles comme du lin et du coton). Le polyester et l'acrylique sont des matières plastiques issues de la transformation du pétrole, et la viscose est fabriquée à partir de cellulose, donc de plantes.

La production et la transformation des matières textiles ont d'importants impacts négatifs sur l'environnement, et l'industrie du textile est très peu circulaire. Au Québec, ce sont surtout les vêtements usagés qui sont récupérés pour être revendus. Pour ce qui est du recyclage, les mélanges de fibres complexifient beaucoup le tri des matières, la séparation des matériaux et la conservation d'une valeur élevée pour les produits. De plus, les installations et les organisations de recyclage de textiles sont rares au Québec. En 2021, les résidus textiles issus des ICI représentaient 25 % de la masse traitée par les récupérateurs et 33 % de la masse éliminée.

Les rejets de textile post-industriel sont particulièrement appropriés pour les processus de recyclage mécanique, facilités par la connaissance de la composition des textiles à recycler et l'uniformité et la pureté de ces textiles. Le recyclage mécanique consiste à transformer les textiles en matières premières sans affecter leur structure moléculaire. Il implique donc peu de procédés chimiques, mais il réduit la qualité des fibres textiles. Les fibres recyclées mécaniquement doivent donc souvent être mélangées à des fibres vierges pour en faire de nouveaux produits. La valeur de ces nouveaux produits est généralement inférieure à celle des produits neufs ayant été recyclés.

Le recyclage chimique consiste généralement à séparer un polymère en ses monomères qui pourront être utilisés à nouveau après une repolymérisation, ce qui n'entraîne pas en une diminution de la qualité des produits. Ce procédé peut être affecté négativement par des produits chimiques qui se retrouveraient dans les textiles à recycler.

Références

RECYC-QUÉBEC. (2018). *Produits de textile et d'habillement*. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-textile.pdf>

RECYC-QUÉBEC. (2021). *Bilan 2021 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. ISBN : 978-2-550-94646-5. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2021-complet.pdf>

Baloyi, R. B., Gbadeyan, O. J., Sithole, B. et Chunilall, V. (2024). Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review. *Textile Research Journal*, 94(3-4), 508-529. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1177/00405175231210239>

RÉUTILISATION ET RECYCLAGE EN BOUCLE OUVERTE DES TEXTILES PRÉCONSUMMATION

FABSCRAP est un organisme de bienfaisance disposant de deux entrepôts (New York, Philadelphie) qui vise à détourner les déchets textiles préconsommation de l'enfouissement. FABSCRAP fait notamment affaire directement avec des entreprises pour récupérer tous types de déchets textiles, incluant des tissus de recouvrement. FABSCRAP fournit aux entreprises des sacs pour y mettre leurs déchets textiles et se charge de revenir les chercher. Les revenus de FABSCRAP proviennent en majorité des frais aux entreprises pour leur service et des ventes de tissus. L'organisation reçoit aussi du financement et des dons en argent. En 2022, pour la première fois depuis 2016 (à l'exception de 2020), les dépenses de FABSCRAP ont dépassé ses revenus.

Le tri des textiles (en moyenne 7 750 lbs / semaine, pour un total de 371 994 lbs en 2022) est réalisé par des bénévoles. Trois voies peuvent être prises par les textiles récupérés par FABSCRAP :

- 1) Revente au public (sur place et en ligne) : pour les textiles récupérés à travers un service dit *non-proprietary*, ce qui signifie que les entreprises ont accepté que leurs tissus soient revendus au public. Applicable aux morceaux de tissu de plus d'un mètre.
- 2) Déchiquetage : pour les textiles récupérés à travers un service dit *proprietary*, ce qui signifie que les entreprises ont refusé que leurs tissus soient revendus au public, et pour les morceaux qui ne sont pas en état d'être revendus tels quels. FABSCRAP fait affaire avec un déchiqueteur dans un autre État. Le résultat est appelé *shoddy* et peut servir de rembourrage ou d'isolant, notamment pour isoler des maisons ou pour l'industrie automobile.
- 3) Enfouissement : pour les textiles qui ne peuvent être ni revendus (*proprietary* ou non réutilisables) ni déchiquetés (cuir et faux cuir, fourrure et fausse fourrure, tissus avec des billes ou des paillettes, vinyles et élastiques).

Références

<https://fabscrap.org/>

FABSCRAP. (2022). *The FABSCRAP annual report*.

https://static1.squarespace.com/static/56aff2e3d51cd44dd1c364ee/t/6495da246d3d7b33dd164a14/1687542309802/FABSCRAP_ANNUALREPORT_2022_FINAL_LOWRES.pdf

H. Willner, FABSCRAP, communication par courriel, 27 février 2024

APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE MÉCANIQUE DES TEXTILES MIXTES

Sans une séparation chimique des différents types de fibres composant un textile mixte, ces matériaux peuvent subir une valorisation énergétique ou être déchiquetés pour en faire un *shoddy* (matériau de rembourrage ou isolant).

Il est également possible d'en faire des matériaux textiles non tissés semblables à du feutre, notamment utiles pour l'isolation thermique et sonore, dont le coût de production serait inférieur à celui des isolants acoustiques traditionnels :

- 1) Défilage ;
- 2) Arrangement par flux d'air des fibres ;
- 3) Ajout d'un liant chimique (poly[acétate de vinyle]) par arrosage (atomisation) ou liaison thermique (air à 220 °C, machine fonctionnant à un rythme de 6 m/min) ;
- 4) Calandrage (pressage) ;
- 5) Ajout de mousse polyuréthane bicomposée comme liant pour obtenir des matériaux composites non tissés.

Ces matériaux non tissés sont de bons isolants sonores pour les hautes fréquences (plus de 2000 Hz, et possibilité d'absorber plus de 70 % entre 50 et 4000 Hz) et l'humidité n'affecte pas leur caractère isolant (thermique et sonore). Les feutres de polyester coton sont ceux qui performent le mieux. Les textiles peuvent être triés par couleur si souhaité.



Figure 1 : Échantillon de matériau non tissé (tiré de : Sakthivel et al., 2021)

Références

TerraCycle Canada, communication par courriel, 26 février 2024

H. Willner, FABSCRAP, communication par courriel, 27 février 2024

Sakthivel, S., Senthil Kumar, S., Mekonnen, S. et Solomon, E. (2020). Thermal and sound insulation properties of recycled cotton/polyester chemical bonded nonwovens. *Journal of*

Engineered Fibers and Fabrics, 15, 1558925020968819. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1177/1558925020968819>

Sakthivel, S., Kumar, S. S., Melese, B., Mekonnen, S., Solomon, E., Edae, A., Abedom, F. et Gedilu, M. (2021). Development of nonwoven composites from recycled cotton/polyester apparel waste materials for sound absorbing and insulating properties. *Applied Acoustics*, 180, 108126. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108126>

APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE DES TEXTILES D'ACRYLIQUE

L'acrylique ne peut pas être recyclé par un processus thermomécanique (impliquant d'abord une fusion du matériau).

Recyclage mécanique de l'acrylique permettant d'obtenir des fibres pouvant être filées pour en faire de nouveaux textiles d'acrylique

- 1) Ajustement des paramètres de la machine (coupeuse guillotine pour matières souples, machine à effilochage) pour l'effilochage selon les résidus à traiter ;
- 2) Découpage et déchetage du textile d'acrylique ;
- 3) Filage des fibres d'acrylique recyclées (longueur d'au moins 18 mm), avec ajout de fibres vierges (0 à 40 %) au besoin.

Ce procédé pourrait aussi être appliqué au polyester. Dans le projet REACT, le textile d'acrylique provenant d'auvents conçus pour un usage à l'extérieur a été décontaminé pour retirer des revêtements potentiellement toxiques avant d'être recyclé.

Recyclage mécanique des fibres d'acrylique pour fabriquer un matériau textile isolant semblable à un feutre (acoustique, thermique)

- 1) Ouverture des fibres (pré-consommation, longueur peut varier) ;
- 2) Application d'une solution de résine phénol-formaldéhyde par arrosage (atomisation) ;
- 3) Moulage à 130 °C ;
- 4) Pressage (45 minutes).

Ce matériau répond aux exigences des « matériaux isolants » thermiques (ISO, CEN, DIN, TS) et il est un meilleur isolant sonore que les isolants expérimentaux et commerciaux auxquels il a été comparé.

Procédé de recyclage chimique du textile d'acrylique pour obtenir un composant d'un adsorbant pour le traitement rentable d'effluents industriels

Des fibres d'acrylique post-industrielles, facilement accessibles, peuvent être utilisées dans la synthèse d'un adsorbant permettant de retirer les ions toxiques gadolinium(III) (Gd[III]) d'effluents d'eaux usées industrielles.

- 1) Dispersion des fibres d'acrylique dans du diméthylformaldéhyde et de l'acide phosphoreux ;
- 2) Condensation par reflux ;
- 3) Précipitation dans de l'eau redistillée ;

Clinique en environnement

4) Obtention d'acide poly(amino-phosphonique).

Cet acide poly(amino-phosphonique) peut former des composites avec de l'oxyde de graphène magnétique. Ces composites agissent comme adsorbant efficace et recyclable. Ce procédé permet d'obtenir un adsorbant sans recourir au formaldéhyde, un composé toxique utilisé dans les autres procédés visant à produire de tels adsorbants.

Références

Baloyi, R. B., Gbadeyan, O. J., Sithole, B. et Chunilall, V. (2024). Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review. *Textile Research Journal*, 94(3-4), 508-529. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1177/00405175231210239>

Poggio, M. et Vulliet, M. (2022, 7 décembre). *D4.3: Report on mechanical recycling of acrylic fibre – Executive summary*. REcycling of waste ACrylic Textiles. <https://cordis.europa.eu/project/id/820869/results>

Poggio, M., Faranda, C. et Jak Spinning. (2021, 27 janvier). *REACT Project WP4 – Mechanical Recycling and Spinning*. REcycling of waste ACrylic Textiles. https://www.react-project.net/wp-content/uploads/sites/41/2021/01/REACT_WP4_-Review-Meeting_2-27.01.2021_v2.pdf

Dönmez, E. T. et Turker, E. (2022). Thermal and sound insulation performances of building panels produced by recycling waste fibres of yarn factories. *Textile and Apparel*, 32(1), 9-23. DOI: 10.32710/tekstilvekonfeksiyon.941068

Yin, W., Zhan, X., Fang, P., Xia, M., Yu, J. et Chi, R. A. (2019). A facile one-pot strategy to functionalize graphene oxide with poly (amino-phosphonic acid) derived from wasted acrylic fibers for effective Gd (III) capture. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 7(24), 19857-19869. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1021/acssuschemeng.9b05221>

APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE CHIMIQUE DES TEXTILES DE VISCOSE

Hydrolyse enzymatique du textile de viscose pour obtenir des solutions riches en glucose

- 1) Tri et déchetage du textile (coloré ou blanc) ;
- 2) Préparation d'un réacteur :
 - a. Eau désionisée amenée à 50 °C
 - b. Ajout d'acide sulfurique (72 %) et de NaOH (50 %) pour obtenir un pH de 5 ;
 - c. Ajout du textile, attente de 30 minutes.
- 3) Hydrolyse dans le réacteur par le mélange d'enzymes Cellic CTec 2 (96 h) ;
- 4) Filtration du contenu du réacteur ;
- 5) Évaporation sous vide pour concentrer le résultat de l'hydrolyse, stérilisation.

Les solutions riches en glucose obtenues à l'aide de ce procédé ont été utilisées comme source de carbone pour la synthèse d'acide D-lactique (utile pour la production de fibres d'acide polylactique qui pourraient être utilisées dans la confection de textiles au lieu du polyester) par *Pediococcus acidilactici* ZP26.

Hydrolyse acide (acide sulfurique 64%) des résidus de fabrication de fils de viscose

- 1) Préparation d'une solution d'acide sulfurique à 64 % froide ;
- 2) Ajout de la viscose et brassage ;
- 3) Chauffage à 40 °C et brassage (5 à 60 minutes)
- 4) Refroidissement et ajout d'eau désionisée
- 5) Obtention d'une suspension de nanocellulose
- 6) Nettoyage à l'eau désionisée, centrifugation et dialyse de la suspension ;
- 7) Ultrasonication (bris de molécules à l'aide d'ultrasons).

Production d'un adsorbant de teinture cationique peu coûteux, utile pour le traitement d'eaux usées

- 1) Purification des fibres de viscose post-industrielles ;
 - a. Nettoyage par ébullition en solution alcaline ;
 - b. Oxydation ;
 - c. Déminéralisation.
- 2) Oxydation des fibres de viscose
 - a. Trempage dans une solution de périodate de sodium et avec un tampon acétique à pH 4 ;

Clinique en environnement

- b. Brassage à température pièce pour 60 à 360 minutes
 - c. Nettoyage des fibres à l'eau froide ;
 - d. Oxydation des groupements aldéhydes avec chlorite de sodium (pH 4, 24 à 48 h)
 - e. Nettoyage à l'eau distillée et séchage.
- 3) Broyage à boulets (8 h par intervalles de 5 à 10 min) de fibres de viscose pour obtenir l'adsorbant en poudre.

Références

Campos, J., Bågenholm-Ruuth, E., Sanchis-Sebastiá, M., Bao, J. et Wallberg, O. (2024). Waste Viscose for Optically pure Lactic acid Production. *Waste and Biomass Valorization*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02480-w>

Prado, K. S., Gonzales, D. et Spinace, M. A. (2019). Recycling of viscose yarn waste through one-step extraction of nanocellulose. *International journal of biological macromolecules*, 136, 729-737. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.124>

Abdel Ghafar, H., Salama, M., Radwan, E. K. et Salem, T. (2019). Recycling of pre-consumer viscose waste fibers for the removal of cationic dye from aqueous solution. *Egyptian Journal of Chemistry*, 62(6), 1057-1067. DOI: 10.21608/ejchem.2019.7968.1625

PROCÉDÉS DE SÉPARATION DU POLYESTER ET DU COTON (CELLULOSE POUR LE RECYCLAGE DES FIBRES TEXTILES)

Indépendamment de la source d'un déchet textile, les procédés de recyclage mécanique ne permettent pas de séparer les fibres de polyester et les fibres de cellulose comme le coton d'un textile mixte pour obtenir la matière pure. Plusieurs procédés chimiques peuvent le faire en dissolvant ou en dépolymérisant sélectivement l'un des deux composants du textile (le polyester ou le coton) pour conserver l'autre composant sous forme de fibres solides intactes.

Certaines compagnies utilisent ces procédés :

- Evrnu (Washington) : procédés brevetés d'hydrolyse alcaline du polyester à haute température et de dissolution de la cellulose (selon la composition du textile)
- BlockTexx (Australie) : procédé breveté qui consiste à placer les textiles déchiquetés dans une solution d'acide sulfurique (2 à 4 %) dans un réacteur à 120 à 150 °C et 5 bars pour permettre la catalyse de la réaction par l'acide et séparer la cellulose et les fibres de polyester.
- Circ (Virginie) : procédé hydrothermique breveté à l'eau sous-critique qui permet d'obtenir de l'acide téréphtalique, de l'éthylène glycol et de la pulpe de cellulose. Ce procédé peut être utilisé pour recycler du coton, du polyester ou des mélanges. Différentes séquences de traitement sont possibles. Le textile est traité dans un réacteur à eau sous-critique (105 à 190 °C ou 40 à 300 psi ou les deux, jusqu'à 90 minutes). Le pH pour le traitement peut aussi être ajusté entre 10 et 14. Il est aussi possible de faire un premier traitement à pH 10 à 14 pour récupérer l'acide téréphtalique, suivi d'un traitement à pH 2 à 4 pour récupérer la cellulose. Il est aussi possible d'inclure une étape de décoloration et différents solvants peuvent être intégrés au processus.
- Worn Again Technologies (Royaume-Uni) : procédé de dissolution de la cellulose des textiles à l'aide de deux solvants (le premier comprenant un groupement amide et le second comprenant un liquide ionique protique avec un acide et une base) et de deux températures différentes (d'abord 100 à 110 °C pour 12 à 30 minutes, puis 20 à 50 °C pour 6 minutes à 3 h).

Références

Loo, S. L., Yu, E. et Hu, X. (2023). Tackling critical challenges in textile circularity: a review on strategies for recycling cellulose and polyester from blended fabrics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110482. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110482>

Circ. (s.d.) *Our technology*. <https://circ.earth/our-technology/>

Barla, F. G., Showalter, T., Su, H.— C., Jones, J. et Bobe, I. (2019, 10 décembre). *Methods for recycling cotton and polyester fibers from waste textiles*. United States Patent. <https://patentimages.storage.googleapis.com/a2/a8/97/cc948f9ae8419d/US10501599.pdf>

<https://www.evrnu.com/>

Flynn, S. et Stanev. C. (2018, 2 août). *Methods and systems for processing mixed textile feedstock, isolating constituent molecules, and regenerating cellulosic and polyester fibers*. United States Patent Application Publication. <https://patentimages.storage.googleapis.com/63/00/5e/503170290898ad/US20180215893A1.pdf>

BlockTexx. (s.d.). *Technology*. <https://www.blocktexx.com/technology>

Speight, R., O'Hara, I., Zhanying Zhang, J., Moller, D., Jone, A. et Ross, G. (2020, 24 décembre). *A system and process for the separation and recycling of blended polyester and cotton textiles for re-use*. World Intellectual Property Bureau. <https://patentimages.storage.googleapis.com/e9/a3/c4/5f7bd137aa5f3c/WO2020252523A1.pdf>

Worn Again Technologies. (s.d.). *About Us*. <https://wornagain.co.uk/about-us/>

Walker, A., Reid, J. E. S. et Hauru, L. (2023, 12 octobre). *Recycling process*. Australian Patent Office. <https://patentimages.storage.googleapis.com/76/cd/55/f850a23a3cac51/AU2023233181A1.pdf>

TECHNOLOGIES POUR RETIRER LE COTON D'UN MÉLANGE POLYESTER-COTON

Dissolution

Génère une solution de cellulose et une fraction de polyester solide.

Principe : Dissolution physique, bris des ponts H entre les molécules avec NMMO (120 °C) ou liquides ioniques (60 à 120 °C, possibilité d'ajouter un solvant aprotique comme le DMSO pour améliorer le processus et baisser les coûts). Après la séparation du polyester, précipitation de la cellulose en ajoutant de l'eau à la solution (possibilité de réutiliser l'eau et le solvant grâce à un procédé d'évaporation).

Rendement : 40 à 95 %.

Inconvénients : possibilité de dégradation des deux types de fibres, solubilité variable de la cellulose selon le solvant.

Hydrolyse acide

Génère des fibres de polyester, de la cellulose microcristalline et des nanocristaux de cellulose.

Principe : Différents acides (sulfurique, nitrique, phosphorique) décomposent la microstructure des fibres de coton à des températures de 90 à 140 °C.

Rendement de l'extraction de la cellulose : 55 %.

Le taux d'hydrolyse de la cellulose liée au polyester peut être amélioré en procédant d'abord à un traitement acide statique (60 secondes, 90 °C) puis à un battage mécanique (10 minutes, température pièce), ou encore en augmentant la température et la durée de la réaction, la concentration d'acide ou le ratio liquide/solide.

Traitement hydrothermique catalysé par un acide

Génère de la poudre de cellulose.

Principe : Hydrolyse avec de l'eau à température et pression élevées (110 à 180 °C pour 30 min à 3 h) et un réactif comme l'acide citrique, l'acide chlorhydrique (HCl) ou l'acide phosphotungstique (HPW). L'eau est à une température suffisante pour hydrolyser la cellulose, mais pas le polyester.

Clinique en environnement

Rendement : 95 % pour le polyester et 80 % pour la cellulose.

Dépolymérisation enzymatique

Génère des sucres.

Principe : Des complexes enzymatiques cellulases dépolymérisent la cellulose en sucres. C'est une réaction spécifique qui affecte très peu le polyester.

Conditions : généralement 1 à 3 % de solides en suspension ; 45 à 55 °C ; pH de 4,5 à 5 ; 10 à 40 FPU/g de cellulase ; 72 à 96 h.

Un prétraitement (dissolution dans NMMO, traitement acide ou traitement alcali) réduit la cristallinité de fibres textiles et augmente leur surface de contact avec le complexe enzymatique pour améliorer le rythme de la réaction. Les cellulases sont de plus en plus accessibles et abordables.

Rendement (avec prétraitement NaOH) : 88 à 98 % pour le glucose.

Références

Loo, S. L., Yu, E. et Hu, X. (2023). Tackling critical challenges in textile circularity: a review on strategies for recycling cellulose and polyester from blended fabrics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110482. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110482>

Hou, W., Ling, C., Shi, S., Yan, Z., Zhang, M., Zhang, B. et Dai, J. (2018). Separation and characterization of waste cotton/polyester blend fabric with hydrothermal method. *Fibers and Polymers*, 19, 742-750. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7735-9>

TECHNOLOGIES POUR RETIRER LE POLYESTER D'UN MÉLANGE POLYESTER-COTON

Dissolution sélective

Génère une solution de polyester et une fraction de fibres de cellulose solides.

Conditions : Plusieurs solvants peuvent être utilisés (DMSO, m-crésol, phénol/tétrachloréthane..., 70 à 150 °C, 30 min à 2 h). Précipitation ou filtration du polyester après refroidissement.

L'utilisation de N,N-diméthylcyclohexylamine comme solvant à 50 °C demande moins d'énergie et permet une meilleure conservation de la qualité du polyester. Les teintures sont retirées au préalable.

Inconvénient : grande consommation de produits chimiques.

Rendement pour le polyester : 15 à 57 %. L'efficacité est affectée par le pourcentage de polyester dans le mélange de fibres.

Hydrolyse alcaline

Génère de l'acide téréphtalique, de l'éthylène glycol et une fraction de cellulose qui peut être utilisée pour fabriquer de nouvelles fibres.

Principe : le polymère de polyester est séparé en 2 monomères (acide téréphtalique et éthylène glycol). Si les déchets textiles ont été broyés au préalable, ce procédé peut aussi servir à les décolorer. La cellulose et les monomères sont séparés par filtration, puis l'acidification permet de séparer les deux monomères en faisant précipiter l'acide téréphtalique.

Conditions : 5 à 20 % NaOH entre 70 et 90 °C. Un catalyseur de transfert de phase comme le BTAC peut accélérer la réaction (40 min plutôt que 390 avec 1 % de solides en suspension) et améliorer le rendement pour la cellulose (85 à 97 %).

Rendement : 100 % de dépolymérisation du polyester (10 % NaOH, 90 °C, 390 min, sans catalyseur).

Inconvénients : Une température élevée accélère la réaction pour le polyester, mais dégrade la cellulose.

Traitement hydrothermique

Résulte en l'hydrolyse du polyester (en monomères ou en plus petits polymères).

Clinique en environnement

Principe : Dégradation des fibres avec de l'eau à température et pression élevées.

Conditions : 180 °C, ou 150 °C avec un catalyseur de transfert de phase ou un cosolvant.

Inconvénient : Les fibres cellulosiques sont trop dégradées par ce traitement pour pouvoir être utilisées pour faire de nouvelles fibres.

Glycolyse

Génère une fraction solide de coton et du bis(2hydroxyéthyl téréphtalate) (BHET). Le BHET peut être utilisé pour faire du PET.

Principe : les fibres de polyester sont dégradées par l'éthylène glycol.

Conditions : 150 à 196 °C, catalyseur (comme acétate de zinc ou bêtaïne d'acétate de zinc, 5 %), durée de l'ordre de 45 min.

Rendement : dépolymérisation de 1,8 % des fibres de polyester sans catalyseur, plus de 80 % avec catalyseur.

Dépolymérisation enzymatique

Génère des monomères du polyester

Principe : Des PET hydrolases dégradent les polymères de polyester. C'est un domaine de recherche et de développement actif.

Rendement : moins de 30 % en 25 jours. Un prétraitement hydrolytique ou chimique améliore le rendement de la réaction (85 %).

Des cutinases disponibles dans le commerce pourraient aussi être utilisées pour obtenir de l'acide téréphtalique.

Rendement : 30 % en 25 jours. L'utilisation simultanée de cellulases peut donner un rendement de 83 % pour le glucose.

Inconvénient : Les réactions enzymatiques se déroulent sur plusieurs jours. Les temps de réaction sont longs et le complexe enzymatique est surtout actif à la surface du matériau.

Avantage : utilisation d'un faible ratio liquide/solide

Références

Loo, S. L., Yu, E. et Hu, X. (2023). Tackling critical challenges in textile circularity: a review on strategies for recycling cellulose and polyester from blended fabrics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110482. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110482>

Hou, W., Ling, C., Shi, S., Yan, Z., Zhang, M., Zhang, B. et Dai, J. (2018). Separation and characterization of waste cotton/polyester blend fabric with hydrothermal method. *Fibers and Polymers*, 19, 742-750. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7735-9>

TEXTILE INDUSTRIEL : VOILES DE PARACHUTE, DE VOILIER ET DE KITE

Les voiles pour les bateaux, les parachutes et les kites peuvent être faites de différents matériaux synthétiques. Le nylon (notamment de type indéchirable, ou ripstop) est le plus courant pour les parachutes. Il est aussi possible d'utiliser du Kevlar ou du polyester. Quant aux voiles pour bateaux et pour kites, elles sont le plus souvent faites de polyester (polyéthylène téréphtalate [PET] ou Dacron, et autres types de polyéthylène). Selon l'utilisation précise pour laquelle ces voiles sont conçues, elles peuvent aussi être faites, par exemple, de nylon, de fibres aramides (comme le Kevlar), de polyéthylène de masse molaire très élevée (UHMPE) ou encore de fibre de carbone.

Les rejets de textile post-industriel sont particulièrement appropriés pour les processus de recyclage mécanique, facilités par la connaissance de la composition des textiles à recycler et l'uniformité et la pureté de ces textiles. Le recyclage mécanique consiste à transformer les textiles en matières premières sans affecter leur structure moléculaire. Il implique donc peu de procédés chimiques, mais il réduit la qualité des fibres textiles. Les fibres recyclées mécaniquement doivent donc souvent être mélangées à des fibres vierges pour en faire de nouveaux produits. La valeur de ces nouveaux produits est généralement inférieure à celle des produits neufs ayant été recyclés.

Le recyclage chimique consiste généralement à séparer un polymère en ses monomères qui pourront être utilisés à nouveau après une repolymérisation, ce qui ne résulte pas en une diminution de la qualité des produits. Ce procédé peut être affecté négativement par des produits chimiques qui se retrouveraient dans les textiles à recycler.

Références

Baloyi, R.B., Gbadeyan, O.J., Sithole, B. et Chunilall, V. (2024). Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review. *Textile Research Journal*, 94(3-4), 508-529. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1177/00405175231210239>

RÉUTILISATION DES VOILES DE PARACHUTE ET DE KITE

L'un des volets du projet RE'FLY consiste à encourager la formation de partenariats entre des clubs ou des écoles de vol libre et des organisations (appelées « recycleurs ») qui récupèrent notamment les textiles provenant de parachutes et de kites en fin de vie pour les réutiliser. Ces organisations s'en servent, par exemple, pour fabriquer des hamacs, des sacs, des structures gonflables ou du matériel pour les arts de la scène.

La Fédération française de vol libre met à la disposition de la population une carte interactive qui permet de localiser les clubs et les écoles de vol libre qui agissent comme points de dépôt de ces textiles et qui les acheminent aux recycleurs. Il ne s'agit pas ici de mettre en place de nouveaux débouchés, mais de faire connaître ceux qui existent et de faciliter l'acheminement des matières textiles jusqu'à eux. Les écoles et les clubs sont connus de ceux qui pratiquent le vol libre, il s'agit donc de points de dépôt faciles d'accès. En date du 18 mars 2024, 20 points de dépôt étaient recensés à travers la France sur la carte interactive. La FFVL encourage les écoles et les clubs participants à désigner un animateur développement durable, mais peu d'intérêt a été manifesté pour ce poste.

Références

Fédération française de vol libre. (2022). *Commission développement durable — Rapport d'activité 2022*. https://federation.ffvl.fr/sites/ffvl.fr/files/2022_Rapport-commission-DevelopDurable-vdef.pdf

Fédération française de vol libre. (2021, 6 août). *Inscrivez votre structure sur « Carte Re'Fly » et soyez l'acteur local du recyclage du matériel de vol libre*. <https://federation.ffvl.fr/pages/plate-forme-structures-recyclage>

Fédération française de vol libre. (s.d.). *Structures de recyclage et de réemploi*. <https://carte.ffvl.fr/?mode=recyclage>

Fédération française de vol libre. (2023, 15 avril). *Recyclage du matériel de vol libre*. <https://federation.ffvl.fr/pages/recyclage-materiel-VL>

RECYCLAGE EN BOUCLE OUVERTE DU TEXTILE DE PARACHUTE POUR FABRIQUER D'AUTRES OBJETS DE PLASTIQUE

Ce volet du projet RE'FLY fait appel à la plasturgie pour mettre en place un procédé de recyclage pour les faibles volumes de textiles provenant des voiles de parapente en polyamide enduit (nylon 6-6). Ce matériau est aussi utilisé, entre autres, pour les voiles de parachute et de kite.

Les voiles en fin de vie sont utilisées comme charges pour ce procédé unique et breveté, qui exploite plusieurs sources de plastiques issues de déchets pour les comptabiliser avec d'autres matériaux afin de fabriquer différents objets de plastique. Le projet vise la viabilité économique, et une écotaxe ou une responsabilité élargie du producteur pourrait y contribuer. Dans l'ensemble, il s'agit d'utiliser les déchets pour la comptabilisation.

Le broyage grossier du textile a permis d'intégrer des flocons de polyamide enduit dans la fabrication de prototypes de plateau de sellette de parapente à l'aide d'un procédé d'injection. Il faut intégrer des additifs, comme une autre matière plastique, pour ce procédé. Le prototype a été réalisé avec du mobilier de jardin recyclé.

La micronisation (broyage très fin) permettrait d'intégrer une plus grande proportion de polyamide enduit, sous forme de granulats, dans les produits fabriqués et d'utiliser des procédés d'injection. En 2019, les participants à RE'FLY étaient en quête d'un tel procédé industriel.

Ce projet implique un adepte du vol libre (initiateur du projet), la Fédération française de vol libre, un fabricant de matériel de parapente, un fournisseur de tissu pour la fabrication de parapentes et une entreprise spécialisée dans la plasturgie.

Ce volet du projet RE'FLY, impliquant des procédés de plasturgie, a été interrompu en 2020 en raison du ralentissement des activités de vol libre pendant la pandémie de COVID-19 et était toujours suspendu en date du 15 mars 2024. Le volet présenté à la fiche précédente est toujours en activité.

Références

Mermet-au-Louis, C. (2019, 15 juin). *Projet Re'fly — Interview de Michel Joulot*. Made Nature. <https://blog.made-nature.com/projet-refly-interview-de-michel-joulot/>

H. Guerry, Cycl-add, communication personnelle, 15 mars 2024

RÉUTILISATION DU TISSU DE VOILES POUR EN FAIRE DES ACCESSOIRES

Plusieurs entreprises confectionnent des sacs à partir de morceaux de voiles faites de différents matériaux (polyester, nylon, aramides, fibre de carbone). Par exemple :

- **Sea Bags** (basée dans le Maine) reçoit des dons de voiles faites de différents matériaux de la part de particuliers et d'organisations comme des clubs de voile. La compagnie fabrique des sacs, des coussins et des chaises.
- **Salty Bag** (Grèce) utilise des voiles usagées de bateaux, de parachutes et de kites faites de polyester, de nylon, d'aramides et de fibre de carbone pour confectionner des sacs et des napperons. La compagnie accepte également les retours de ses sacs en fin de vie et se charge de les remettre à neuf pour qu'ils puissent être réutilisés. Salty Bag reçoit des dons de voiles, mais la compagnie utilise aussi des déchets textiles de préconsommation, comme du tissu servant à la confection de couvertures pour bateaux, et d'autres déchets textiles comme des ceintures de sécurité.
- **Sails and Canvas** (Angleterre) n'utilise que le polyester *Dacron*. La compagnie accepte les tissus de particuliers, de clubs de voile et de manufacturiers de voiles, qui sont nettoyés avant d'être coupés et cousus pour en faire des sacs, des chaises, des brise-vents, des coussins et des butées de porte.

Références

<https://saltybag.com/>

<https://seabags.com/>

<https://www.sailsandcanvas.co.uk/>

APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE DU TEXTILE DE NYLON

Le nylon peut être déchiqueté et fondu pour en faire des flocons ou des pastilles qui serviront à produire de nouveaux objets de nylon. Ce recyclage thermomécanique du textile de nylon (polyamide 6-6 ou polyamide 6) est peu répandu. Les grandes étapes de ce premier procédé sont les suivantes :

- 1) Tri des résidus ;
- 2) Nettoyage et séchage des résidus ;
- 3) Broyage ;
- 4) Fusion du polyamide 6-6 (sa température de fusion est relativement basse, 260 °C) ;
- 5) Moulage avec ajout de polyamide 6-6 vierge.

Ce second procédé permet de retirer la teinture et de recycler le nylon 6-6 provenant de tapis en fibres textiles de nylon de la qualité des fibres vierges :

- 1) Dissolution (5 minutes dans 1,4— butanediol à 150 °C) ;
- 2) Filtration à 150 °C ;
- 3) Précipitation ;
- 4) Filage par fusion à 275 °C à l'aide d'une extrudeuse mélangeuse.

Finalement, un mélange de fibres de nylon et de kevlar (1:1) peut être mélangé à sec avec du ciment et du sable, avant l'ajout d'eau, notamment pour améliorer la résistance du ciment à la compression et à la flexion et pour prévenir les ruptures. L'ajout de nylon à du béton en améliore la ductilité et la résistance à la compression. L'étude concernait du ciment utilisé en construction et soulignait un intérêt d'incorporer des déchets textiles dans des ciments pour en faire des trottoirs, des allées de maison et des routes.

Il existe aussi des procédés de recyclage chimique du textile de nylon :

- Dépolymérisation du polyamide 6-6 par micro-ondes ;
- Glycolyse du polyamide 6-6 avec de l'éthylène glycol et aminoglycolyse du polyamide 6-6 avec de l'éthylène glycol et de la triéthylènetétramine. Le résultat peut servir à la synthèse de polyuréthanes.

Références

Baloyi, R. B., Gbadeyan, O. J., Sithole, B. et Chuniwall, V. (2024). Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review. *Textile Research Journal*, 94(3-4), 508-529. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1177/00405175231210239>

Tonsi, G., Maesani, C., Alini, S., Ortenzi, M. A. et Pirola, C. (2023). Nylon recycling processes : a brief overview. *Chemical Engineering Transactions*, 100, 727-732. <https://doi.org/10.3303/CET23100122>

Mu, B., Shao, Y., Yu, X., McBride, L., Hidalgo, H. et Yang, Y. (2024). High-quality separation and recovery of nylon and dyes from waste carpet via non-destructive dissolution and controlled precipitation for sustainable recycling. *Separation and Purification Technology*, 332, 125801. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125801>

Tran, N. P., Gunasekara, C., Law, D. W., Houshyar, S. et Setunge, S. (2023). Repurposing of blended fabric waste for sustainable cement-based composite: Mechanical and microstructural performance. *Construction and Building Materials*, 362, 129785. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129785>

Qin, Y., Zhang, X. et Chai, J. (2019). Damage performance and compressive behavior of early-age green concrete with recycled nylon fiber fabric under an axial load. *Construction and building materials*, 209, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.094>

Asahi Kasei Corp. et Microwave Chemical Co., Ltd. (2023, 27 avril). *Asahi Kasei and Microwave Chemical launch joint demonstration project for chemical recycling of polyamide 66 using microwave-based technology*. <https://www.asahi-kasei.com/news/2023/e230427.html>

Datta, J., Błażek, K., Włoch, M. et Bukowski, R. (2018). A new approach to chemical recycling of polyamide 6.6 and synthesis of polyurethanes with recovered intermediates. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 4415-4429. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1314-4>

RECYCLAGE DE TISSU ARAMIDE POUR PRODUIRE DES NANOFIBRES D'ARAMIDE

La déprotonation (retrait d'un proton) assistée par un donneur de proton permet de produire des nanofibres d'aramide à une fraction des coûts du procédé impliquant des matières aramides vierges et en réduisant la durée du cycle de préparation. Ce procédé de recyclage est présenté comme « technologiquement et économiquement viable ». Le KOH, un alcali, permet de déprotoner les molécules qui composent les fibres d'aramide. Plus les charges négatives s'accumulent sur les molécules d'aramide (polyanions), plus elles se repoussent, jusqu'à ce que les liaisons hydrogène qui relient ces molécules se rompent. C'est ce qui permet d'obtenir des nanofibres. Le DMSO dissout les polyanions pour générer une dispersion.

La structure et les propriétés des fibres d'aramide ne sont pas significativement altérées à la fin de la vie utile d'un tissu aramide, et ce procédé n'est pas influencé par la forme des fibres d'aramide utilisées. Voici les grandes étapes du procédé réalisé en laboratoire :

- 1) Nettoyage des tissus avec de l'acétone et de l'eau désionisée ;
- 2) Déprotonation dans le système KOH/diméthylsulfoxyde (DMSO)/H₂O en 5 à 9 h (selon la concentration de fibres d'aramide) ;
- 3) Obtention d'une dispersion de nanofibres d'aramide et de DMSO.

Les nanofibres d'aramides peuvent être utilisées entre autres dans des batteries lithium-soufre pour les rendre plus sécuritaires et dans la composition d'isolants électriques pour de petits systèmes.

Références

Yang, B., Li, W., Zhang, M., Wang, L. et Ding, X. (2021). Recycling of high-value-added aramid nanofibers from waste aramid resources via a feasible and cost-effective approach. *ACS nano*, 15(4), 7195-7207. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1021/acsnano.1c00463>

Zheng, S., Zhang, H., Fan, J., Xu, Q. et Min, Y. (2020). Improving electrochemical performance and safety of lithium–sulfur batteries by a “Bulletproof Vest”. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(46), 51904-51916. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1021/acсами.0c13130>

Zeng, F., Chen, X., Xiao, G., Li, H., Xia, S. et Wang, J. (2019). A bioinspired ultratough multifunctional mica-based nanopaper with 3D aramid nanofiber framework as an electrical insulating material. *ACS nano*, 14(1), 611-619. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1021/acsnano.9b07192>

APERÇU DES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE DU TEXTILE DE POLYESTER

Recyclage mécanique du polyester pour la fabrication de matériau non tissé de type feutre

- 1) Défibrage du textile propre (1 à 2 h nécessaires pour 1000 kg);
 - a. Découpage en morceaux d'environ 5 cm ;
 - b. Déchiquetage du textile pour obtenir des fibres et des morceaux de moins de 2 cm.
- 2) Compaction des fibres pour le transport (balles de 500 kg), si nécessaire ;
- 3) Réouverture et mélange des fibres, si compactées ;
- 4) Mélange des fibres issues de textile (40 %) avec du polyester recyclé issu de bouteilles de plastique (50 %) et des fibres de polyester bicomposées (10 %, liant).
- 5) Cardage (obtention de fibres parallèles), nappage (formation de couches de fibres croisées), aiguilletage (positionnement de fibres à la verticale pour emmêler les différentes couches) et calandrage (pressage à 100 °C) des fibres pour créer un matériau non tissé d'une épaisseur d'environ 5 mm semblable à du feutre.

Ce procédé s'inscrit dans un projet pilote visant à développer le recyclage des textiles post-consommation au Canada à travers une chaîne d'approvisionnement impliquant des acteurs déjà établis au pays. Sans tenir compte de la collecte et du tri des textiles, le processus de production de ce feutre a impliqué une entreprise chargée du défibrage et une entreprise chargée de la production du tissu non tissé. Ce matériau a ensuite été utilisé pour fabriquer des paniers à linge vendus chez Canadian Tire, qui était également l'acteur responsable de la fabrication des produits finis à partir du feutre de polyester recyclé. Le prix de vente était près des coûts de production. Pour ce qui est de la capacité de traitement de ce procédé dans le cadre du projet pilote, à partir des 1000 kg de textile récupérés, un total de 1410 paniers a été produit, à un rythme de 75 à 80 paniers par jour.

Recyclage thermomécanique du textile 100% polyester

Le procédé de recyclage appliqué aux emballages de PET pourrait être utilisé pour les textiles faits de ce matériau :

- 1) Déchiquetage du textile ;
- 2) Fusion (à plus de 260 °C) ;
- 3) Formation de flocons ou de pastilles qui serviront à produire de nouveaux produits en plastique ou des fibres.

Le recyclage de fibres de polyester en nouvelles fibres textiles n'est toutefois pas établi à l'échelle industrielle. La fusion répétée du polyester, son extrusion et son moulage par injection donnent lieu à une dégradation de certaines de ses propriétés.

Initiatives et procédés de recyclage chimique du textile de polyester (pet)

- Dissolution (plusieurs solvants possibles pour la dépolymérisation, dont l'éthylène glycol [Jeplan]);
- Dépolymérisation par micro-ondes (gr3n, objectif de produire 40 000 tonnes de PET recyclé et d'éviter l'émission de 2 millions de tonnes de CO₂);
- Dépolymérisation enzymatique (Carbios);
- Hydrolyse permettant de décolorer le textile et d'obtenir de l'acide téréphtalique (traitement au Ca(OH)₂ [43 %, 25 minutes dans un réacteur à 270 °C et 25 rpm] et hydrolyse dans l'eau à 100 °C) (Li et al., 2022).

Références

Drennan et al. (2023). *Creating a Textile Recycling Supply Chain*. Fashion Takes Action. https://fashiontakesaction.com/wp-content/uploads/2023/11/Creating-a-Textile-Recycling-Supply-Chain_FINAL.pdf

Harmsen, P., Scheffer, M. et Bos, H. (2021). Textiles for circular fashion: The logic behind recycling options. *Sustainability*, 13(17), 9714. <https://doi.org/10.3390/su13179714>

Duhoux et al. (2021). *Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling - Final Report*. European Commission. https://www.centexbel.be/sites/default/files/inline-files/DGgrow-study-textile-recycling_0.pdf

Jeplan. (s.d.). *BRING Technology – Making clothing from clothing*. <https://www.jeplan.co.jp/en/technology/fashion/>

gr3n. (s.d.). *The project grows again with a new grant*. <https://www.gr3n-recycling.com/project-1.html>

gr3n. (2023, 24 juillet). *gr3n to build in Spain – the first-of-a-kind manufacturing plant for microwave assisted depolymerization of PET in partnership with Intecsa Industrial*. gr3n communication. <https://blog.gr3n-recycling.com/2023/07/24/gr3n-to-build-in-spain-the-first-of-a-kind-manufacturing-plant-for-microwave-assisted-depolymerization-of-pet-in-partnership-with-intecsa-industrial/>

Carbios. (s.d.). *Enzymatic recycling: removing the constraints of current processes*. <https://www.carbios.com/en/enzymatic-recycling/>

Li, Y., Yi, H., Li, M., Ge, M. et Yao, D. (2022). Synchronous degradation and decolorization of colored poly (ethylene terephthalate) fabrics for the synthesis of high purity terephthalic acid. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132985. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132985>

