

Etat des lieux des études sur le relargage de micro-fragments des TLC avec un focus sur la fin de vie

Re_fashion

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble des acteurs consultés qui ont contribué à cette étude (listé en Annexe D).

SYNTHESE

La contamination des milieux naturels par les micro-fragments issus des textiles d'habillement, du linge de maison et des chaussures (TLC) représente un enjeu environnemental et sanitaire croissant. Le terme « micro-fragments » est ici retenu pour englober l'ensemble des émissions, qu'elles soient d'origine synthétique, artificielle ou naturelle, qu'il s'agisse des microfibrilles relarguées par les textiles ou des microparticules générées par l'usure des chaussures, en réponse aux limites des définitions existantes qui excluent encore trop souvent les fibres non plastiques.

Si la littérature scientifique s'est majoritairement concentrée sur les émissions survenant lors des phases de production et d'usage, en particulier au lavage, les étapes de fin de vie restent un angle mort significatif, alors même que les politiques publiques orientent massivement la filière vers la circularité. Ce rapport vise à dresser un état des lieux des connaissances et des lacunes relatives au relargage de micro-fragments lors des voies de valorisation des TLC – seconde-main, recyclage mécanique (boucle fermée et ouverte), thermomécanique et chimique – à partir d'une revue systématique de la littérature disponible complétée par des entretiens avec des acteurs de la filière.

Concernant l'allongement de la durée de vie des TLC, les rares études disponibles suggèrent que le vieillissement des textiles influe sur leur propension à relarguer des micro-fragments, notamment lors du lavage et sous exposition aux UV. Toutefois, ces travaux sont menés dans des conditions de laboratoire qui ne reproduisent pas les conditions réelles de porté, ce qui limite fortement la robustesse des conclusions. Le potentiel de relargage lié au vieillissement naturel en usage reste ainsi très insuffisamment caractérisé, en particulier pour les fibres naturelles, artificielles et biosourcées.

Les résultats relatifs aux procédés de recyclage mettent en évidence des émissions à deux niveaux distincts : lors des opérations elles-mêmes (découpe, délissage, broyage, défibrage, effilochage) et de manière indirecte, via les propriétés des fibres recyclées intégrées dans les produits finis, dont le comportement en termes de relargage lors de l'usage reste à ce jour insuffisamment documenté pour permettre des conclusions définitives. Parmi les procédés étudiés, la voie chimique apparaît comme celle présentant le moins d'impacts, tant lors du recyclage que lors de l'incorporation des matières recyclées, dans la mesure où elle restitue des fibres dont la qualité est à priori équivalente à celle des fibres vierges ; les données disponibles restent néanmoins insuffisantes pour le confirmer.

Les chaussures, et particulièrement les semelles, constituent un angle mort persistant : leur contribution aux émissions est vraisemblablement significative, mais aucune méthode normalisée ne permet à ce jour de la quantifier, et les exigences techniques imposées aux matières recyclées incorporées – identiques à celles des semelles vierges – devraient constituer un facteur limitant des impacts potentiels.

Ces résultats soulignent l'urgence de développer des protocoles de mesure standardisés couvrant l'ensemble du cycle de vie et des milieux de dépôt (eau, air, sol), ainsi que de mener des études spécifiques sur l'impact des procédés de recyclage et du vieillissement des matières. Ils appellent également à sensibiliser et former les acteurs de la filière aux enjeux des micro-fragments et aux bonnes pratiques permettant de les limiter. Enfin, une approche collaborative associant chercheurs, industriels et pouvoirs publics apparaît indispensable pour partager les connaissances et co-construire des solutions adaptées. Ce rapport ne remet pas en cause les bénéfices environnementaux globaux de la circularité, mais souligne la nécessité de mieux caractériser ses impacts en termes d'émissions de micro-fragments.

Rapport rédigé par : JED INNOVATION et REFASHION

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	2
SYNTHESE	2
SIGLES & ACRONYMES	5
I. Introduction & contexte	6
A. Contexte et enjeux	6
i. Une pollution omniprésente et sous-estimée.....	6
ii. Trois milieux concernés, trois défis	6
iii. Impacts sanitaires : au-delà des microplastiques	7
iv. Cycle de vie : un déséquilibre des connaissances	8
v. La chaussure : le grand oublié.....	8
vi. Fin de vie : l'angle mort des études.....	9
B. Cadre de définitions	9
i. Micro-fragments, microfibrilles, microplastiques : de quoi parle-t-on ?.....	9
ii. Classification des matières et ambiguïtés réglementaires.....	10
C. Méthodes et cadre réglementaire : l'essentiel.....	11
i. Normes de mesure : focus sur le lavage.....	11
ii. Cadre réglementaire : vers une prise en compte progressive.....	11
II. Les impacts des voies de valorisation	12
A. Seconde-main	12
i. Impact du vieillissement des vêtements/linge de maison/tiges textiles sur le relavage de micro-fragments	12
ii. Impact du vieillissement des semelles de chaussures sur le relavage de micro-fragments.....	13
iii. Axes d'amélioration.....	14
B. Recyclage & incorporation de matière recyclée.....	14
i. La préparation matière	15
ii. Recyclage mécanique en boucle fermée.....	16
iii. Recyclage mécanique en boucle ouverte	18
iv. Recyclage thermomécanique	20
v. Recyclage chimique.....	22
vi. Recyclage chaussures	23
C. Déchets Ultimes	25
III. Mise en perspective avec les autres étapes du cycle de vie.....	26
A. Impact des phases de production de textile.....	26
B. Impacts des phases de production des chaussures.....	27
C. Impacts de la phase d'utilisation	28

IV. Conclusion globale et perspectives.....	30
V. Annexes.....	32
A. Annexe A : Définitions.....	32
i. Dimension.....	32
ii. Origine.....	33
iii. Matière.....	34
B. Annexe B : méthodologies de mesures et normes.....	36
i. Les méthodologies de mesure.....	36
ii. Les limites des méthodes de mesures et normes.....	38
C. Annexe C : Contexte réglementaire et affichage environnemental.....	39
i. REACH.....	39
ii. France.....	39
iii. PEFCE.....	39
iv. Affichage environnemental français.....	39
D. Annexe D : Liste des acteurs interrogés.....	40
E. Annexe E : Références bibliographiques spécifiques aux impacts de production textiles sur le relargage de micro-fragments.....	41
Références bibliographiques.....	42

SIGLES & ACRONYMES

ACV	Analyse de Cycle de Vie
APPLIA	Association Européenne des appareils ménagers
BIOTA	Ensemble des êtres vivants (faune et flore) d'une région, formant une unité autonome de matière vivante
CETIA	Centre Technologique dédié à la recyclabilité des articles textiles et cuir
CTTN	Institut de Recherche sur l'Entretien et le Nettoyage
ECHA	European Chemicals Agency
EVA	Ethylène Acetate de vinyle
IGEDD	Institut de Gestion Durable du Développement
ISO	International Organization for Standardization
IPC	Institut de la Plasturgie et des Composites
JRC	Joint Research Centre (Centre Commun de Recherche de la Commission européenne)
MFC	MicroFiber Consortium
MariLCA	Marine Litter Life Cycle Assessment
MPR	Matière Première Recyclée
OCS	Operation Clean Sweep
PA	Polyamide
PEFCR	Product Environmental Footprint Category Rules
PES	Polyester
PET/PES	Polyéthylène Terephtalate
PFAS	Substances per et fluoroalkylées
PU	Polyurethane
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (règlement européen sur les substances chimiques)
TDS	Total Dissolved Solid
TLC	Textiles, Linges de maison et Chaussures
TOC	Total Organic Content
WRAP	Waste and Resources Action Programme

I. Introduction & contexte

Cette section pose les bases nécessaires à la compréhension de la Partie 2 consacrée aux impacts des voies de valorisation. Des informations sur les autres étapes du cycle de vie, les définitions et les normes sont présentées en section III et en Annexes.

A. Contexte et enjeux

i. Une pollution omniprésente et sous-estimée

La problématique des microplastiques occupe une place croissante dans les débats environnementaux, notamment dans le secteur textile. Selon les études récentes, **entre 15 et 35% des microplastiques présents dans l'environnement pourraient provenir des textiles synthétiques**¹, une estimation qui ne concerne que les fibres synthétiques et exclut les fibres naturelles et artificielles, pourtant tout aussi présentes et potentiellement impactantes. Ces chiffres sont à prendre avec précaution, car ils peuvent être relativement variables selon les sources et les définitions utilisées.

Si les chiffres mentionnent systématiquement les textiles synthétiques (incluant les tiges des chaussures concernées), les impacts des chaussures et particulièrement des **semelles sont peu documentés** (sans doute confondus avec les émissions des pneus). Seule l'étude du Fraunhofer² mentionne l'usure des chaussures comme la 7ème cause de production de microplastiques.

Dans le cadre des textiles, linges de maison et chaussures (TLC), les émissions peuvent donc prendre plusieurs formes (fibres, fragments, poussières, particules) et présenter plusieurs natures chimiques (synthétiques, naturelles, artificielles). **Nous utilisons le terme « micro-fragments » pour englober l'ensemble de ces émissions**, bien que les définitions, les réglementations et les études citées fassent plutôt appel aux notions de microplastiques ou microfibrilles.

ii. Trois milieux concernés, trois défis

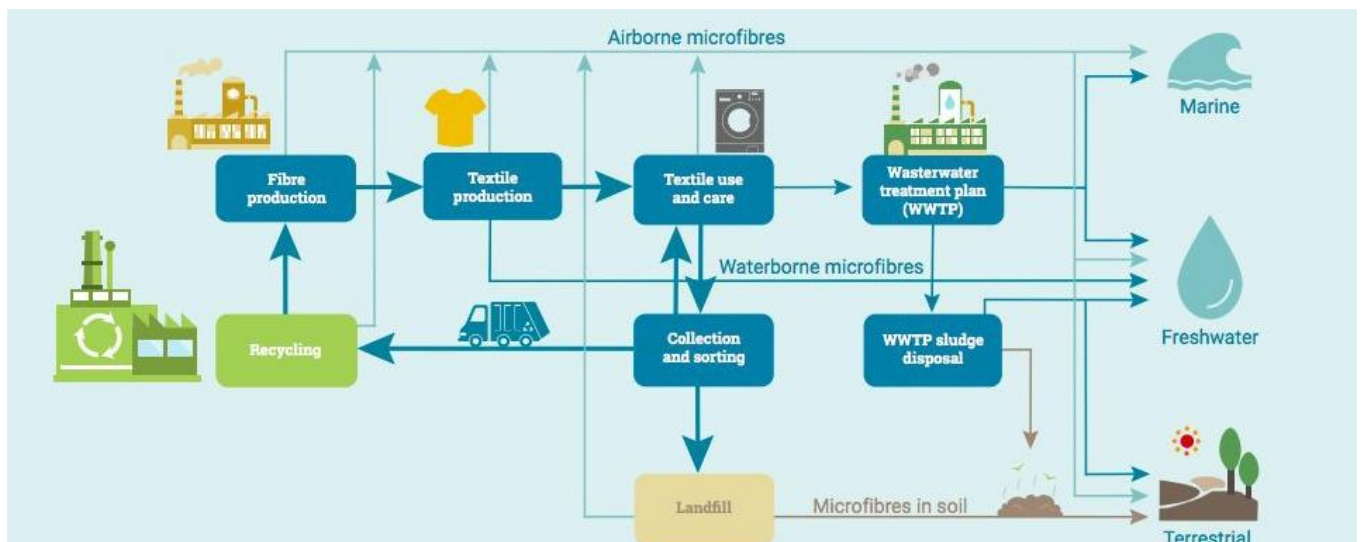


Figure 1 : Sources et diffusions potentielles de micro-fragments³-Exemple textile

¹ <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/microplastics-from-textiles-towards-a-circular-economy-for-textiles-in-europe>

² Kunststoffe in der Umwelt: mikro und makroplastik, Bertling and al; Fraunhofer Institute publication, 2018

³ Microfiber Pollution in the Earth System, Liu and al, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (2022) 260:13

Les flux d'émissions de micro-fragments se retrouvent dans **trois milieux de la biosphère**, chacun posant des défis spécifiques de mesure et d'évaluation :

Le milieu aquatique concentre l'essentiel des études, avec des estimations allant jusqu'à 3 milliards de tonnes/an de microplastiques se déversant dans les océans et les rivières⁴. C'est de loin le milieu le mieux documenté, notamment via les études sur les émissions lors du lavage domestique.

Le milieu terrestre révèle une contamination préoccupante : une étude de l'ADEME en 2025⁵ a détecté des microplastiques dans **76% des sols français analysés**. La part de responsabilité des TLC reste mal quantifiée, mais l'ubiquité de cette pollution souligne l'urgence d'une meilleure compréhension des sources.

Le milieu aérien demeure le moins quantifié. Une étude menée entre 2016 et 2022 montre néanmoins que les fibres d'origine cellulosique seraient environ **2,5 fois plus nombreuses que les fibres synthétiques dans l'atmosphère**⁶, bien que la tendance s'inverse progressivement. Cette pollution aérienne soulève des enjeux sanitaires spécifiques, notamment dans les milieux professionnels.

La répartition des micro-fragments dans les trois milieux n'est pas connue avec certitude et de nombreuses difficultés de prélèvements et mesures existent encore. Cependant, **il existe une certitude : les impacts de ces micro-fragments sont réels dans les trois écosystèmes**⁷.

iii. Impacts sanitaires : au-delà des microplastiques

Au-delà des impacts environnementaux, les micro-fragments posent des **risques sanitaires avérés, quelle que soit leur origine et composition**. Cette réalité est trop souvent occultée par le focus exclusif sur les microplastiques synthétiques.

Les **fibres naturelles**, souvent perçues comme inoffensives, sont pourtant liées à des pathologies reconnues. La **byssinose**⁸, maladie pulmonaire professionnelle due à l'exposition chronique aux poussières de coton, de lin ou de chanvre, en est l'illustration la plus documentée. Des études récentes (2025)⁹ rappellent l'importance des plans d'action et de réhabilitation pour cette pathologie encore présente dans l'industrie textile.

Les **fibres artificielles et naturelles** montrent également des effets nocifs sur la faune. Des études sur les bivalves¹⁰ et les vers de terre¹¹ révèlent que les microfibrilles biosourcées peuvent être parfois tout aussi impactantes que leurs équivalents synthétiques, remettant en question l'idée d'une innocuité des matières "naturelles".

Un chiffre clé souvent ignoré : contrairement aux idées reçues, **environ 70% des micro-fragments seraient d'origine naturelle** selon de nombreuses études rassemblées par le MFC¹². Cette réalité souligne l'importance d'une approche globale, ne se limitant pas aux seuls microplastiques.

⁴ https://www.e-a.earth/wp-content/uploads/2024/05/EA_2024_Update_Primary_Microplastics.pdf

⁵ <https://infos.ademe.fr/economie-circulaire-dechets/2025/microplastiques-une-contamination-potentiellement-importante-des-sols-francais/>

⁶ Man-made natural and regenerated cellulosic fibres greatly outnumber microplastic fibres in the atmosphere, Finnegan and al., Environmental Pollution 310 (2022)

⁷ Microfibres: the invisible pollution from textiles, The First Sentier MUFG Sustainable Investment Institute, 2022

⁸ <https://lemedecin.fr/medical/pathologies/byssinose.html>

⁹ Strategic overview of rehabilitation practices and action plans for byssinosis: A holistic review; Vaishali and al.; Clinical Epidemiology and Global Health Vol 33, 2025

¹⁰ On the horns of a dilemma: Evaluation of synthetic and natural textile microfibre effects on the physiology of the pacific oyster *Crassostrea gigas*, Detrée and al., Environmental Pollution Volume 331, Part 2, 15 August 2023

¹¹ Are Biobased Microfibers Less Harmful than Conventional Plastic Microfibers: Evidence from Earthworms, Courtene Jones and al., Environ. Sci. Technol. 2024, 58, 20366–20377

¹² Micro Fiber Consortium: Behind The Break 2025

iv. Cycle de vie : un déséquilibre des connaissances

Les micro-fragments sont émis **tout au long du cycle de vie d'un textile**, depuis sa production jusqu'à sa fin de vie. En se basant sur les travaux de l'Institut "The First Sentier MUFU Sustainable Investment Institute"⁷ et sur les données de Boucher et Friot (2017), on peut estimer une répartition approximative :

- ~50% des émissions : **production** (filature, tissage/tricotage, ennoblissement)
- ~25% des émissions : **porté** (friction, usure mécanique)
- ~25% des émissions : **lavage** (le mieux documenté)
- **Fin de vie : données quasi inexistantes**

Attention les intervalles de confiance de ces estimations sont extrêmement larges, et il existe un manque d'études systémiques permettant de quantifier précisément les flux à chaque étape.

Le MFC a réalisé une cartographie qualitative complète des voies d'émissions le long du cycle de vie¹³ identifiant les flux directs et par redistribution dans les trois milieux (eau, air, terre). Cette cartographie sera présentée en détail en Section III. Si les différentes voies sont plus ou moins bien identifiées, les données quantitatives fiables font cruellement défaut, particulièrement pour les phases de production et de fin de vie.

Le paradoxe de la recherche actuelle est que la très grande majorité des études se concentrent sur les émissions après lavage – la phase la plus facile à étudier en laboratoire via les normes ISO – alors que cette phase ne représenterait qu'environ 25% des émissions totales. La phase de production (50% estimé) reste largement sous-étudiée.

Une étude de revue de 2024 portant sur 57 articles¹⁴ révèle un problème méthodologique majeur : **81% des études ne sont pas concluantes** concernant l'impact des paramètres de conception sur les émissions de micro-fragments. Cette situation s'explique par :

- Des méthodologies non standardisées rendant les comparaisons impossibles ;
- Des biais expérimentaux multiples ;
- Un manque de reproductibilité des résultats ;
- Une focalisation excessive sur le lavage, au détriment des autres étapes.

v. La chaussure : le grand oublié

Il n'existe **aucune étude systématique sur les émissions de micro-fragments durant le cycle de vie complet d'une chaussure**. Les rares travaux existants concernent l'usure des semelles en usage (assimilée aux émissions des pneus), mais les phases de production des semelles, des tiges textiles, et surtout la fin de vie, sont totalement absentes de la littérature.

Dans ce rapport, nous assimilons les tiges textiles aux textiles d'habillement et linge de maison, bien que cette hypothèse présente des limites importantes : les tiges ne subissent pas les mêmes contraintes (pas de lavage domestique, friction différente) et utilisent souvent des matériaux composites complexes.

Aucune méthode de mesure normalisée n'est disponible pour les chaussures, que ce soit pour les tiges ou les semelles, et ce quel que soit le milieu (eau, air, terre).

¹³ Micro Fiber Consortium: Behind The Break 2025

¹⁴ Emission of fibres from textiles: A critical and systematic review of mechanisms of release during machine washing, Tedesco and al., Science of The Total Environment, Volume 955, 10 December 2024

vi. *Fin de vie : l'angle mort des études*

Ce constat général met en lumière **une lacune majeure : la fin de vie des TLC reste un angle mort** en termes d'émissions de micro-fragments. C'est pourtant à ce stade que se jouent des enjeux cruciaux dans une perspective d'économie circulaire.

Le **réemploi** et les processus de **recyclage**, bien que vertueux pour réduire les impacts environnementaux et notamment la consommation de ressources vierges, **peuvent également contribuer à la libération de micro-fragments dans l'environnement** :

- Les opérations de découpe, broyage, effilochage génèrent-elles des émissions significatives ?
- Le vieillissement des textiles en réemploi augmente-t-il leur propension à émettre des micro-fragments ?
- Les matières recyclées intégrées dans de nouveaux produits ont-elles des comportements différents en termes d'émissions ?
- Quels sont les flux d'émissions dans les différentes technologies de recyclage (mécanique, thermomécanique, chimique) ?

Ces questions fondamentales restent largement sans réponse, alors même que les politiques publiques (AGEC, Green Deal européen) et les stratégies industrielles s'orientent massivement vers la circularité.

Ce rapport propose donc un focus spécifique sur les phases avales du cycle de vie des TLC : réemploi, réutilisation et recyclage (mécanique, thermomécanique, chimique). L'objectif est de :

1. **Faire ressortir ce qui est connu** : rassembler les rares études existantes sur les émissions en fin de vie
2. **Identifier ce qui manque** : cartographier les lacunes de connaissances et les besoins de recherche
3. **Poser les bonnes questions** : orienter les futurs travaux pour concilier circularité et limitation des émissions de micro-fragments
4. **Proposer des axes d'amélioration** : identifier les leviers d'action pour réduire les impacts

La Section II de ce rapport constitue donc le cœur de l'étude, explorant systématiquement chaque voie de fin de vie et son impact potentiel en termes d'émissions de micro-fragments.

B. Cadre de définitions

i. Micro-fragments, microfibrilles, microplastiques : de quoi parle-t-on ?

Comme dit précédemment, considérant la diversité des produits et compositions des TLC, **nous utilisons le terme « micro-fragments » pour regrouper l'ensemble des émissions : microfibrilles –naturelles, artificielles ou synthétiques – et microplastiques.**

Consensus sur les dimensions

Malgré des variations selon les sources, **un consensus émerge sur la dimension maximale : 5 mm dans au moins une dimension.** Les principales définitions internationales convergent vers cette limite, avec des nuances pour les fibres.

ORGANISATIONS	DIMENSION RETENUE	PARTICULARITES
ECHA/REACH ^{15,16}	Particules : 0,1 µm - 5 mm Fibres : 0,3 µm - 15 mm	Ratio longueur/diamètre > 3
MICROFIBER CONSORTIUM ¹⁷	< 5 mm	Ratio L/D > 100 pour microfibres
WRAP ¹⁸	Longueur < 5 mm	Définition textile
IGEDD/PEFCR ^{19,20}	< 5 mm toutes directions	Microplastiques et microfibres

Tableau 1 : principales définitions

La notion de facteur de forme (ratio longueur/diamètre) reste plus variable selon les définitions, compliquant les comparaisons entre études. Certaines utilisent un ratio de 3, d'autres de 100, selon qu'on parle de microplastiques en général ou de microfibres textiles spécifiquement.

Plus de détails sur les définitions sont donnés en Annexe A.

ii. Classification des matières et ambiguïtés réglementaires

Pour les textiles, on distingue classiquement :

- **Matières naturelles** (coton, laine, lin) – polymères naturels non modifiés
- **Matières artificielles** (viscose, lyocell, acétate) – polymères naturels chimiquement modifiés
- **Matières synthétiques** (polyester, polyamide, acrylique) – polymères de synthèse

La définition européenne REACH de microplastiques inclut les **polymères synthétiques ou naturels chimiquement modifiés**²¹. Une **zone grise persiste quant à la classification** des fibres artificielles (viscose, lyocell) en fibres plastiques. Les avis divergent selon les sources. Pour les chaussures, le caoutchouc naturel des semelles n'est pas clairement positionné.

Les fibres naturelles organiques (animales ou végétales) sont exclues des définitions réglementaires car non modifiées chimiquement, bien qu'elles représentent **~70% des micro-fragments émis** selon le MFC²². Cette prédominance est expliquée par l'usage massif des fibres naturelles et cellulosiques et par leur plus forte propension à se fragmenter, car elles sont souvent utilisées en fibres discontinues (staple) et dans des constructions qui relarguent davantage que les filaments continus.

Dans la suite de ce rapport nous utiliserons les termes suivants :

- **Microfibres** : fibres relarguées par les textiles ou tiges de chaussures, toutes matières confondues (naturelles, artificielles et synthétiques)
- **Microparticules** : particules relarguées par les semelles de chaussures, toutes matières confondues (naturelles, artificielles et synthétiques)
- **Micro-fragment** : terme englobant qui regroupe alors les deux types de relargage cités ci-dessus, les microfibres et les microparticules.

¹⁵ ECHA, Background document to RAC and SEAC opinions on intentionally added microplastics, 2020

¹⁶ RÈGLEMENT (UE) 2023/2055 DE LA COMMISSION du 25 septembre 2023

¹⁷ Micro Fiber Consortium: Behind The Break 2025

¹⁸ WRAP - Textile derived microfibre release: Investigating the current evidence base. Textile derived microfibre release, 2019

¹⁹ IGEDD, La pollution par les microplastiques d'origine textile, Rapport n° 014908-01, Septembre 2023

²⁰ Implementation of microplastics and microfibers impact in the EF (physical effects on BIOTA impact category), Draft Working Document Oct 2025

²¹ RÈGLEMENT (UE) 2023/2055 DE LA COMMISSION du 25 septembre 2023

²² Micro Fiber Consortium: Behind The Break 2025

Pour plus de détails sur les définitions, débats et ambiguïtés, voir Annexe A.

C. Méthodes et cadre réglementaire : l'essentiel

i. Normes de mesure : focus sur le lavage

Constat principal : La très grande majorité des normes concernent la mesure de micro-fragments **après lavage**. Aucune méthode normalisée n'existe pour des prélèvements dans l'atmosphère ou les sols. Aucune méthode n'est disponible pour les chaussures.

Trois normes ISO constituent le socle actuel :

- **ISO 4484-1:2023** – Pertes de matière des étoffes pendant le lavage
- **ISO 4484-2** – Évaluation qualitative et quantitative des microplastiques (échantillons solides, liquides, aériens)
- **ISO 4484-3:2023** – Mesure de la masse en sortie de machine à laver

Limitations critiques : Ces normes ne couvrent que les micro-fragments **plastiques** (pas d'équivalent pour les fibres naturelles et artificielles) et excluent les chaussures. Le MFC recense de nombreuses autres méthodes propriétaires²³ rendant les comparaisons entre études quasi impossibles.

ii. Cadre réglementaire : vers une prise en compte progressive

REACH (UE, 2023)²⁴: Restriction des microplastiques ajoutés intentionnellement. **Les TLC ne sont pas explicitement inclus**, les micro-fragments étant considérés comme non intentionnels. Les fibres naturelles ne sont pas concernées.

Loi AGECE (France, 2024)²⁵ : Interdiction similaire. Obligation prévue de filtre à microfibrilles sur les machines à laver prévu depuis le 1^{er} janvier 2025, mais le décret d'application n'est pas encore paru à la date de publication de cette étude.

PEFCR Apparel & Footwear 3.1 (EU, 2025)²⁶ : Dans ce cadre restrictif de la méthodologie européenne du Product Environment Footprint (PEF) datant de 2022 où l'impact des micro-fragments est absent, le Technical Secretariat du PEFCR Apparel & Footwear a tout de même ajouté le premier module d'impact des fragments de fibres avec inventaire, facteurs d'impact et exemples. Chaque étude PEF sur les secteurs textile et chaussure doit désormais mesurer les rejets de microplastiques en plus des indicateurs classiques. Ces facteurs d'impact se basent sur les résultats du projet MarILCA, qui devraient être mis à jour en 2026²⁷.

Affichage environnemental français²⁸: Inclut un complément hors-ACV sur un critère microfibrilles (70% biodégradabilité + 30% relargage) en se basant sur la composition déclarée des vêtements et des facteurs issus du projet MarILCA. Le complément « Microfibrilles » vient s'ajouter directement au coût environnemental exprimé en points.

Pour plus de détails sur les normes, leurs limites et le contexte réglementaire, voir Annexe B : méthodologies de mesures et normes.

²³ Micro Fiber Consortium: Behind The Break 2025

²⁴ <https://trade.ec.europa.eu/access-to-markets/fr/news/restriction-des-microplastiques-dans-lue-partir-du-17-octobre-2023>

²⁵ https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000041553847

²⁶ <https://pefapparelandfootwear.eu/>

²⁷ <https://marilca.org/>

²⁸ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/affichage-environnemental-vetements>

II. Les impacts des voies de valorisation

La Section II de ce rapport vise à combler les lacunes identifiées en faisant un état des lieux des connaissances et des manques sur les impacts en fin de vie : réemploi, réutilisation et recyclage des TLC.

Ce chapitre se concentre sur les impacts après le tri. Le schéma suivant reprend les différentes voies potentielles de devenir des TLC. Les exutoires élimination/valorisation énergétique sont exclus de l'étude.

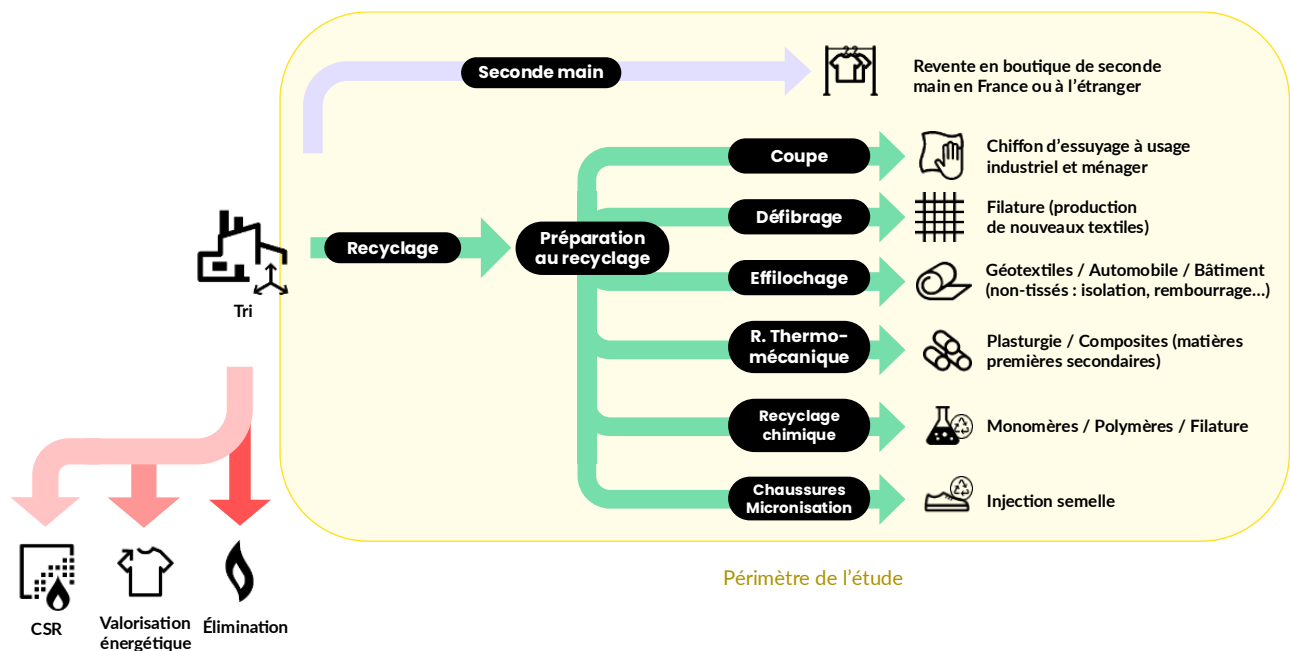


Figure 2 : Le devenir des TLC usagés après tri

A. Seconde-main

Dans le cadre de cette étude le réemploi et la réutilisation seront étudiés de la même façon et regardés du point de vue de l'allongement de la durée de vie des TLC.

Peu de rapports ou d'articles ont étudié l'évolution de la quantité de micro-fragments relargués au cours de la vie d'un produit.

i. *Impact du vieillissement des vêtements/linge de maison/tiges textiles sur le relargage de micro-fragments*

Une étude de synthèse menée par l'APPLIA²⁹, montre qu'on observe souvent une diminution des émissions après un premier lavage, puis une stagnation des émissions après un certain nombre de lavages (certaines études vont jusqu'à 48 lavages). Cependant dans l'ensemble des études, les produits ne sont pas portés en conditions réelles entre chacun des lavages, ce qui limite les conclusions que l'on peut tirer. Des tests sur de vieux vêtements (de 1 à 31 ans) ont montré que des pics de relargage avait également lieu lors du 1^{er} lavage après utilisation. Lors de ce « 1^{er} lavage », les vêtements utilisés en conditions réelles de portée ont relargué jusqu'à deux fois plus de micro-fragments que des vêtements récents non-portés, démontrant l'effet de l'usure lors de

²⁹ Updated Literature Review on Microplastics from Household Washing Machines (2020-2024), RISE Research Institutes of Sweden AB, 2024

la phase d'utilisation sur la production de micro-fragments. Ces vêtements usagés atteignent également un plateau de relargage si des lavages successifs sont effectués sans phase de port intermédiaire, de façon similaire aux vêtements neufs. A noter que l'étude principale menée sur ce sujet³⁰ concerne des vêtements en coton/polyester. La différence de relargage de micro-fragments entre vêtements neufs et vieux est d'autant plus importante que le taux de coton est élevé, suggérant que ce dernier résiste moins au vieillissement naturel, lors de l'usage. Ce phénomène a été très peu étudié et des études complémentaires seraient sans doute à mener.

Impact du vieillissement sur la qualité des fibres

Des travaux, notamment menés par les équipes du Dr. Nowack^{31,32} principalement sur les fibres polyester, montrent une dégradation de l'état de surface des fibres durant les vieillissements en exposition aux UV (reproduisant l'usage en plein air). Cette dégradation est accompagnée d'un relargage de micro-fragments et surtout nano-fragments de formes différentes de ceux observés après les lavages. Ce relargage peut avoir lieu dans le milieu aqueux (lavage) mais également aérien lors du porté. Les premiers résultats montrent que le potentiel de relargage durant le vieillissement « naturel » pourrait être plus important que le lavage en machine.

Des études du même type seraient intéressantes à mener sur des matières naturelles, artificielles et matières plastiques biosourcées.

ii. Impact du vieillissement des semelles de chaussures sur le relargage de micro-fragments

Bien que peu étudié de façon systématique, l'usage des chaussures est une source non négligeable de micro-fragments. Des travaux du Fraunhofer Institut³³ classe même l'usage des chaussures comme la 7ème source d'émissions de microplastiques, devant le lavage textile et les emballages. Les semelles sont majoritairement composées de matières synthétiques et de caoutchouc partiellement d'origine naturelle.

Il existe également quelques études sur les impacts du running^{34,35} mais de façon générale la littérature est très pauvre sur cette thématique.

Parmi les paramètres qui vont conduire à la dégradation des semelles et donc la production de microparticules on peut noter, selon les polymères³⁶ :

- La dégradation UV : une forte exposition aux UV peut conduire à des ruptures de chaînes des polymères et donc à une plus grande fragilité/friabilité
- La température : une utilisation des chaussures à des températures élevées entraîne une augmentation du taux d'abrasion ;
- La capacité de résistance à la fatigue : les semelles de chaussures sont très sollicitées lors des marches ou running. Des matières peu résistantes à la fatigue risquent d'induire des émissions accrues de micro-fragments.

Un point de vigilance particulier, mis en avant dans les études, est l'impact non seulement des micro-fragments en tant que tels, mais surtout du relargage d'additifs et molécules dont ils sont responsables. Les micro-fragments des chaussures pénètrent le sol via des processus de lixiviation et peuvent relarguer différents additifs

³⁰ Effect of the age of garments used under real-life conditions on microfibre release from polyester and cotton clothing, Fernandes and al., Environmental Pollution Volume 348, 2024

³¹ Formation of nanoparticles during accelerated UV degradation of fleece polyester textiles, Yang and al., NanoImpact 35 (2024) 100520

³² Characterization of fiber fragments released from polyester textiles during UV weathering, Pinlova and al., Environmental Pollution 322 (2023) 121012

³³ Kunststoffe in der Umwelt: mikro und makroplastik, Bertling and al; Fraunhofer Institute publication, 2018

³⁴ Microplastic accumulation on urban footpaths: microplastic deposition on concrete and asphalt surfaces after a single running event; Van Der Werf and al., International Journal of Environmental Science and Technology, Volume 23, article number 102

³⁵ Plastics on the rocks: the invisible but harmful footprint of shoe soles; Cecchi; Comptes Rendus. Géoscience, Volume 355 (2023), pp. 135-144

³⁶ <https://wasserdreinnull.de/en/blog/microplastics-from-shoe-soles/>

(présents en grand nombre dans les semelles : anti-abrasion, anti UV, agents de process, plastifiant, etc.) pouvant avoir des impacts négatifs sur l'écosystème^{37,38}.

iii. Axes d'amélioration

Des études complémentaires seraient à mener sur l'influence de la durée de vie des TLC sur le relargage de micro-fragments.

De nombreuses études existent sur les impacts des paramètres de production sur le relargage de micro-fragments en machine mais très peu d'études traitent du vieillissement en usage réel du textile et encore moins des chaussures.

Des travaux pourraient être lancés autour des différents éléments de vieillissement et leurs impacts sur le relargage non seulement marin, mais aérien :

- Lavage
- Exposition aux conditions climatiques : vent, humidité, UV
- Abrasion lors de l'usage
- Impact pollution chimique (micro-fragments comme vecteur de transport de produits chimiques)

Dans le cas des semelles de chaussures, tous les paramètres (matières, additifs, fabrication) pouvant permettre d'améliorer la résistance aux UV, à la température, à la fatigue et à l'abrasion, vont conduire à une diminution de l'émission de micro-fragments.

B. Recyclage & incorporation de matière recyclée

Ce chapitre étudie l'impact des différents types de recyclage sur le relargage de micro-fragments. Les effets des procédés sur le relargage « immédiat » et les impacts potentiels de l'incorporation de matière recyclées sur les produits finis lors de leur usage seront également inclus.

Pour rappel, il existe aujourd'hui trois grandes voies de recyclage des textiles et linge de maison³⁹:

- **Le recyclage mécanique** : regroupe l'ensemble des traitements mécaniques (coupe, effilochage et défibrage) permettant d'obtenir des chiffons d'essuyage ou des fibres effilochées ;
- **Le recyclage thermomécanique** : représente un ensemble de procédés de préparation et de fusion des matières majoritairement synthétiques associés à un/des traitement(s) mécanique(s) (extrusion, injection...), afin de produire des granulats destinés à la plasturgie ;
- **Le recyclage chimique et enzymatique** : désigne l'ensemble des procédés de transformation des matières polymères (synthétiques ou cellulosiques) en polymères purifiés (dissolution), ou en composés issus de ces polymères (monomères ou oligomères). On parle le plus souvent de recyclage chimique, ou de recyclage enzymatique lorsque des enzymes sont utilisées.

Pour les chaussures, deux procédés sont notables :

- Broyage de la chaussure entière, pour le recyclage de la chaussure entière si monomatière, ou le recyclage des différentes matières après une étape de tri des broyats ;

³⁷ Microplastics from shoe sole fragments cause oxidative stress in a plant (*Vigna radiata*) and impair soil environment Lee and al.; Journal of Hazardous Materials Volume 429, 5 May 2022,

³⁸ Are your shoes safe for the environment? – Toxicity screening of leachates from microplastic fragments of shoe soles using freshwater organisms; Kim and al.; Journal of Hazardous Materials 421 (2022)

³⁹https://pro.refashion.fr/sites/default/files/rapport-etude/Revue%20des%20perturbateurs%20et%20faciliteurs%20au%20recyclage%20des%20TLC_VF_Refashion_2025.pdf

- Séparation de la tige et de la semelle par découpe, arrachage ou délaminage, pour la valorisation matière des différents composants.

Il existe très peu d'articles et de travaux s'intéressant à ces aspects de recyclage, en lien avec les micro-fragments.

i. La préparation matière

Dans ce que nous appelons de façon générale la préparation matière, nous incluons, le délissage pour les textiles, le démantèlement pour les chaussures et la mise au format (coupe en chiquettes, broyage/déchiquetage). Ces types de préparations sont communs à l'ensemble des voies de valorisation, que ce soit lors du recyclage mécanique, thermomécanique, ou chimique.

Ces étapes sont surtout responsables d'émissions directes dans l'atmosphère via les ateliers de délissage/démantèlement.

L'opération de délissage, bien que jamais citée dans la littérature étudiée, a été mentionnée dans divers entretiens réalisés dans le cadre de cette revue comme une étape susceptible d'émettre des micro-fragments selon les techniques utilisées. Le délissage manuel et/ou mécanique grossier peut conduire à des émissions. Certaines lignes de délissage automatique sont néanmoins équipées d'aspirations qui limitent le phénomène.

L'opération de démantèlement n'est pas documentée et n'a pas été évoquée lors des entretiens.

a. Coupe en chiquettes

Comme montré par le MFC, l'étape de découpe de tissu (lors de la confection) émet de façon prépondérante des micro-fragments dans l'air. Une étude récente⁴⁰ montre que les relargages dans l'atmosphère durant la partie découpe (en confection) peuvent être 50 fois supérieurs au relargage mesuré lors d'un lavage. On peut donc extrapoler ces résultats aux étapes de découpe préalables au recyclage. Ces coupes étant souvent plus rudes/brutales que lors de la confection, on peut penser que leur impact est sans doute encore plus élevé, bien qu'aujourd'hui aucune étude ne permette d'avoir une idée précise de cet impact.

Concernant les impacts sur le relargage lors de l'utilisation du produit final, on peut noter deux points principaux :

- Le chiffon obtenu présente une présence de micro-fragments liés aux étapes de découpe
- Des études ont montré que des bordures de textile « brutes » (bords francs) sont favorables à un relargage de micro-fragments lors de l'usage et du lavage⁴¹.

b. Broyage/déchiquetage

Nous évoquerons ici le broyage comme étape de préparation dans le cadre des divers processus de recyclage des textiles, tiges de chaussures et semelles. Cette étape peut aussi être représentative de la préparation pour la valorisation en CSR.

En ce qui concerne les chaussures notamment les semelles, seul le process appelé « 1st grinding step » dans l'étude menée par le CETIA sur le recyclage des semelles est évoqué ici⁴². Les étapes additionnelles de broyage menant à la micronisation, dévulcanisation, extrusion etc., seront détaillées plus particulièrement dans le paragraphe suivant.

Des articles mettent clairement en avant les impacts des procédés mis en œuvre lors du recyclage des plastiques (tous secteurs d'activités confondus), notamment l'étape de broyage. Ces relargages représenteraient environ

⁴⁰ Microfiber Release during Apparel Manufacturing process – A greater concern than Domestic Laundering, Balasaraswahi and al., Emerging Contaminants Available online 21 August 2025, 100559 In Press

⁴¹ Microfiber Pollution: A Systematic Literature Review to Overcome the Complexities in Knit Design to Create Solutions for Knit Fabrics, Allen and al., Environ. Sci. Technol. 2024, 58, 4031–4045

⁴² Refashion - State of the art of recycling solutions for shoe soles - July 2025

3% du total des microplastiques du recyclage plastique^{43,44,45}. Cela peut avoir lieu dans l'atmosphère de l'atelier et dans les eaux de procédés.

Aucun article a été identifié traitant spécifiquement des textiles en matière naturelles ou artificielles, mais au vu des émissions constatées dans le cadre de simple découpage et lors du broyage/déchetage des plastiques, il n'y a aucune raison que ces procédés n'induisent pas d'émissions de micro-fragments avec d'autres matières.

c. Axes d'amélioration

Les principaux axes d'amélioration vont concerner des adaptations ou modifications des procédés.

Il a été montré que des coupes au laser ont moins d'impact que des coupes mécaniques^{46,47}. Des systèmes d'aspiration au niveau des éléments de découpe, de broyage sont également pertinents.

En ce qui concerne les chiffons, un premier lavage dans une machine équipée de filtres pourrait être un moyen intéressant de limiter l'émission de micro-fragments dans des milieux non contrôlés.

ii. *Recyclage mécanique en boucle fermée*

Le recyclage mécanique en boucle fermée par défibrage consiste à décomposer mécaniquement les textiles pour en extraire des fibres recyclées réintégréées dans la fabrication de nouveaux produits textiles. Ce procédé, qui soumet les matières à d'importantes contraintes mécaniques, soulève des questions encore peu documentées quant aux émissions de micro-fragments générées lors des opérations de défibrage et à la capacité des fibres ainsi obtenues à relarguer davantage de micro-fragments dans leur seconde vie.

⁴³ Global discharge of microplastics from mechanical recycling of plastic waste, Suzuki and al., Env. Pollution Volume 348, 1 May 2024

⁴⁴ The potential for a plastic recycling facility to release microplastic pollution and possible filtration remediation effectiveness, Brown and al., Journal of Hazardous Materials Advances 10 (2023)

⁴⁵ Waste plastic management: Recycling and the environmental health nexus, Nafiu and al., Cleaner Materials 15 (2025)

⁴⁶ The origin of microplastic fiber in polyester textiles: The textile production process matters, Cai and al, Journal of Cleaner Production 267 (2020) 121970

⁴⁷ Bibliographie de la thèse tml « textile microplastic leak », Présentation de la méthode de thèse TML et de son étude bibliographique sur le relargage de fibres microplastiques. Cosne and al., 2024

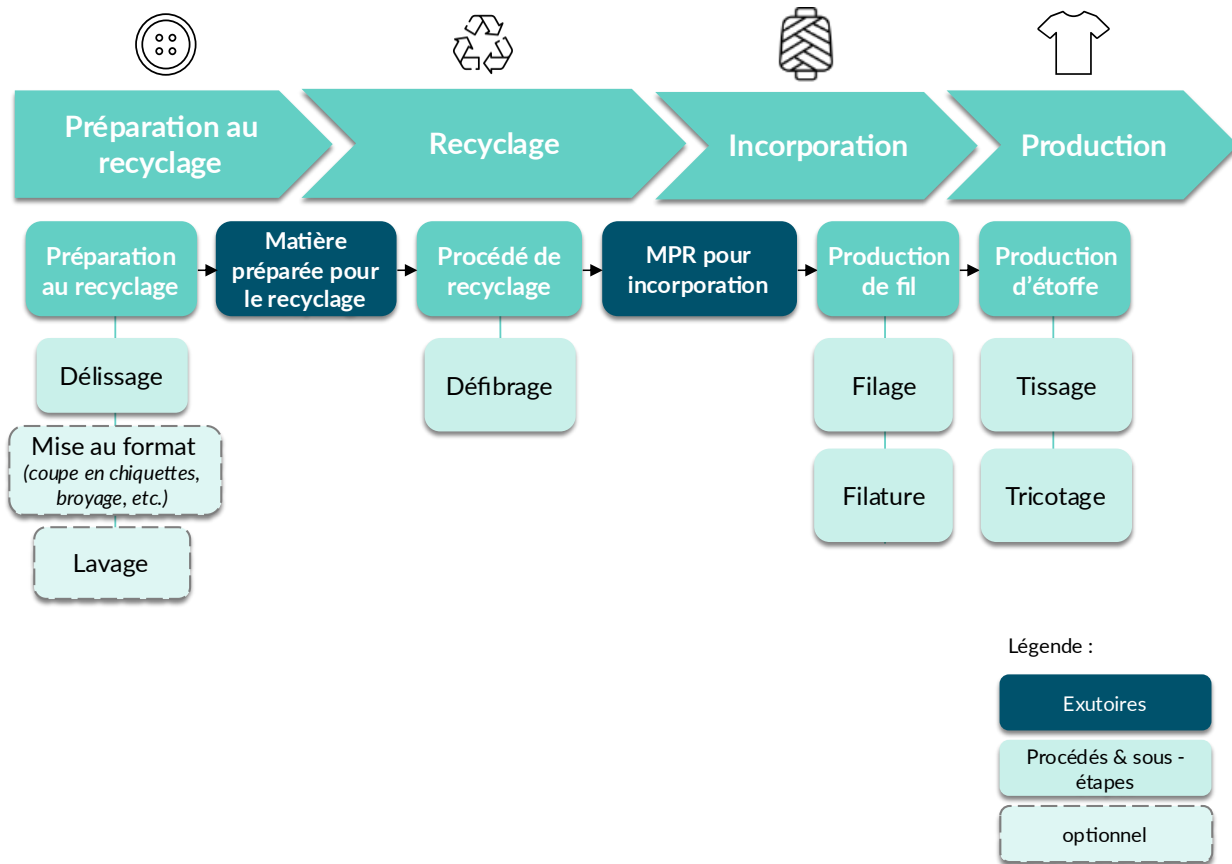


Figure 3 : Le recyclage textile en boucle fermée

a. Impact du défibrage textile

Le défibrage implique notamment du déchetage qui est souvent associé à des opérations d'affinage, comme le cardage mécanique ou le soufflage. L'ensemble de ces étapes dégage une quantité de poussières, soit des micro-fragments. Il n'existe pas d'étude publique aujourd'hui sur la caractérisation de ces poussières : quantité, taille, forme.

Ces poussières, peuvent se retrouver à la fois dans l'atmosphère de l'usine, mais également dans les produits, ou rester accrochées aux fibres.

b. Impacts de l'incorporation de MPR

▪ Impacts sur les matières premières recyclées : les fils

Plusieurs hypothèses tendent à montrer que le recyclage mécanique pourrait avoir un impact négatif : sur la qualité du produit final⁴⁸, sur la mécanique des fibres et sur la longueur des fibres⁴⁹. Les facteurs pouvant avoir des effets sur la quantité de micro-fragments relargués seront discutés en Section III pour la phase de conception.

▪ Impacts sur l'étoffe et les produits finis (hors non-tissés)

A la vue des impacts que peut avoir le recyclage sur la qualité des fibres (mécanique et longueur), on peut s'attendre à ce que le recyclage mécanique ait un impact négatif sur la qualité du produit final.

⁴⁸ Transforming mechanically recycled cotton and linen from post-consumer textiles into quality ring yarns and knitted fabrics, Raiskio and al, Waste Management Bulletin, Vol 3, Issue 1, April 2025,76-86

⁴⁹ Mechanical Recycling of Textiles: Identifying Factors Impacting Fibre Quality, Lindstrom k., Doctorate PhD. 2025

Il y a peu d'études traitant directement du sujet d'émission de micro-fragments par rapport à l'incorporation de MPR. On peut citer l'étude de Abbas and al⁵⁰ qui étudie l'impact de l'incorporation de MPR produite à partir du recyclage mécanique sur des textiles en laine, en polyester et en acrylique. Cette étude montre clairement une dégradation des fibres lors du recyclage et donc une nette augmentation du relargage de micro-fragments en phase d'utilisation du produit incorporant de la MPR. Cette étude met aussi en lien direct le relargage durant le lavage et les propriétés mécaniques des fibres, confortant l'hypothèse que l'étape de défibrage est a priori un facteur aggravant pour le relargage de micro-fragments. Une autre étude⁵¹ montre l'impact négatif de l'introduction de fibres recyclées dans les textiles sur les tests d'abrasion (fibres de coton et lin recyclées mélangées à du coton et viscose vierges). Enfin une dernière étude très récente⁵² (2026) réalisée avec du PET montre un impact négatif de l'incorporation de MPR produite à partir du recyclage mécanique (défibrage) sur le relargage de micro-fragments lorsqu'on compare des produits incorporant 30% de fibres recyclées plusieurs fois avec des produits réalisés à partir de fibres vierges. Par exemple, 3 fois plus de micro-fragments ont été relargués par les produits incorporant des fibres synthétiques en PET recyclées mécaniquement 3 fois de suite.

c. Axes d'amélioration

Si le défibrage génère très probablement des micro-fragments, plusieurs voies de mitigation de l'émission des micro-fragments peuvent être envisagées pour en limiter les effets. Des instruments de captation des poussières, installés le long du procédé peuvent permettre une très forte diminution de ces émissions.

Comme proposé dans le travail de K.Lindstrom⁵³, on peut aussi travailler sur l'ajout de lubrifiant (type polyéthylène glycol, PEG) durant le procédé. Des essais ont été réalisés sur des tissus de coton, de polyester ou polycoton sur lesquels ont été pulvérisés des solutions de PEG dilué dans de l'eau (concentration < 1%). On voit alors que l'on peut augmenter de 50 à 100% la longueur des fibres après défibrage comparé aux essais témoins et permettre la filature.

Ensuite, comme il sera montré dans la Section III, afin de compenser les potentielles augmentations de micro-fragments liées à la fragilisation des fibres lors du défibrage, des adaptations de procédés de filature, de tissage ou tricotage peuvent être réalisées : jouer sur les type de filatures (prioriser les filatures vortex ou air-jet), adapter les types d'étoffes, utiliser éventuellement des finitions chimiques adoucissantes et mécaniques de type calandrage, brulage, rasage, et des procédés de coloration à basse température et cycles courts.

Néanmoins les données manquent pour réellement évaluer l'impact du recyclage mécanique en boucle fermée. Des études seraient donc à mettre en place pour :

- Mieux quantifier l'impact du procédé de défibrage sur le relargage de micro-fragments des produits issus de ce procédé : paramètres de procédés, différentes machines.
- Mieux quantifier les différents moyens de mitigation et leurs impacts : chimiques, mécaniques.

iii. Recyclage mécanique en boucle ouverte

Le recyclage mécanique en boucle ouverte pour la fabrication de non-tissés consiste à transformer des textiles en fin de vie en fibres par des procédés d'effilochage, ces matières étant ensuite intégrées comme matière première dans des produits non-tissés à plus faible valeur ajoutée (isolants, rembourrages, feutres techniques). Si ce débouché constitue aujourd'hui l'une des voies de recyclage mécanique les plus développées industriellement, les contraintes mécaniques importantes imposées à la matière et la diversité des intrants traités soulèvent des interrogations encore peu explorées sur les émissions de micro-fragments générées lors

⁵⁰ Serviceability and washing durability of recycled polyester, wool, and acrylic: Sustainability concerns and microfiber leaching, Abbas and al., Industrial Crops & Products 225 (2025) 120450

⁵¹ Transforming mechanically recycled cotton and linen from post-consumer textiles into quality ring yarns and knitted fabrics, Raiskio and al, Waste Management Bulletin, Vol 3, Issue 1, April 2025,76-86

⁵² Mechanically Recycled Textiles: A Source of Microplastic Fiber Emissions, Environ. Sci. Technol. 2026, 60, 1810–1818

⁵³ Improving Mechanical Textile Recycling by Lubricant Pre-Treatment to Mitigate Length Loss of Fibers, Lindstrom and al., Sustainability 2020, 12, 8706

du procédé et sur le comportement de ces produits finis en termes de relargage tout au long de leur propre cycle de vie. En raison des volumes actuels et des projections le focus de l'étude se fera sur les non-tissés. La valorisation en chiffon d'essuyage a été traitée dans la partie préparation/découpe.

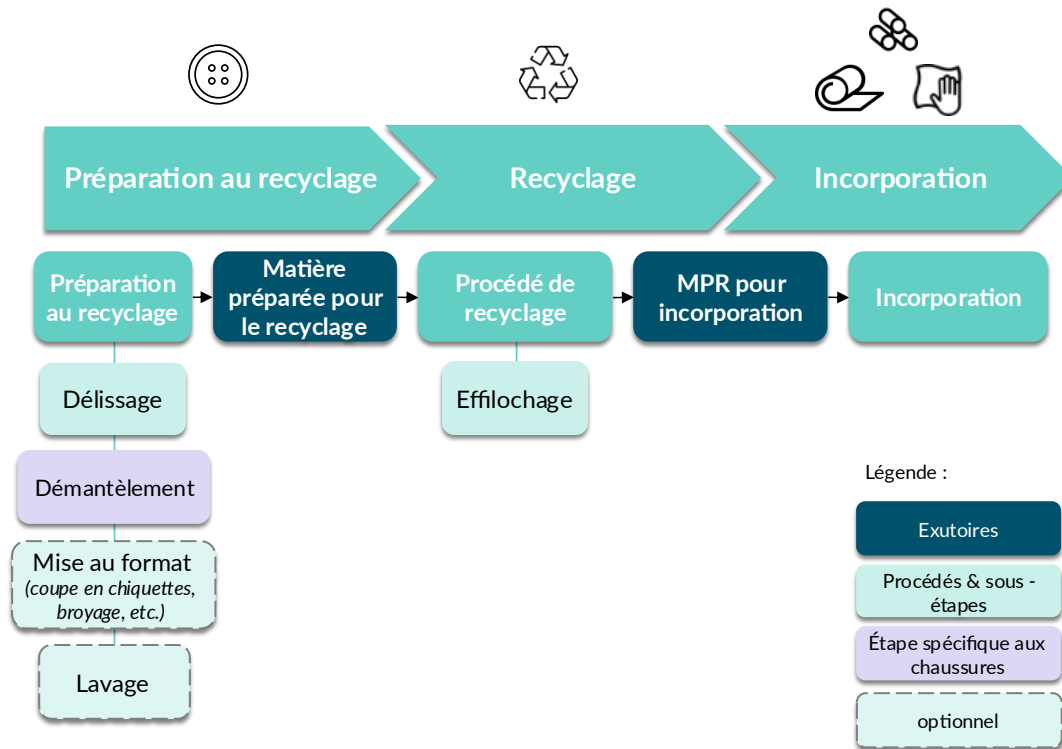


Figure 4 : Recyclage en boucle ouverte des textiles et chaussures

a. Impact de l'effilochage : les non-tissés

Les impacts du recyclage mécanique ont déjà été discutés dans la section précédente. Cependant, il est important de noter que les fibres issues de l'effilochage à destination de la boucle ouverte sont plus courtes/abimées que celles obtenues à partir du procédé de défibrage. Le procédé étant plus violent que le procédé de défibrage, les effets décrits dans le chapitre B.ii seront exacerbés, dont les émissions de micro-fragments dans l'atmosphère.

b. Impact de l'incorporation de MPR : les non-tissés

Les produits non-tissés dans leur ensemble sont déjà identifiés comme sources potentielles de micro-fragments, que ce soit via la production, les produits à usage unique et donc la mise en déchet rapide (masques, sachets de thé), ou durant leur cycle de vie (filtre, etc.)⁵⁴. S'il n'existe pas de chiffres clairs, une partie croissante de ces non-tissés est fabriquée à partir de textile recyclé.

Pour les mêmes raisons que les impacts du recyclage décrits au-dessus sur la mécanique des fibres, il est prédit que les produits non-tissés incorporant de la MPR relarguent plus de micro-fragments que les produits non-tissés issus de matière vierge.

Les modes de constitution et de consolidation des produits non tissés (mécanique, chimique, thermique, etc), et les types de procédés propres à ces modes peuvent néanmoins être optimisés ou modifiés pour limiter les relargages. Ces éléments seraient à étudier de façon plus précise dans une étude spécifique.

⁵⁴ Nonwoven Fabrics: The Giant of Micro(nano)plastic Pollution Hidden in the Corners of Life; Tand and al; Environ. Sci. Technol. 2025, 59, 11429-11432

Certains produits non-tissés sont cependant liés par adhésion ce qui pourrait réduire le relargage lors de la production et de l'utilisation de ces produits, incluant ou non de la MPR. C'est notamment le cas des isolants pour le bâtiment (hors isolation soufflée) qui contient un liant plastique entre les fibres textiles.

Dans ce cas particulier de matériau d'isolation, le sujet d'émissions de micro-fragments est d'autant moins critique lors de la phase d'usage, le produit se retrouvant dans une situation où il ne sera pas soumis à friction ou agressions climatiques (vent, UV). Le point sera en revanche à prendre en compte lors de la démolition et mise en décharge ou recyclage.

c. Axes d'amélioration

Au-delà des axes d'améliorations décrits dans le cadre du procédé de défibrage, il existe plusieurs éléments permettant de limiter le relargage de micro-fragments pour des non-tissés :

- Procédés plus doux d'utilisation des MPR : température, pression, flux d'air (cas des produits médicaux par exemple).
- Nettoyage régulier des machines et systèmes d'aspirations performants.
- Utilisation de liant pour limiter les émissions de micro-fragments.
- Certains additifs permettent également de limiter les émissions de poussières

iv. Recyclage thermomécanique

Dans ce chapitre, les boucles ouvertes et fermées seront traitées en même temps.

Une fois le surtri et la préparation au recyclage des textiles effectués, voire le démantèlement des tiges pour les chaussures, le procédé de recyclage thermomécanique comprend les étapes suivantes⁵⁵ :



L'étape de densification consiste à chauffer les textiles broyés dans un tambour, afin de les agglomérer et les densifier pour faciliter leur passage en extrusion/granulation.

L'étape de granulation est une étape de fusion/extrusion/granulation qui permet d'obtenir de la matière sous forme de granulats fondus.

L'étape de compoundage n'est pas une étape obligatoire et dépend de la qualité des granulés après granulation et de la qualité visée pour l'application finale. Elle consiste à intégrer de la matière thermoplastique vierge et des additifs, afin d'obtenir des granulats utilisables pour l'application finale (thermoformage, filage, etc.).

Les procédés étant très proches pour les textiles et chaussures ils seront traités ensemble.

a. Impacts des procédés

Le procédé de production des granulés inclut notamment l'étape de préparation, dont les impacts ont été décrits plus haut, et une étape d'extrusion. Cette dernière étape, n'est pas considérée comme impactante directement dans le cadre d'émissions de micro-fragments. Elle est néanmoins critique afin de maîtriser les propriétés des granulés qui seront réutilisés en tant que MPR. Ce point sera évoqué dans le paragraphe sur l'incorporation de MPR.

b. Manipulation des granulés

La principale cause d'émissions de micro-fragments lors du procédé est identifiée comme étant liée à la perte des granulats plastiques, qui peuvent conduire par dégradation, à la production de micro-fragments. Les

⁵⁵ Le recyclage thermomécanique des textiles, Refashion, 2025

granulés occupent la 3^{ème} place parmi les principales sources de rejet non intentionnelles de plastique⁶⁴ (après les peintures et les pneumatiques). Ces pertes peuvent intervenir à différentes étapes : chargement des systèmes de compoundage, récupération post extrusion, transport dans les sites, approvisionnement maritime ou terrestre, etc.

Dans ce cadre-là, en avril 2025 un accord provisoire (en attente d'adoption finale) sur un règlement relatif à la prévention des pertes de granulés plastiques a été validé entre le Conseil et le Parlement Européen^{56,57,58}. Un ensemble clair de mesures sera inclus dans un plan de gestion des risques que devra élaborer toute installation dans laquelle des granulés plastiques sont manipulés. Cet accord requiert aux entreprises manipulant plus de 1500 t/an de granulés de faire certifier par un tiers indépendant leurs bonnes pratiques. Pour les entreprises manipulant moins de 1500 t/an, c'est-à-dire la majorité des entreprises de recyclage TLC, elles devront établir une auto-déclaration de respect des exigences. Au vu des procédures européennes, cette réglementation ne sera pas applicable avant au mieux 2027.

c. Impact de l'incorporation de MPR

Il est connu que le recyclage thermomécanique, notamment du fait du processus d'oxydation, a tendance à impacter la qualité des polymères recyclés : diminution de la masse molaire des polymères et dégradation des propriétés mécaniques. Au vu des éléments pouvant impacter le relargage des micro-fragments, on pourrait donc s'attendre à une plus forte émission de micro-fragments des produits réalisés à partir de polymères recyclés. A l'inverse, l'incorporation de MPR est rarement supérieure à 30% pour justement atteindre des propriétés mécaniques respectant les cahiers des charges techniques et ainsi réduire le risque de dégradation plus rapide.

Comme précédemment il y a aujourd'hui peu d'études mettant en avant l'impact du recyclage sur les émissions de micro-fragments du produit fini.

Une première étude compare les émissions des micro-fragments de textiles réalisés à partir de PET vierge et PET bouteille recyclé⁵⁹ : les différences ne sont pas significatives. Il est à noter quand même que le PET bouteille est à l'origine de qualité technique supérieure au PET textile, et que donc une légère dégradation durant le recyclage lui permet de garder des propriétés équivalentes au PET textile.

Le MFC a réalisé une étude⁶⁰ comparant 79 pièces d'habillement textiles fabriquées à partir de MPR et 172 pièces textiles fabriquées à base de PET vierge. Les résultats ne montrent pas de différence en termes d'émission de micro-fragments entre les produits recyclés et les vierges. Le rPET est selon toute vraisemblance d'origine bouteille au vu de des pratiques industrielles actuelles.

Dans cette même étude, le MFC a listé plusieurs travaux et les résultats peuvent être contradictoires. La majorité sont non concluants ou ne montrent pas de différences notables entre le PET vierge et recyclé. La plupart ne mentionnent d'ailleurs pas la source du PET recyclé ce qui pose un problème sur la lisibilité et l'interprétation des résultats.

Aucune étude n'a été trouvée sur les autres types de matières thermoplastiques (PA, etc.), ni sur les matières utilisées pour les semelles (TPU, EVA, Caoutchouc, divers élastomères, PVC, etc.). De plus, comme discuté précédemment, l'effet de la phase d'utilisation sur l'usure et donc sur le relargage n'est que très peu mentionné dans les études. Il serait pertinent de se pencher sur le vieillissement des produits contenant des MPR.

⁵⁶ <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/04/08/plastic-pellet-losses-council-and-parliament-agree-on-new-rules-to-reduce-microplastic-pollution/pdf>

⁵⁷ <https://www.surfrider.fr/press/lunion-europeenne-adopte-une-reglementation-inedite-sur-les-granules-plastiques-pour-reduire-la-pollution-aux-microplastiques-mais-les-derogations-et-delais-risquent-den-limiter-la/>

⁵⁸ <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/09/22/plastic-pellets-council-signs-off-regulation-to-reduce-pollution-from-microplastics/>

⁵⁹ Differences in the release of microplastic fibers and fibrils from virgin and recycled polyester textiles, Gao and al., Resources, Conservation & Recycling 207 (2024)

⁶⁰ Technical Research Report: Recycled Polyester within the context of Fibre Fragmentation, MFC, 2023

d. Axes d'amélioration

Parmi les axes d'améliorations qui peuvent être cités :

- Concernant la manipulation des granulés, il existe un manuel, appelé *Operation Clean Sweep*, élaboré en collaboration avec la Fédération de la plasturgie, PlasticsEurope, et Elipso, qui liste et détaille des lignes directrices et des bonnes pratiques pour réduire les pertes de granulés plastiques dans l'environnement⁶¹.
- Concernant les propriétés des MPR, il existe aujourd'hui deux principales pistes pour limiter les effets de l'extrusion :
 - jouer sur le procédé d'extrusion lui-même pour limiter les conditions d'oxydation et améliorer la qualité des MPR ;
 - rajouter une étape de recondensation qui permet de rallonger les chaînes de polymères et donc de limiter les pertes de propriétés mécaniques.

v. Recyclage chimique

Le recyclage chimique inclut diverses familles de procédés :

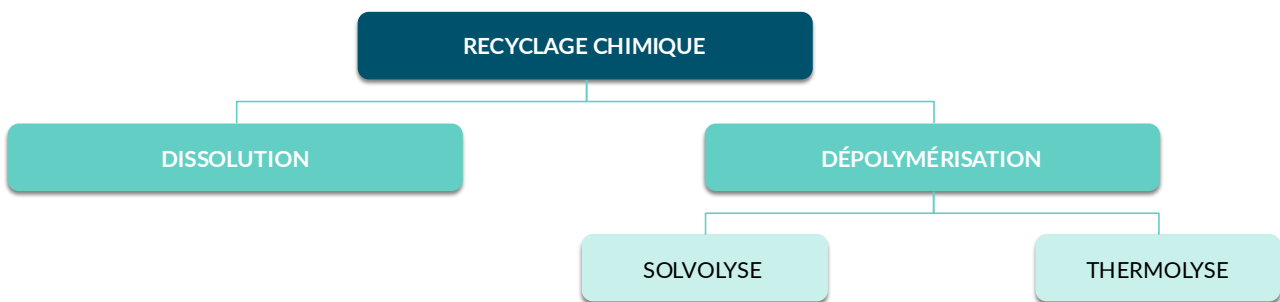


Figure 5 : Les principaux procédés de recyclage chimique⁶²

La figure ci-dessus traite seulement des textiles et tiges de chaussures. On peut également rajouter les procédés de dépolymérisation enzymatiques, moins répandus industriellement.

Pour les chaussures, on peut assimiler à du recyclage chimique les procédés suivants : dévulcanisation chimique et la déréticulation (PU, EVA)⁶³.

a. Impacts des procédés

Tous ces procédés peuvent être décomposés en trois grandes parties :



La première partie concerne par exemple les étapes de purification pour retirer les colorants, les impuretés et les apprêts. La seconde prend en compte la réaction ou dissolution elle-même, quant à la troisième, elle concerne la purification des matières obtenues.

⁶¹ https://www.opcleansweep.eu/application/files/1416/3004/9689/OCS_Manual_FR.pdf

⁶² Le recyclage chimique des textiles, Refashion, 2024

⁶³ https://pro.refashion.fr/sites/default/files/rapport-etude/etude_recyclage_semelles_CETIA_refashion2025.pdf

Les étapes les plus critiques pour la production de micro-fragments sont les deux premières. Les procédés de recyclage chimique étant relativement récents, il y a peu d'études spécifiques sur la production de micro-fragments durant le procédé.

On peut quand même citer une étude de Manivannan and al.⁶⁴ en 2025 qui a étudié les émissions de micro-fragments dans le cadre de procédés de recyclage de polycoton. Il a montré que l'étape la plus critique est l'étape de décoloration (équivalente à une forme de lavage), avant le traitement chimique. Le traitement par hydrolyse basique, qui dans ce cas-là préserve le coton mais dépolymérise le PET émet également moins de micro-fragments que l'hydrolyse acide qui, elle, préserve le PET mais dégrade le coton en cellulose.

Les étapes de purification du gisement risquent donc d'être les plus émettrices en termes de micro-fragments : impuretés, lavage pouvant impliquer des agitations fortes et des dégradations chimiques ou physique.

Les risques lors de l'étape de réaction seront sans doute plus liés aux réactions incomplètes et aux quelques impuretés résiduelles, voire aux matières non dépolymérisées.

b. Impacts de l'incorporation de MPR

Concernant les produits réalisés à la suite du recyclage chimique, si aucune étude n'est pour l'instant publiée, le fait est que la qualité des fibres et matières produites serait équivalente à de la matière vierge. Les émissions de micro-fragments d'un produit incorporant de la MPR devraient donc être équivalentes à un produit constitué intégralement de matière vierge. Ce point est à valider sur les procédés de dévulcanisation néanmoins.

c. Axes d'amélioration

L'axe principal d'amélioration va concerner la mise en place d'une filtration efficace qui devra permettre d'éviter une pollution des eaux de procédés.

Les autres axes d'améliorations vont concerner les process et les réactions directement et vont s'appuyer sur l'optimisation des paramètres de réaction et/ou de purification (température, agitation, temps de réaction, etc.) et seront à étudier au cas par cas.

vi. Recyclage chaussures

Ce chapitre se focalise sur le recyclage mécanique des semelles de chaussures. Les recyclages thermomécaniques et chimiques des semelles ne seront pas spécifiquement traités en raison du manque de données. Même si les procédés peuvent varier, on peut supposer que les conclusions seront très proches des éléments discutés dans les chapitres précédents sur les textiles.

a. La micronisation des semelles de chaussures

La micronisation est un procédé mécanique qui permet de réduire les particules d'un matériau à une dimension de l'ordre du micron. Ce procédé est surtout utilisé aujourd'hui dans le cadre du recyclage des semelles de chaussures. C'est une étape qui vient en supplément du broyage déjà mentionné précédemment.

Par définition le procédé de micronisation est donc susceptible de produire des micro-fragments. Les tailles de particules obtenues par micronisation sont en général inférieures au mm, voire 0,5 mm, ce qui rentre de fait dans la catégorie micro-fragments selon les définitions de la section I.B. Il est d'ailleurs intéressant de noter que

⁶⁴ Textile Recycling's Hidden Problem: Surface-Modified Fiber Fragments Emitted at Every Stage, Manivannan and al., Environ Sci Technol. 2025

des études se basent sur les procédés de micronisation (surtout la micronisation cryogénique) afin d'obtenir des microparticules similaires à celles récupérées dans les océans et donc utilisable dans des études de toxicité, dégradation, etc.

b. Dévulcanisation mécanique

La dévulcanisation mécanique s'apparente à une forme de broyage ou cisaillement et donc les conclusions sont à rapprocher des éléments discutés en chapitre II.B.

c. Impacts de l'incorporation de MPR

Les produits issus de la micronisation sont ensuite dans l'extrême majorité des cas utilisés comme charges dans diverses applications ou alors formulés avec d'autres matières plastiques pour réduire les coûts ou ajouter des propriétés spécifiques.

Dans ce cas, la dégradation du matériau en question va conduire directement au relargage de ces micro-fragments. Une attention particulière est donc à porter sur l'usage, l'usure et la fin de vie de ces matériaux. Dans certains cas, l'ajout de matière micronisée peut également avoir un impact négatif sur les propriétés du produit final et donc augmenter son usure.

Des tests préliminaires ont par exemple été réalisés par le CETIA, Micropolymers, Elanova et le CTC sur l'introduction de semelle en caoutchouc micronisées dans des plaques de matrice de caoutchouc vierges⁶⁵. Les résultats montrent que si la processabilité n'est pas impactée de façon critique, les propriétés mécaniques sont dégradées, notamment la résistance à l'abrasion et donc le relargage potentiel de micro-fragments.

Il ne s'agit que de résultats préliminaires et plusieurs projets de R&D sont en cours pour atteindre des propriétés mécaniques équivalentes avec ou sans l'incorporation de micronisats (meilleur tri des grades de caoutchouc, purification, nettoyage, optimisation de la formulation). L'incorporation de MPR est rarement supérieure à 30% pour justement atteindre des propriétés mécaniques respectant les cahiers des charges techniques et ainsi réduire le risque de dégradation plus rapide.

Par ailleurs, si la matière micronisée est refondue et mélangée à de la matière vierge, sauf impact sur les propriétés mécaniques, il ne devrait pas y avoir d'impact sur la production de micro-fragments.

d. Axes d'amélioration

Lors des étapes de micronisation, plusieurs bonnes pratiques peuvent être mises en place pour éviter les pollutions aux micro-fragments :

- Un système de filtration adapté pour éliminer les micro-fragments de l'air circulant dans la ligne de micronisation ;
- Lors de la mise en big-bag du micronisat, après passage sur tamis, une attention particulière doit être apportée à l'élimination des poussières avec des systèmes de cyclones au-dessus des big-bags par exemple, et des nettoyages des sols après un certain nombre de remplissages pour éviter l'accumulation de micro-fragments dans les zones de chargement ;
- L'incorporation du micronisat réalisée directement sur le site de production permet d'éviter les déplacements, les ruptures de charges et les changements de conditionnement, diminuant les risques de fuites dans l'environnement ;
- En zone extérieure de l'usine (zone de remplissage des camions par exemple), équiper les bouches d'évacuation d'eau avec des systèmes de filtration.

⁶⁵ État de l'art des solutions de recyclage des semelles de chaussures en Europe, Refashion, 2025

C. Déchets Ultimes

Si ce rapport étudie les problématiques d'émissions de micro-fragments liées au recyclage et au réemploi, il semble important de mentionner, pour ne pas la sous-estimer, la source d'émission de micro-fragments par les déchets TLC en décharge (organisée ou sauvage). L'oxydation, la dégradation par UV, les phénomènes d'abrasion, conduisent à modifier l'intégrité structurale des matériaux et donc à la production de micro-fragments⁶⁶. Ces phénomènes sont notamment très présents en bord de mer avec l'action conjuguée du soleil, de l'abrasion avec le sable et le sel et les vagues. Ces phénomènes sont dépendants du type de matière. Par exemple, pour le PET ces taux de dégradation peuvent atteindre 1 mm/an⁶⁷. Cela peut suffire pour contribuer de façon non négligeable à l'apparition de microplastiques. Ces taux étant liés à la biodégradabilité, ils vont être beaucoup plus élevés pour les fibres naturelles. Cependant la persistance des matières dans l'environnement est également à prendre en considération, étant plus élevée pour les matières synthétiques, voire artificielle, que les matières naturelles.

⁶⁶ A framework for the assessment of marine litter impacts in life cycle impact assessment, Woods and al., Ecological Indicators, 129 (2021)

⁶⁷ Degradation Rates of Plastics in the Environment, Chamas and Al, ACS Sustainable Chem. Eng. 2020, 8, 3494–3511

III. Mise en perspective avec les autres étapes du cycle de vie

Cette section a pour but de replacer l'analyse précédente, qui se concentrait essentiellement sur les voies de valorisation en fin de vie, dans son contexte global considérant l'ensemble du cycle de vie.

A. Impact des phases de production de textile

Le MFC a réalisé une cartographie qualitative complète des types d'émissions le long de ce cycle de vie, en mettant en évidence pour chaque étape les différents flux d'émissions directes et par redistribution :

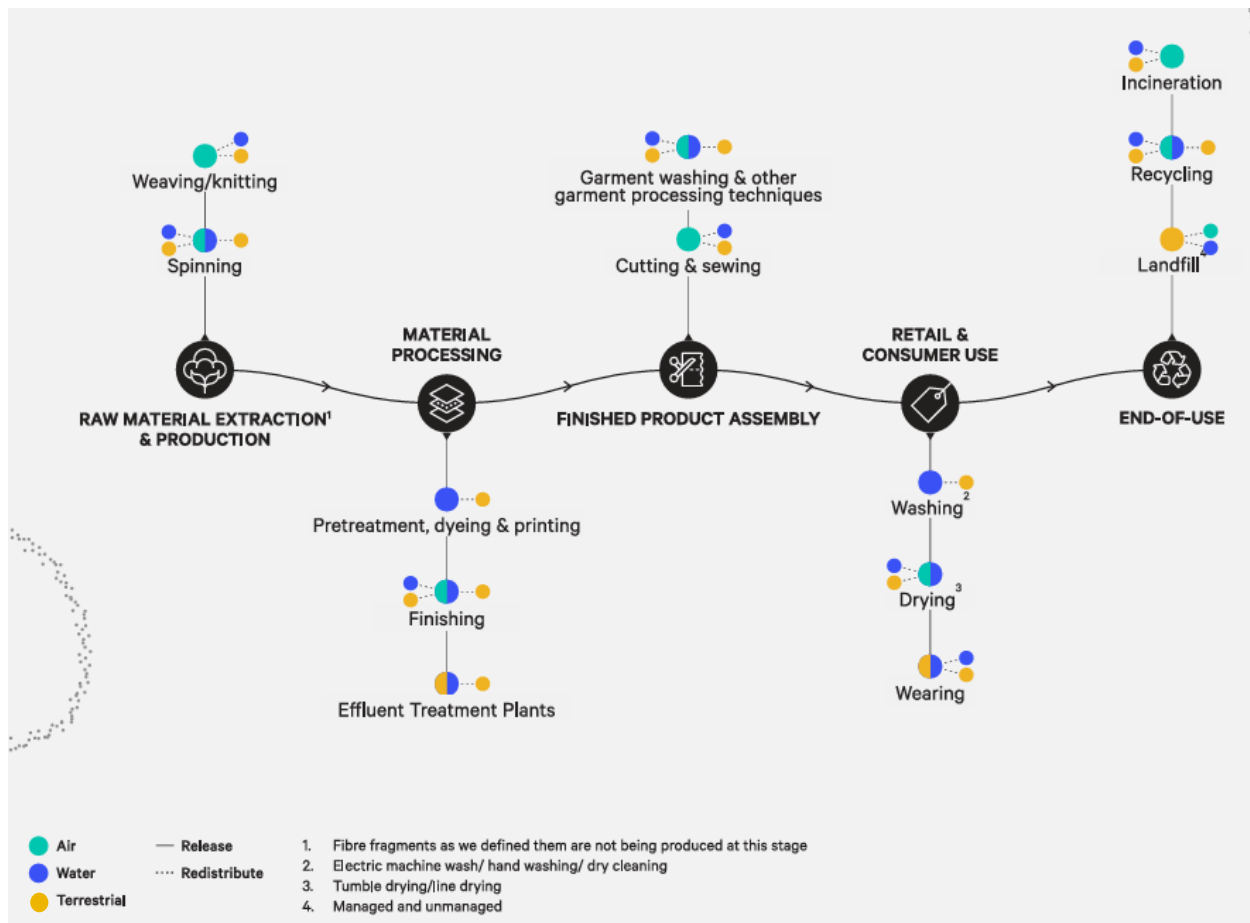


Figure 6 : Voies d'émissions de micro-fragments

Si les différentes voies sont plus ou moins bien identifiées, il y a aujourd'hui très peu de résultats donnant une répartition des flux de micro-fragments le long de ce cycle de vie.

Ce chapitre détaille les éléments pouvant contribuer à augmenter ou réduire le relargage de micro-fragments lors de l'étape de production. De nombreuses études ont traité de l'impact des différents paramètres de procédés de fabrication sur l'émission de micro-fragments. Cependant ces résultats doivent être pris avec précaution. En effet, il est très difficile de tirer des conclusions claires des articles : une étude de revue de 2024 sur 57 articles montre par exemple que 81% des études ne sont pas concluantes⁶⁸.

⁶⁸ Emission of fibres from textiles: A critical and systematic review of mechanisms of release during machine washing, Tedesco and al., Science of The Total Environment, Volume 955, 10 December 2024

Le tableau ci-dessous rassemble l'ensemble des conclusions d'un large panel d'articles de revue (Annexe E). La très grande majorité des études sont basées sur des mesures d'émissions de micro-fragments après lavage. L'impact de la modification de ces paramètres sur les émissions lors de la production (essentiellement dans l'air) n'est pas étudié.

Tableau 2 : Impact des paramètres de production textile sur le relargage des micro-fragments

	Réduit les émissions de micro-fragments	Augmente les émissions de micro-fragments
Matière	Fibres synthétiques Haute ténacité Forte élongation	Fibres naturelles, artificielles Mélange fibres naturelles/synthétiques Fibres courtes
Fil/Filament	Filament Filé de fibres discontinues de grande longueur Filé de fibres discontinues avec un fort taux de torsion Procédé de filature vortex Fils de faible pilosité Fils présentant une forte résistance à la traction Fils peu rugueux (surface plus lisse) Procédé de filature peignée Fil avec faible densité linéaire/fin	Filé de fibres discontinues de faible longueur Faible taux de torsion Procédé de filature à anneaux/continue
Etoffe	Tissé (dans la majorité des études) Tricoté (dans une seule étude) Structure de l'étoffe dense Bonne résistance à l'abrasion de l'étoffe Couture des bords des étoffes pour éviter les fils libres	Tricoté (dans la majorité des études) Faible densité Tissage "lâche" type satin Présence d'élasthanne
Finition mécanique	Rasage Calandrage Brûlage	Brossage Compaction Tribofinition
Teinture	Coloration par pièce Coloration au fil basse température et temps de cycle courts de teinture	Pas de teinture
Finition chimique	Agents hydrophobes Adoucissants Laminés	Agents hydrophiles Agents augmentant l'absorption d'humidité

B. Impacts des phases de production des chaussures

Il est à noter qu'aucune étude équivalente sur les émissions de micro-fragments durant le cycle de vie d'une chaussure n'a été identifiée. Comme pour l'ensemble du rapport, on peut assimiler la partie tige textile aux autres produits textiles d'habillement et de linge de maison. Cette hypothèse présente bien évidemment certaines limites, notamment car les tiges textiles ne subissent pas les mêmes contraintes que les textiles d'habillement ou le linge de maison lors de leur phase d'utilisation (notamment porté et lavage).

La production des chaussures se réalise en plusieurs étapes :

- La fabrication de la tige (qui désigne le dessus de la chaussure),
- La fabrication de la semelle,
- Le montage (qui consiste en l'assemblage de la tige et de la semelle),
- La finition.

Comme décrit plus tôt ce chapitre traite essentiellement de la production des semelles et de son impact sur la production de micro-fragments.

Les semelles de chaussures sont essentiellement fabriquées par des procédés d'extrusion moulage, puis éventuellement les différentes couches sont assemblées.

Les procédés peuvent conduire à l'émission de micro-fragments soit directement et ce majoritairement via la production de déchets lors des manipulations, stockage et élimination ; soit indirectement, c'est-à-dire en impactant les propriétés physico-chimiques des semelles et notamment les résistances à l'abrasion et au vieillissement.

Il n'y a cependant pas aujourd'hui d'ensemble d'études, comme celles décrites pour les textiles, permettant d'établir un tableau des différentes étapes des procédés et leurs impacts sur les relargages de microplastiques.

C. Impacts de la phase d'utilisation

La phase d'utilisation des TLC est une source significative d'émissions de micro-fragments, bien que les connaissances restent encore fragmentaires. Ce sujet a été traité plus en détail dans la partie II.A sur la seconde main.

Comme précisé précédemment, 50% du relargage de microfibrilles de vêtements aurait lieu lors du porté (friction, usure mécanique) et des lavages. Les études montrent généralement une diminution des émissions après les premiers lavages, suivie d'une stagnation. Le même phénomène semble se produire pour des textiles portés en conditions réelles, après un pic lors du 1^{er} lavage post-porté dû à différents facteurs d'usure. Ces résultats restent limités car la très grande majorité des études ne reproduisent pas les conditions réelles d'usage entre lavages.

Au-delà du lavage, les travaux du Dr. Nowack^{69,70} sur le polyester révèlent que l'exposition aux UV durant le porté dégrade la surface des fibres et génère des nano-fragments de formes différentes de ceux observés après lavage. Le potentiel de relargage durant ce vieillissement « naturel » pourrait être plus important que celui du lavage en machine, tant dans le milieu aqueux qu'aérien. Ces études mériteraient d'être étendues aux fibres naturelles, artificielles et biosourcées.

Quant aux chaussures, l'usure des semelles durant l'usage quotidien constitue une source sous-estimée : le Fraunhofer la classe comme la 7^{ème} source de microplastiques, devant le lavage textile. Dégradation UV, températures élevées et fatigue mécanique accélèrent les émissions.

Il est également important de noter que les micro-fragments et notamment ceux en matières naturelles sont des vecteurs importants de déplacement de substances chimiques dans les milieux aériens (ou elles captent également d'autres polluants) et aquatiques⁷¹. De plus, de nombreuses espèces chimiques, autorisées il y a encore quelques années (certains phtalates, formaldéhyde, PFAS, etc.), peuvent être retrouvées dans ces micro-fragments. Une étude⁷² a notamment été menée par des équipes de l'Institute of Chemical Process Fundamentals de l'Académie de Sciences de République Tchèque, sur le relargage de certains produits chimiques par des textiles neufs et usagés. Cette étude montre que les vêtements usagés relarguent en quantités très faibles des produits (aluminium, zinc, cobalt, arsenic, plomb, sélénium, PFAS) qui ne sont pas forcément liés à leur production, mais qui ont pu être absorbés par les textiles durant la phase d'utilisation. Les quantités restent

⁶⁹ Formation of nanoparticles during accelerated UV degradation of fleece polyester textiles, Yang and al., NanoImpact 35 (2024) 100520

⁷⁰ Characterization of fiber fragments released from polyester textiles during UV weathering, Pinlova and al., Environmental Pollution 322 (2023) 121012

⁷¹ Natural Fibers: A Missing Link to Chemical Pollution Dispersion in Aquatic Environments, Ladewig and al., Environ. Sci. Technol. 2015, 49, 12609–12610

⁷² Hazardous Substances in Textiles: A Comparative Study on Chemical Leaching, Shtukaturova and al., Dorbrin Congress, 2025

de l'ordre du ppm et ne poseront pas nécessairement de problème étant en dessous des seuils définis par les réglementations. Les produits les plus présents dans les textiles neufs restent essentiellement liés à la production.

Pour les matières synthétiques et notamment les chaussures, un point de vigilance majeur concerne le relargage d'additifs chimiques (plastifiants, anti-UV, anti-abrasion) par lixiviation dans les sols, avec des impacts toxiques documentés sur les écosystèmes. Les données quantitatives sur l'évolution des émissions au cours de la vie d'une chaussure font cependant cruellement défaut.

IV. Conclusion globale et perspectives

Ce rapport a permis de rassembler et de synthétiser les **rare études disponibles** sur le relargage de micro-fragments avec un focus sur l'impact des voies de valorisation des Textiles d'habillement, Linge de maison et Chaussures (TLC). Cette étude porte spécifiquement sur les micro-fragments et ne remet pas en cause les résultats positifs sur l'environnement mis en avant dans le cadre de l'étude relative aux impacts environnementaux de la filière REP TLC⁷³.

Plusieurs constats émergent :

- **Les relargages de micro-fragments sont une réalité à toutes les étapes du cycle de vie**, mais leur quantification et leur répartition restent très incertaines.
- **Les processus de recyclage**, bien que vertueux pour la réduction des déchets et la préservation des ressources, peuvent eux-mêmes générer des émissions de micro-fragments, notamment lors des étapes de préparation (délissage, découpe, broyage) et impacter les relargages de micro-fragments des produits contenant des MPR.
- **Les chaussures, et particulièrement les semelles**, sont un angle mort des études : leur contribution aux émissions de micro-fragments est peu renseignée, alors qu'elles représentent une source non négligeable, notamment via l'abrasion et le vieillissement.
- **Les méthodes de mesure et les normes actuelles** se concentrent presque exclusivement sur les émissions liées au lavage, laissant de côté les autres milieux (air, sol) et les autres étapes du cycle de vie, en particulier la fin de vie.

Ce travail met également en lumière plusieurs lacunes dans la connaissance et la gestion des émissions de micro-fragments lors de la valorisation des TLC :

- **Manque de données quantitatives** : Il existe peu de données fiables sur la répartition des relargages de micro-fragments selon les différentes voies de fin de vie ;
- **Peu d'études sur l'impact du vieillissement** des TLC sur le relargage de micro-fragments, en conditions réelles d'usage peuvent être trouvées. De plus, les études existantes sont souvent difficilement comparables en raison de protocoles expérimentaux différents, de méthodologies peu standardisées et très axées sur des mesures post lavages.
- **Insuffisance de recherches sur l'impact des procédés de recyclage** : leurs impacts directs (relargage lors des opérations) et indirects (qualité des matières recyclées et relargage accru lors de l'usage des produits finis) restent mal connus.

Plusieurs leviers d'action peuvent être mobilisés pour réduire les relargages de micro-fragments dans les étapes de valorisation :

- **Améliorer les procédés de préparation et de recyclage**
 - Mettre en place des systèmes de captation des poussières et de filtration de l'air dans les ateliers de délissage, découpe et broyage.
 - Optimiser les paramètres des procédés pour limiter la dégradation des fibres et la production de micro-fragments dans les produits finis contenant des MPR.
- **Renforcer la recherche sur le relargage de micro-fragments durant l'usage et la valorisation des TLC**
 - Lancer des études sur l'impact du vieillissement des TLC et des procédés de recyclage sur le relargage de micro-fragments.

⁷³ Refashion – Étude relative aux impacts environnementaux de la filière REP TLC usagés issus de la consommation des ménages – Juin 2025

- Se focaliser dans un premier temps sur le recyclage mécanique pour mieux évaluer et optimiser les impacts.
- Étudier spécifiquement le relargage lié aux chaussures, notamment aux semelles, et proposer des solutions pour le réduire.
- **Sensibiliser et former les acteurs de la filière (recycleurs, industriels, consommateurs) aux enjeux des micro-fragments et aux bonnes pratiques pour les limiter.**
- **Promouvoir une approche globale et collaborative**
 - Favoriser les partenariats entre chercheurs, industriels et pouvoirs publics pour partager les connaissances et co-construire des solutions.
 - Encourager l'éco-conception des TLC, en intégrant dès la phase de conception des critères de durabilité, de recyclabilité et de faible émission de micro-fragments.

Pour concilier circularité et limitation des émissions de micro-fragments il est essentiel de poursuivre le travail et s'interroger sur :

- **Quelles optimisations mettre en place** selon chaque procédé de recyclage pour minimiser les émissions de micro-fragments, tout en préservant la qualité des matières recyclées et la viabilité économique du recyclage ?
- **Comment concilier allongement de la durée de vie des TLC et maîtrise des émissions de micro-fragments ?** Le réemploi et la réutilisation, bien que bénéfiques pour l'environnement par rapport à l'achat de neuf, peuvent-ils avoir un impact négatif significatif sur le relargage de micro-fragments en raison du vieillissement des matériaux ?

En conclusion, ce rapport souligne l'importance de combler les lacunes de connaissances sur les émissions de micro-fragments en fin de vie des TLC, afin de mettre en balance les bénéfices globaux du recyclage et du réemploi évalués à l'échelle du cycle de vie, tout en proposant des pistes concrètes pour réduire leur impact environnemental et sanitaire.

V. Annexes

A. Annexe A : Définitions

i. Dimension

- IGEDD⁷⁴

Dans un rapport de 2023, l'IGEDD ne prend pas parti pour une définition claire en termes de taille des microplastiques. Ce rapport rappelle que la majorité des études mentionnent **5 mm** comme limite de **taille** pour la plus grande des dimensions. Mais il existe une grande variabilité dans les dimensions choisies (qui dépendent souvent des méthodes de mesures). La notion de facteur de forme (ratio longueur/diamètre) est abordée pour les textiles mais sans définition claire.

- ECHA⁷⁵

L'ECHA élabore en 2020 une définition pour les microplastiques, affinée dans le règlement (UE) 2023/2055 de la commission⁷⁶ REACH.

Les microplastiques sont des particules qui contiennent des polymères solides auxquels des additifs ou autres substances ont été ajoutés et où plus de 1% en masse des particules ont des dimensions comprises **entre 0.1 µm et 5 mm, ou pour les fibres, une longueur comprise entre 0.3 µm et 15 mm**, et un ratio **longueur/diamètre supérieur à 3**. Les polymères naturels qui n'ont pas été chimiquement modifiés sont exclus, de la même façon que les polymères qui sont biodégradables ou ont une solubilité supérieure à 2g/L.

La définition de polymère est celle définie dans le cadre de REACH.

Pour rappel cette définition n'est pas spécifique aux textiles et est donc plus générale. Elle est cependant reprise par exemple dans le rapport de synthèse commandité par l'APPLIA (Association Européenne des appareils ménagers) sur les impacts du lavage⁷⁷.

- MicroFiber Consortium⁷⁸

Dans son rapport Behind the Break, MFC, met en avant le débat autour des limites de taille, entre ceux qui souhaitent une définition le plus large possible afin de garder une flexibilité sur le périmètre des recherches, et ceux qui souhaitent avoir une définition plus fine afin de comparer proprement les études. Dans le rapport, les définitions proposées sont celles de Liu and al.⁷⁹. La définition de microfibre est définie par **un diamètre > 50 µm, une longueur de 1 µm à 5 mm et avec un ratio longueur/diamètre supérieur à 100**. Une autre définition de microfibre donnée dans le rapport Behind the Break est : **fibres ayant des dimensions de moins de 5 mm dans toutes les directions**.

- WRAP

Dans son rapport de 2019, le WRAP⁸⁰ décide lui de définir une microfibre comme : « n'importe quelle fibre d'origine textile qui mesure **moins de 5 mm dans l'axe de la longueur**, qu'elle soit intentionnellement formée ou créée via un procédé secondaire lors de la production, du process, de l'usage ou de la fin de vie. »

⁷⁴ IGEDD, La pollution par les microplastiques d'origine textile, Rapport n° 014908-01, Septembre 2023

⁷⁵ ECHA, Background document to RAC and SEAC opinions on intentionally added microplastics, 2020

⁷⁶ RÈGLEMENT (UE) 2023/2055 DE LA COMMISSION du 25 septembre 2023

⁷⁷ RISE Report 2024: Updated literature review on microplastics from household front load/top load washing machines and other reference household washing machines (e.g. used for EN and ISO testing) (literature from 2020-2024)

⁷⁸ Micro Fiber Consortium: Behind The Break 2025

⁷⁹ Liu, J., Yang, Y., Ding, J., Zhu, B. & Gao, W. Microfibers: a preliminary discussion on their definition and sources. Environ. Sci. Pollut. Res. 26, 29497–29501 (2019).

⁸⁰ WRAP - Textile derived microfibre release: Investigating the current evidence base. Textile derived microfibre release, 2019

- Technical Advisory Board (PEF)

Enfin dans un document de travail du Technical Advisory Board pour la méthode PEF européenne⁸¹, qui souhaite intégrer une nouvelle catégorie d'impact sur les microplastiques et microfibrilles, une distinction claire est réalisée entre les microplastiques (microparticules de polymères synthétiques) et microfibrilles (fragments de fibres de nature artificielle ou naturelle). Dans les deux cas la dimension <5 mm est donnée.

En conclusion, on notera l'absence d'une définition claire concernant les dimensions des microfibrilles, **même si la dimension maximale de 5 mm revient souvent pour les microfibrilles**. Cette confusion et variation dans les définitions complexifie le travail de comparaison entre les différentes études.

ii. Origine

Dans le cadre notamment des microplastiques, deux catégories sont définies : les microplastiques primaires, et les microplastiques secondaires.

Là aussi, il y a des divergences de définition selon les sources.

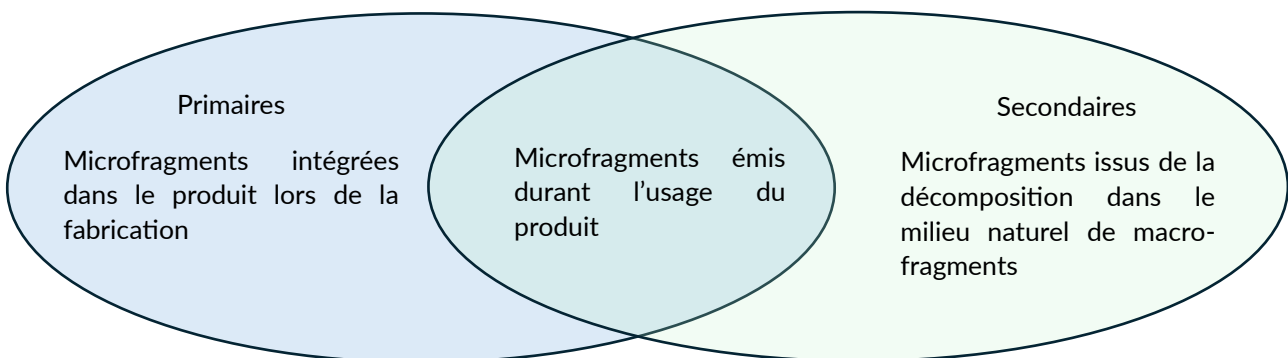


Figure 7 : Définitions de microfragments primaires et secondaires

S'il y a globalement un accord pour dire que les particules intégrées dans le produit dès la fabrication sont des sources primaires de microparticules, et que les micro-fragments issus de la décomposition des produits en fin de vie sont des particules secondaires, il y a une divergence sur le positionnement des micro-fragments émis durant la durée de vie du produit. L'IGEDD par exemple classe ces derniers dans les sources secondaires, alors que l'Union Internationale de Conservation de la Nature et l'ETC (European Topic Center) les classent dans les sources primaires.

Parmi les principales causes de relargage de micro-fragments secondaires dans le cadre des TLC on peut noter les mises en décharges sauvages ou les dépôts sauvages. Les éléments biologiques et environnementaux (milieux aqueux, rayons UV) sont à l'origine de cette transformation de macro-fragments en micro-fragments^{82,83}.

⁸¹ Implementation of microplastics and microfibers impact in the EF (physical effects on BIOTA impact category), Draft Working Document Oct 2025

⁸² Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review, Zhang and al., Env.pollution, Vol 274 2021

⁸³ From macro to micro: The key parameters influencing the degradation mechanism and the toxicity of microplastics in the environment, Kumari and al., Polymer Degradation and Stability Volume 233, 2025

Selon un rapport de 2018 du Parlement Européen⁸⁴, les microplastiques secondaires (issus de produits divers, pas uniquement de TLC) pourraient représenter jusqu'à 81% des microplastiques des océans. Nous n'avons pas de donnée sur les micro-fragments au sens large.

Ces définitions atteignent également des limites dans le cadre des produits et procédés du recyclage. Par exemple, dans quelle catégorie peut-on classer les fibres émises lors des procédés de recyclage, et les émissions des produits issus du réemploi ou de la réutilisation ?

Ces problématiques de définitions, si elles ne sont pas critiques pour le contenu de cette étude, peuvent être un élément clef lors de la rédaction ou de l'interprétation de potentielles réglementations s'appuyant sur ces termes.

iii. Matière

Pour les textiles, il est commun de distinguer les matières naturelles, artificielles et synthétiques. Pour les chaussures, la tige et la semelle sont souvent traitées de part et d'autre et peuvent être constituées de cuir, de textile (cf. précédemment) et de matériaux autres tels que les matériaux thermoplastiques, caoutchoutiques ou thermodurcissables.

Concernant les micro-fragments, les définitions matières sont parfois moins claires et basées la plupart du temps sur la définition des microplastiques.

L'UE inclut dans la définition de microplastiques les polymères **synthétiques ou naturels chimiquement modifiés**⁸⁵. Dans ce cadre-là les fibres artificielles feraient parties des composés considérés comme plastique. Leur faible quantité aujourd'hui par rapport aux autres types de fibres n'induit pas de changement majeur sur les conclusions. En 2023 la production de fibres artificielle représente 6% de la production totale de fibres, ce qui est du même ordre de grandeur que les chiffres obtenus dans l'étude caractérisation de Refashion en 2023⁸⁶.

Comme précisé plus haut, les fibres naturelles organiques (animales ou végétales) sont exclues de la définition de microplastique car ne faisant pas l'objet de transformation chimique. Pour bien expliciter ce qui est appelé transformation chimique on peut s'appuyer sur la définition juridique du plastique publiée par l'IPC⁸⁷ : Un polymère naturel est considéré comme non chimiquement modifié lorsque sa « **structure chimique demeure inchangée**, même si elle a été soumise à un processus ou traitement chimique ou à un processus physique de transformation minéralogique, par exemple pour éliminer les impuretés ». Dans ce cadre-là, **la viscose et le lyocell ne sont pas considérés comme des plastiques, contrairement aux fibres d'acétate de cellulose**.

Le terme transformation chimique reste ambigu, certains procédés pouvant modifier notamment en surface la structure chimique ou physique des matières naturelles (la mercerisation par exemple, ou certains procédés d'hydrofugations).

L'ECHA dans un rapport de 2020⁸⁸ met d'ailleurs en avant les difficultés de définition autour du terme plastique et le problème d'une non-standardisation des définitions. Comme cité plus haut, le Technical Advisory Board (TAB) du PEF exclut les matières artificielles de la définition de microplastique. Le TAB du PEF considère deux grandes familles : les microplastiques (particules de polymères synthétiques) et les microfibrilles (fragments de fibres d'origines naturelles et artificielles). Les microfibrilles synthétiques sont considérées comme des microplastiques.

Tout comme pour les fibres artificielles, il reste également des ambiguïtés concernant la classification du caoutchouc naturel pouvant être utilisé dans les semelles de chaussures.

⁸⁴ <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20181116STO19217/microplastics-sources-effects-and-eu-solutions>

⁸⁵ RÈGLEMENT (UE) 2023/2055 DE LA COMMISSION du 25 septembre 2023

⁸⁶ https://refashion.fr/pro/sites/default/files/rapport-etude/Synthèse_Etude_Caractérisation_Refashion_2023_FR.pdf

⁸⁷ <https://www.ct-ipc.com/blog-ipc/la-definition-juridique-du-plastique/>

⁸⁸ Background document to rac and seac opinions on intentionally added microplastics, Committee for Risk Assessment (RAC), ECHA, 2020

Le terme micro-fragments inclut la totalité de ces fibres et fragments de petite dimensions, peu importe leur matière, qui sont émis notamment par les textiles et chaussures.

Pour diverses raisons, historiques ou méthodologiques, les micro-fragments issus de fibres naturelles sont aujourd'hui moins étudiés que ceux issus de fibres synthétiques⁸⁹ (figure 3).

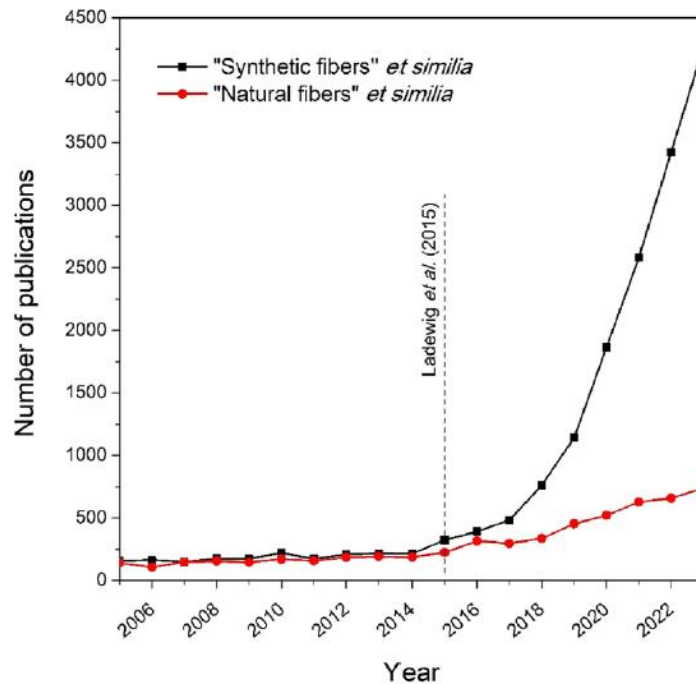


Figure 8 : Evolution du nombre de publications sur les micro-fragments

Pourtant les micro-fragments de fibres naturelles ne doivent pas être sous-estimés, d'après le rapport Behind the Break du MFC⁹⁰ : la quantité de microfibrilles d'origine naturelle serait supérieure à celles des microfibrilles plastiques. Une étude⁹¹, menée sur la comparaison des émissions de micro-fragments dans l'atmosphère entre 2016 et 2022 montre que les fibres d'origines cellulosiques seraient environ 2,5 fois plus nombreuses que les fibres synthétiques. La tendance est quand même à une augmentation de la proportion des fibres synthétiques, et un croisement des courbes d'émissions pourrait avoir lieu entre 2025 et 2030. Attention, ces chiffres prennent en compte l'ensemble des micro-fragments, sans distinction de leur origine.

Les mêmes tendances ont pu être observées dans certains milieux marins. Une étude⁹² de Stanton and al. réalisée en Angleterre sur des sites de prélèvement en rivière et atmosphériques montre que les fibres naturelles représentent 93,8% des fibres analysées et ne sont absentes que de 9,7% des prélèvements.

Un dernier point qu'il semble intéressant de préciser lorsqu'on aborde les notions de matières dans le cadre des micro-fragments, est la notion de biodégradabilité. Il s'agit d'une différence majeure entre les types de matières.

⁸⁹ Natural Fibers: Why Are They Still the Missing Thread in the Textile, Fiber Pollution Story? Stanton and al., *Environ. Sci. Technol.* 2024, 58, 12763–12766

⁹⁰ Micro Fiber Consortium: Behind The Break 2025

⁹¹ Man-made natural and regenerated cellulosic fibres greatly outnumber microplastic fibres in the atmosphere, Finnegan and al., *Environmental Pollution* 310 (2022)

⁹² Freshwater and airborne textile fibre populations are dominated by 'natural', not microplastic, fibres, Stanton and al., *Science of the Total Environment* 666 (2019)

B. Annexe B : méthodologies de mesures et normes

i. Les méthodologies de mesure

La norme « ISO 4484-1:2023 – Textiles et produits textiles – Microplastiques d’origines textiles – Partie 1 : Détermination des pertes de matière des étoffes pendant le lavage » est une méthode de test utilisable en laboratoire permettant d’évaluer la propension des étoffes (comportant des matières synthétiques) à libérer des microfibrilles plastiques au lavage et en quelles quantités. Elle a fait l’objet d’essais inter laboratoires auxquels le CTTN (participant au TC 38/WG 34) a contribué. La norme a été publiée en février 2023.

La norme « ISO 4484-2 – Textiles et produits textiles – Microplastiques d’origines textiles – Partie 2 : Evaluation qualitative et quantitative des microplastiques » est plus complète et propose une méthode analytique d’évaluation des microplastiques afin de pouvoir déterminer : leur nombre, leurs morphologies, la distribution dimensionnelle et leur type (nature, couleur). Cette norme s’applique à des échantillons de nature physique différente : solide, liquide ou prélèvement aérien.

La définition de taille est celle donnée dans la définition REACH. En revanche les polymères naturels et biodégradables sont exclus de cette norme.

La norme « ISO 4484-3:2023 – Textiles et produits textiles – Microplastiques d’origines textiles – Partie 3 : Mesure de la masse de matériaux collectés libérés par les produits finis textiles par la méthode de lavage domestique » décrit une méthode pour mesurer la masse de matériaux en sortie du tuyau d’évacuation d’une machine à laver normalisée conforme à l’ISO 6330 lors du processus de lavage. Elle s’applique aux produits finis textiles.

Dans son rapport Behind The Break, le MFC a recensé et comparé un ensemble de normes et méthodes de mesures (ne s'applique pas aux étoffes et produits textiles découpés), présentés dans le tableau 3.

TEST METHOD	THE MICROFIBRE CONSORTIUM	UNDER ARMOUR (DIN 19292)	HOHENSTEIN	AATCC TM 212 - 2021	ISO 4484-1	ISO 4484-2	ISO 4484-3
Overview	Measures material loss from fabrics during the initial wash.	Compares material loss between fabrics during the initial wash. A quick, inexpensive test to aid in early-stage product development.	Measures material loss from fabrics during the initial wash.	Measures material loss from fabrics during the initial wash. Includes the optional inclusion of detergent.	Measures material loss from fabrics during the initial wash.	Measures microplastic loss from fabrics during the initial wash.	Measures material loss from a fabric/garment through a domestic washing machine. Can be repeated across multiple wash cycles.
Qualitative/Quantitative	Quantitative	Qualitative	Quantitative & Semi-qualitative	Quantitative	Quantitative	Quantitative & Semi-qualitative	Quantitative
Number of Specimens required	8	8	4	4	4	4	≥2
Size detection limit	1.6µm	5µm	50µm	1.6µm	1.6µm	0.45µm, 0.8µm, 1µm, 5µm	10 ± 4µm
Ease of Use*	++	+++	+	++	++	+	+
Cost**	\$\$	\$	\$\$\$	\$\$	\$\$	\$\$\$	\$\$\$
Limitations	Does not differentiate fibre composition, polymer type and/or chemical additives.	Subjective analysis. Does not differentiate fibre composition, polymer type and/or chemical additives. White or pale fabrics are not applicable for this method.	Does not differentiate between polymer types and/or chemical additives. This method can only be performed by Hohenstein.	Does not differentiate fibre composition, polymer type and/or chemical additives.	Does not differentiate between polymer types and/or chemical additives.	A relatively new test, therefore, it has not undergone extensive validation and is not CEN approved. Some non-synthetic fibres can't be fully characterised.	Does not differentiate between polymer types and/or chemical additives.
<p>*Ease-of-use: From most (+++) to least (+) easy to use, with the Under Armour test being the easiest, as anyone within the supply chain can be trained to carry out the test, compared to Hohenstein test, which can only be carried out at Hohenstein labs.</p> <p>**Cost: From most (\$\$\$) to least (\$) expensive, with the Under Armour test being the least expensive as it was designed to be inexpensive for its adoption within the supply chain, compared to the most expensive tests such as Hohenstein, ISO 4484-2, and ISO 4484-3, which require specific resources (i.e., testing equipment and trained lab technicians) to carry out the test.</p>							

Tableau 3 : tableau comparatif des différentes méthodes de mesures de microfragments

Au-delà de ces méthodes normées, très axées sur le lavage, beaucoup de travaux techniques se basent sur des méthodes propres et des types de prélèvements spécifiques. Ce qui rend encore une fois difficile la plupart des comparaisons directes entre études. La demande des experts est très forte pour obtenir plus de standardisation.

ii. *Les limites des méthodes de mesures et normes*

Le Tableau 3 décrit une série de méthodologies/normes de mesures de la quantité de micro-fragments, mais essentiellement dans l'eau. Dans le cadre d'une étude complète de l'impact du cycle de vie d'un produit, il est donc à noter aujourd'hui un manque de méthodes normées ou standardisées pour la mesure des micro-fragments dans l'air principalement et dans les sols.

Aucune méthode de mesure n'est disponible pour les chaussures.

Ces difficultés de mise en place de méthodes sont liées à plusieurs éléments⁹³ :

- les stratégie de prélèvements : choix de volumes et lieux de prélèvements pour être représentatif, sélection des outils de prélèvements (notamment pour récupérer les faibles tailles de fragments).
- les méthodes de purification et préparation des échantillons : certaines méthodes de purification par exemple utilisent des procédés oxydatifs ou de « digestion » qui vont partiellement dégrader certaines catégories de fibres.
- les méthodes de comptage qui sont également souvent limitées par les outils à notre disposition et la représentativité des échantillons. Les difficultés sur ce point limitent notamment les études à des études quantitatives (masse de micro-fragments) et non qualitatives (matières, morphologie).

Ces limitations et le manque de méthodes et normes rendent d'autant plus compliquées les comparaisons entre études et peuvent expliquer également les écarts de données ou certaines différences dans les conclusions entre articles et études.

⁹³ Are We Underestimating Anthropogenic Microfiber Pollution? A Critical Review of Occurrence, Methods, and Reporting; Atheya and al., Environmental Toxicology and Chemistry—Volume 41, Number 4—pp. 822–837, 2022

C. Annexe C : Contexte réglementaire et affichage environnemental

i. REACH

Le 25 septembre 2023, dans le cadre du règlement REACH, la commission européenne a adopté la loi sur les restrictions des microplastiques vendus seuls ou ajoutés intentionnellement. Les définitions des microplastiques sont celles mentionnées dans le paragraphe précédent à savoir : particules de polymère synthétique de taille inférieure à 5 mm qui sont organiques, insolubles dans l'eau et résistantes à la dégradation. Une période transitoire a été mise en place pour l'application de l'interdiction de vente des microplastiques concernés. Les produits TLC ne sont pour l'instant pas explicitement inclus dans cette liste⁹⁴, les microplastiques présents étant considérés comme non ajoutés intentionnellement. A ce jour les autres types de micro-fragments (notamment ceux en matière naturelle) ne sont pas abordés dans le règlement REACH.

ii. France

Au niveau de la France, la loi AGECE a inclus un volet sur la mise en place de ces interdictions dès 2024⁹⁵ : « Il est mis fin à la mise sur le marché de toute substance à l'état de microplastique, telle quelle ou en mélange, présente de manière intentionnelle en concentration égale ou supérieure à 0,01 %, considérée comme le rapport entre la masse de microplastique et la masse totale de l'échantillon de matière considéré contenant ce microplastique. Les microplastiques naturels qui n'ont pas été modifiés chimiquement ou biodégradables ne sont pas concernés ».

La France devait également mettre en place une obligation, à partir de janvier 2025, pour les machines à laver vendues en France, de posséder un filtre à microfibrilles. Le décret d'application n'est toujours pas sorti à ce jour, et aucune date n'est programmée.

iii. PEFCR

Le JRC mène actuellement des travaux, en s'appuyant sur le projet MarILCA⁹⁶ pour intégrer dans les analyses de cycle de vie une nouvelle catégorie d'impact : effets physiques sur le BIOTA. Et ceci que ce soit dans le milieu aquatique, terrestre ou aérien.

Certaines limites ont été soulevées : manque de données sur l'impact des microplastiques sur la santé humaine, disponibilité des données et harmonisation entre les différentes bases, problématique des facteurs de forme.

iv. Affichage environnemental français

L'affichage environnemental textile, qui est déployé depuis le 1^{er} octobre 2025⁹⁷ (sur la base du volontariat), au-delà de l'utilisation de la méthode ACV (basée sur la dernière version des PEFCR Apparel and Footwear), inclut un complément sur les microfibrilles couvrant à la fois le caractère biodégradable de la fibre (pour 70% du calcul) et la capacité du produit à relarguer des fibres dans l'environnement (pour 30%). Le calcul se base uniquement sur la composition du produit .

⁹⁴ <https://trade.ec.europa.eu/access-to-markets/fr/news/restriction-des-microplastiques-dans-lue-partir-du-17-octobre-2023>

⁹⁵ https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000041553847

⁹⁶ <https://marilca.org/>

⁹⁷ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/affichage-environnemental-vetements>

D. Annexe D : Liste des acteurs interrogés

Catégorie d'acteurs	Acteur
Organismes/Centres de Recherche	Microfiber Consortium
	Laboratoire Gemtex
	EMPA-SwissFederal Laboratory for material science and technologies
	Université Caen-IFREMER
	European Outdoor Group (EOG)
Centres Techniques	CETI
	CTC
	CETIA
Recycleurs et experts	Lavoisier Circular Transition
	Ecobalyse
	The8Impact

E. Annexe E : Références bibliographiques spécifiques aux impacts de production textiles sur le relargage de micro-fragments

- Impact of textile composition, structure, and treatment on microplastic release during washing: a review Gliaudelyte and al. *Textile Research Journal* 2025, Vol. 95(1-2) 220–232
- Release of microplastic fibers from synthetic textiles during household washing; Akyildiz and al.; *Environmental Pollution* 357 (2024) 124455
- Synthetic textile and microfiber pollution: a review on mitigation strategies; Ramasamy and al.; *Environmental Science and Pollution Research*, Volume 28, pages 41596–41611, (2021)
- The origin of microplastic fiber in polyester textiles: The textile production process matters; Cai and al.; *Journal of Cleaner Production* 267 (2020) 121970
- La pollution par les micro-plastiques d'origine textile ; IGEDD
- Bibliographie de la thèse CIFRE TLM « Textile microplastic leaks », COSNE Antoine and al., Présentation de la méthode de thèse TML et de son étude bibliographique sur le relargage de fibres microplastiques. 23 pages
- Textile Fiber Pollution: Relating Textile Features to Fiber Release in Pilling Experiments; Pereira and al.; *ACS Omega* 2025, 10, 22472–22481
- A review on microplastic emission from textile materials and its reduction techniques; Aravin Prince Periyasamy and al.; *Polymer Degradation and Stability* 199 (2022)
- Textile derived microfibre release: Investigating the current evidence base; WRAP, 2019
- Microfiber Pollution: A Systematic Literature Review to Overcome the Complexities in Knit Design to Create Solutions for Knit Fabrics" Allen and al.; *Environ. Sci. Technol.* 2024, 58, 4031–4045
- Unveiling the Microfiber Release Footprint: Guiding Control Strategies in the Textile Production Industry Wang and al.; *Ecotoxicology and Public Health* December 8, 2023
- Investigation on microfiber release from elastane blended fabrics and its environmental significance; R. Rathinamoorthy and al.; *Science of The Total Environment* Volume 903, 10 December 2023
- BEHIND THE BREAK EXPLORING FIBRE FRAGMENTATION; The Microfibre Consortium
- Root Cause analysis: unravelling the Root cause behind fibre fragmentation in Textiles; The Microfibre Consortium; Technical Research Report 2025 MFC
- Emission of fibres from textiles: A critical and systematic review of mechanisms of release during machine washing; Tedesco and al.; *Science of The Total Environment* Volume 955, 10 December 2024
- Fibrous Microplastics Release from Textile Production Phases: Brief Review of Current Challenges and Applied
- Research Directions; Hossain and al.; *Materials* 2025, 18, 2513
- Microplastic emissions in textile wet processing: Progress, challenges, and mitigation strategies; Ali and al.; *Science of The Total Environment*; Volume 1002, 1 November 2025, 180589
- Investigating the influence of yarn characteristics on microfibre release from knitted fabrics during laundering Hazlehurst and al.; *Sec. Toxicology, Pollution and the Environment* Volume 12 - 2024 | "

Références bibliographiques

- A framework for the assessment of marine litter impacts in life cycle impact assessment, Woods and al., Ecological Indicators, 129 (2021)
- Are Biobased Microfibers Less Harmful than Conventional Plastic Microfibers: Evidence from Earthworms, Courtene Jones and al., Environ. Sci. Technol. 2024, 58, 20366–20377
- Are We Underestimating Anthropogenic Microfiber Pollution? A Critical Review of Occurrence, Methods, and Reporting; Atheya and al., Environmental Toxicology and Chemistry—Volume 41, Number 4—pp. 822–837, 2022
- Are your shoes safe for the environment? – Toxicity screening of leachates from microplastic fragments of shoe soles using freshwater organisms; Kim and al.; Journal of Hazardous Materials 421 (2022)
- Bibliographie de la these cifre tml « textile microplastic leak », Présentation de la méthode de thèse TML et de son étude bibliographique sur le relargage de fibres microplastiques. Cosne and al., 2024
- Characterization of fiber fragments released from polyester textiles during UV weathering, Pinlova and al., Environmental Pollution 322 (2023) 121012
- Degradation Rates of Plastics in the Environment, Chamas and Al, ACS Sustainable Chem. Eng. 2020, 8, 3494–3511
- Differences in the release of microplastic fibers and fibrils from virgin and recycled polyester textiles, Gao and al., Resources, Conservation & Recycling 207 (2024)
- ECHA, Background document to RAC and SEAC opinions on intentionally added microplastics, 2020.
- Effect of the age of garments used under real-life conditions on microfibre release from polyester and cotton clothing, Fernandes and al., Environmental Pollution Volume 348, 2024
- Emission of fibres from textiles: A critical and systematic review of mechanisms of release during machine washing, Tedesco and al., Science of The Total Environment, Volume 955, 10 December 2024
- État de l'art des solutions de recyclage des semelles de chaussures en Europe, Refashion, 2025
- Formation of nanoparticles during accelerated UV degradation of fleece polyester textiles, Yang and al., NanoImpact 35 (2024) 100520
- Freshwater and airborne textile fibre populations are dominated by 'natural', not microplastic, fibres, Stanton and all., Science of the Total Environment 666 (2019)
- From macro to micro: The key parameters influencing the degradation mechanism and the toxicity of microplastics in the environment, Kumari and al., Polymer Degradation and Stability Volume 233, 2025
- Global discharge of microplastics from mechanical recycling of plastic waste, Suzuki and al., Env. Pollution Volume 348, 1 May 2024
- Hazardous Substances in Textiles: A Comparative Study on Chemical Leaching, Shtukaturova and al., Dorbrin Congress, 2025
- <https://infos.ademe.fr/economie-circulaire-dechets/2025/microplastiques-une-contamination-potentiellement-importante-des-sols-francais/>
- <https://lemedecin.fr/medical/pathologies/byssinose.html>
- <https://marilca.org/>
- https://pro.refashion.fr/sites/default/files/rapport-etude/etude_recyclage_semelles_CETIA_refashion2025.pdf
- https://pro.refashion.fr/sites/default/files/rapport-etude/Revue%20des%20perturbateurs%20et%20faciliteurs%20au%20recyclage%20des%20TLC_VF_Refashion_2025.pdf
- https://refashion.fr/pro/sites/default/files/rapport-etude/Synthese_Etude_Caracterisation_Refashion_2023_FR.pdf
- <https://trade.ec.europa.eu/access-to-markets/fr/news/restriction-des-microplastiques-dans-lue-partir-du-17-octobre-2023>
- <https://wasserdreinnull.de/en/blog/microplastics-from-shoe-soles/>
- <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/09/22/plastic-pellets-council-signs-off-regulation-to-reduce-pollution-from-microplastics/>
- <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/04/08/plastic-pellet-losses-council-and-parliament-agree-on-new-rules-to-reduce-microplastic-pollution/pdf>
- <https://www.ct-ipc.com/blog-ipc/la-definition-juridique-du-plastique/>
- https://www.e-a.earth/wp-content/uploads/2024/05/EA_2024_Update_Primary_Microplastics.pdf
- <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/affichage-environnemental-vetements>
- <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/microplastics-from-textiles-towards-a-circular-economy-for-textiles-in-europe>
- <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20181116STO19217/microplastics-sources-effects-and-eu-solutions>
- https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000041553847
- https://www.opcleansweep.eu/application/files/1416/3004/9689/OCS_Manual_FR.pdf
- <https://www.surfrider.fr/press/union-europeenne-adopte-une-reglementation-inedite-sur-les-granules-plastiques-pour-reduire-la-pollution-aux-microplastiques-mais-les-derogations-et-delais-risquent-den-limiter-la/>
- IGEDD, La pollution par les microplastiques d'origine textile, Rapport n° 014908-01, Septembre 2023
- Implementation of microplastics and microfibers impact in the EF (physical effects on BIOTA impact category), Draft Working Document Oct 2025
- Implementation of microplastics and microfibers impact in the EF (physical effects on BIOTA impact category), Draft Working Document Oct 2025
- Improving Mechanical Textile Recycling by Lubricant Pre-Treatment to Mitigate Length Loss of Fibers, Lindstrom and al., Sustainability 2020, 12, 8706
- Kunststoffe in der Umwelt: mikro und makroplastik, Bertling and al; Fraunhofer Institute publication, 2018

- Le recyclage chimique des textiles, Refashion, 2024
- Le recyclage thermomécanique des textiles, Refashion, 2025
- Liu, J., Yang, Y., Ding, J., Zhu, B. & Gao, W. Microfibers: a preliminary discussion on their definition and sources. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 29497–29501 (2019).
- Man-made natural and regenerated cellulosic fibres greatly outnumber microplastic fibres in the atmosphere, Finnegan and al., *Environmental Pollution* 310 (2022)
- Mechanical Recycling of Textiles: identifying Factors Impacting Fibre Quality, Lindstrom k., Doctorate PhD. 2025
- Mechanically Recycled Textiles: A Source of Microplastic Fiber Emissions, *Environ. Sci. Technol.* 2026, 60, 1810–1818
- Micro Fiber Consortium: Behind The Break 2025
- Microfiber Pollution in the Earth System, Liu and all, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (2022) 260:13
- Microfiber Pollution: A Systematic Literature Review to Overcome the Complexities in Knit Design to Create Solutions for Knit Fabrics, Allen and all., *Environ. Sci. Technol.* 2024, 58, 4031–4045
- Microfiber Release during Apparel Manufacturing process – A greater concern than Domestic Laundering, Balasaraswahi and al., *Emerging Contaminants Available online* 21 August 2025, 100559 In Press
- Microfibres: the invisible pollution from textiles, The First Sentier MUFGE Sustainable Investment Institute, 2022
- Microplastic accumulation on urban footpaths: microplastic deposition on concrete and asphalt surfaces after a single running event; Van Der Werf and al., *International Journal of Environmental Science and Technology*, Volume 23, article number 102
- Microplastics from shoe sole fragments cause oxidative stress in a plant (*Vigna radiata*) and impair soil environment Lee and al.; *Journal of Hazardous Materials* Volume 429, 5 May 2022,
- Natural Fibers: A Missing Link to Chemical Pollution Dispersion in Aquatic Environments, Ladewig and al., *Environ. Sci. Technol.* 2015, 49, 12609–12610
- Natural Fibers: Why Are They Still the Missing Thread in the Textile, Fiber Pollution Story? Stanton and al., *Environ. Sci. Technol.* 2024, 58, 12763–12766
- Nonwoven Fabrics: The Giant of Micro(nano)plastic Pollution Hidden in the Corners of Life; Tand and al; *Environ. Sci. Technol.* 2025, 59, 11429–11432
- On the horns of a dilemma: Evaluation of synthetic and natural textile microfibre effects on the physiology of the pacific oyster *Crassostrea gigas*, Detrée and al., *Environmental Pollution* Volume 331, Part 2, 15 August 2023
- Plastics on the rocks: the invisible but harmful footprint of shoe soles; Cecchi; *Comptes Rendus. Géoscience*, Volume 355 (2023), pp. 135-144
- Refashion - State of the art of recycling solutions for shoe soles - July 2025
- Refashion – Étude relative aux impacts environnementaux de la filière REP TLC usagés issus de la consommation des ménages – Juin 2025
- RÈGLEMENT (UE) 2023/2055 DE LA COMMISSION du 25 septembre 2023
- RISE Report 2024: Updated literature review on microplastics from household front load/top load washing machines and other reference household washing machines (e.g. used for EN and ISO testing) (literature from 2020-2024)
- Serviceability and washing durability of recycled polyester, wool, and acrylic: Sustainability concerns and microfiber leaching, Abbas and al., *Industrial Crops & Products* 225 (2025) 120450
- Strategic overview of rehabilitation practices and action plans for byssinosis: A holistic review; Vaishali and al.; *Clinical Epidemiology and Global Health* Vol 33, 2025
- Technical Research Report: Recycled Polyester within the context of Fibre Fragmentation, MFC, 2023
- Textile Recycling's Hidden Problem: Surface-Modified Fiber Fragments Emitted at Every Stage, Manivannan and all., *Environ Sci Technol.* 2025
- The origin of microplastic fiber in polyester textiles: The textile production process matters, Cai and al, *Journal of Cleaner Production* 267 (2020) 121970
- The potential for a plastic recycling facility to release microplastic pollution and possible filtration remediation effectiveness, Brown and al., *Journal of Hazardous Materials Advances* 10 (2023)
- Transforming mechanically recycled cotton and linen from post-consumer textiles into quality ring yarns and knitted fabrics, Raiskio and al, *Waste Management Bulletin*, Vol 3, Issue 1, April 2025, 76-86
- Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review, Zhang and al., *Env. pollution*, Vol 274 2021
- Updated Literature Review on Microplastics from Household Washing Machines (2020-2024), RISE Research Institutes of Sweden AB, 2024
- Waste plastic management: Recycling and the environmental health nexus, Nafiu and al., *Cleaner Materials* 15 (2025)
- WRAP - Textile derived microfibre release: Investigating the current evidence base. Textile derived microfibre release, 2019