

Microplastiques : terre inconnue ?



Marie-France Dignac est directrice de recherche à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae).



Gabin Colombini est post-doctorant à l'Institut de recherche pour le développement (IRD).

La pollution des sols par les plastiques est beaucoup moins bien documentée que celle des océans, alors que les quantités de plastiques dans les sols seraient de 4 à 23 fois plus élevées en masse que dans les océans [1]. La « pollution plastique » est devenue une menace pour l'environnement [2] et la santé humaine [3] ; elle est à l'origine du dépassement de la limite planétaire liée à l'introduction de nouvelles entités dans l'environnement [4].

Une pollution mondiale

La production cumulée de plastiques depuis 1950 dépasse aujourd'hui les 9,2 milliards de tonnes, dont seuls 24 % sont encore utilisés, environ 9 % ont été recyclés [1], 12 % ont été incinérés et 79 % se sont accumulés dans les décharges ou dans l'environnement naturel [5,6]. De grandes quantités de plastiques se sont ainsi accumulées dans les océans, les lacs et rivières, avec des conséquences néfastes avérées sur de nombreux organismes aquatiques [7].

Les plastiques regroupent une large gamme de polymères auxquels des additifs ou d'autres substances peuvent avoir été ajoutés. Certaines fibres sont aussi faites de plastique avec additifs, comme les filtres de cigarettes, les lingettes ou les textiles synthétiques. Les plastiques dits « biodégradables » (faits à partir de polymères spécifiques) ne le sont que dans des conditions de compostage industriel, et le terme « plastique biodégradable » est particulièrement mal choisi car il véhicule l'idée fausse que ces matériaux seraient dégradés dans l'environnement, ce qui n'est pas le cas [8]. Comme les plastiques non

biodégradables, ils contiennent de nombreux produits chimiques toxiques et peuvent produire de nombreux microplastiques, des particules allant de 1 millième de mm à 5 mm [9].

La pollution des sols aux microplastiques, mise en évidence depuis une dizaine d'années, est encore mal connue. Pourtant, les masses de microplastiques présentes dans les sols pourraient dépasser celles des océans [1].

Les plastiques sont majoritairement fabriqués à partir du pétrole et sont une source importante de gaz à effet de serre (CO_2 notamment) depuis leur fabrication jusqu'au traitement des déchets [10]. Les politiques actuelles favorisent l'utilisation de polymères biosourcés, c'est-à-dire fabriqués à partir de résidus végétaux, moins émetteurs de CO_2 . Toutefois ces plastiques biosourcés ne résoudront pas le problème de la pollution plastique puisqu'ils ne sont pas nécessairement biodégradables (ni en compostage industriel, ni dans l'environnement) [11], ils peuvent se fragmenter en microplastiques et contiennent également des additifs potentiellement toxiques [12].

La pollution de l'environnement par les microplastiques est particulièrement problématique [13]. La pollution sous forme de microplastiques peut circuler dans l'air, l'eau, le sol et se retrouver dans les organismes vivants. En raison de leur petite taille, ils sont transportés dans les régions les plus reculées du globe par le vent ou les eaux. Aujourd'hui, ils sont présents dans tous les écosystèmes : sols, océans, sédiments, jusqu'aux sommets des montagnes [14] et aux calottes glaciaires [15].



Steppe, Jan Stanislawski (1860-1907)

Sources de la pollution des sols agricoles aux microplastiques

Dans les sols cultivés, une source majeure des microplastiques sont les pratiques agricoles [16,17]. Certaines sources sont assez évidentes, comme les films plastiques pour le paillage du sol, utilisés pour limiter l'évaporation de l'eau et l'installation de plantes non désirées. Aujourd'hui, 12,5 millions de tonnes de ces plastiques agricoles sont utilisés chaque année dans le monde [18]. En raison de leur finesse et de leur altération pendant la saison de culture, il n'est en général pas possible de retirer la totalité des films après usage. Leur fragmentation constitue ainsi une source locale de microplastiques. Par ailleurs, l'usure du matériel agricole peut entraîner la présence de microplastiques dans les sols.

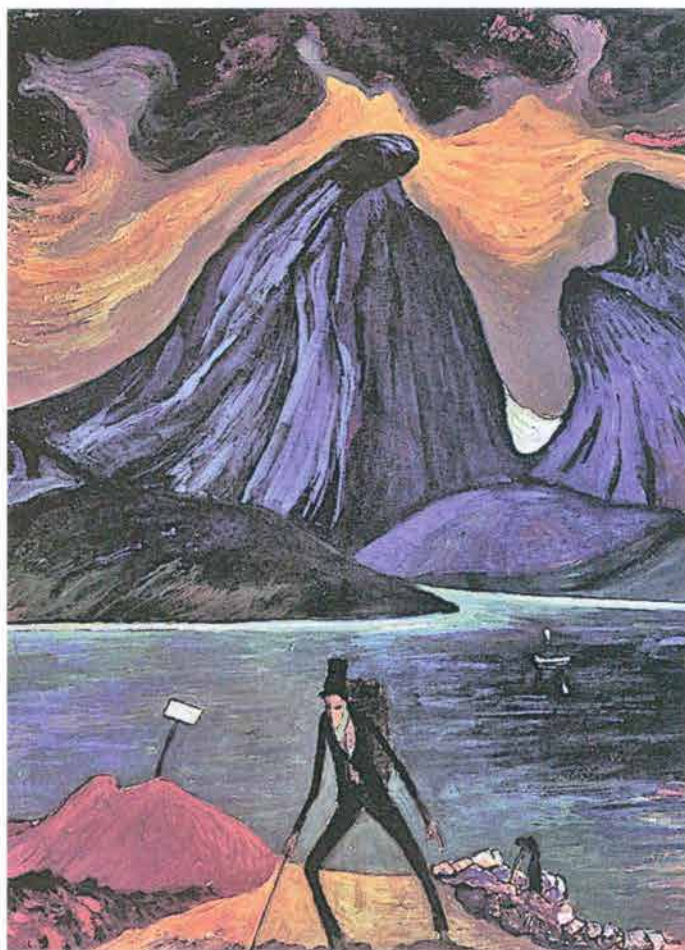
Deux sources de microplastiques beaucoup moins intuitives participent également largement à la pollution des sols agricoles. La première est l'apport au sol de certains amendements organiques d'origine résiduaire, comme les composts riches en matières organiques. Les matières organiques résiduaires susceptibles d'être épandues sur les sols peuvent être d'origine agricole (comme les effluents d'élevage), urbaine (déchets ménagers ou boues d'épuration) et industrielle, brutes ou transformées (par compostage ou comme résidus de méthanisation par exemple). Les amendements organiques sont utilisés pour améliorer les proprié-

tés des sols [19] mais peuvent être une source de microplastiques [20]. Il existe différentes voies d'entrée des plastiques et microplastiques dans les composts : mauvais tri à la source, nombreux plastiques présents dans l'environnement (emballages, mégots de cigarette, sacs plastiques) accidentellement collectés en même temps que les déchets verts urbains ou ruraux.

Les boues de station d'épuration des eaux usées, dont près des trois quarts sont épandues sur les sols après compostage [19], sont également une source de microplastiques, essentiellement de fibres textiles synthétiques générées par l'abrasion des vêtements lors du lavage, ou encore des lingettes jetées dans le circuit de collecte des eaux usées.

Les chiffres de la pollution des sols par les microplastiques

La teneur des sols en microplastiques est très variable en fonction des usages des sols. Au niveau mondial, les sols agricoles sont davantage contaminés que les sols forestiers et les prairies naturelles [21,22]. Une étude sur des sols agricoles réalisée sur un dispositif expérimental a permis de montrer que 22 ans d'apport de composts issus d'ordures ménagères non triées à la source pouvaient conduire à l'accumulation de plus de 400 kg par hectare de microplastiques de taille comprise entre 2 et 5 mm [20], soit l'équivalent en masse de 1 400 bouteilles d'eau de 50 cl par hectare. L'épandage de composts



Le Chiffonnier (détail), Marianne von Werefkin (1860-1938)

issus du traitement mécano-biologique de la fraction non triée des ordures ménagères est encore une pratique courante dans au moins 18 départements français. Grâce à la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire de 2020 [23], cette pratique va être interdite en France, mais cette interdiction n'interviendra qu'en 2027.

Le devenir des plastiques une fois dans les sols

La durée de vie des plastiques dans l'environnement est estimée de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années [24]. Ils ne sont donc pas dégradables à l'échelle d'une vie humaine. Cependant, ils peuvent subir différents processus de transformation physique

ou chimique. Une fois dans le sol, les plastiques peuvent se fragmenter [25]. Cette fragmentation pourrait être plus lente dans les sols que dans l'eau, les plastiques y étant moins exposés aux rayons UV ou à l'abrasion, c'est-à-dire à la fragmentation résultant des frottements. Cette fragmentation des plastiques en débris de plus en plus fins favorise la libération dans le milieu naturel des additifs qu'ils contiennent [25].

Des impacts avérés de la pollution des sols aux microplastiques

La dégradation des sols liée à la pollution plastique peut affecter de manière significative leur biodiversité [26], leur fonctionnement [27] et la qualité des plantes cultivées [28], impactant le rendement des cultures et la sécurité alimentaire [29].

L'étude des impacts des microplastiques ne peut pas être abordée de la même manière que l'étude d'autres contaminants car la pollution plastique est à la fois physique et chimique. Les impacts physiques sur les sols dépendent de la taille et de la forme des particules [30]. De même, la pollu-

tion chimique est due à l'ensemble des molécules présentes dans les milliers de matériaux plastiques différents, dont la plupart sont inconnues, et dont très peu sont réglementées [31,32]. Une étude exhaustive des impacts de chaque type de particule plastique n'est pas envisageable mais de nombreuses études ont mis en évidence des impacts négatifs de différents matériaux plastiques sur le sol.

Les études scientifiques ont montré que la présence de microplastiques modifie les propriétés physiques (par exemple, la circulation de l'eau) et chimiques (par exemple, les éléments nutritifs utiles aux plantes) des sols [33], impactant leur bon fonctionnement et la croissance des plantes [34], et donc diminuant les rendements des cultures [29].

Les recherches scientifiques ont aussi montré la toxicité des microplastiques pour de nombreux organismes du sol [35] comme les microorganismes [33], les vers de terre [36], les escargots [37] ou les plantes [38]. La présence de microplastiques dans les sols conduit à la diminution du taux de reproduction et à l'augmentation du taux de mortalité de nombreuses espèces de la faune du sol [39] et contribuent à la diminution de la biomasse totale de cette faune, induisant des changements dans la fonctionnalité du sol qu'elle régule [40,41]. Cette toxicité augmente avec la fragmentation des microplastiques en particules de tailles plus petites, qui peuvent être ingérées par les organismes et dans lesquelles les composés toxiques ont un effet plus important [25]. Cependant, la plupart des études se concentrent sur l'effet direct des microplastiques sur un seul type d'organismes (vers de terre, plantes, champignons ou bactéries...) alors que les effets en cascade ou indirects des microplastiques restent encore mal connus. Des recherches sur les effets cocktails, sur les chaînes trophiques [42] et à plus long terme sont encore nécessaires [26].

De plus, il a été prouvé que les plantes peuvent absorber à partir du sol des nanoplastiques (particules de tailles encore plus petites que le millièème de millimètre) [28] qui se retrouvent ainsi dans la chaîne alimentaire [43]. Les ruminants ingèrent aussi des déchets plastiques, avec de graves conséquences pour la sécurité alimentaire [44].

L'importante surface spécifique et la structure poreuse des microplastiques les rendent très réactifs : les microplastiques peuvent adsorber d'autres polluants environnementaux (métaux lourds, antibiotiques et pesticides) [45], conduisant à leur bioconcentration, à l'augmentation de leur biodisponibilité et de leur écotoxicité [46].

Les microplastiques se retrouvent aussi au cœur des agrégats du sol (particules organiques et minérales agrégées ensemble) et y restent piégés pour de longues périodes [47]. Ils peuvent être une source de pollution de l'air (remobilisation des microplastiques avec le vent) et des eaux de surface et souterraines (ruissellement, érosion

et percolation de l'eau vers les nappes). Il est encore nécessaire de mener des études sur le lien entre les impacts des microplastiques sur les sols (qui produisent 90 % de l'alimentation humaine) et leurs impacts sur la santé humaine.

Aujourd'hui, un problème majeur lié à la pollution par les plastiques est leur diversité chimique [48]. Les composés utilisés dans la production de plastiques se comptent en milliers de molécules, dont quelques pourcents seulement font l'objet de suivis réglementaires [49]. Au final, ce sont des milliers de produits chimiques potentiellement toxiques pour les écosystèmes qui sont présents dans les plastiques conventionnels [50] et les plastiques biosourcés et biodégradables [12]. Parmi les additifs ajoutés intentionnellement, les phtalates, utilisés pour accroître la souplesse des plastiques, les bisphénols qui renforcent leur résistance, ou certains retardateurs de flamme sont des perturbateurs endocriniens connus [51,52]. Aujourd'hui, la composition des plastiques est protégée par le secret industriel. Les connais-



Savant au microscope, vitrail anonyme du bâtiment Tudor Chambers à Pretoria (1903-1904)

sances scientifiques actuelles montrent la nécessité de simplifier les formulations et de les rendre transparentes, et de mettre en place une liste restrictive des additifs autorisés [53]. La production annuelle mondiale de plastiques est passée de 2 à 460 millions de tonnes entre 1950 et 2019, elle a doublé depuis 2000 et pourrait atteindre 1,2 milliards de tonnes en 2060 [54]. Les modèles développés par les chercheurs montrent que la seule mesure qui permettra de réduire la pollution plastique est d'agir en amont, en réduisant la production de plastique [55]. Ces solutions basées sur la science sont au cœur des négociations en cours, sous l'égide du Programme des Nations unies pour l'environnement, qui devraient aboutir d'ici fin 2024 à un traité mondial visant à mettre fin à la pollution plastique dans tous les milieux, sous la forme d'un instrument international juridiquement contraignant [56]. //

Marie-France Dignac et Gabin Colombini

Les auteurs remercient l'Ademe (projet Plastisol, Graine 2019) et l'ANR (projet e-DIP, ANR-21-CE34-0017). GC remercie l'IRD pour le financement de son post-doctorat.

Références

- [1] Heinrich-Böll-Stiftung, *Atlas du plastique 2020 : faits et chiffres sur le monde des polymères synthétiques*, La Fabrique écologique, 2020.
- [2] United Nations Environment Program, "From pollution to solution: a global assessment of marine litter and plastic pollution", Report, 2021. Sur unep.org
- [3] World Health Organization, "Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health", 2022. Sur who.int
- [4] Persson et al., "Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities", *Environmental science & technology*, 2022, 56:1510-21.
- [5] Geyer et al., "Production, use, and fate of all plastics ever made", *Science advances*, 2017, 3:e1700782.
- [6] Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, « Pollution plastique : une bombe à retardement », Rapport, 2020. Sur senat.fr
- [7] Leistenschneider et al., "A critical review on the evaluation of toxicity and ecological risk assessment of plastics in the marine environment", *Science of The Total Environment*, 2023, 896:164955.
- [8] Paul-Pont et al., "Discussion about suitable applications for biodegradable plastics regarding their sources, uses and end of life", *Waste Management*, 2023, 157:242-8.
- [9] Napper IE, Thompson RC, "Environmental deterioration of biodegradable, oxo-biodegradable, compostable, and conventional plastic carrier bags in the sea, soil, and open-air over a 3-year period", *Environmental Science & Technology*, 2019, 53:4775-83.
- [10] « La pollution par le plastique tout au long de sa durée de vie », Scientists' Coalition for an Effective Plastic Treaty, 2023. Sur ikhapp.org
- [11] Courtene-Jones et al., « Le traité mondial sur les plastiques : quel rôle donner aux plastiques biosourcés, biodégradables et aux bioplastiques ? », Scientists' Coalition for an Effective Plastic Treaty, 2023. Sur ikhapp.org
- [12] Zimmermann et al., "Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? In vitro toxicity and chemical composition", *Environment International*, 2020, 145:106066.
- [13] Thompson et al., "Lost at sea: where is all the plastic?", *Science*, 2004, 304:838.
- [14] Napper et al., "Reaching new heights in plastic pollution: preliminary findings of microplastics on Mount Everest", *One Earth*, 2020, 3:621-30.
- [15] Bergmann et al., "White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic", *Science Advances*, 2019, 5:1-10.
- [16] Hofmann et al., "Plastics can be used more sustainably in agriculture", *Commun Earth Environ*, 2023, 4:1-11.
- [17] Corradini et al., "Microplastics occurrence and frequency in soils under different land uses on a regional scale", *Science of the Total Environment*, 2021, 752:41917.
- [18] Food and Agriculture Organization, "Assessment of agricultural plastics and their sustainability: a call for action", 2021. Sur fao.org
- [19] Houot et al., « Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier : Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques », Synthèse du rapport d'expertise Inra, CNRS, Irstea, 2014. Sur inrae.fr
- [20] Colombini et al., "A long-term field experiment confirms the necessity of improving biowaste sorting to decrease coarse microplastic inputs in compost amended soils", *Environ Pollut*, 2022, 315:120369.
- [21] Büks F, Kaupenjohann M, "Global concentrations of microplastics in soils: a review", *Soil*, 2020, 6:649-62.
- [22] Xu G et al., "Soil microplastic pollution under different land uses in tropics, southwestern China", *Chemosphere*, 2022, 289:133176.

- [23] Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, « La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire », 15 novembre 2023. Sur ecologie.gouv.fr
- [24] Chamas A et al., "Degradation rates of plastics in the environment", *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2020, 8:3494-511.
- [25] Rillig MC et al., "The global plastic toxicity debt", *Environmental Science & Technology*, 2021, 55:2717-9.
- [26] Daghighi E et al., "The forgotten impacts of plastic contamination on terrestrial micro- and mesofauna: a call for research", *Environmental Research*, 2023, 231:116227.
- [27] Wang Y et al., "Consequences of microplastics on global ecosystem structure and function", *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2023, 261.
- [28] del Real AEP et al., "Assessing implications of nanoplastics exposure to plants with advanced nanometrology techniques", *J Hazard Mater*, 2022, 430:128356.
- [29] Gao H et al., "Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: A meta-analysis", *Science of the Total Environment*, 2019, 651:484-92.
- [30] Rillig MC et al., "Shaping up: toward considering the shape and form of pollutants", *Environ Sci Technol*, 2019, 53:7925-6.
- [31] Geueke B et al., "Systematic evidence on migrating and extractable food contact chemicals: most chemicals detected in food contact materials are not listed for use", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63:9425-35.
- [32] Zimmermann L et al., "What are the drivers of microplastic toxicity? Comparing the toxicity of plastic chemicals and particles to *Daphnia magna*", *Environmental Pollution*, 2020, 267:115392.
- [33] Seeley ME et al., "Microplastics affect sedimentary microbial communities and nitrogen cycling", *Nature communications*, 2020, 11:2372.
- [34] Lian J et al., "Effects of microplastics derived from polymer-coated fertilizer on maize growth, rhizosphere, and soil properties", *Journal of Cleaner Production*, 2021, 318:128571.
- [35] Helmberger MS et al., "Towards an ecology of soil microplastics", *Funct Ecol*, 2020, 34:550-60.
- [36] Huerta Lwanga E et al., "Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae)", *Environmental science & technology*, 2016, 50:2685-91.
- [37] Colpaert R et al., "Polyethylene microplastic toxicity to the terrestrial snail *Cantareus aspersus*: size matters", *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29:29258-67.
- [38] Bethanis J et al., "Micro- and nano-plastics in agricultural soils: A critical meta-analysis of their impact on plant growth, nutrition, metal accumulation in plant tissues and crop yield", *Applied Soil Ecology*, 2023, 194:105202.
- [39] Wei H et al., "Meta-analysis reveals differential impacts of microplastics on soil biota", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 230:113150.
- [40] Delgado-Baquerizo M et al., "Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes", *Nat Ecol Evol*, 2020, 4:210-20.
- [41] Liu T et al., "Earthworms coordinate soil biota to improve multiple ecosystem functions", *Curr Biol*, 2019, 29:3420-9.
- [42] Huerta Lwanga E et al., "Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain", *Scientific reports*, 2017, 7:1-7.
- [43] Silva GC et al., "Microplastics and their effect in horticultural crops: Food safety and plant stress", *Agronomy*, 2021, 11:1-17.
- [44] Priyanka M, Dey S, "Ruminal impaction due to plastic materials. An increasing threat to ruminants and its impact on human health in developing countries", *Vet World*, 2018, 11:1307-15.
- [45] Wanner P, "Plastic in agricultural soils—a global risk for groundwater systems and drinking water supplies?—a review", *Chemosphere*, 2021, 264:128453.
- [46] Wang S et al., "Single and combined effects of microplastics and lead on the freshwater algae *Microcystis aeruginosa*", *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 208:111664.
- [47] Watteau F et al., "Microplastic detection in soil amended with municipal solid waste composts as revealed by transmission electronic microscopy and pyrolysis/GC/MS", *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2018, 2:1-14.
- [48] Lehmann A et al., "Microplastics have shape- and polymer-dependent effects on soil aggregation and organic matter loss: an experimental and meta-analytical approach", *Microplastics and Nanoplastics*, 2021, 1:1-14.
- [49] Wiesinger H et al., "Deep dive into plastic monomers, additives, and processing aids", *Environmental Science & Technology*, 2021, 55:9339-51.
- [50] Groh KJ et al., "Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards", *Science of the Total Environment*, 2019, 651:3253-68.
- [51] Fernandez MO, Trasande L, "The global plastics treaty: an endocrinologist's assessment", *Journal of the Endocrine Society*, 2023, 8:1-3.
- [52] Endocrine Society, "Chemicals used in plastic materials harm human health and the economy", 30 mai 2023. Sur endocrine.org
- [53] Dey T et al., "Global plastic treaty should address chemicals", *Science*, 2022, 378:841-2.
- [54] Organisation de coopération et de développement économique, « Perspectives mondiales des plastiques : scénarios d'action à l'horizon 2060 », 2022. Sur oecd.org
- [55] Bergmann M et al., "A global plastic treaty must cap production", *Science*, 2022, 376:469-70.
- [56] Programme des Nations unies pour l'environnement, « Avant-projet de texte de l'instrument international juridiquement contraignant sur la pollution plastique, notamment dans le milieu marin », 2023. Sur wedocs.unep.org