

Le plastique dans l'environnement Suisse

État des connaissances sur les impacts environnementaux des plastiques (micro- et macroplastiques)

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2020



Mandant

Office fédéral de l'environnement (OFEV)
Division Déchets et matières premières
CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Accompagnement OFEV

Amanda Finger

Mandataire

EBP Schweiz AG
Zollikerstrasse 65
8702 Zollikon
Suisse

Téléphone +41 44 395
11 11
info@ebp.ch
www.ebp.ch

**Auteurs et
auteur**

Isolde Erny
Dr. Isabel O'Connor
Dr. Andy Spörri

Remarque: Le présent rapport a été réalisé sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Impression: 15. April 2020
2020-04-15_Le_Plastique_dans_l'environnement_Suisse.docx

Résumé

En Suisse, le plastique est présent partout dans l'environnement: dans les sols, les eaux et leurs sédiments, l'air ainsi que dans les organismes vivants. Cette contamination et ses effets possibles sur l'homme et l'animal ainsi que les mesures possibles sont discutés intensivement en politique et dans les médias. Ce rapport doit servir de base pour la poursuite des discussions et des travaux sur le sujet.

Ce rapport traite des micro- et macroplastiques dans l'environnement en Suisse. En tant que méta-étude, il donne un aperçu systématique de l'état actuel des connaissances sur la base d'études déjà réalisées. Dans le même temps, les connaissances existantes sont présentées de manière intelligible et dans la mesure du possible classées. Par souci de concision et de clarté, le rapport se concentre sur les études clés importantes et ne donne pas d'aperçu complet de toutes les études existantes. En raison de l'intérêt médiatique et politique pour le sujet, il faut s'attendre à ce que de nouvelles bases scientifiques sur le sujet soient continuellement publiées.

Production, utilisation et élimination des matières plastiques

Les plastiques ont des propriétés très différentes selon le type de polymère et les additifs qu'ils contiennent. Les matières plastiques sont devenues indispensables en tant que matériaux en raison de leurs propriétés techniques diverses. Elles sont donc utilisées en grande quantité dans toutes les industries et tous les domaines de la vie quotidienne. Environ 1 million de tonnes de matières plastiques sont utilisées chaque année en Suisse. Une partie est éliminée dans la même année, le reste est utilisé plus longtemps. Au total, environ 780'000 t de plastiques sont éliminées chaque année – plastiques ayant une courte durée de vie et ceux utilisés plus longtemps.

Introduction de matières plastiques dans l'environnement

Il existe de nombreuses **sources** d'émissions de plastiques dans l'environnement. Si les plastiques sont libérés dans l'environnement sous forme de petites particules d'un diamètre maximal de 5 mm, on les appelle des microplastiques. On parle de macroplastiques lorsque les particules de plastique ont un diamètre ≥ 5 mm. Ces derniers comprennent également des produits entiers tels que des bouteilles en PET abandonnées, des sacs en plastique, etc.

Aujourd'hui, il existe de grandes incertitudes quant à la quantité de macro- ou microplastiques réellement introduits dans l'environnement. Les données quantitatives actuelles sont basées sur des mesures ponctuelles extrapolées d'une part et sur des estimations modélisées d'autre part.

Les macroplastiques pénètrent dans l'environnement par le biais du littering – des déchets négligemment jetés sur la voie publique – et de l'élimination inappropriée des plastiques, comme par exemple avec les résidus biodégradables. Là, les macroplastiques se désintègrent au fil du temps en microplastiques.

Dans le cas des microplastiques, les émissions provenant de l'utilisation de produits en plastique dominent par rapport aux microplastiques produits de manière intentionnelle. La principale source est l'abrasion des pneus, suivie d'un grand nombre d'autres sources provenant des ménages, des milieux bâtis, des routes, de l'agriculture, de la construction, de l'industrie et de l'artisanat.

Les plastiques parviennent dans le sol, les eaux de surface et l'air par des **voies d'apport** diffuses et ponctuelles. Les voies d'apport importantes sont les entrées indirectes avec les eaux usées, le ruissellement et la suspension de particules dans l'air, ainsi que les entrées directes dans les eaux de surface, les sols et l'air. Grâce à la gestion des déchets et des eaux usées, une partie des émissions de plastiques peut être retenue avant d'atteindre l'environnement. Ces mécanismes de rétention et de filtrage sont particulièrement importants pour les matières plastiques présentes dans les eaux usées et pour les déchets abandonnés collectés lors du nettoyage de l'espace public.

Il est encore difficile de quantifier les apports dans les différents compartiments environnementaux et l'efficacité des mesures de rétention. Des estimations récentes montrent toutefois que les apports sur et dans les sols sont beaucoup plus élevés que les apports dans les eaux de surface. Il convient donc d'accorder une plus grande attention aux sols.

Devenir et comportement des plastiques dans l'environnement

Les matières plastiques et surtout les microplastiques se retrouvent en Suisse dans les sols et les eaux de surface, dans l'air et dans les organismes vivants. Cependant, il est très difficile de mesurer la concentration des microplastiques dans l'environnement, en particulier dans les sols et les sédiments, et il n'existe pas encore d'analyse standardisée. Il y a donc encore des lacunes relatives aux données. Jusqu'à présent, les particules de microplastique n'ont pas été détectées dans les eaux souterraines.

En général, les particules de faible densité se trouvent dans la phase aqueuse des eaux de surface, tandis que les particules de densité plus élevée coulent et se déposent dans les sédiments des rivières et des lacs. Les particules de plastique dans les sols sont en grande partie immobiles, mais peuvent être transportées dans les couches plus profondes du sol par des organismes tels que les vers de terre.

Le plastique ne se décompose que très lentement dans l'environnement et y reste longtemps. La lumière du soleil et les contraintes mécaniques telles que le transport provoquent la fragmentation des morceaux de plastique, mais la dégradation complète est très lente et peut parfois prendre plusieurs centaines d'années.

Effets des plastiques sur l'environnement

Les micro- et macroplastiques peuvent potentiellement avoir un impact sur la santé humaine et animale. Toutefois, il existe encore un grand besoin de recherche dans ce domaine. Des blessures du tube digestif d'animaux causées par des macroplastiques et l'enchevêtrement des animaux dans des filets de pêche et des sacs de plastique dans les océans ont été observés. Cependant, les effets des microplastiques sur les personnes et les animaux

dans des concentrations environnementales telles qu'observées actuellement sont encore mal compris. En effet, ces effets dépendent de facteurs qui restent encore à étudier, comme par exemple les propriétés chimiques et physiques des particules de plastique.

Les recherches encore limitées concernant les **systèmes aquatiques** ne permettent pas de faire des déclarations fiables sur le risque pour l'homme et les animaux. D'une part, les concentrations mesurées sont généralement sous-estimées car on se concentre sur les particules de plus grande dimension. D'autre part, les effets des particules de dimensions et de composition différentes sont peu étudiés.

Les données sur les **sols** font encore largement défaut, mais des études ont permis d'observer des effets négatifs chez des organismes du sol tels que les vers de terre ou les collemboles dans des conditions de laboratoire.

Dans l'**air**, les microplastiques constituent une petite partie de la poussière fine (PM₁₀ resp. PM_{2,5}). Les valeurs limites d'immission des particules sont régies par l'Ordonnance sur la protection de l'air et sont mesurées dans le cadre de son exécution. En général, l'homme et l'environnement sont protégés des effets nocifs si les limites d'immission sont respectées.

Conclusion

Les plastiques n'ont pas leur place dans l'environnement. Il faut donc éviter respectivement réduire leur apport. Étant donné la longue vie des plastiques dans l'environnement, leurs concentrations dans l'environnement ne cesseront d'augmenter si les apports restent inchangés, amplifiant par la même occasion les risques pour les personnes et les animaux.

Il est donc important, d'une part, d'intensifier la récolte des données nécessaires à une analyse de risques pertinentes des impacts environnementaux des plastiques. Cela concerne les sources, les voies d'apport et les processus de transport des matières plastiques, mais aussi leurs effets dans les conditions environnementales prévalant dans des écosystèmes pollués ou vulnérables en Suisse.

D'autre part, conformément au principe de précaution et en l'absence de données appropriées, il est nécessaire d'examiner comment réduire les apports de matières plastiques dans l'environnement afin de prévenir les effets négatifs. En fonction de la source, des solutions peuvent être trouvées aux niveaux de la production, de l'utilisation et de l'élimination des matières plastiques. La conception des mécanismes de rétention actuels est également à améliorer et d'autres mécanismes sont à développer pour les voies d'apport importantes dans l'environnement.

Zusammenfassung – Plastik in der Schweizer Umwelt

Plastik findet sich überall in der Umwelt in der Schweiz: in Böden, Gewässern, deren Sedimenten und der Luft sowie in Lebewesen. Diese Tatsache und ihre möglichen Auswirkungen auf Menschen und Tiere sowie mögliche Massnahmen werden in der Politik und in den Medien intensiv diskutiert. Der Bericht soll als erste Grundlage zu weiteren Diskussionen und Arbeiten zum Thema dienen.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit Mikro- und Makroplastik in der Schweizer Umwelt. Er gibt als Metastudie einen systematischen Überblick über den aktuellen Wissensstand auf der Basis bereits erstellter Studien – gleichzeitig wird das vorhandene Wissen in verständlicher Form dargelegt und soweit heute möglich, eingeordnet. Im Sinne der Kürze und der Übersichtlichkeit fokussiert der Bericht auf wichtige Schlüsselstudien und verzichtet auf eine vollständige Übersicht aller vorhandener Studien. Es ist dabei aufgrund des medialen und politischen Interessens am Thema zu erwarten, dass laufend neue wissenschaftliche Grundlagen zum Thema veröffentlicht werden.

Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Kunststoffen

Kunststoffe weisen je nach Polymertyp und enthaltenen Additiven sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Kunststoffe sind aufgrund verschiedenster technischer Eigenschaften als Werkstoffe nicht mehr wegzudenken. Entsprechend werden sie in allen Branchen und Lebensbereichen in grossen Mengen eingesetzt. In der Schweiz kommen jährlich rund 1 Million Tonnen Kunststoffe zum Einsatz. Ein Teil davon wird im gleichen Jahr entsorgt, der Rest wird länger verwendet. Insgesamt werden jedes Jahr rund 780'000 t Kunststoffe entsorgt – darunter sowohl kurzlebige als auch solche, die länger im Einsatz waren.

Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt

Es gibt zahlreiche **Quellen** für die Emissionen von Kunststoffen in die Umwelt. Wenn die Kunststoffe als kleine Partikel mit maximal 5 mm Durchmesser in die Umwelt gelangen, spricht man von Mikroplastik. Von Makroplastik spricht man, wenn die Kunststoffstücke ≥ 5 mm sind, hierzu gehören aber auch ganze Produkte wie gelitterte PET-Flaschen, Plastiksäcke und dergleichen.

Heute bestehen grosse Unsicherheiten bezüglich der effektiv in die Umwelt eingetragenen Mengen von Makro- oder Mikroplastik. Die heutigen Mengenangaben basieren einerseits auf hochgerechneten Punktmessungen und andererseits auf Modellabschätzungen.

Makroplastik gelangt durch Littering – das achtlose Wegwerfen von Abfall – und sonstige nicht korrekt entsorgte Kunststoffe, wie beispielsweise Falschentsorgung in der Grüngutsammlung, in die Umwelt. Dort zerfällt es über die Zeit zu Mikroplastik.

Beim Mikroplastik dominieren die Emissionen aus der Nutzung von Kunststoffprodukten gegenüber beabsichtigt produziertem Mikroplastik. Die grösste Quelle ist Reifenabrieb, gefolgt von einer Vielzahl weiterer Quellen aus Haushalten, Siedlungen, Strassen, Landwirtschaft, Bauwesen sowie Industrie und Gewerbe.

Kunststoffe gelangen durch diffuse und punktuelle Eintragspfade in die Böden, Oberflächengewässer und die Luft. Wichtige Eintragspfade sind der indirekte Abtransport mit Abwässern, Abschwemmungen und Aufwirbelung in der Luft sowie direkte Einträge in Oberflächengewässer, Böden und die Luft. Durch die Abfall- und Siedlungswasserwirtschaft wird ein Teil der Kunststoff-Emissionen auf dem Weg in die Umwelt zurückgehalten. Diese Rückhalte- und Filtermechanismen sind insbesondere bedeutend für Kunststoffe im Abwasser sowie für gelitterte Abfälle, die durch Reinigungsmassnahmen wieder eingesammelt werden.

Es ist nach wie vor schwierig, die Einträge in die verschiedenen Umweltkompartimente und die Effizienz der Rückhaltmassnahmen zu quantifizieren. Neueste Abschätzungen zeigen aber, dass die Einträge auf und in die Böden viel höher als die Einträge in die Oberflächengewässer sind. Den Böden sollte somit mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Verbleib und Verhalten von Kunststoffen in der Umwelt

Kunststoffe und insbesondere Mikroplastik finden sich in der Schweiz in Böden und Oberflächengewässern, in der Luft und in Lebewesen. Die Messung der Konzentration von Mikroplastik in der Umwelt ist jedoch sehr schwierig, insbesondere in Böden und Sedimenten, und es existiert noch keine standardisierte Analytik. Deshalb gibt es hier noch Datenlücken. Im Grundwasser wurde bisher kein Mikroplastik nachgewiesen.

Generell sind in der Wasserphase von Oberflächengewässern Partikel mit geringer Dichte zu finden, während Partikel grösserer Dichte in Fluss- und Seesedimente absinken. Plastikpartikel in Böden sind weitgehend immobil, können aber durch Organismen wie Regenwürmer in tiefere Bodenschichten gelangen.

Plastik wird in der Umwelt nur sehr langsam abgebaut und verbleibt dort entsprechend über lange Zeiträume. Durch Sonnenlicht und mechanische Beanspruchung wie Transport zerkleinern sich die Plastikstücke zwar, aber der vollständige Abbau verläuft sehr langsam – mitunter über mehrere hundert Jahre.

Auswirkungen von Kunststoffen in der Umwelt

Mikro- und Makroplastik kann möglicherweise Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen und Tieren haben, es besteht diesbezüglich jedoch noch grosser Forschungsbedarf. Belegt sind Verletzungen des Verdauungstraktes von Tieren durch Makroplastik sowie das Verheddern von Tieren in Fischernetzen und Plastiksäcken in den Weltmeeren. Die Effekte von Mikroplastik auf Menschen und Tiere unter gängigen Umweltkonzentrationen sind aber noch kaum verstanden, da sie von noch zu untersuchenden Faktoren wie den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Kunststoffpartikel abhängen.

Die wenigen bisher durchgeführten Studien für **aquatische Systeme** lassen keine belastbaren Aussagen zum Risiko für Menschen und Tiere zu. Einerseits werden die gemessenen Konzentrationen durch den Fokus auf grössere Partikel meist unterschätzt. Andererseits sind die Auswirkungen der Partikel mit unterschiedlicher Grösse und Beschaffenheit nur wenig erforscht.

Für **Böden** fehlen Daten noch weitgehend, allerdings wurden in Studien negative Effekte bei Bodenorganismen wie Regenwürmern oder Springschwänzen unter Laborbedingungen beobachtet.

In der **Luft** ist Mikroplastik ein kleiner Teil des Feinstaubs (PM₁₀ resp. PM_{2,5}). Die Immissionsgrenzwerte für Feinstaub werden durch die Luftreinhalte-Verordnung geregelt und im Rahmen des Vollzugs gemessen. Bei der Einhaltung der Immissionsgrenzwerte sind Mensch und Umwelt im Allgemeinen vor schädlichen Auswirkungen geschützt.

Fazit

Plastik gehört nicht in die Umwelt, deshalb ist sein Eintrag zu vermeiden bzw. zu minimieren. Da bei unverändert hohem Eintrag und der Tatsache, dass sich Kunststoffe nur über sehr lange Zeiträume abbauen, die Umweltkonzentrationen ansteigen, wird das Risiko für Menschen und Tiere mit der Zeit zunehmen.

Daher ist es einerseits wichtig, die Datenlage dahingehend zu verbessern, dass aussagekräftige Risikoanalysen für die Umweltwirkungen von Kunststoffen möglich werden. Dies betrifft Quellen, Eintragspfade und Transportprozesse von Kunststoffen, aber auch deren Auswirkungen unter Umweltbedingungen in belasteten oder vulnerablen Ökosystemen der Schweiz.

Andererseits ist im Sinne des Vorsorgeprinzips bei mangelnder Datenlage zu prüfen, wie Kunststoffeinträge in die Umwelt reduziert werden können, um negativen Auswirkungen vorzubeugen. Lösungsansätze dafür finden sich je nach Quelle auf der einen Seite bei der Freisetzung während der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Kunststoffen. Auf der anderen Seite könnte die Ausgestaltung heutiger, resp. weiterer möglicher Rückhalte-mechanismen für relevante Eintragspfade in die Umwelt verbessert werden.

Riassunto – La plastica nell'ambiente svizzero

In Svizzera la plastica si trova ovunque nell'ambiente: nel suolo, nelle acque e nei loro sedimenti, nell'aria e negli organismi viventi. Questa contaminazione e i suoi possibili effetti sull'uomo e sugli animali, così come le possibili misure atte a contrastarli, vengono discussi intensamente sia in ambito politico sia nei media. Questo rapporto ha lo scopo di gettare le basi per ulteriori discussioni e lavori concernenti tale argomento.

Nel presente rapporto viene trattato il tema delle micro e macroplastiche nell'ambiente svizzero. In qualità di meta-studio, esso fornisce una panoramica sistematica dello stato attuale delle conoscenze tratte da studi già compiuti, le quali vengono presentate in maniera comprensibile e classificate per quanto attualmente possibile. Per motivi di brevità e chiarezza, il rapporto si concentra su importanti studi chiave e non fornisce una panoramica completa di tutti gli studi esistenti. Considerando l'interesse dimostrato da parte dei media e della politica per il tema, è presumibile che verranno pubblicati di continuo nuovi fondamenti scientifici sull'argomento.

Produzione, uso e smaltimento delle materie plastiche

Le materie plastiche hanno proprietà molto diverse a seconda del tipo di polimero e degli additivi che contengono. A causa delle loro diverse proprietà tecniche, le materie plastiche sono indispensabili come materiali. Per cui vengono utilizzati in grandi quantità in tutti i settori e gli ambiti della vita. In Svizzera ogni anno si impiegano circa 1 milione di tonnellate di materie plastiche. Una parte di esse viene smaltita nello stesso anno, mentre il resto viene utilizzato per periodi più lunghi. Ogni anno vengono smaltite complessivamente circa 780'000 t di plastica, sia che il suo utilizzo sia stato breve o prolungato.

Immissione di materie plastiche nell'ambiente

Esistono numerose **fonti** di emissione di materie plastiche nell'ambiente. Le materie plastiche che entrano nell'ambiente sotto forma di piccole particelle del diametro di 5 mm al massimo vengono definite microplastiche. Mentre si definiscono macroplastiche le particelle che hanno un diametro ≥ 5 mm, il che include anche prodotti interi come bottiglie di PET disperse nell'ambiente, sacchetti di plastica e simili.

Oggi c'è grande incertezza sulla quantità di macro e microplastiche che viene effettivamente introdotta nell'ambiente. Le cifre odierne si basano, da un lato, su dati puntuali estrapolati e, dall'altro, su stime di modelli.

Le macroplastiche finiscono nell'ambiente attraverso il *littering*, ossia il gettare i rifiuti nell'ambiente in maniera non curante, e a causa dello smaltimento non adeguato di altre plastiche, ad esempio perché introdotte nella raccolta dei rifiuti vegetali. Una volta giunte nell'ambiente, le plastiche con il tempo si decompongono fino a diventare microplastiche.

Nel caso delle microplastiche, le emissioni derivanti dall'uso di prodotti di plastica sono nettamente superiori a quelle delle microplastiche prodotte intenzionalmente. La fonte principale è l'abrasione degli pneumatici, seguita

da un gran numero di altre fonti, tra cui le economie domestiche, i complessi residenziali, le strade, l'agricoltura, l'edilizia, l'industria e il commercio.

Le plastiche finiscono nel suolo, nelle acque superficiali e nell'aria attraverso **vie d'ingresso** diffuse e situate in punti specifici. Importanti vie d'ingresso sono il trasporto indiretto attraverso le acque reflue, i deflussi superficiali e la sospensione di particelle nell'aria, così come gli apporti diretti nelle acque superficiali, nel suolo e nell'aria. Attraverso la gestione dei rifiuti e delle acque municipali, alcune delle emissioni di plastica vengono trattenute nel loro percorso verso l'ambiente. Questi meccanismi di ritenzione e di filtraggio sono particolarmente importanti per le plastiche nelle acque di scarico e per i rifiuti abbandonati che vengono raccolti durante la pulizia degli spazi pubblici.

È ancora difficile quantificare gli apporti nei vari comparti ambientali e l'efficacia delle misure di ritenzione. Tuttavia, stime recenti mostrano che gli apporti da e verso il suolo sono molto più elevati rispetto agli apporti verso le acque superficiali. Occorre quindi prestare maggiore attenzione al suolo.

Permanenza e comportamento delle materie plastiche nell'ambiente

Le materie plastiche, e in particolare le microplastiche, in Svizzera sono presenti nel suolo e nelle acque superficiali, nell'aria e negli organismi viventi. Tuttavia, è difficile quantificare la concentrazione di microplastiche nell'ambiente, specialmente nel suolo e nei sedimenti, inoltre non esiste ancora un'analisi standardizzata. Pertanto, i dati sono ancora lacunosi. Finora non sono state rilevate microplastiche nelle acque sotterranee.

In generale, le particelle a bassa densità si trovano nella fase acquosa delle acque superficiali, mentre le particelle a maggiore densità affondano nei sedimenti di fiumi e laghi. Le particelle di plastica nel suolo sono in gran parte immobili, ma possono essere trasportate negli strati più profondi da altri organismi, come ad esempio dai lombrichi.

La plastica si degrada molto lentamente nell'ambiente e vi rimane per lunghi periodi di tempo. La luce del sole e le sollecitazioni meccaniche, come il trasporto, provocano la rottura dei pezzi di plastica. Tuttavia, la decomposizione completa è molto lenta e a volte dura diverse centinaia di anni.

Effetti delle materie plastiche nell'ambiente

Le micro e macroplastiche possono potenzialmente avere un impatto sulla salute degli esseri umani e degli animali, tuttavia è necessario condurre ulteriori ricerche in questo campo. Sono state riscontrate lesioni del tratto digestivo negli animali, così come intrappolamenti di animali nelle reti da pesca e nei sacchetti di plastica negli oceani. Tuttavia, gli effetti delle microplastiche sull'uomo e sugli animali alle attuali concentrazioni ambientali sono ancora poco conosciuti, in quanto dipendono da fattori ancora da studiare, come le proprietà chimiche e fisiche delle particelle di plastica.

Le esigue ricerche effettuate finora sui **sistemi acquatici** non consentono di formulare affermazioni affidabili sul rischio per l'uomo e gli animali. Da un lato, le concentrazioni misurate vengono sottovalutate, poiché ci si concen-

tra maggiormente sulle particelle più grandi. Dall'altro lato, gli effetti di particelle di dimensioni e caratteristiche diverse sono stati finora poco studiati e sono in gran parte sconosciuti.

Per quanto riguarda il **suolo**, i dati sono ancora molto carenti, anche se in alcuni studi sono stati osservati effetti negativi su organismi che vivono nel suolo, quali lombrichi o collemboli, in condizioni di laboratorio.

Nell'**aria** le microplastiche costituiscono una piccola parte delle polveri fini (PM₁₀ o PM_{2.5}). I valori limite di immissione per le polveri fini sono regolati dall'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico e vengono misurati nell'ambito della sua attuazione. In generale, l'uomo e l'ambiente sono protetti dagli effetti nocivi se vengono rispettati i limiti di immissione.

Conclusione

Le plastiche non sono parte integrante dell'ambiente, pertanto il loro ingresso deve essere evitato o ridotto al minimo. Poiché le materie plastiche si degradano in periodi di tempo molto lunghi, le concentrazioni ambientali continueranno ad aumentare se l'input rimarrà elevato. Il rischio per l'uomo e gli animali di conseguenza aumenterà nel tempo.

È quindi importante, da un lato, migliorare la situazione dei dati in modo tale da rendere possibile un'analisi significativa dei rischi riguardanti l'impatto ambientale delle materie plastiche. Ciò riguarda le fonti, le vie d'ingresso e i processi di trasporto delle materie plastiche, ma anche i loro effetti sotto le condizioni ambientali che vigono negli ecosistemi inquinati o vulnerabili in Svizzera.

D'altra parte, secondo il principio di precauzione, in caso di mancanza di dati appropriati, è necessario trovare una soluzione per ridurre l'immissione di materie plastiche nell'ambiente per evitare impatti negativi. A seconda della fonte, gli approcci per risolvere questo problema possono riguardare da un lato la riduzione delle emissioni durante la produzione, l'uso e lo smaltimento di materie plastiche, e dall'altro lo sviluppo di attuali e futuri meccanismi di ritenzione più efficaci per le principali vie d'ingresso nell'ambiente.

Summary – Plastics in the Swiss environment

Plastics can be found everywhere in the environment in Switzerland: in the soil, water, sediments, air, as well as in living organisms. Their prevalence and the potential impacts for humans and animals, as well as possible measures to reduce the negative effects are being intensively discussed within politics and in the media. This report intends to serve as a basis for further discussions and work on the topic.

The report deals with micro- and macroplastics in the Swiss environment. As a meta-study, it provides a systematic overview of the current state of knowledge based on studies that have already been carried out. Existing knowledge is presented in a comprehensive form and classified to the extent possible. For the sake of concision and clarity, the report focuses on important key studies and does not provide a complete overview of all existing studies. Due to the interest in the topic on the part of the media and policy-makers, it is expected that new scientific findings on the topic will be published on a regular basis.

Production, use and disposal of plastics

Plastics have very different properties depending on the type of polymer and the additives they contain. Due to their different technical properties, plastics have become indispensable materials. They are used in large quantities across all industries and within all aspects of daily life. In Switzerland, around 1 million tonnes of plastics are used annually. Some of these are disposed of in the same year, the rest are used for a longer period. A total of around 780'000 tonnes of plastics are disposed of each year – including both short-lived plastics and those that have been in use for prolonged periods.

Input of plastics into the environment

There are numerous **sources** of plastic emissions into the environment. Plastics with a maximum diameter of 5 mm are called microplastics. Macroplastics are defined as plastic pieces ≥ 5 mm in diameter and they also include whole products such as crushed PET bottles, plastic bags, or similar.

Considerable uncertainty remains about the quantities of macro- or microplastics that are effectively introduced into the environment. Current quantities are based on extrapolated point measurements and on model estimates.

Macroplastics enter the environment through littering – the careless disposal of waste – and other improper disposal methods, such as mixing plastic into green waste collection. In the environment, they decompose over time into microplastics.

In the case of microplastics, emissions associated with the use of plastic products are typically the prime source. The largest source is tire abrasion, followed by numerous other sources from households, settlements, roads, agriculture, construction, industry and commerce.

Plastics are released into the soil, surface water and air through diffuse and point sources. Important **input pathways** are the indirect transport via

wastewater, runoff and turbulence in the air, as well as direct inputs into surface water, soil and air. Through waste and municipal water management, some of the emissions of plastics are captured before being released into the environment. These retention and filtering mechanisms are particularly important for plastics in wastewater and for littered waste, which is collected again during public space cleaning.

It is still difficult to quantify the introduction of plastics into the various environmental compartments and the efficiency of the retention measures. However, recent estimates show that inputs to and from soils are much higher than inputs to surface waters. More attention should, therefore, be paid to soils.

Fate and behaviour of plastics in the environment

Plastics, and microplastics in particular, are found in Switzerland in soil and surface waters, in the air and in living organisms. However, measuring the concentration of microplastics in the environment is very difficult, especially in soils and sediments, and there is no standardized approach for analysis yet. Consequently, there are still data gaps. So far, no microplastics have been detected in groundwater.

In general, low-density particles are found in the aqueous phase of surface water, while particles of higher density sink into river and lake sediments. Plastic particles in soils are largely immobile but can penetrate deeper soil layers by means of organisms such as earthworms.

Plastic degrades very slowly in the environment and remains there for extended periods of time. Sunlight and mechanical stress such as transport cause the plastic pieces to break up, but the complete decomposition process is very slow – possibly taking as long as several hundred years.

Effects of plastics in the environment

Micro- and macroplastics can potentially have an impact on the health of humans and animals, but a great need for research in this area still exists. Evidence of macroplastic injuries to the digestive tract of animals, as well as the entanglement of animals in fishing nets and plastic bags in the oceans, is well-evidenced. However, the effects of microplastics on humans and animals under common environmental concentrations are still poorly understood, as they depend on factors still to be investigated such as the chemical and physical properties of the plastic particles.

The few studies carried out to date for **aquatic systems** do not allow any reliable statements regarding the risk to humans and animals. On the one hand, the measured concentrations are frequently underestimated due to the focus on larger particles. In addition, the effects of particles of different sizes and characteristics are not well researched and are largely unknown.

For **soils**, data are still largely lacking, although studies have observed negative effects in soil organisms such as earthworms or springtails under laboratory conditions.

In the **air**, microplastics constitute a small part of the particulate matter (PM₁₀ resp. PM_{2.5}). The maximum permitted ambient air pollution levels for particulate matter are regulated by the Ordinance on Air Pollution Control and are measured during enforcement. In general, people and the environment are protected from harmful effects if the permitted ambient air pollution levels limits are observed.

Conclusion

Plastic does not belong in the environment, therefore, its introduction should be avoided or minimized. Since plastics only degrade over very long periods of time, the environmental concentrations will increase if the input remains high. This in turn means, that the risk for humans and animals will increase over time.

It is, therefore, important on the one hand to improve the data basis in order to allow for reliable risk analyses of the environmental impact of plastics. This concerns sources, input pathways and transport processes of plastics, but also their effects under environmental conditions in polluted or vulnerable ecosystems in Switzerland.

On the other hand, in accordance with the precautionary principle, in the absence of sufficient data, it is necessary to determine how plastic released into the environment can be reduced in order to prevent negative impacts. Depending on the source, approaches to solving this problem can be found by tackling releases during production, use and disposal of plastics. In addition, the design of retention mechanisms for relevant input paths into the environment could be improved.

Table des matières

1.	Introduction	16
1.1	Situation initiale	16
1.2	Objectif et portée de l'étude	16
1.3	Termes et définitions	17
1.4	Aperçu de la problématique des apports de matières plastiques à l'environnement	20
1.5	Aperçu de la situation des données	23
2.	Production, utilisation et élimination des plastiques (Drivers)	24
2.1	Production	24
2.2	Utilisation	25
2.3	Élimination et recyclage des déchets	28
2.4	Conclusion	30
3.	Apport de matières plastiques à l'environnement (Pressures)	31
3.1	Rejet de matières plastiques et apport à l'environnement	31
3.2	Sources	32
3.3	Voies d'apport	34
3.4	Quantification des apports dans les compartiments environnementaux	38
3.5	Conclusion	40
4.	Devenir et comportement des plastiques dans l'environnement (State)	41
4.1	Les plastiques dans les eaux de surface, les sols et l'air	41
4.2	Transport	43
4.3	Dégradation	44
4.4	Puits de plastique	46
4.5	Conclusion	46
5.	Effets des plastiques dans l'environnement (Impacts)	47
5.1	L'évaluation des effets et des risques	47
5.2	Effets sur les personnes	48
5.3	Effets sur les organismes (animaux)	50
5.4	Conclusion	52
6.	Liste des abréviations du rapport	55
7.	Bibliographie	57

1. Introduction

1.1 Situation initiale

Depuis plusieurs années, l'impact environnemental des matières plastiques est un sujet qui fait l'objet de discussions intenses dans le monde politique, les médias et le domaine public. Ainsi, diverses initiatives parlementaires ont été déposées en Suisse et l'UE a déjà publié une stratégie relative aux matières plastiques contenant des mesures très concrètes.

Les matières plastiques sont rejetées dans l'environnement à partir de diverses sources et par diverses voies d'apport. Les plastiques de différentes tailles et compositions se retrouvent partout dans l'environnement. Les effets de ces particules plastiques sur les écosystèmes et les organismes n'ont été étudiés que de manière limitée. En outre, les processus de transport au sein et entre les compartiments environnementaux, les puits éventuels (sites d'enrichissement) ainsi que la dégradation des plastiques dans un environnement naturel ne sont pas encore suffisamment connus.

Il est actuellement difficile d'obtenir une vue d'ensemble de la pollution au plastique en Suisse et d'évaluer les habitats et les écosystèmes potentiellement menacés ainsi que les risques pour l'homme.

1.2 Objectif et portée de l'étude

Le présent rapport compile au sens d'une méta-étude les connaissances actuelles et les lacunes relatives aux effets des matières plastiques sur l'environnement en Suisse et offre à l'OFEV une base nécessaire à l'accomplissement de ses tâches.

L'accent est mis sur les apports de micro- et macroplastiques à l'environnement et sur leurs impacts environnementaux en Suisse^a. D'autres impacts environnementaux (par exemple, la consommation de ressources et d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre) causés par l'extraction des ressources, la fabrication de produits en plastique et l'élimination des déchets plastiques ne sont pas couverts ou de manière très marginale par le rapport. De même, aucune indication n'est donnée concernant les réglementations existantes et les éventuels besoins d'adaptation.

Le contenu du rapport se base sur la littérature existante. L'accent est mis sur la Suisse. Le cas échéant, des études internationales sont examinées de manière critique, afin de déterminer dans quelle mesure les résultats sont transférables à la Suisse. Toutes les études importantes ont été prises en compte afin de résumer l'état des connaissances à l'automne 2019. Pour des raisons de ressources et de lisibilité, une description exhaustive de

^a Les polymères liquides ne sont donc pas pris en compte par le présent rapport.

toutes les études publiées a été omise. Le rapport a été délibérément rédigé dans un langage accessible, afin de toucher un lectorat aussi large que possible. Les commentaires du mandant ont été pris en compte avec soin.

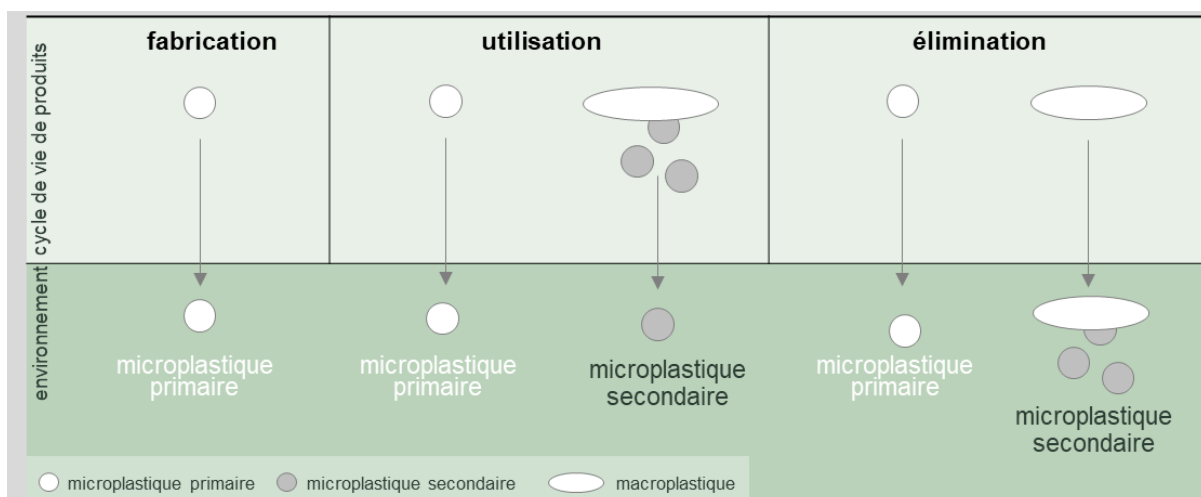
1.3 Termes et définitions

L'encadré ci-dessous donne un aperçu des termes et définitions utilisés dans le présent rapport.

La définition des microplastiques en rapport à leur formation joue un rôle central. Comme il s'agit d'un sujet relativement nouveau, les termes ne sont pas toujours utilisés de façon cohérente dans la littérature. En ce qui concerne la taille des particules de microplastique, le présent rapport utilise la définition récemment publiée par l'«European Chemicals Agency» (ECHA), qui propose une limite inférieure explicite pour la taille des particules¹. Pour la subdivision des particules de microplastique dans l'environnement en fonction de leur formation, la définition du «Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection» (GESAMP)² et «Science Advice for Policy by European Academies» (SAPEA)³ distinguant les microplastiques dits primaires et secondaires est prise en compte.

Termes et définitions	
Matière plastique et plastique	
matière plastique / plastique	Un matériau composé de polymères. Dans la plupart des cas, les matières premières sont dérivées du pétrole ⁴ . Le caoutchouc et le caoutchouc synthétique des pneus de voiture sont également des matières plastiques. Les plastiques d'origine biologique sont produits à partir de ressources renouvelables (voir ci-dessous). Le terme plastique est utilisé ici comme synonyme de matière plastique.
Blocs de construction en matière plastique	
monomère	molécule réactive de faible poids moléculaire qui peut se combiner pour former des polymères ⁴
oligomère	combinaison de quelques monomères ⁴
polymère	combinaison de beaucoup de monomères ⁴
additifs	additifs influençant les propriétés du plastique (par exemple, colorants, plastifiants et retardateurs de flamme) ⁴
Types de matière plastique	
Divisé en trois groupes selon les propriétés thermiques et mécaniques:	
thermoplastique	Matières plastiques telles que le polyéthylène téréphtalate (PET) ou le polyéthylène (PE). Elles sont constituées de polymères non réticulés avec des régions cristallines et amorphes. Ces régions déterminent, entre autres, la dégradabilité du plastique ou la force avec laquelle les polluants environnementaux s'adsorbent sur la matière

	plastique ^{5,6} . A une certaine températures, les thermoplastiques peuvent être déformés aussi souvent que souhaité ^{4,7} .
thermodurcissants	Matières plastiques telles que les plaquettes de frein ou les chemins de câbles. Elles sont constituées de polymères étroitement réticulés ⁴ . Elles sont rigides et ne peuvent pas être fondues, mais se désintègre lorsque leur température de décomposition est dépassée (pyrolyse) ^{4,7} . Des chocs mécaniques entraînent des fissures ou des craquelures dans le matériau.
élastomères	Matières plastiques telles que les pneus de voiture ou les élastiques. Elles sont constituées de polymères réticulés à larges mailles. Les élastomères s'étirent et reprennent leur forme initiale dès que la contrainte mécanique est réduite. ⁴
Microplastique	
Défini par l'ECHA comme suit: Polymères pouvant contenir des additifs ou d'autres substances sous forme de particules de 1 nm à 5 mm ou de fibres d'une longueur maximale de 15 mm ¹ . Il s'agit d'un nouveau terme qui n'est pas utilisé uniformément dans la littérature. Les microplastiques sont souvent définis comme des particules de plastique inférieures à 5 mm sans qu'une taille minimale soit spécifiée ^{5,8} .	
Les microplastiques présents dans l'environnement sont classés en fonction de leur origine comme suit ¹⁻³ :	
microplastique primaire	Les microplastiques primaires sont des produits à part entière. Leur rejet dans l'environnement est soit intentionnel (par ex. particules porteuses d'engrais), soit accepté (par ex. corps de friction dans les cosmétiques), soit non intentionnel (par ex. pertes lors du transport). Le rejet dans l'environnement peut donc se produire aussi bien pendant la phase de production que pendant l'utilisation et l'élimination.
microplastique secondaire	Les microplastiques secondaires sont créés par l'altération et la fragmentation des macroplastiques en microplastiques pendant la phase d'utilisation et d'élimination. Les macroplastiques se désintègrent en microplastiques, par exemple lors de l'usure les pneus de voiture (abrasion), lors du lavage des textiles synthétiques (en particulier les textiles polaires), lors de la dégradation due à l'altération ou lors de la fragmentation de films plastiques pour l'agriculture ou de déchets en plastique. La libération n'est pas intentionnelle.



La division en ces deux types de microplastiques est importante en termes de responsabilité et de champ d'action des différents acteurs dans la réduction de l'apport à l'environnement. En général, les fabricants ont une influence majeure sur les émissions primaires de microplastiques et les consommateurs sur les émissions secondaires de microplastiques^b.

Macroplastique

macroplastique

Dans le présent rapport, les pièces de plastique de plus de 5 mm sont appelées macroplastiques. Le macroplastique comprend donc des morceaux de plastique ≥ 5 mm, mais aussi des produits entiers tels que des bouteilles en PET écrasées, des sacs en plastique et autres. Le terme sert de distinction au microplastique et n'est pas toujours utilisé uniformément dans la littérature.

Plastique bio, plastique biodégradable et plastique oxo-dégradable

matière plastique d'origine biologique

Les matières plastiques d'origine biologique ont les mêmes propriétés que les plastiques à base de pétrole, mais sont fabriqués à partir de biomasse telle que définie dans la norme européenne EN 165759 (par exemple, le caoutchouc naturel comme ingrédient des pneus). Cependant, le matériau de départ ne dit rien sur la capacité de dégradation du plastique¹⁰.

matière plastique biodégradable

Les plastiques biodégradables ou matières plastiques biodégradables sont des matériaux pouvant être complètement décomposés par des microorganismes naturels et convertis en eau, en dioxyde de carbone et en biomasse. Selon la définition, peu importe que les matières plastiques soient produites à base de ressources renouvelables ou non.¹¹

matière plastique oxo-dégradable

Les matières plastiques oxo-dégradables contiennent des additifs qui accélèrent la fragmentation dans l'environnement sous certaines conditions (la lumière ou la chaleur sont nécessaire). Il n'y a pas de preuve que le microplastique qui en résulte se dégrade dans l'environnement dans un délai raisonnable.^{10,12}

^b Une caractérisation des microplastiques en fonction de leur utilisation et de leur origine, accompagnée d'illustrations, figure dans le rapport "Évaluation de la pollution par les plastiques dans les eaux de surface en Suisse"⁵¹

Élimination appropriée et inappropriée et littering^c	
élimination appropriée	L'élimination comprend les processus et les activités qui servent à l'élimination ou à la récupération des déchets. Elle est appropriée si elle est effectuée conformément aux exigences légales et n'entraîne donc pas d'effets négatifs sur la santé et l'environnement.
élimination inappropriée	L'élimination inappropriée (par opposition au littering) comprend l'élimination intentionnelle ou non intentionnelle de déchets de manière non conforme aux exigences légales, tels que: <ul style="list-style-type: none">— élimination des sacs en plastique avec es résidus biodégradables (élimination incorrecte) ;— incinération de déchets plastiques dans les foyers pouvant produire des gaz et des résidus toxiques (dioxines) ;— élimination des déchets plastiques par les toilettes dans le réseau d'égouts (élimination incorrecte) ;— dépôt de sacs poubelle dans la forêt ou le long des routes (décharge illégale).
littering	Le terme "littering" désigne le fait de jeter ou d'abandonner sur la voie publique des petites quantités de déchets urbains, sans utiliser les infrastructures prévues ¹³ .

Poussières fines	
poussières fines	Les poussières fines dans l'air sont un mélange complexe. Les PM ₁₀ et les PM _{2,5} sont des particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm et 2,5 µm respectivement. D'une part, les particules sont rejetées dans l'environnement directement par les processus de combustion (par exemple les moteurs diesel, les chauffages au bois) et par l'abrasion mécanique (par exemple les pneus, les freins, les revêtements routiers) et la suspension de particules dans l'air. D'autre part, une partie des particules ne se forment dans l'air qu'à partir de polluants précurseurs gazeux (par exemple le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, l'ammoniac, les composés organiques volatils) ¹⁴

1.4 Aperçu de la problématique des apports de matières plastiques à l'environnement

Le graphique informatif suivant donne un aperçu des sources et des processus les plus importants associés à l'apport des micro- et macroplastiques dans l'environnement. Il existe des sources d'apports de plastiques à l'environnement à tous les stades du cycle de vie des plastiques (voir chapitre 2): pendant la production, pendant l'utilisation et pendant l'élimination. Ils pénètrent dans l'environnement par diverses voies d'apport: par exemple par le lessivage ou par des apports directs lors de leur abandon dans la forêt (cf.

^c Les définitions utilisées ici se basent sur des informations de l'OFEV.

chapitre 3). Les matières plastiques pénètrent ainsi dans les eaux de surface, les sols et l'air, où elles ne sont pratiquement pas dégradées (voir chapitre 4). Les animaux et les personnes peuvent absorber le plastique de l'environnement, mais les effets sont actuellement encore difficiles à évaluer (voir chapitre 5).

Ce rapport fournit une vue d'ensemble du sujet en utilisant la structure DPSIR:

- **Drivers / driving forces:** activités drivers;
- **Pressures:** pression sur l'environnement;
- **State:** qualité de l'environnement;
- **Impacts:** impact sur l'environnement;
- **Responses:** mesures correctives.

L'étape *Responses* n'est pas incluse dans ce rapport.

Micro- et macroplastiques : de la source à l'environnement

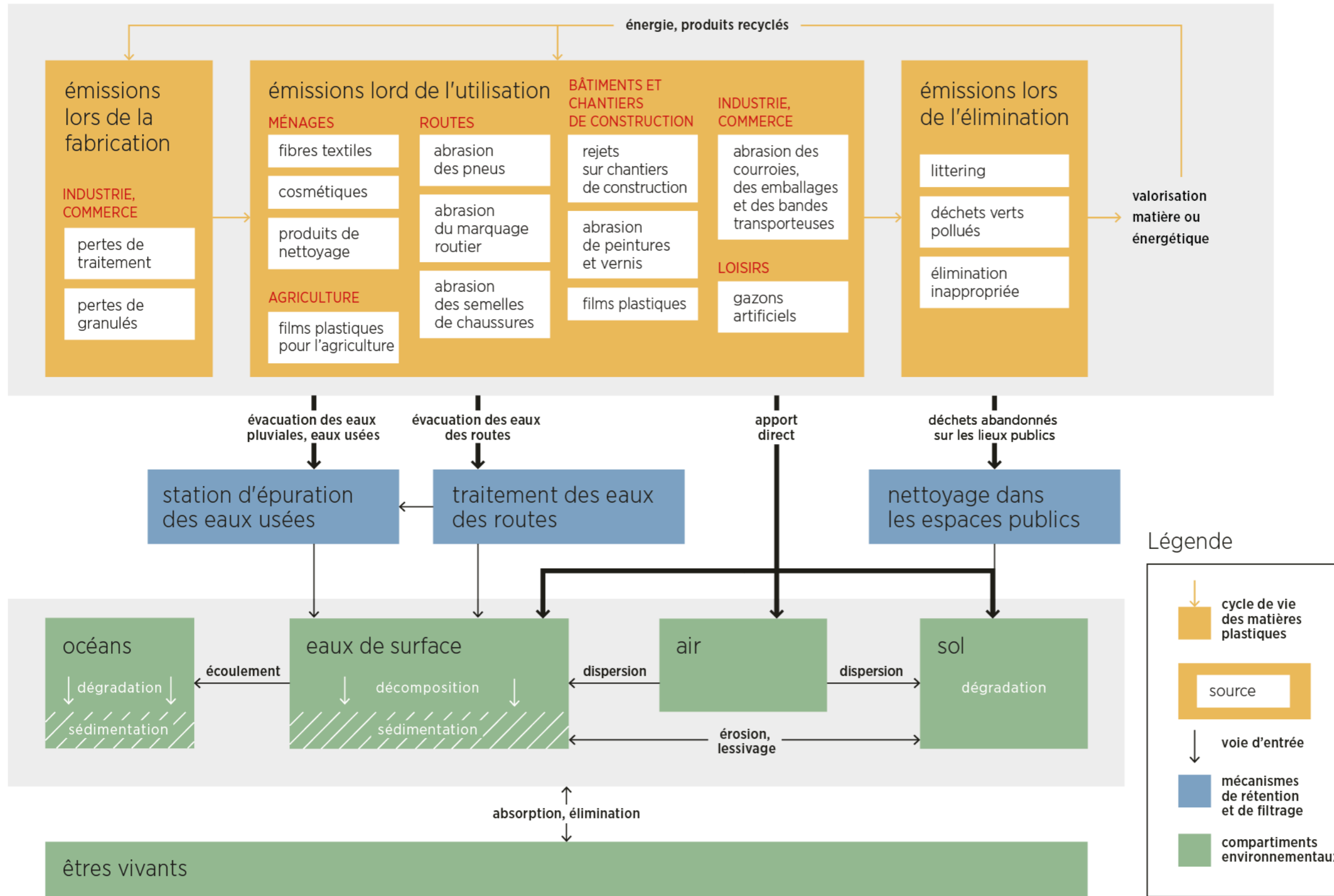


Figure 1: Cet aperçu montre en orange le cycle de vie des plastiques, en bleu les mécanismes de rétention et de filtrage qui dirigent de nombreuses émissions de plastiques vers l'élimination et en vert les compartiments environnementaux dans lesquels les plastiques peuvent se retrouver. Les champs blancs indiquent les sources de plastique quantitativement pertinentes dans l'environnement. Les flèches noires indiquent les flux importants de plastique. Si une voie d'apport contient un mécanisme de rétention et de filtrage, le plastique est retenu, ce qui est symbolisé par une réduction de l'épaisseur de la flèche.

1.5 Aperçu de la situation des données

La situation des données n'est pas très uniforme en ce qui concerne les apports de matières plastiques à l'environnement. De nombreuses études ne donnent des renseignements que sur des sujets très spécifiques. Les investigations sous-jacentes ont été menées de manière très locale ou ont eu lieu dans des conditions de laboratoire. La situation des données pour les différents chapitres du rapport est estimée comme suit:

- Production, utilisation et élimination des matières plastiques: Les associations professionnelles fournissent de bonnes données.
- Apport des plastiques à l'environnement: Diverses études quantifient les sources à l'aide d'estimations modélisées, d'extrapolations et d'observations ponctuelles et nomment les voies d'apport. En raison de la mauvaise situation des données, les calculs sont soumis à un degré élevé d'incertitude, mais l'image qualitative est néanmoins uniforme. Cependant, il est difficile de quantifier la quantité exacte des apports dans les différents compartiments de l'environnement et seules des données rudimentaires sont disponibles aujourd'hui.
- Devenir et comportement des matières plastiques dans l'environnement: Ici aussi, diverses études donnent des chiffres quantitatifs sur les concentrations, le transport et les processus de dégradation, mais ceux-ci sont soumis à de fortes incertitudes. Par exemple, il existe quelques échantillons d'eau et de sédiments provenant de lacs suisses, mais pas assez pour pouvoir se prononcer sur la vitesse de sédimentation en fonction de la vitesse d'écoulement. En raison des différentes méthodes et unités utilisées, les valeurs sont souvent difficiles à comparer et à interpréter. Il n'existe actuellement aucune méthode uniforme pour déterminer la quantité de plastique dans les sols. Ceci est accentué par le fait que les très petites particules ne sont pas détectées avec les méthodes actuelles, en particulier dans les sols et les sédiments, mais aussi souvent dans les eaux de surface. Cela s'applique, par exemple, aux particules d'abrasion des pneus, certes petites mais quantitativement très importantes. En ce qui concerne les processus de dégradation, il est également difficile de tirer des conclusions précises, car la plupart des plastiques ne se dégradent que très lentement dans un environnement naturel et il faut donc procéder à des extrapolations temporelles.
- Effets des plastiques dans l'environnement: A quelques exceptions près, les effets des microplastiques sur les personnes et les animaux dans des concentrations courantes dans l'environnement sont encore mal connus. Cependant, ils font de plus en plus l'objet de recherches intensives.

2. Production, utilisation et élimination des plastiques (Drivers)

Les plastiques ont des propriétés très différentes selon le type de polymère et les additifs qu'ils contiennent. Ils sont utilisés en grande quantité et dans des applications très différentes.

En Suisse, environ 1 million de tonnes de matières plastiques sont consommées chaque année. Une partie est éliminée dans la même année, le reste est utilisé plus longtemps. Au total, environ 780'000 t sont éliminées chaque année.¹⁵

2.1 Production

Une quantité énorme et sans cesse croissante de plastiques de différentes compositions est produite dans le monde entier. La plupart des plastiques produit à base de pétrole brut, mais plus récemment aussi de biomasse. Les matières plastiques sont des polymères et contiennent des additifs.

La production mondiale de plastiques a augmenté régulièrement ces dernières années. En 2017, elle s'élevait à environ 350 millions de tonnes⁷. Sur ce total, environ 64 millions de tonnes ont été produites dans l'UE (UE-28 + Norvège et Suisse)⁷. En Suisse, on ne produit que de très petites quantités de plastique, mais des quantités considérables y sont traitées. En 2018, la Suisse aura transformé environ 775'000 t de matières plastiques et 42'000 t de caoutchouc¹⁶.

Les matières plastiques sont produites par la polymérisation de monomères. La matière première d'origine est généralement du pétrole⁴. Le type et les propriétés d'un plastique dépendent du choix du monomère (par exemple, l'éthylène ou le styrène), de la méthode de production et des additifs utilisés. En raison de leurs propriétés mécaniques et thermiques, les plastiques se répartissent grosso modo en trois groupes: thermoplastiques, thermodurcissants et élastomères (voir chapitre 1.3). Les plastiques d'origine biologique sont produits à partir de biomasse au lieu du pétrole¹⁷. Les matières premières typiques sont par exemple l'amidon ou les fibres de feuilles de palmier. En Suisse, environ 3'000 t de matières plastiques d'origine biologique sont mises sur le marché chaque année¹⁷.

En ajoutant des additifs, les propriétés du plastique peuvent être modifiées spécifiquement^{18,19}: par exemple, les plastifiants tels que les phtalates rendent le matériau plus souple et plus flexible, tandis que les colorants donnent au plastique la couleur souhaitée. Le Tableau 1 donne un aperçu des fonctions des additifs.

Tableau 1: Aperçu des additifs typiques avec exemples et explications^{18,19}.

Catégorie	Exemple d'additif(s)	Explications
Additifs fonctionnels		
plastifiants	phtalates	80% des plastifiants sont utilisés pour la production du PVC, 20% pour le plastique de cellulose.
retardateurs de flamme	décabromodiphényléthane	
stabilisateurs	bisphénol A (BPA)	divers sous-groupes: antioxydants, stabilisateurs UV, stabilisateurs thermiques, etc.
biocides	triclosan	Principalement utilisés pour le PVC souple et les polyuréthanes expansés.
Autres		
colorants	oxydes de fer	
matières de remplissage	chaux, argile, suie	diluants rendant la production moins coûteuse (par exemple, la suie dans les pneus de voiture ²⁰).
matières de renforcement	fibres de verre, fibres de carbone	
aides à la vulcanisation	ssoufre	Le soufre lie les molécules de caoutchouc lors du processus dit de vulcanisation dans la fabrication des pneus.
adjuvants de façonnage	savons métalliques (savons de zinc ou de calcium), acides aliphatiques	Lors de la fabrication des pneus, les adjuvants de façonnage améliorent la formabilité du matériau.

2.2 Utilisation

Les plastiques ont des propriétés très diverses et peuvent donc être utilisés dans une large gamme d'applications. On les trouve dans tous les secteurs industriels et dans tous les domaines du quotidien.

Tableau 2 présente des exemples de domaines d'application pour les polymères les plus importants en termes de quantité. En raison de la grande variété de polymères et d'applications, seul un aperçu non exhaustif est présenté dans le tableau 2. En outre, de plus en plus de produits sont fabriqués à partir de matériaux composites, c'est-à-dire qu'ils sont constitués de deux ou plusieurs types de plastique qui ne peuvent être séparés mécaniquement.

Tableau 2: Exemples de types de polymères typiques et de leurs utilisations^{4,7,21}.

Catégorie de plastique	Polymère	Exemple(s) de produit(s)
thermoplastique	polyéthylène basse densité (LDPE)	films alimentaires, sacs en plastique, films plastiques pour l'agriculture
	polyéthylène haute densité (HDPE)	bouteilles de lait, bouteilles de shampoing, tuyaux d'eau potable en HDPE
	polypropylène (PP)	emballages, tubes, pièces automobiles
	polystyrène (PS)	montures de lunettes, vaisselle en plastique
	polystyrène expansé "sagex" (EPS)	emballage, isolation des bâtiments
	chlorure de polyvinyle (PVC)	cadres de fenêtres, revêtement de sol, isolation des câbles
	polyéthylène téréphtalate (PET)	gourdes, textiles
thermodurcissant	polyuréthanes (PUR) ^a	isolation des bâtiments, pièces de boîtier dans la construction mécanique
élastomère	caoutchouc	pneus de voiture, bandes élastiques
	polyuréthanes (PUR) ^a	matelas, semelles de chaussures, sièges auto

^a Les mousses rigides (duroplast) sont produites à partir de matières premières à chaîne courte, les mousses élastiques (élastomère) à partir de matières premières à chaîne longue.

Selon une estimation de 2010 encore valable actuellement, environ 1'000'000 t de matières plastiques sont consommées chaque année en Suisse. De ce total, 570'000 t sont utilisées pendant plus d'un an ("stockage provisoire"), par exemple châssis de fenêtres, composants de véhicules ou des jouets. Les 430'000 t restantes sont éliminées au cours de la même année, sous forme par exemple de produits et d'emballages à courte durée de vie. En outre, 320'000 t de déchets sont éliminées chaque année à partir du stockage provisoire, par exemple lorsque les cadres de fenêtres ont atteint la fin de leur durée de vie. De plus, 30'000 t de déchets de production sont générées annuellement. En Suisse, cela représente 780'000 t de déchets plastiques par an.¹⁵

Figure 2 donne un aperçu de l'utilisation et de la consommation de matières plastiques en Suisse en 2010 selon le secteur industriel et le type de polymère. Les plus gros consommateurs de plastiques en termes de quantité sont clairement les industries de l'emballage et de la construction, qui représentent près des deux tiers de la consommation totale. Les plastiques sont également utilisés dans diverses autres industries, mais dans des proportions nettement plus faibles. L'utilisation des différents polymères donne une image comparable. Plus de la moitié de la consommation totale en Suisse est constituée par les trois polymères suivants: le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) et le polychlorure de vinyle (PVC)¹⁵.

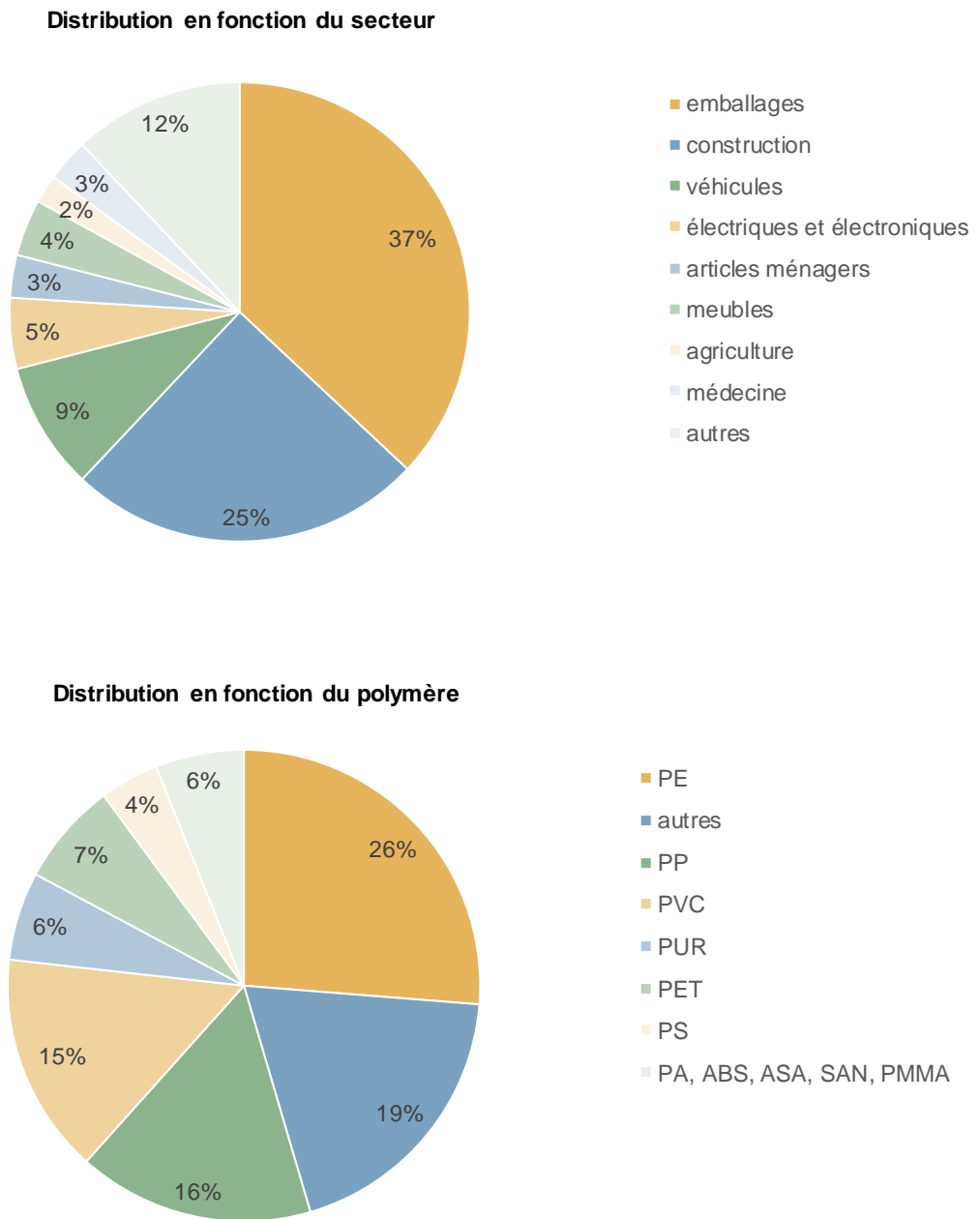


Figure 2 Consommation de matières plastiques en Suisse: distribution (en pourcentage du poids) des différents secteurs industriels (en haut) ; distribution (en pourcentage du poids) des différents types de polymères (en bas)¹⁵.

Figure 3 compare les types de polymères les plus couramment utilisés en termes de quantités de plastiques utilisées par rapport aux quatre secteurs les plus importants de l'emballage, de la construction, de l'automobile et de l'électrique/électronique. Les polymères PE, PP et PET dominent l'industrie de l'emballage, tandis que le PVC est principalement utilisé dans l'industrie de la construction. Les autres polymères sont utilisés dans divers secteurs industriels. Leur grande quantité est frappante et dénote de la grande diversité d'utilisation des matières plastiques.¹⁵

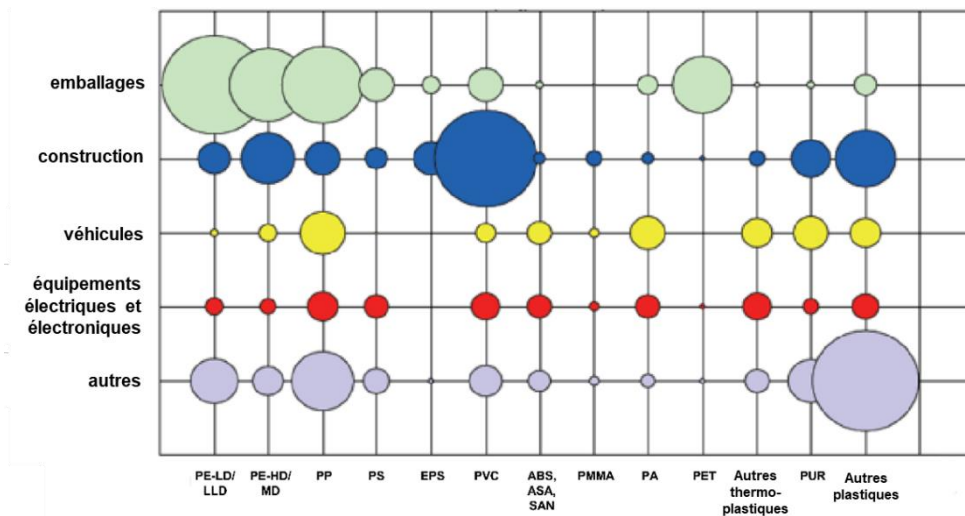


Figure 3 Utilisation des différents types de polymères dans les principaux secteurs industriels en Suisse (des cercles plus grands correspondent à des quantités plus élevées de matières plastiques)¹⁵.

2.3 Élimination et recyclage des déchets

Après la phase d'utilisation, les plastiques représentent des déchets (généralement sous forme de macroplastiques) et sont en Suisse, selon le type de plastique, recyclés ou incinérés⁴. Une petite partie est rejetée dans l'environnement par le littering ou à cause d'une élimination inappropriée.

Au total, 780'000 t de déchets plastiques sont produites chaque année en Suisse¹⁵ (voir Figure 4). 430'000 t sont des plastiques qui sont éliminés au cours de la première année d'utilisation (principalement des emballages). A cela s'ajoute 320'000 t de déchets plastiques provenant du « stockage provisoire » et 30'000 t de déchets de production. La taille du « stockage provisoire », ou la proportion de plastiques qui entrent ou sortent du « stockage provisoire », est sujette à des fluctuations au cours des années.

En Suisse, les déchets plastiques sont traités comme suit¹⁵ (voir Figure 4):

- collecte avec les ordures ménagères et valorisation thermique dans les d'usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) (environ 635'000 t) ;
- collecte séparée et recyclage (env. 80'000 t) ;
- utilisation thermique de la partie non recyclable provenant de collectes séparées dans les cimenteries (env. 50'000 t) et UIOM (env. 15'000 t).

Certaines fractions spécifiques de plastique sont collectées séparément, puis recyclées. En 2018, PET-Recycling Schweiz a recyclé 38'000 t de bouteilles de boissons en PET, ce qui correspond à un taux de recyclage de 82 %²². Depuis un certain temps, le commerce de détail collecte également les bouteilles en plastique PE (comme les bouteilles de shampooing) sépa-

⁴ Note: Les microplastiques résultant par exemple de l'usure ou de l'altération (par exemple, l'abrasion des pneus ou les microfibrilles provenant du lavage des textiles synthétiques) ne sont pas classés comme déchets.

rément en vue de leur recyclage. Les matières plastiques provenant de l'artisanat et de l'industrie sont également partiellement recyclées. En outre, il existe divers systèmes de collecte, essentiellement privés, pour les déchets plastiques mélangés provenant des ménages.

La partie non recyclable des déchets plastiques collectés séparément auprès de l'industrie et des ménages est utilisée par les cimenteries ou les UIOM pour produire de la chaleur. Pour les collectes par type de déchets plastiques, cette proportion est généralement plus faible que pour les collectes mélangées.

L'élimination appropriée des déchets plastiques garantit qu'ils ne se retrouvent pas dans l'environnement. En revanche, une élimination inappropriée entraîne l'apport de plastique à l'environnement.

Certaines matières plastiques, en particulier les sacs plastiques utilisés pour la collecte, finissent par le biais des résidus biodégradables dans les installations de compostage ou de méthanisation. Ces plastiques sont en partie triés et séparés du compost ou du digestat. Selon l'efficacité du tri, différentes quantités de ces déchets restent dans le compost ou le digestat et sont apportées à l'environnement²³. Cela s'applique également aux fragments de plastiques dits biodégradables non décomposés. En effet, ceux-ci ne sont souvent totalement dégradables que dans des conditions idéales, rarement rencontrées dans la réalité¹⁷.

De plus, une quantité importante de matières plastiques est rejetée dans l'environnement par le biais du littering et une élimination inappropriée. Comme cette quantité ne peut être mesurée directement, il n'existe à cet égard que des estimations approximatives fondées sur des modèles théoriques. Selon une nouvelle étude, environ 1,2 % des produits en plastique à l'emporter (p. ex. emballages, couverts jetables) se retrouvent dans l'environnement à cause du littering et ceci malgré les mesures de nettoyage⁸.

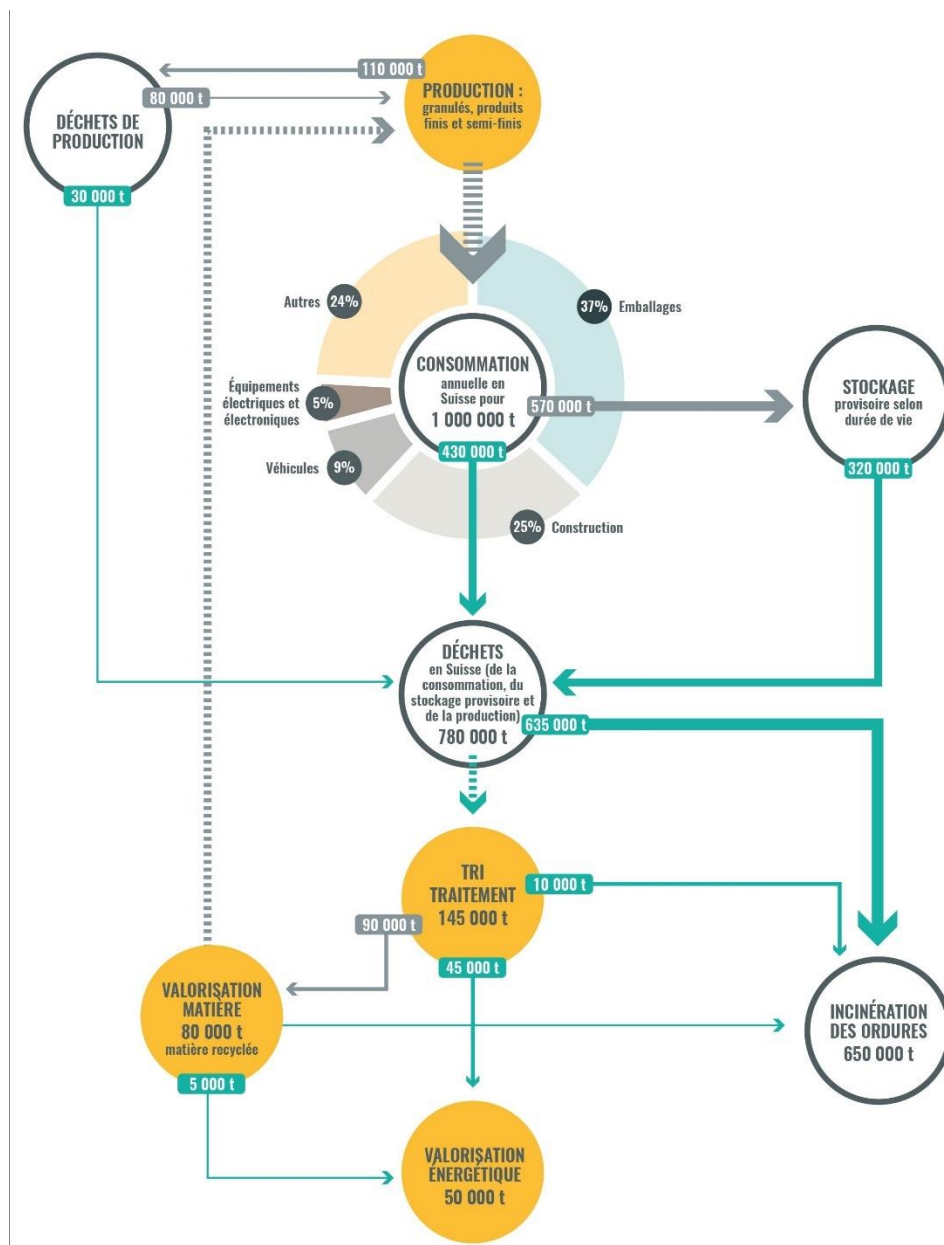


Figure 4 Flux de matières plastiques en Suisse en 2010^{15,24}.

2.4 Conclusion

En résumé, tout au long du cycle de vie des matières plastiques, de la production à l'élimination en passant par l'utilisation, les matières plastiques sont utilisées pour un nombre extraordinaire d'applications et dans une grande variété de compositions. Cependant, certaines applications et certains types de matières plastiques dominent: plus des deux tiers de toutes les matières plastiques sont utilisées pour les emballages, les bâtiments et les véhicules, et plus de la moitié de toutes les matières plastiques utilisées aujourd'hui sont du PE, du PP et du PVC. La connaissance des applications et des types de matières plastiques les plus importants aide à comprendre les apports de plastiques à l'environnement, tels que décrits dans le chapitre suivant.

3. Apport de matières plastiques à l'environnement (Pressures)

Il existe de grandes incertitudes concernant les quantités de macro- et microplastiques qui sont effectivement introduites dans l'environnement. Les informations actuelles sur les quantités sont basées d'une part sur des mesures ponctuelles extrapolées et d'autre part sur des estimations modélisées.

Les macroplastiques pénètrent dans l'environnement surtout par le littering (le fait d'abandonner les déchets sur place) et une élimination inappropriée (p. ex. une élimination avec les résidus biodégradables). Une fois arrivées dans l'environnement, le macroplastique se décompose au fil du temps en microplastiques.

Dans le cas des microplastiques, les émissions provenant de l'utilisation de produits en plastique dominent par rapport aux microplastiques produits intentionnellement. La source la plus importante est l'abrasion des pneus, suivie d'une variété d'autres sources provenant des routes, des bâtiments et des chantiers de construction, des terrains de sport et de jeu, des ménages, de l'élimination des déchets, de l'industrie et de l'artisanat, et de l'agriculture.

3.1 Rejet de matières plastiques et apport à l'environnement

Pendant le cycle de vie des matières plastiques, il existe de nombreuses sources de rejet et d'apport à l'environnement: les matières plastiques peuvent être rejetées (**émissions**) lors de la production, de l'utilisation ou de l'élimination. Les quantités effectivement rejetées dans l'environnement (**apport**) peuvent être égales ou inférieures aux quantités rejetées en raison des mécanismes de rétention et de filtrage.

Une partie du plastique libéré va directement dans l'environnement, c'est-à-dire dans le sol, les eaux de surface ou l'air (par exemple, particules d'abrasion des pneus dans le remblai de la route). Une autre partie est retenue par des mécanismes de rétention et de filtrage. Par exemple, les fibres des textiles synthétiques abrasées lors du lavage sont filtrées dans les stations d'épuration des eaux usées (STEP) et les objets en plastique abandonnés sont collectés lors du nettoyage des espaces publics. Cependant, malgré ces mécanismes de rétention et de filtrage, une partie des plastiques est rejetée dans l'environnement. En effet, les STEP ne peuvent pas retenir complètement les microplastiques, tout comme tous les objets abandonnés ne peuvent pas être collectés lors du nettoyage des espaces publics. Dans l'ensemble, la quantité de plastique entrant réellement dans l'environnement (apport) est inférieure à la quantité de plastique libérée (émission) (Figure).

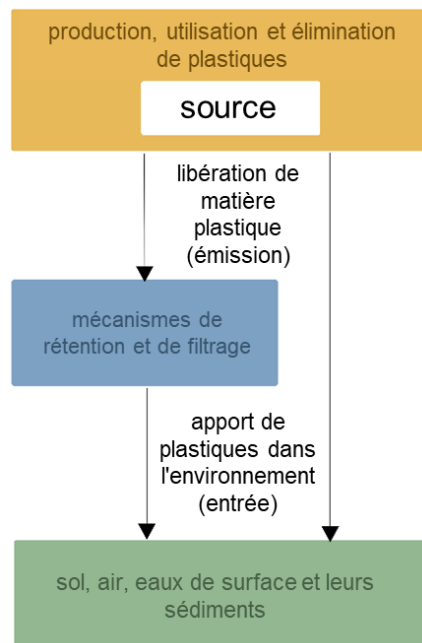


Figure 5 — matières plastiques peuvent être rejetés (émissions) lors de la fabrication, de l'utilisation et de l'élimination des produits en plastique. Tout n'est pas rejeté dans l'environnement, car une partie est retenue par des mécanismes de rétention et de filtrage. La quantité apportée à l'environnement est donc inférieure à la quantité de plastique rejetée.

3.2 Sources

Il existe de nombreuses sources d'émissions de micro- et macroplastiques dans l'environnement. Ils se manifestent à toutes les étapes de la chaîne de valorisation du plastique:

- émissions lors de fabrication
- émissions lors de l'utilisation
- émissions lors de l'élimination

Plusieurs études ont quantifié les émissions des micro- et macroplastiques^{1,5,8,23,25-28}. Les principales sources sont décrites ci-dessous. Sauf mention contraire, les quantités spécifiques (en g/(personne*a)) calculées pour l'Allemagne dans Bertling et al.⁵ ont été utilisées pour la Suisse et extrapolées à 8,5 millions d'habitants en t/a. Ces extrapolations sont soumises à de fortes incertitudes. Toutefois, les quantités entrantes effectives sont probablement inférieures aux quantités déclarées, car les mécanismes de filtrage et de rétention réduisent les quantités dans une mesure encore inconnue. Toutefois, les données qualitatives ou semi-quantitatives sont cohérentes entre les différentes études.

- **Abrasion des pneus:** divers modèles indiquent que l'abrasion des pneus est de loin la plus grande source de microplastiques en termes de quantité^{5,25,26}. L'extrapolation pour la Suisse basée sur Bertling et al. donne environ 10'400 t d'abrasion des pneus par an⁵. Cela correspond aux résultats d'une étude suisse qui estime l'usure annuelle des pneus à environ 10'700 t. La proportion apportée à l'environnement est estimée à 74 %.

Le reste est éliminé par le traitement des eaux de chaussée et des eaux usées.²⁸ La proportion de poussières fines PM_{10} et $PM_{2,5}$ provenant l'abrasion des pneus et pouvant pénétrer dans les poumons se situe au niveau du pourcentage à un chiffre^{29,30}.

- **Littering et élimination inappropriée:** Le littering entraîne l'entrée des macroplastiques dans l'environnement sous forme par exemple de bouteilles et d'emballages en PET. Une fois dans l'environnement, ils se désintègrent lentement en microplastiques secondaires. Selon une nouvelle étude, environ 1,2 % des produits en plastique à l'emporter (p. ex. emballages, couverts jetables) se retrouvent dans l'environnement par le biais du littering et ceci malgré les mesures de nettoyage. L'étude estime qu'environ 2'700 t de plastique finissent dans le sol et les eaux de surface chaque année.^{5,8}
- **Routes:** En plus de l'abrasion des pneus, il existe diverses autres sources de microplastiques sur les routes. Si l'on transfère les chiffres de l'Allemagne à la Suisse, 930 t de microplastique dues à l'abrasion des semelles de chaussures, 770 t dues à l'abrasion du marquage routier et 330 t dues à l'abrasion des balais et des balayeuses sont produites chaque année.
- **Bâtiments et chantiers:** Environ 1'000 t de microplastiques par an résultent de la construction et de la démolition de bâtiments⁵. En plus des microplastiques, les macroplastiques pénètrent également dans l'environnement, par exemple par la fragmentation et la dispersion des isolations en polystyrène⁸. En outre, l'altération des façades des bâtiments génère environ 320 t de microplastiques par an⁵.
- **Terrains de sport et de jeu:** En raison de l'altération et de l'usure, les particules des terrains de sport et de jeu (p. ex. le gazon artificiel) pénètrent dans l'environnement par ruissellement et par la mise en suspension des particules. Tous les terrains de sport réunis rejettent environ 1'120 t de microplastiques par an.
- **Ménages:** Dans les ménages, les microplastiques sont principalement générés lors du lavage des vêtements synthétiques (environ 650 t de fibres microplastiques par an). Les cosmétiques et les produits de nettoyage contiennent également des microplastiques qui, après utilisation, sont rejetés dans les eaux usées (environ 160 t/a de cosmétiques, 40 t/a de détergents et d'agents de nettoyage).
- **L'élimination des déchets:** Une source importante d'émission est l'élimination inappropriée des déchets en plastique avec les résidus biodégradables, qui ainsi pénètre ensuite dans l'environnement sous forme de compost et de digestat. Il a été calculé sur la base d'un échantillonnage de produits utilisés en agriculture, qu'environ 50 t de plastique sont répandues chaque année sur les sols agricoles par l'utilisation de digestat et de compost contaminé par des microplastiques (apport). Environ les deux tiers de cette quantité proviennent du digestat solide et environ un

⁵ Le total de 3'469 t (sols et eaux de surface) présenté dans la figure 2 de l'étude citée comprend non seulement les déchets dus au littering mais également d'autres déchets (p. ex. provenant de décharge illégale ou du transport lié à la construction). Selon les auteurs de l'étude, 2'700 t de produits en plastique à l'emporter sont rejetées dans l'environnement par le biais du littering malgré les mesures de nettoyage.

tiers du compost²³. En outre, des microplastiques sont créés lors du broyage des véhicules dans les parcs à ferraille à ciel ouverts^{5,8}.

- **Industrie et artisanat:** Au cours du processus de fabrication, des pertes de production et pertes de granulés peuvent se produire. Ses pertes se retrouvent principalement à proximité immédiate ou en aval du lieu de production^{31,32}. Il n'existe aucune donnée pour la Suisse. La Suisse n'ayant pas de producteur de matières plastiques primaires, les estimations de l'étranger ne sont pas pertinentes. Cependant, des matières plastiques peuvent être émises pendant la transformation du plastique et pendant le transport. En outre, des particules de plastique sont émises par le biais de l'abrasion des bandes transporteuses et des produits de protection contre l'usure des machines (260 t/a), des courroies (140 t/a) et des roues dentées (20 t/a), ainsi que lors du nettoyage de conteneurs et des emballages (200 t/a)⁵.
- **Agriculture:** Les films plastiques sont souvent utilisés en agriculture, par exemple les films de serre ou les films de paillage. On estime que les films de paillage en PE contribuent de 0,3 à 3 t/a par an à l'apport de plastique dans les sols²⁷.

Outre les sources susmentionnées, quantitativement les plus importantes, il existe de nombreuses autres sources, telles que l'abrasion des conduites ou l'ajout d'additifs microplastiques dans les médicaments. Ces dernières ne sont pas décrites dans le présent rapport.

La liste des sources d'émissions ci-dessus, montre que la majorité des émissions de microplastiques pendant la phase d'utilisation des produits sont causées par abrasion (p. ex. abrasion des pneus), tandis que les émissions des microplastiques produites intentionnellement (p. ex. éléments exfoliants dans les cosmétiques) sont nettement inférieures^{1,5}. En Allemagne, le rapport entre les microplastiques produits intentionnellement et ceux produits involontairement est estimé à 89 % contre 11 %⁵. On peut supposer un ratio similaire pour la Suisse. Les émissions de macroplastiques sont dominées par le littering.

Une comparaison directe des quantités de micro- ou de macroplastiques rejetés dans l'environnement n'est pas pertinente. Si l'usure des pneus est prise en compte dans le calcul, les émissions des microplastiques en Suisse et en Europe sont probablement plus élevées que celles des macroplastiques⁵. La comparaison dépend entre autres des matières plastiques considérées. Dans l'ensemble, il convient de noter que la quantification des sources est fondée sur des estimations modélisées et des extrapolations soumises à une grande incertitude.

3.3 Voies d'apport

Selon la source et le moment de la libération, les micro- et macroplastiques libérés pénètrent dans le sol, les eaux de surface et l'air par différentes voies d'apport. Le plastique peut être absorbé par les êtres vivants. Il est important de noter qu'une grande partie des plastiques rejetés est collectée et éliminée

lors du nettoyage des espaces publics et l'épuration des eaux usées, et ne pénètre donc pas dans l'environnement.

Le Tableau 3 présente une vue d'ensemble des voies d'apport. On distingue les apports ponctuels de matières plastiques, par exemple via les eaux usées provenant des STEP, et les apports diffus, par exemple le littering ou les eaux de ruissellement des routes⁵. Les distances parcourues par les particules lors du ruissellement ou la dispersion par l'air dépendent, entre autres, de la densité et de la taille des particules et sont décrites plus en détail au chapitre 4.2

Tableau 3: Voies d'apport ponctuelles et diffuses.

Type d'apport	Voie d'apport
apports ponctuels	évacuation des eaux de pluie à l'intérieur et à l'extérieur des agglomérations par <ul style="list-style-type: none"> — l'évacuation des eaux de chaussée (avec / sans traitement) — les stations d'épuration des eaux usées (STEP) — les déversements directs
	évacuations des eaux usées des ménages, de l'industrie et de l'artisanat par <ul style="list-style-type: none"> — les STEP — les déversements directs (rare, p. ex. lors de fortes précipitations)
apports diffus	dispersion dans l'air (dérive, transport longue distance, dépôt sec et humide)
	ruissellement
	les apports directs diffus (par exemple par le littering, le compost contaminé)

Les apports de micro- et macroplastiques dans les sols, les eaux de surface et l'air sont réduits par des mesures déjà mises en œuvre dans la gestion des déchets et la gestion des eaux usées (**mécanismes de rétention et de filtrage**). Par exemple, certaines des particules de plastique, comme les plastiques abandonnés ou les particules d'abrasion des pneus, sont éliminées de manière respectueuse de l'environnement lors du nettoyage des rues et des espaces publics. L'apport de matières plastiques à l'environnement par le littering et les mécanismes de rétention correspondants sont décrits au chapitre 3.2

Le concept suisse de **d'évacuation des eaux de chaussée** prévoit en priorité l'infiltration des eaux de pluie dans le remblai sur le bas-côté de la route. Si cela n'est pas possible, les eaux de chaussée doivent être rejetées dans les eaux de surface. Les eaux de ruissellement des routes très fréquentées doivent subir un traitement préalable dans des installations adaptées de traitement des eaux de chaussée, alors que les eaux de ruissellement des routes moins fréquentées sont directement rejetées dans les eaux de surface. Lors de précipitations extrêmes (trois à cinq fois par an), l'excès des eaux de chaussée peut pénétrer dans les eaux de surface sans subir de

traitement^{33,34}. La troisième priorité pour l'évacuation des eaux de chaussée est le raccordement au système de canalisation d'eaux mixtes.⁶

Dans les **milieux bâtis**, les eaux de pluie sont généralement – en raison du manque de possibilités d'infiltration – soit traitées dans les STEP (systèmes mixtes), soit rejetées directement dans les eaux de surface (systèmes séparatifs). Ici aussi les eaux de pluie hautement chargées doivent être traitées avant d'être déversées dans les eaux de surface. Même dans les systèmes mixtes (STEP ou système de canalisation), l'eau de pluie excédentaire en cas de précipitations extrêmes est rejetée sans traitement dans les eaux de surface^{34, f}.

Les eaux usées des **ménages, de l'artisanat et de l'industrie** sont traitées dans les STEP. Dans les STEP de Zurich, plus de 90 % des microplastiques présents dans les eaux usées sont éliminés (8 µm – 5 mm)³⁵. Une étude allemande a également constaté une réduction de 97 % des particules³⁶. Etant donnée qu'une étude finlandaise³⁷ a également fourni des valeurs comparables, on peut supposer que les valeurs de Zurich s'appliquent à l'ensemble de la Suisse. Des expériences en laboratoire ont montré que même les nanoparticules (< 100 nm) sont retenues jusqu'à 98 %³⁸. La modélisation de Boucher et al. indique que le débit sortant de l'ensemble des STEP ne contribue que dans une faible mesure aux apports de plastique dans les eaux de surface²⁵. Les matières plastiques retenues par l'épuration des eaux usées pénètrent dans les boues d'épuration, qui représentent ainsi un puits important pour les matières plastiques^{36,39,40}. L'épandage des boues d'épuration sur les sols est interdit en Suisse depuis 2006⁴¹. Les boues d'épuration sont valorisées thermiquement et ne constituent donc plus, contrairement à la situation à l'étranger, une voie d'apport des matières plastiques dans l'environnement.

Comme la gestion des déchets et le traitement des eaux usées en Suisse présentent un niveau technologique élevé, on peut supposer que les rejets de matières plastiques dans l'environnement par ces deux voies d'apport sont inférieurs à la moyenne mondiale. Dans Boucher et al., il a été estimé qu'environ 0,03 % de la consommation annuelle de matières plastiques en Suisse se retrouve dans les eaux de surface, le sol et l'air, contre 2,9 % au niveau mondial²⁵.

Le plastique qui n'est pas retenu par les mesures de nettoyage peut pénétrer dans les eaux de surface, le sol et l'air par des voies d'apport diverses. Le Tableau 4 présente une synthèse qualitative des voies d'apport possibles en fonction de la source.

⁶Sur la base des données de l'OFEV.

Tableau 4: Les voies d'apport des plastiques dans les différents compartiments environnementaux selon la source. Évaluation qualitative des auteurs et auteures de cette étude (aucune prétention à l'exhaustivité). Note: eaux signifie eaux de surface.

Source	Voie d'apport	Compartiment
DÉCHETS ET ÉLIMINATION INAPPROPRIÉE	apport direct	sols, eaux
littering	dispersion	sols, eaux, air
élimination inappropriée		
décharge illégale		
ROUTES	apport direct	air, sols
abrasion des pneus	dispersion	sols, eaux, air
abrasion des semelle de chaussures		
abrasion du marquage routier	ruissellement	sols, eaux
abrasion des balais et balayeuses	évacuation des eaux de pluie – STEP	eaux
	évacuation des eaux de pluie – traitement des eaux de chaussée	eaux
	évacuation des eaux de pluie – déversement direct	eaux
MÉNAGES	apport direct	air
abrasion des emballages	dispersion	sols, eaux, air
abrasion des fibres textiles synthétiques		
cosmétiques et détergents	eaux usées canalisées – STEP	eaux
ÉLIMINATION DES DÉCHETS	apport direct	sols, air
compost	dispersion	sols, eaux, air
recyclage des gravats, du métal et du plastique	évacuation des eaux de pluie	eaux
	eaux usées canalisées – STEP	eaux
ARTISANAT	apport direct	sols, eaux, air
pertes lors de la transformation et pertes de granulés	dispersion	sols, eaux, air
abrasion des machines, des courroies et des roues dentées	eaux usées canalisées – STEP	eaux
nettoyage des conteneurs		
SPORTS, TERRAINS DE JEU	dispersion	sols, eaux, air
abrasion des terrains de sport et de jeu (par exemple, gazon artificiel)	eaux usées canalisées – STEP	eaux
	évacuation des eaux de pluie – évacuation directe	eaux
BÂTIMENTS / CHANTIERS DE CONSTRUCTION	dispersion	sols, eaux, air
rejet sur les chantiers de construction	dépôts alluviaux	sols, eaux
abrasion des peintures et vernis (principalement au niveau des façades)	évacuation des eaux de pluie	eaux
	eaux usées canalisées – STEP	eaux
TRAITEMENT DES EAUX USÉES	évacuation des eaux de pluie – STEP	eaux
abrasion des conduites		
débit sortant des STEP	évacuation des eaux de pluie – traitement des eaux de chaussée	eaux
AGRICULTURE	apport direct	sols
plastiques utilisés dans l'agriculture (p. ex. films plastiques)		

3.4 Quantification des apports dans les compartiments environnementaux

Le plastique provenant des diverses sources peut pénétrer dans les eaux de surface, les sols et l'air par diverses voies d'apport (voir Tableau 4). Cependant, la quantification des apports par compartiment environnemental est très difficile et seules des informations rudimentaires sont disponibles aujourd'hui.

Dans le public, le principal sujet de discussion est le rejet de matières plastiques dans les eaux. Cependant, des études récentes indiquent que les apports dans les sols sont plus importants en termes de quantité^{8,26,42}.

Les résultats de l'étude de l'ICF et d'Eunomia sont présentés ci-après à titre d'exemple. Dans cette étude, l'apport de sources de microplastiques secondaires sélectionnées a été modélisé pour différents compartiments environnementaux pour l'UE (Figure 6). Bien que l'estimation soit encore sujette à une grande incertitude, le calcul indique qu'une proportion importante se retrouve dans le sol. Sous le terme "waste management" sont comprises toutes les particules de plastique émis correctement éliminées par le système de gestion des déchets (p. ex. le nettoyage des rues). Pour les sols agricoles, l'épandage des boues d'épuration (sans importance pour la Suisse) et d'autres apports de matières plastique sont pris en compte.²⁶

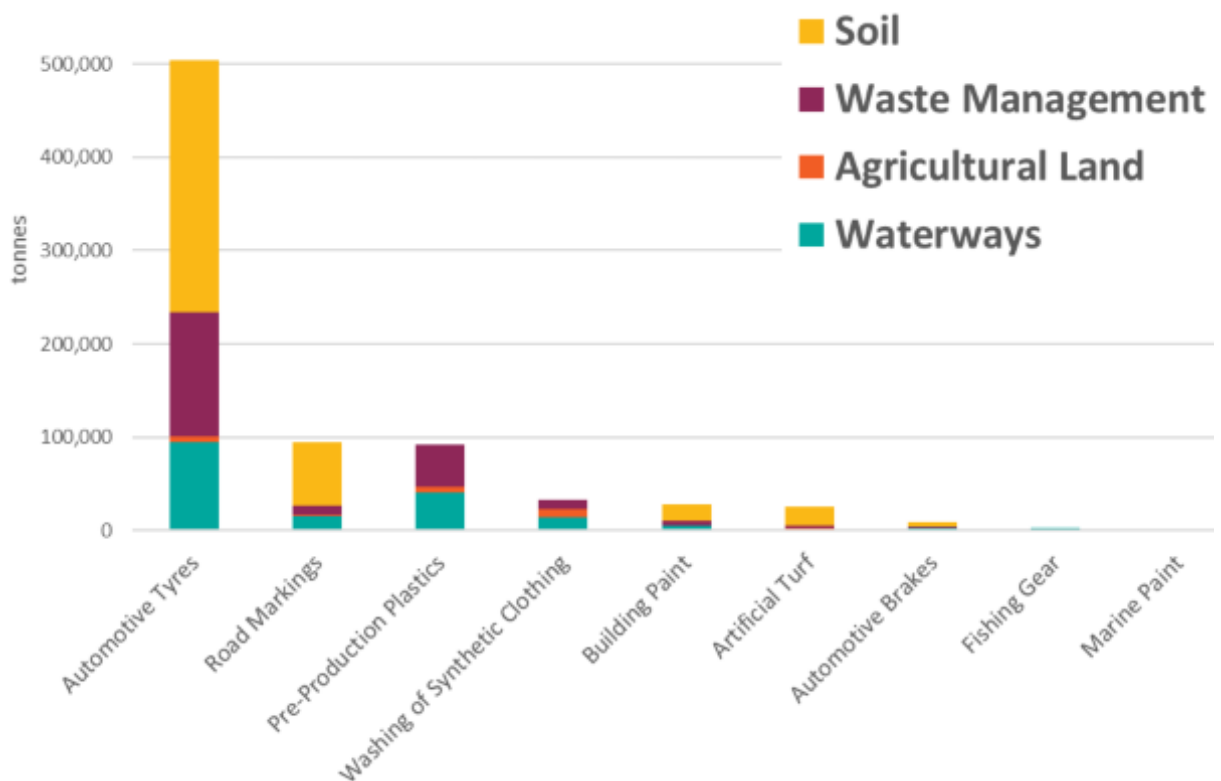


Figure 6 Apports modélisés des microplastiques dans les différents compartiments environnementaux, sur la base d'une étude pour l'UE26.

Une étude réalisée pour la Suisse par le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa) montre aussi qu'une grande partie des plastiques aboutissent dans les sols. Les auteurs ont modélisé l'impact environnemental des sept polymères les plus couramment utilisés, mais n'ont pas considéré l'abrasion des pneus. Au total, environ 5'120 t de plastique sont rejetées dans l'environnement chaque année. Environ 4'400 t de macroplastiques pénètrent dans les sols et 110 t dans les eaux. Pour les microplastiques il s'agit d'environ 600 t dans les sols et 15 t dans les eaux. Cette étude identifie la littering comme la source la plus importante de plastique, principalement pour les sols et secondairement pour les eaux de surface. D'autres sources importantes dans les sols sont les micro- et macroplastiques provenant des chantiers de construction et de l'agriculture, ainsi que des processus de fabrication et d'élimination. En plus du littering, les plastiques issus des processus d'élimination, les fibres textiles et les cosmétiques représentent d'autres sources importantes relatives aux eaux de surface.⁸

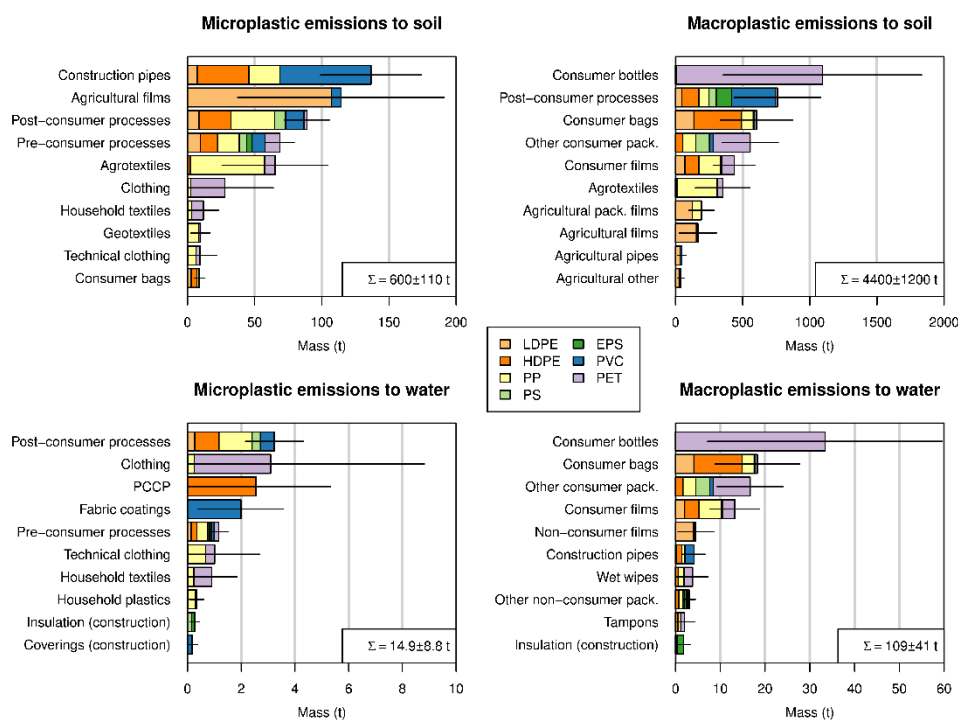


Figure 7 Modélisation des apports de micro et macroplastiques dans les sols et les eaux de surface suisses⁸. L'apport relatif à l'abrasion des pneus n'a pas été modélisé dans cette étude.

Dans une étude de l'Agroscope, les apports de matières plastiques sur les surfaces agricoles en Suisse ont été étudiés. Chaque année, environ 16'000 t de plastique sont épanchées, dont environ 160 t par an restent dans le sol. Les principales sources d'apport sont le littering (80 t/a) et les engrais composés digestat et de compost contaminés (50 t/a)²⁷. L'apport relatif aux films agricoles a été estimé plus bas, soit à environ 1,7 – 17 t par an⁷ et est

⁷ L'étude répertorie les entrées par source. Ici, les entrées de toutes les diapositives examinées ont été résumées.

basé sur des chiffres plus récents et plus détaillés que dans l'étude de l'EMPA mentionnée ci-dessus^{8,27,8}.

3.5 Conclusion

En Suisse, des apports importants de matières plastiques dans l'environnement se produisent d'une part, par la libération involontaire de microplastiques par exemple par abrasion pendant la phase d'utilisation, et d'autre part par le rejet de macroplastiques par le biais du littering et l'élimination inappropriée des matières plastiques (p. ex. élimination inappropriée dans le compost). La libération de microplastiques par le biais de produits auxquels des microplastiques ont été intentionnellement ajoutés (p. ex. des cosmétiques) est beaucoup moins importante.

En Suisse, la gestion des déchets urbains et des eaux usées élimine efficacement les déchets plastiques et les contaminations. Malgré l'effort de nettoyage important dans les lieux publics, les déchets plastiques abandonnés représentent une part importante de l'apport de matière plastique dans l'environnement.

Alors que les apports de plastique dans les eaux ont déjà fait l'objet d'une grande attention, les apports dans les sols ont été jusqu'à présent plutôt négligés. Dans l'ensemble, la modélisation indique que les apports dans les sols sont beaucoup plus élevés que dans les eaux de surface. Les apports dans les sols et leurs effets devraient donc à l'avenir être examinés de plus près.

⁸ Communication personnelle de l'auteur de l'étude.

4. Devenir et comportement des plastiques dans l'environnement (State)

Les matières plastiques et en particulier les microplastiques se retrouvent sur tous les continents et dans tous les compartiments de l'environnement, y compris en Suisse.

La taille des particules et la densité des matières plastiques influencent leur transport dans l'environnement. Les particules petites et légères sont transportées par l'air sur de longues distances, tandis que les particules plus lourdes se déposent plus rapidement dans les sols et les eaux de surface. De même, les particules de faible densité restent dans l'eau des lacs sous forme de matière en suspension, sont transportées par les rivières ou se déposent sur les rives. Les particules de densité plus élevée ou les particules formant des agrégats coulent et s'enfoncent dans les sédiments des rivières et des lacs. Le plastique présent dans les sols est en grande partie immobile. Si les principes du transport sont bien compris, sa quantification est encore difficile aujourd'hui.

Le plastique se dégrade très lentement dans l'environnement; il peut y rester jusqu'à plusieurs centaines d'années.

4.1 Les plastiques dans les eaux de surface, les sols et l'air

Les plastiques et surtout les microplastiques se retrouvent sur tous les continents et dans tous les milieux environnementaux: dans les océans, les rivières, les lacs, les sédiments, les sols ainsi que dans l'air⁴³⁻⁴⁵. On suppose généralement que le nombre de particules dans l'environnement augmente avec la diminution de la taille des particules³. Non seulement les concentrations de particules sont intéressantes, mais aussi le type de polluants contenus ou adsorbés.

En Suisse aussi, des micro- et macroplastiques ont été **détectés dans l'environnement**. Des campagnes de mesures ont permis de détecter des microplastiques dans l'air, dans les lacs, les rivières, les sédiments et les sols, et même dans des endroits géographiquement isolés⁴⁶⁻⁵¹. Jusqu'à présent, aucun microplastique n'a été détecté dans les eaux souterraines suisses (taille examinée de 8 µm à 5 mm)³⁵.

Les **méthodes** d'identification et de quantification des microplastiques dans les eaux ou les sols sont encore en cours de développement^{40,48,50,52,53}. Un point critique reste la comparabilité des données dépendant essentiellement des méthodes utilisées et de la taille de particules considérées. Par exemple, de nombreuses études ne mesurent que les particules d'un diamètre supérieur à 300 µm, alors que les particules d'abrasion des pneus sont généralement beaucoup plus petites^{25,54}. La mesure de la concentration des particules microplastiques est particulièrement difficile, car il est difficile de les séparer de manière fiable des autres particules du sol ou, dans les eaux de surface, de la matière en suspension. En outre, il existe clairement un

manque de méthodes standardisées pour l'identification et la quantification des microplastiques dans l'environnement. L'état actuel de l'échantillonnage, de la préparation des échantillons et de l'analyse de l'eau, du sol, des boues d'épuration et de la matière compostée est présenté dans le document de discussion du Ministère fédéral allemand de l'Education et de la Recherche dans le cadre du programme "Plastik in der Umwelt". La différence entre les méthodes thermoanalytiques et spectroscopiques est particulièrement importante. Les méthodes thermoanalytiques peuvent être utilisées pour identifier les polymères et mesurer leur fraction massique dans les échantillon. Cependant, il n'est pas possible d'obtenir avec ces méthodes des informations sur la taille et la forme des particules. Les méthodes spectroscopiques fournissent des informations détaillées sur la taille, la forme, le nombre et la composition chimique (identification des polymères) des particules microplastiques. La taille, la forme et les propriétés de surface des particules peuvent être pertinentes en termes d'écotoxicologie. C'est pourquoi ces informations ne doivent pas être négligées.⁵⁵

En raison des différentes méthodes d'analyse, les **concentrations** mesurées en Suisse dans différentes études sont actuellement encore difficiles à comparer. Dans la gamme de tailles de particules étudiées, on a trouvé principalement du PE, du PP, du PS et du PVC^{25,46,56,57}. Ces derniers sont les polymères les plus couramment utilisés (voir Figure 2). Une étude a examiné les concentrations des microplastiques de 0,3 à 5 mm dans les rivières et les lacs suisses. Des concentrations moyennes de microplastiques de 0,36 particules/m³ ont été mesurées à la surface des **rivières** et de 0,27 particules/m³ à la surface des **lacs**.^{46,9} Une autre étude a examiné les eaux du lac de Zurich à différentes profondeurs (figure 8). Même à une profondeur de 30 m, des microplastiques ont été découverts et une augmentation de la concentration avec la diminution de la taille des particules a été démontrée: la concentration moyenne de particules de taille > 100 µm sur l'entier de la colonne d'eau s'élevait à 132 particules/m³, tandis que les particules de taille 5 – 10 µm présentaient une concentration moyenne de 1,5 million de particules/m³.⁵⁰ Les plus grosses particules (> 100 µm) n'ont été trouvées qu'à partir d'une profondeur de 20 m, de sorte que les résultats correspondent bien à ceux de l'étude mentionnée ci-dessus.

⁹ Dans l'étude, les particules présentes dans les lacs sont rapportées en nombre de particules/km². La médiane a été calculée en supposant un échantillonnage d'une colonne d'eau de 18 cm avec le filet Manta de 18 x 60 cm.

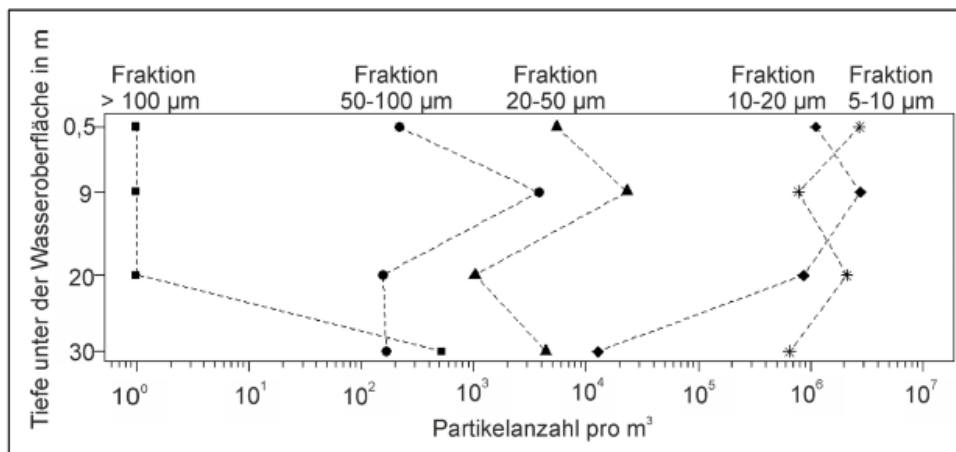


Figure 8 Profil de la distribution verticale de microplastiques dans le lac de Zurich pour différentes fractions granulométriques.⁵⁰

Il existe peu de données sur les concentrations de microplastiques dans les **sols**. Dans une nouvelle étude, une concentration de plastique dans les sols agricoles (0 – 25 cm) d'environ 200 mg/kg a été déduite de l'analyse des flux de matière plastique²⁷. Une autre étude a mesuré une moyenne de 5 mg/kg (diamètre 0,125 mm – 5 mm)⁴⁸ dans les plaines alluviales des réserves naturelles suisses.

Les poussières fines dans l'air se composent d'une petite partie de microplastiques. La proportion de particules respirables PM₁₀ et PM_{2,5} due à l'abrasion des pneus relève du pourcentage à un chiffre²⁹.

Outre les données sur le nombre de particules, diverses études ont également montré que les particules de matière plastique présentes dans l'environnement suisse peuvent contenir des **polluants** organiques et inorganiques^{46,47,56}. Il s'agit d'additifs (cf. chapitre 2.1) délibérément ajoutés lors de la production, mais aussi de polluants environnementaux qui s'adsorbent sur les particules de matière plastique (p. ex. métaux lourds).

4.2 Transport

Les particules de plastique peuvent être transportées d'un compartiment environnemental à l'autre ou peuvent parcourir de longues distances à l'intérieur d'un compartiment. Cependant, elles peuvent également rester immobiles pendant de très longues périodes. Les processus de transport sont fortement déterminés par la taille et la densité des particules. Ces deux variables dépendent du plastique lui-même. Les particules de plastique peuvent également gagner en taille et en poids en raison de leur agrégation ou de l'accumulation de micro-organismes à leur surface^{5,25}.

La forme, la taille et la densité d'une particule influence fortement le transport **aérien** (dispersion): plus les particules sont légères et petites, plus elles sont transportées loin. Le temps passé dans l'air varie de quelques minutes à plusieurs semaines^{54,58}. Les particules passent de l'air à l'eau ou au sol par dépôt humide ou sec.

Dans **l'eau**, ce sont surtout les particules ayant une densité similaire ou inférieure à celle de l'eau qui sont transportées (par exemple les emballages en polyéthylène ou les mousses plastiques). Elles restent en suspension dans l'eau des lacs, sont rejetées sur les rives ou transportées par les rivières. Les particules plus grossières de densité plus élevée, comme les élastomères (p. ex. particule d'abrasion des pneus), les thermodurcissants et les thermoplastiques techniques de densité supérieure à 1 g/cm³, ont tendance à sédimenter et sont donc moins sujettes à être transportées. Les particules fines restent en suspension dans l'eau et ne se déposent qu'après s'être agrégées (coagulation) avec d'autres particules.⁵ L'altération et l'adsorption de micro-organismes à la surface des particules de plastique (biofilms) peuvent influencer les caractéristiques de transport: les particules de densité plus faible peuvent commencer à sédimenter en raison de la présence d'un biofilm, tandis que les particules de densité plus élevée peuvent profiter de la flottabilité du biofilm et remonter⁵⁹. On peut supposer qu'une grande partie du plastique est déposée dans les sédiments des lacs et des rivières, tandis qu'une plus petite partie, restée en suspension dans l'eau, est déposée sur les rives ou transportée par les rivières^{25,31}.

Contrairement à la grande mobilité des particules de plastique dans l'air et dans l'eau, leur mobilité dans le **sol** est faible. L'évacuation des plastiques est possible par lessivage ou érosion. Dans les sols, les particules plastiques peuvent être transportées par écoulement préférentiel⁶⁰ ou par bioturbation^{61,62}, c'est-à-dire par le biais d'organismes du sol tels que les vers de terre et les collembolles. Les caractéristiques de transport des particules plastiques dans les sols font l'objet de projets de recherche en cours.

4.3 Dégradation

Les plastiques se dégradent très lentement dans l'environnement et sont donc considérés comme persistants¹. La dégradation des plastiques implique normalement la fragmentation des particules de plastique en petits morceaux, qui sont ensuite chimiquement et biologiquement minéralisés. En particulier, la biodégradation des plastiques courants est très lente dans un environnement naturel, mais aussi lors du compostage et de la méthanisation.⁵

La fragmentation résulte d'une interaction complexe de facteurs biotiques et abiotiques: biodégradation en surface par les micro-organismes, fragilisation par les rayons UV, broyage par les vagues, abrouissement et bien d'autres facteurs^{1,5,10}.

Au cours de la **biodégradation**, les petites particules sont complètement décomposées et les plus grosses particules uniquement à la surface. La biodégradation représente la minéralisation des composants du plastique par les microorganismes.

La **voie et la vitesse de dégradation** dépendent de facteurs abiotiques et biotiques, ainsi que de la composition du plastique lui-même^{1,5}. Certains polymères tels que les polyesters, les polyamides, les polycarbonates et les polyuréthanes peuvent être scindés par hydrolyse. D'autres polymères tels

que le polyéthylène ou le polypropylène nécessitent d'abord une étape supplémentaire de dégradation très lente (hydroxylation) avant de pouvoir également être séparés par hydrolyse. Cependant, même si le polymère est accessible pour l'hydrolyse, la dégradation peut être très lente si le polymère contient des additifs inhibiteurs de la dégradation, s'il présente une cristallinité élevée ou si les températures sont basses.⁵

Le **temps de dégradation** des plastiques dans l'environnement est difficile à estimer. Des périodes de plusieurs décennies à plusieurs siècles sont souvent mentionnées, mais ne peuvent être clairement documentées⁵. Des particules de plastique datant de plus de 60 ans, au vu de leur composition; ont été trouvées sur les rives du lac Léman⁴⁷. Les taux de dégradation des différents polymères sont très différents. Une compilation des données de la littérature dans Bertling et al. montre des différences s'élevant jusqu'à un facteur 1'000 entre les polymères peu et facilement dégradables. Mais ici aussi, les incertitudes méthodologiques sont importantes. En effet, la perte de poids est fréquemment mesurée au lieu de la minéralisation réelle et le temps de dégradation est extrapolé à partir d'analyses menées sur quelques jours. Dans de telles conditions, il n'est pas certain que le polymère se décompose réellement au cours de la période de l'étude ou qu'au contraire la perte de poids soit uniquement due à l'élimination des additifs par lavage.⁵

Les **plastiques biodégradables** sont sensés se dégrader beaucoup plus rapidement dans l'environnement, lors du compostage ou de la méthanisation. Une étude du Centre suisse de compétences pour la recherche en bio-énergie (SCCER BIOSWEET) a examiné l'aptitude des matériaux biodégradables à être utilisés dans les installations suisses de compostage et de méthanisation. Les matériaux biodégradables sont principalement utilisés pour les articles jetables (p. ex. les assiettes), les sacs de compostage et dans l'agriculture. Cependant, tous les matériaux ne sont pas adaptés à toutes les installations de compostage et de méthanisation, ce qui rend l'élimination plus difficile dans la pratique. De plus, les conditions calculées par les tests de laboratoire qui seraient nécessaires à une dégradation complète à court terme, ne sont souvent pas présentes en milieu naturel. C'est pourquoi la dégradation des plastiques biodégradables dans les sols et les eaux est souvent plus lente ou rendue impossible.¹⁷ La dégradation ne contribue généralement pas à la formation d'humus et les ingrédients énergétiquement utiles (p. ex. l'amidon) sont perdus pendant la minéralisation. C'est pourquoi l'incinération et la méthanisation sont généralement plus judicieuses que le compostage, car elles permettent au moins d'utiliser les ressources à des fins énergétiques⁶³.

Les **plastiques oxo-dégradables** sont annoncés comme étant dégradables, mais ne peuvent malheureusement pas tenir cette promesse. Ce sont des plastiques conventionnels contenant des additifs accélérant la fragmentation en petits morceaux, mais pas le processus de biodégradation. Les particules microplastiques qui en résultent ne sont pas complètement biodégradables dans un délai raisonnable, ni dans les conditions naturelles, ni dans les conditions de compostage.^{10,12,64} Les plastiques oxo-dégradables doivent donc faire l'objet d'un examen critique. Selon une étude non encore publiée de

l'EPF Zurich, l'utilisation de plastiques oxo-dégradables n'est pas très répandue en Suisse – contrairement aux pays du Moyen-Orient et d'Amérique du Sud. Les grandes sociétés commerciales suisses évitent délibérément l'utilisation de ces matières plastiques.⁶⁵

4.4 Puits de plastique

Par puits, on entend les endroits et les processus où le plastique demeure pour une période prolongée. Les puits de plastique dans l'environnement sont actuellement mal connus. Les puits sont définis comme étant les océans⁶⁶, les sédiments des océans et des eaux⁶⁷, et les sols⁴³. Les boues d'épuration sont également considérées comme un puits, car les plastiques retenus par le traitement des eaux usées y parviennent³⁶. Comme les boues d'épuration sont incinérées en Suisse, le plastique qu'elles contiennent ne peut plus se retrouver dans l'environnement. Un autre puits correspond à la collecte de plastique lors du nettoyage des espaces publics. Le plastique collecté est incinéré et ne se retrouve plus non plus dans l'environnement. Un dernier puits est constitué par les installations de traitement des eaux de chaussée (cf. chapitre 3.3).

4.5 Conclusion

Les plastiques se retrouvent dans tous les compartiments de l'environnement et s'accumulent également dans la plupart d'entre eux, car les taux de dégradation sont très faibles par rapport aux taux d'apport à l'environnement.

Les particules de plastique sont particulièrement mobiles dans l'air et dans les eaux et peuvent être transférées de ces compartiments à d'autres. En revanche, les plastiques s'accumulent dans l'eau des océans, les sédiments des eaux de surfaces ainsi que dans les sols.

Les processus de transport et de transfert dépendent fortement de facteurs spatiaux (p. ex. une vitesse d'écoulement réduite dans un barrage) et temporels (p. ex. une vitesse d'écoulement accrue pendant les tempêtes). D'autres facteurs influençant le transport sont la forme, la taille et la densité des particules de plastique.

5. Effets des plastiques dans l'environnement (Impacts)

Les micro- et les macroplastiques sont absorbés par les personnes et les animaux, soit par le biais des aliments, soit par les voies respiratoires.

Les effets des microplastiques sur les personnes et les animaux dans des concentrations environnementales communes sont encore mal compris. Dans des études de laboratoire, des effets négatifs à des concentrations élevées de microplastiques ont été démontrés sur certaines espèces. On suppose que les effets dépendent de divers facteurs, tels que la taille d'une particule ou les caractéristiques de sa surface. Les particules de plastique elles-mêmes, ainsi que les monomères ou les additifs qu'elles contiennent, peuvent avoir des effets toxiques. Il reste à préciser si ces effets se produisent également aux concentrations actuellement rencontrées dans l'environnement.

Les animaux peuvent se blesser par enchevêtrement dans des macroplastiques (p. ex. dans les filets de pêche) ou par lésion de la paroi intestinale. Des animaux peuvent également mourir de faim à cause de la réduction du volume de leur estomac due à l'accumulation des macroplastiques. A long terme, les macroplastiques se décomposent en microplastiques secondaires et peuvent donc potentiellement avoir d'autres effets.

Dans l'ensemble, le risque pour les personnes et les animaux dépend des effets possibles et du niveau d'exposition. Ni l'un ni l'autre ne peuvent être évalués de façon concluante à l'heure actuelle et devront faire l'objet d'un examen plus approfondi.

5.1 L'évaluation des effets et des risques

"Tout est poison et rien n'est poison; c'est la dose qui fait le poison" Paracelsus¹⁰,

En principe, toutes les substances peuvent avoir des effets négatifs sur l'homme et les animaux si la dose ingérée est suffisamment élevée. Toutefois, aucun effet n'est à prévoir à faibles doses. Il en va de même pour les micro- et les macroplastiques ainsi que leurs composants.

Trois éléments d'information sont donc nécessaires pour évaluer le risque pour les personnes et les animaux:

— *Exposition:* Quelles sont les quantités auxquelles les personnes ou les animaux sont exposés? Ici, les concentrations dans l'eau, le sol, l'air et la nourriture, mais également les voies d'absorption, c'est-à-dire de la manière dont les microplastiques sont absorbés, sont à considérer. En écotoxicologie, on utilise généralement la concentration mesurée ou modélisée dans le sol ou l'eau (MEC: measured environmental concentration,

¹⁰ Dans: Septem Defensiones 1538, Works Vol. 2, Darmstadt 1965, p. 510

PEC: predicted environmental concentration); chez l'homme, la dose journalière absorbée calculée (par la respiration, avec les aliments, par la peau).

- *Toxicité*: Quels effets sont déclenchés à quelles concentrations et à quelles quantités? En dessous de quelle concentration ne se produit aucun effet? En écotoxicologie, la valeur est souvent fixée avec la PNEC (predicted no effect concentration), en toxicologie avec l'ADI (acceptable daily intake) ou la TDI (tolerable daily intake) ou DNEL (derived no effect level).
- *Évaluation des risques*: L'exposition estimée est-elle susceptible d'avoir des effets néfastes sur les personnes et/ou les animaux? Le risque est calculé comme suit:

$$\text{quotient de risque} = \frac{\text{exposition}}{\text{toxicité}}$$

Un risque existe dès que l'exposition est égale ou supérieure à la concentration nécessaire pour déclencher un effet. L'évaluation des risques est généralement effectuée pour les personnes et les animaux aquatiques et terrestres.

Les effets sur les écosystèmes ne font pas partie d'une analyse de risque classique, mais sont pertinents en fonction de la question traitée. Les déplacements d'espèces par le biais des plastiques⁵ (p. ex. les animaux ou les micro-organismes attachés au plastique et déplacés vers de nouveaux sites) ou la réduction de la fertilité du sol due à la baisse d'activité des vers de terre sont des exemples d'impacts sur les écosystèmes⁴². Jusqu'à présent, ces effets n'ont guère été étudiés et ne seront pas abordés plus avant ici.

L'état actuel des connaissances sur les effets des plastiques sur les personnes et les animaux est décrit ci-dessous.

5.2 Effets sur les personnes

Les effets des microplastiques sur l'homme sont encore très peu connus. Les microplastiques sont absorbés par les personnes par le biais des aliments ou par la respiration de particules de plastique présentes dans les poussières fines pouvant pénétrer dans les poumons⁶⁸.

Des microplastiques ont été détectés dans divers **aliments**. Cependant, les mesures sont difficilement comparables en raison des différentes **méthodes** de mesure utilisées et associées à des incertitudes. Cela est dû à l'identification et à la quantification encore difficiles des microplastiques dans les aliments, entre autres à cause des contaminations en laboratoire ne pouvant dans certains cas pas être exclues et représentant un défi majeur⁶⁹.

Jusqu'à présent, des microplastiques ont été détectés dans des **produits** frais et transformés: dans les moules (0,2 – 4 particules/g), le poisson, le miel (0,166 fibres et 0,009 fragments par g), le sel (0,007 – 0,68 particules/g) et la bière (0,025 fibres, 0,033 fragments et 0,017 particules par ml)⁶⁸⁻⁷⁰.

Dans les aliments d'origine animale, on n'examine généralement pas en détail dans quelle partie de l'aliment se trouvent les microplastiques. Cela est toutefois important, car les microplastiques dans le tractus gastro-intestinal d'un poisson comestible n'ont pas la même importance que ceux présents dans la chair musculaire, étant donné que les humains ne mangent normalement pas d'intestins de poisson⁶⁸⁻⁷⁰. La situation est différente dans le cas des moules, où la bête entière est mangée⁷⁰. Les microplastiques peuvent être présents dans le produit brut ou peuvent pénétrer dans l'aliment plus tard au cours du processus de production, par l'abrasion de l'emballage ou par contamination par l'air ambiant⁷⁰. Des microplastiques ont également été détectés dans l'**eau potable**, comme l'indique l'Organisation mondiale de la santé (WHO, World Health Organization) dans son étude. Selon la WHO, il n'y a actuellement aucune hypothèse de risque sanitaire lié aux microplastiques dans l'eau potable, mais il existe encore d'énormes lacunes dans les connaissances.⁷¹ En Suisse, aucun microplastique n'a été détecté dans l'eau potable³⁵.

Une première étude menée auprès de huit personnes venant d'Europe et d'Asie a révélé la présence de microplastique dans les selles⁷². Ceci confirme d'une part que les microplastiques peuvent être **ingérer** par la nourriture, et d'autre part qu'au moins une partie de ceux-ci est à nouveau **excré-tée**.

Le passage des microplastiques de l'intestin ou des poumons à la circulation sanguine, aux tissus et aux organes (**absorption** et **translocation**) n'a guère été étudié. L'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) suppose que les particules < 150 µm peuvent traverser la paroi intestinale, mais que moins de 0,3 % d'entre elles sont effectivement absorbées. Seules de très petites particules (< 1,5 µm) peuvent pénétrer dans les organes. Les particules non absorbées ainsi que les particules absorbées peuvent être excrétées.⁷⁰ On suppose que l'absorption est influencée par divers facteurs tels que la taille des particules, l'hydrophobicité, la charge de surface, les groupes fonctionnels ou les couches de protéines accumulées⁶⁸.

On sait très peu de choses sur les **effets** des **microplastiques** sur les personnes. En principe, les effets seraient possibles au niveau des poumons et des intestins ou, s'ils sont absorbés, dans d'autres parties du corps. Des études sur l'hygiène de l'air ont montré que les poussières fines et les nanoparticules peuvent entraîner des maladies respiratoires et circulatoires^{29,68,73,74}. En outre, des réactions inflammatoires sont possibles^{68,73}.

Les particules microplastiques peuvent libérer des **monomères** ou des **oligomères** qui provoquent des effets toxiques. On suppose que les monomères sont pour la plupart biologiquement inertes (p. ex. dans le PE ou le PP), mais il y a des exceptions. Par exemple, le bisphénol A (élément constitutif du polycarbonate) ou le styrène (élément constitutif du polystyrène) sont des perturbateurs endocriniens. De même, des **additifs** tels que les phtalates peuvent potentiellement être libérés et causer des effets (p. ex. altération du développement embryonnaire).⁷⁴ Les **polluants environnementaux** adsorbés sur les microplastiques pourraient également être libérés

dans le corps humain et ainsi augmenter l'exposition des personnes aux polluants. Toutefois, les premières estimations concernant le bisphénol A et les polluants environnementaux que sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les biphényles polychlorés (PCB) indiquent que la quantité absorbée par le biais des microplastiques est très faible par rapport à l'apport par d'autres voies^{70,74}. Cela est le cas si, par exemple, des additifs provenant de l'emballage entrent en contact avec la nourriture. Sur la base de ces premières projections, les auteurs concluent que l'absorption de constituants liés aux microplastiques est négligeable par rapport aux constituants absorbés par les voies habituelles (p. ex. la nourriture), mais qu'il faut encore poursuivre les recherches. En particulier, cette estimation ne s'applique qu'aux composantes qui sont effectivement absorbées par d'autres voies d'absorption. Dans l'ensemble, les effets des microplastiques sur les personnes ne peuvent pas encore être estimés et devraient faire l'objet d'études plus approfondies.

5.3 Effets sur les organismes (animaux)

Les effets des plastiques sur les organismes sont possibles par l'exposition aux macroplastiques, aux microplastiques, aux composants des plastiques et aux polluants adsorbés sur les plastiques.

De nombreuses études montrent que les **macroplastiques** peuvent avoir des effets négatifs sur les animaux. Les poissons, les oiseaux ou les tortues peuvent s'emmêler et s'étrangler. Les plastiques ingérés provoquent de fausses sensations de satiété dans le tractus gastro-intestinal, pouvant amener l'animal à mourir de faim. Il existe des exemples connus dans les océans⁴³: Les mêmes effets sont en principe possibles pour les animaux d'eau douce et les animaux terrestres. Ces effets n'ont pas encore été démontrés.

Il est également clairement prouvé que de nombreux organismes **ingèrent des microplastiques**. Les microplastiques ont été trouvés dans de nombreux **organismes aquatiques** (poissons, invertébrés) et les **oiseaux**^{43,75,86}. En Suisse, des microplastiques ont été identifiés dans le plancton, les poissons et les oiseaux⁴⁶. L'absorption se fait principalement par la nourriture et, chez les poissons, également par la respiration branchiale^{1,75}. Il est prouvé qu'une proportion importante des microplastiques ingérés est excrétée directement chez les poissons et les invertébrés, le taux dépendant de l'espèce et de la forme des microplastiques⁷⁵. L'absorption et la translocation de très petites particules microplastiques (< 5 µm) à travers le tissu intestinal ont été observées chez divers mollusques et poissons. Toutefois, le mécanisme sous-jacent ainsi que la taille maximale des particules ne sont toujours pas clairs et doivent encore être étudiés plus en détail⁷⁵. Selon l'ECHA, des artefacts expérimentaux ne peuvent pas être exclus pour le moment. En effet, les détections pourraient par exemple être due à des contaminations¹. Il existe peu de données disponibles sur les **organismes terrestres**. Une étude de terrain chinoise a révélé la présence de microplastiques chez 94 % des oiseaux terrestres examinés⁷⁶. Une autre étude a montré que les microplastiques sont ingérés par les vers et les poulets. Dans le cas des poulets, il a également été montré qu'une partie des microplastiques est excrétée⁷⁷.

Les **effets des microplastiques** présents dans l'environnement sur les organismes sont encore mal connus. L'état actuel des connaissances sur les organismes **aquatiques** a été récemment résumé. Les premières études disponibles portaient principalement sur les invertébrés marins. Parfois, les poissons marins ainsi que les invertébrés et les poissons d'eau douce ont également été examinés. Les paramètres classiques tels que l'augmentation de la mortalité, la réduction de la croissance ou de la reproduction ont été fréquemment étudiés. Cependant, l'auteur de la review note également que les effets ont souvent été mesurés à des concentrations assez élevées. Comme il n'existe actuellement aucune méthode d'essai standardisée, les expériences doivent être interprétées et comparées avec prudence. En outre, les données disponibles ne couvrent pas toute la gamme des expositions possibles: p. ex. les particules sphériques de polystyrène ont été utilisées dans beaucoup d'expériences. Le comportement d'autres polymères ou d'autres formes de particules est encore difficile à évaluer à l'heure actuelle. En outre, la plupart des expériences ont été réalisées avec de très petites particules ($< 100 \mu\text{m}$), alors que seules quelques études de terrain ont identifié ces tailles de particules dans l'environnement (voir également le chapitre 4.1).⁷⁵ On suppose que les effets dépendent fortement de la taille des particules^{74,75}. Comme pour l'absorption des microplastiques, les études des effets des microplastiques sur les organismes **terrestres** font largement défaut; il existe des études isolées, comme pour les vers de terre, où l'on a observé une réduction de la reproduction ou de la croissance^{42,61,78}. Ces effets ont également été observés chez les collemboles, bien qu'il n'y ait pas de preuve claire que les microplastiques aient réellement été absorbés⁷⁹.

Malgré les difficultés décrites, des premières **évaluations des risques** ont été réalisées pour les **systèmes aquatiques** pour l'Europe et d'autres régions du monde^{1,75,80,81}, mais aucune évaluation n'est disponible pour la Suisse. Les études disponibles sont arrivées à la conclusion que les concentrations de microplastiques actuellement mesurées dans l'environnement sont généralement inférieures de plus de deux ordres de grandeur aux concentrations pouvant avoir un effet. Deux de ces études ont identifié des régions isolées très polluées pouvant présenter des concentrations nocives (zones marines côtières⁸¹, une région en Asie⁸⁰). Dans l'ensemble, cependant, ces évaluations des risques reflètent l'état actuel des connaissances et doivent encore être interprétées avec beaucoup de prudence^{1,80,81}. Les évaluations des risques mettent en lumière les quatre défis suivants. Premièrement, la définition des valeurs limites écotoxicologiques; le nombre d'espèces animales prises en compte est insuffisant et les données sur les effets chroniques font largement défaut. Deuxièmement, les concentrations de petites particules dans l'environnement sont rarement mesurées et sont donc très probablement sous-estimées. Troisièmement, il convient de noter que les concentrations augmenteront à l'avenir si le plastique continue d'être introduit dans l'environnement. Et quatrièmement, ces études ne sont disponibles que pour les systèmes aquatiques; il manque des données et des comparaisons systématiques pour les sédiments et les sols.

Une première estimation approximative pour les **sols** agricoles a été réalisée dans l'étude de l'Agroscope. Une concentration dans le sol de 0,2 g de microplastique par kg de sol a été calculée à partir des quantités introduites

dans les sols agricoles (voir également le chapitre 4.1) et comparée aux études écotoxicologiques de la littérature scientifique. On y trouve des effets négatifs sur les organismes du sol à partir d'une concentration de 1 g de microplastiques/kg de sol. Il en a été conclu qu'aucun risque n'est actuellement encouru. Toutefois, cette estimation est sujette à des incertitudes car elle est basée sur une quantité limitée de données écotoxicologiques n'ayant de surcroît pas été collectées de manière standardisée. Entre autres, elles ne couvrent pas encore suffisamment la diversité des matières plastiques et des organismes, et il faut s'attendre à ce que la concentration de microplastiques augmente à l'avenir.²⁷ Bien que n'ayant mesuré aucun effet négatif sur les paramètres classiques tels que la mortalité, la croissance ou la fertilité des vers de terre, une étude a mis en lumière des effets négatifs dans l'intestin ainsi qu'une réponse immunitaire après une exposition à des concentrations de 0,06 g de microplastiques/kg de sol⁷⁸. Cela montre que les effets négatifs à des concentrations de plastique environnementale doivent être étudiés de plus près.

Globalement, l'ECHA a conclu en 2019 qu'aucune évaluation finale des risques n'était actuellement possible et qu'il ne pouvait être exclu que des effets dus aux de particules de plastique ne se produise actuellement ou à l'avenir¹.

En ce qui concerne l'air, il n'existe pas d'évaluation des risques spécifique aux microplastiques. Toutefois, l'Ordonnance sur la protection de l'air contient des valeurs limites d'immission pour les poussières fines. Dans l'état actuel des connaissances, le respect des valeurs limites d'immission protège généralement les personnes, les animaux, les plantes, leurs biocénoses et leurs habitats, ainsi que les sols, etc. des effets nocifs et gênants des poussières fines, y compris des microplastiques qu'elles contiennent.

Comme chez l'homme, les particules de plastique peuvent également libérer chez les animaux des **monomères**, des **oligomères** ou des **additifs** et donc provoquer des effets négatifs (voir chapitre 5.2). Toutefois, il n'est pas encore possible d'évaluer si des quantités pertinentes de produits chimiques provenant des microplastiques et migrant dans les organismes peuvent provoquer de tels effets¹. Toutefois, la modélisation réalisée pour les polluants environnementaux indique que l'exposition par le biais de l'alimentation normale est plus pertinente^{82.83}. L'influence de l'altération des particules plastiques sur le rejet de substances potentiellement toxiques ainsi que sur le comportement de sorption des polluants est encore mal comprise et doit être étudiée plus en détail⁸⁴.

5.4 Conclusion

Les effets potentiels des plastiques sur les personnes, les animaux et les écosystèmes entiers sont divers, complexes et, dans l'ensemble, encore mal compris. Les effets vont des effets mécaniques sur l'ensemble de l'organisme ou sur le système digestif et respiratoire, aux effets biochimiques au niveau cellulaire. Des effets concrets sur les organismes ont été prouvés en laboratoire lors d'exposition à des concentrations relativement élevées de

plastiques. Cependant, les premières évaluations des risques pour les eaux suggèrent que le risque pour les organismes aquatiques est actuellement faible. Toutefois, ces estimations sont soumises à une grande incertitude. En outre, les données relatives aux sols sont largement manquantes. Il n'est donc pas encore possible d'évaluer les risques pour l'homme, les animaux et les écosystèmes relativement aux concentrations que l'on trouve aujourd'hui dans l'environnement. L'air représente une exception: une petite partie des microplastiques présents dans l'air fait partie des poussières fines et pour lesquelles l'Ordonnance sur la protection de l'air contient des valeurs limites d'immission. Selon l'état actuel des connaissances, le respect de ces valeurs limites d'immissions protège généralement les hommes, les animaux, les plantes, leurs biocénose et leurs habitats, ainsi que les sols, etc. des effets nocifs et gênants des poussières fines, y compris les microplastiques qu'elles contiennent.

Si les apports en plastique ne sont pas réduits à l'avenir, les concentrations dans l'environnement augmenteront. De plus, les macroplastiques se décomposent avec le temps en microplastiques, ce qui augmente encore le nombre de particules dans l'environnement. C'est pourquoi il n'est pas exclu, à l'heure actuelle, que les concentrations de matières plastiques augmentent à un niveau tel qu'elles puissent avoir des effets à l'avenir. Pour cela, il existe clairement un manque de données et d'extrapolations uniformes pour les concentrations dans les compartiments environnementaux et les processus de transport. Des concentrations élevées sont potentiellement possibles là où les plastiques s'accumulent, par exemple dans les sédiments ou le sol à proximité des routes très fréquentées. Des concentrations temporairement élevées pourraient se produire lors de fortes précipitations dans des bassins versants densément peuplés, car de grandes quantités de plastiques sont alors rejetées dans les cours d'eau par le biais des eaux de chaussée non traitées et des eaux usées. De plus, les plastiques provenant des sols et des sédiments des rivières pourraient être remobilisés lors de tels événements.

On peut donc conclure que, conformément au principe de précaution, une réduction de l'apport de matières plastiques dans l'environnement est importante pour limiter les risques futurs pour l'homme et les animaux. La SAPEA ainsi que l'ECHA recommandent à la Commission européenne, conformément au principe de précaution, de réduire l'apport de matières plastiques dans l'environnement et de prévenir ou d'atténuer les effets possibles, étant donné qu'une analyse des risques n'est actuellement pas possible au vu des données disponibles^{1,3}.

Afin de mieux évaluer les risques liés à l'apport des matières plastiques à l'environnement en suisse de manière générale, mais aussi aux niveaux régional et local, il est essentiel de mieux comprendre les processus suivants:

- quantités de matière plastique introduites dans l'environnement pour les principales sources et les voies d'apport dominantes;
- processus de transport des particules à l'intérieur et entre les compartiments environnementaux;
- voies d'apport et processus de transport pour les très petites particules, qui sont jusqu'ici peu couvertes par les études;

- effets des particules de plastique à des concentrations environnementales réalistes sur les personnes, les animaux et les écosystèmes;
- prise en compte des facteurs spatiaux (p. ex. nombre de lacs et de barrage précédent une section de rivière) pour identifier localement les écosystèmes et les biocénose particulièrement pollués ou menacés;
- identification des écosystèmes terrestres particulièrement pollués et menacés.

6. Liste des abréviations du rapport

- a: année
- ABS: copolymère acrylonitrile-butadiène-styrène
- ADI: acceptable daily intake, dose journalière admissible
- ASA: acrylonitrile styrène acrylate
- BPA: bisphénol A
- cm: centimètre
- cm³: centimètres cubes
- DNEL: Derived no effect level, concentration en dessous de laquelle, selon l'état des connaissances scientifiques, aucun effet néfaste sur la santé humaine n'est attendu.
- ECHA: European Chemicals Agency
- EFSA: European Food Safety Authority Empa: Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
- EPS: polystyrène expansé
- g: gramme
- g/(personne*a): grammes par personne et par an
- g/cm³: grammes par centimètre cube
- GESAMP: Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection
- HAP: hydrocarbures aromatiques polycycliques
- HD: high-density, haute densité
- HDPE: polyéthylène haute densité
- kg: kilogramme
- LD: low density, faible densité
- LLD: basse densité linéaire
- LDPE: polyéthylène basse densité
- m: mètre
- m³: mètres cubes
- MD: medium-density, densité moyenne
- MEC: measured environmental concentration, concentration environnementale mesurée
- mg: milligramme
- mg/kg: milligramme par kilogramme (concentration)
- ml: millilitre
- mm: millimètre
- nm: nanomètre

- PA: polyamide, Nylon
- particules/m³: nombre de particules par mètre cube (concentration)
- PCB: biphényles polychlorés
- PE: polyéthylène
- PEC: predicted environmental concentration, concentration environnementale prévue
- PET: polyéthylène téréphtalate
- PM_{2,5}: particules de diamètre inférieur à 2,5 millièmes de millimètre, PM signifiant Particulate Matter (particules en suspension)
- PM₁₀: particules de diamètre est inférieur à 10 millièmes de millimètre, PM signifie Particulate Matter (particules en suspension)
- PMMA: polyméthacrylate de méthyle, plexiglas
- PNEC: predicted no effect concentration, concentration prévue sans effet
- PP: polypropylène
- PS: polystyrène
- PUR: polyuréthane
- PVC: chlorure de polyvinyle
- SAN: copolymères styrène-acrylonitrile
- SAPEA: Science Advice for Policy by European Academies
- SCCR BIOSWEET: Biomass for Swiss Energy Future: Swiss Competence Center for Energy Research.
- STEP: stations d'épuration des eaux usées
- t: tonne
- t/a: tonnes par an
- TDI: tolerable daily intake, dose journalière admissible
- µm: micromètre
- UE: Union européenne
- UIOM: usine d'incinération d'ordures ménagères
- UV: rayonnement ultraviolet
- WHO: World Health Organization, Organisation mondiale de la santé
- >: supérieur à
- ≥: supérieur ou égal à
- <: inférieur à
- ≤: égal ou inférieur à

7. Bibliographie

1. ECHA. *Annex XV Restriction Report*. European Chemicals Agency, Helsinki, Finland. (2019).
2. GESAMP. *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part 2 of a global assessment*. GESAMP, Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. (2016).
3. SAPEA. *A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society*. SAPEA, c/o acatech, Berlin, Deutschland (2019).
4. Kunststoff-Schweiz. *Kunststoff-Wissen*. (2019). Disponible à l'adresse Internet suivante: <https://www.kunststoffschweiz.ch/html/kunststoff-wissen.html>. (Consulté le 20.2 2019)
5. Bertling, J., Bertling, R. & Hamann, L. *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen*. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (2018).
6. O'Connor, I., Golsteijn, L. & Hendriks, A. J. Review of the partitioning of chemicals into different plastics: Consequences for the risk assessment of marine plastic debris. *Mar. Pollut. Bull.* **113**, 17–24 (2016).
7. PlasticsEurope. *Plastics – the Facts*. Der Verband der Kunststoffherzeuger. (2018).
8. Kawecki, D. & Nowack, B. Polymer-specific modelling of the environmental emissions of seven commodity plastics as macro- and microplastics. *Environ. Sci. Technol.* **53**, 9664–9676 (2019).
9. DIN. *DIN EN 16575: Biobasierte Produkte; Deutsche Fassung*. (2014).
10. Commission Européenne. *Rapport de la Commission au Parlement Européen et au Conseil concernant les incidences sur l'environnement de l'utilisation des plastiques oxodégradables, et notamment des sacs en plastique oxodégradable*. Commission Européenne, Bruxelles, Belgique. (2018).
11. OFEV. *Les bioplastiques sont-ils tous biodégradables ?* (2018). Disponible à l'adresse Internet suivante: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dechets/dossiers/bioplastiques-tous-biodegradables.html>. (Consulté le 4.3.2019)
12. Hann, S., Ettlinger, S., Gibbs, A. & Hogg, D. *The Impact of the Use of Oxo-degradable Plastic on the Environment Final report*. Eunomia Research & Consulting Ltd, Bristol, BS1 4Qs, UK. (2016).
13. OFEV. *Littering*. (2018). Disponible à l'adresse Internet suivante: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dechets/info-specialistes/politique-des-dechets-et-mesures/littering.html> (Consulté le 4.3.2019)

14. OFEV. *Poussières fines*. (2020) Disponible à l'adresse Internet suivante: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/air/info-specialistes/qualite-de-l-air-en-suisse/poussieres-fines.html> (Consulté le 25.02.2020)
15. Schelker, R. & Geisselhardt, P. *Kunststoff-Verwertung Schweiz. Bericht Module 1 und 2*. Redilo, Basel, Schweiz. (2011).
16. Swiss Plastics. *Wirtschaftsdaten 2018*. Swiss Plastics, Aarau, Schweiz. (2019).
17. Baier, U., Haubensak, M., Rüter, R. & Ulmer, S. *BAW vergären & kompostieren?* Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, BIOSWEET Swiss Competence Center for Energy Research. (2016).
18. Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E. & Purnell, P. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *J. Hazard. Mater.* **344**, 179–199 (2018).
19. UBA. *OECD Emission Scenario Document: Additives in the Rubber Industry IC 15 ('others'). Exposure Assessment of the environmental Releases of Chemicals in the Rubber Industry*. Volume 4. Updated. Umweltbundesamt, Berlin, Deutschland. (2003).
20. Kfz-Technik. *Reifenaufbau*. (2019). Disponible à l'adresse Internet suivante: <https://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/reifen/reifen-aufbau.htm>. (Consulté le 5.11.2019)
21. PlasticsEurope. *Plastics – the Facts 2017*. Der Verband der Kunststoffherzeuger. (2017).
22. Petrecycling. *Chiffres et faits 2019*. Disponible à l'adresse Internet suivante: <https://www.petrecycling.ch/fr/savoir/chiffres-et-faits/chiffres>. (Consulté le 29.11.2019)
23. Schleiss, K. *Bericht zur Analyse von Fremdstoffen in Kompost und festem Gärgut der Kompostier- und Vergärungsanlagen in der Schweiz gemäss ChemRRV*. UMWEKO GmbH, Grenchen, Schweiz. (2017).
24. Wältli, C. & Almeida, J. *Élimination des déchets. Illustration en Suisse*. Office fédéral de l'environnement, Berne. État de l'environnement. N° **1615**: 46 p. (2016).
25. Boucher, J., Faure, F., Pompini, O., Plummer, Z. & Wieser, O. (Micro) plastic fluxes and stocks in Lake Geneva basin. *Trends Anal. Chem.* **112**, 66–74 (2019).
26. Hann, S. et al. *Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products*. Eunomia Research & Consulting Ltd. Bristol, and ICF, London, UK. (2018).

27. Kalberer, A., Kawecki-Wenger, D. & Bucheli, T. *Flux plastiques dans l'agriculture suisse et risques potentiels pour les sols*. Recherche agronomique Suisse. **10**, 416–423 (2019).
28. Sieber, R., Kawecki-Wenger, D. & Nowack, B. Dynamic probabilistic material flow analysis of rubber release from tires into the environment. *Environ. Pollut. in press*, (2019).
29. Janssen, N. & Harrison, R. M. The Policy Relevance of Wear Emissions from Road Transport, Now and in the Future. An International Workshop Report and Consensus Statement. *Journal Air Waste Manag. Assoc.* **63**, 136–149 (2013).
30. Kreider, M. L., Panko, J. M., Mcatee, B. L., Sweet, L. I. & Finley, B. L. Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies. *Sci. Total Environ.* **408**, 652–659 (2010).
31. Mani, T., Hauk, A., Wal, U. & Burkhardt-Holm, P. Microplastics profile along the Rhine River. *Sci. Rep.* **5**, (2015).
32. Mani, T. et al. Repeated detection of polystyrene microbeads in the Lower Rhine. *Environ. Pollut.* **245**, 634–641 (2019).
33. OFROU. *Strassenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA)*. (2019). Disponible à l'adresse Internet suivante: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/baustellen/bern-wallis/abgeschlossene-projekte/a1-a12-strassenabwasser-behandlungsanlagen--saba-/strassenabwasser-behandlungsanlagen--saba-.html>. (Consulté le 7.2.2019)
34. AWEL. *Belastung des Zürichsees durch die Strassenentwässerung*. AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft. Baudirektion Kanton Zürich, Zürich. (2009).
35. Cabernard, L., Dursich-Kaiser, E., Vogel, J.-C., Rensch, D. & Niederhauser, P. Mikroplastik in Abwasser und Gewässern. *Aqua Gas* **7/8**, 78–85 (2016).
36. Mintenig, S., Int-Veen, I., Löder, M. & Gerds, G. *Mikroplastik in ausgewählten Kläranlagen des Oldenburgisch- Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) in Niedersachsen*. Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) Biologische Anstalt Helgoland, Helgoland, 41 pp. (2014).
37. Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A. & Setälä, O. Solutions to microplastic pollution: Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Res.* **123**, 401–407 (2017).
38. Mitrano, D. M. et al. Synthesis of metal-doped nanoplastics and their utility to investigate fate and behaviour in complex environmental systems. *Nat. Nanotechnol.* **14**, 362-368. (2019).

39. Umweltbundesamt. *Plastik in der Donau*. Umweltbundesamt, Wien, Österreich (2015).
40. Bläsing, M. & Amelung, W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Sci. Total Environ.* **612**, 422–435 (2018).
41. OFEV. *Boues d'épuration*. (2019). Disponible à l'adresse Internet suivante: https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dechets/guide-des-dechets-a-z/biodechets/types-de-dechets/boues-d_epuration.html. (Consulté le 5.12.2019)
42. Machado, A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* **24**, 1405–1416 (2017).
43. Rochman, B. C. M. Microplastics research— from sink to source. *Science* **360**. (2018).
44. Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S. & Tekman, M. B. White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Sci. Adv.* **5**, 1–11 (2019).
45. Jambeck, J. R. et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Mar. Pollut.* **347**, (2015).
46. Faure, F., Demars, C., Wieser, O., Kunz, M. & De Alencastro, L. F. Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environ. Chem.* **12**, 582–591 (2015).
47. Filella, M. & Turner, A. Observational Study Unveils the Extensive Presence of Hazardous Elements in Beached Plastics from Lake Geneva. *Front. Environ. Sci.* **6**, 1–8 (2018).
48. Scheurer, M. & Bigalke, M. Microplastics in Swiss Floodplain Soils. *Environ. Sci. Technol.* **52**, 3591–3598 (2018).
49. Bukowiecki, N. et al. *PM10-Emissionsfaktoren von Abriebsparkeln des Strassenverkehrs (APART)*. Empa: Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche et PSI: Institut Paul Scherrer, Labor für Atmosphärenchemie. (2009).
50. Witzig, C., Pittroff, M., Fiener, P. & Storck, F. *Optimierung der Dichtentrennung und Bestimmung eines Mikroplastik-Tiefenprofils im Zürichsee*. DVGW-Technologiezentrum Wasser Karlsruhe, und Universität Augsburg, Institut für Geographie, Augsburg (2017).
51. Faure, F. & de Alencastro, F. *Evaluation de la pollution par les plastiques dans les eaux de surface en Suisse. Rapport final*. Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit (ENAC), Institut d'ingénierie de l'environnement (IIE), Laboratoire central environnemental (GR-CEL), Lausanne (2014). (2014).
52. Corradini, F., Bartholomeus, H., Huerta, E., Gertsen, H. & Geissen, V. Predicting soil microplastic concentration using vis-NIR spectroscopy. *Sci. Total Environ.* **650**, 922–932 (2019).

53. He, D. et al. Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *Trends Anal. Chem.* **109**, 163–172 (2018).
54. Kole, P. J., Löhr, A. J., Belleghem, F. G. A. J. Van & Ragas, A. M. J. Wear and Tear of Tyres : A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **14**, (2017).
55. Braun, U., Jekel, M., Gerdt, G., Ivleva, N. & Reiber, J. *Mikroplastik-Analytik: Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren*. Diskussionspapier im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plastik in der Umwelt: Quellen, Senken, Lösungsansätze. Eine Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. (2018).
56. Canton Ticino. *Studio sulla presenza di microplastiche nel Lago Ceresio*. Dipartimento del territorio, Sezione della protezione dell'aria dell'acqua e del suolo, Ufficio del monitoraggio ambiente, Bellinzona, Svizzera. (2018).
57. Scheurer, M. & Bigalke, M. Microplastics in Swiss Floodplain Soils. *Environ. Sci. Technol.* **52**, 3591–3598 (2018).
58. Sommer, F. et al. Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. *Aerosol Air Qual. Res.* **18**, 2014–2028 (2018).
59. Rummel, C. D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kühnel, D. & Schmitt-Jansen, M. Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment. *Environ. Sci. Technol. Lett.* **4**, 258–267 (2017).
60. Zubris, K. A. V & Richards, B. K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environ. Pollut.* **138**, 201–211 (2005).
61. Lwanga, E. H. et al. Microplastics in the Terrestrial Ecosystem: Implications for Lumbricus. *Environ. Sci. Technol.* **50**, 2685–2691 (2016).
62. Maass, S., Daphi, D., Lehmann, A. & Rillig, M. Transport of microplastics by two collembolan species. *Environ. Pollut.* **225**, 456–459 (2017).
63. Dinkel, F. & Kägi, T. *Ökobilanz Entsorgung BAW*. Carbotech, Basel, Schweiz. (2013).
64. Burgstaller, M., Potrykus, A. & Weissenbacher, J. *Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe*. BiPRO GmbH - Part of Ramboll, München, Deutschland. (2018).
65. Wiesinger, H. et al. The identity of oxo-degradable plastics and their use in Switzerland. (*unveröffentlicht*) (2019).
66. Umweltbundesamt. *Mikroplastik: Entwicklung eines Umweltbewertungskonzepts*. Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, Deutschland. (2016).
67. VDI. *Plastik in der Umwelt – Quellen , Senken und Lösungsansätze*. VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, Deutschland. (2015).

68. Wright, S. L. & Kelly, F. J. Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environ. Sci. Technol.* **51**, 6634–6647 (2017).
69. Rist, S., Carney, B., Hartmann, N. B. & Karlsson, T. M. Science of the Total Environment. A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics. *Sci. Total Environ.* **626**, 720–726 (2018).
70. EFSA CONTAM PANEL. Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA J.* **14**, (2016).
71. WHO. *Microplastics in drinking-water*. World Health Organization, Geneva, Switzerland. (2019).
72. Schwabl, P. *Assessment of microplastic concentrations in human stool*. Presentation held at United European Gastroenterology Week. Div. Gastroenterology & Hepatology, Medical University of Vienna. (2018)
73. Amato, F. et al. Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions. *J. Hazard. Mater.* **275**, 31–36 (2014).
74. Rist, S., Carney, B., Hartmann, N. B. & Karlsson, T. M. A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics. *Sci. Total Environ.* **626**, 720–726 (2018).
75. Burns, E. E. & Boxall, A. B. A. Microplastics in the Aquatic Environment: Evidence for or Against Adverse Impacts and Major Knowledge Gaps. *Environ. Toxicol. Chem.* **37**, 2776–2796 (2018).
76. Zhao, S., Zhu, L. & Li, D. Microscopic anthropogenic litter in terrestrial birds from Shanghai, China: Not only plastics but also natural fibers. *Sci. Total Environ.* **550**, 1110–1115 (2016).
77. Lwanga, E. H. et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Sci. Rep.* **7**, 1–7 (2017).
78. Rodriguez-seijo, A. et al. Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché. *Environ. Pollut.* **220**, 495–503 (2017).
79. Zhu, D. et al. Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition. *Soil Biol. Biochem.* **116**, 302–310 (2018).
80. Adam, V., Yang, T. & Nowack, B. Toward an Ecotoxicological Risk Assessment of Microplastics: Comparison of Available Hazard and Exposure Data in Freshwaters. *Environ. Toxicol. Chem.* **38**, 436–447 (2019).
81. Besseling, E. et al. Quantifying ecological risks of aquatic micro- and nanoplastic. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **49**, 32–80, (2018).
82. Bakir, A., O'Connor, I. A., Rowland, S. J., Hendriks, A. J. & Thompson, R. C. Relative importance of microplastics as a pathway for the

- transfer of hydrophobic organic chemicals to marine life. *Environ. Pollut.* **219**, 56–65 (2016).
83. Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, A. & Janssen, C. R. Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies. *Environ. Sci. Technol.* **50**, 3315–3326 (2016).
84. Jahnke, A. et al. Impacts of Weathering Plastic in the Marine Environment. *Environ. Sci. Technol.* **4**, 85–90 (2017).
85. Rummel, C.D. et al. Effects of Leachates from UV-Weathered Microplastic in Cell-Based Bioassays. *Environ. Sci. Technol.* **53**, 9214–9223 (2019).
86. Oekotoxzentrum (2015). Mikroplastik in der Umwelt, Infoblatt. Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie, EAWAG-EPFL.