

Impacts des PFAS dans les centrales photovoltaïques



Synthèse bibliographique

18 mars 2026, V6

Ch. Marée, #ZéroIA

Tables des matières

Introduction	3
1. Que sont les PFAS et les dangers associés ?	4
2. Des PFAS dans les panneaux photovoltaïques ?	8
3. Pollutions aux PFAS à la fabrication, à l'exploitation et à l'élimination des panneaux	10
3.1 Points clés	10
3.2 Production des polymères fluorés PFAS	11
3.3 Fabrication des panneaux	12
3.4 Utilisation des panneaux avec polymères fluorés PFAS	12
3.4.1 Le rôle des revêtements dans les modules PV et les conséquences	12
3.4.2 Quel est le volume de panneaux concernés ?	15
3.5 La fin de vie des panneaux	17
3.5.1 Deux chiffres clés	17
3.5.2 Extraits de l'étude "Recycling of solar panels - Comparison of scenarios for a more circular and safe economy"	22
3.5.3 Le recyclage en France	24
4. Impacts des centrales photovoltaïques sur les écosystèmes	26
4.1 Extraits de l'étude "Addressing chemical contamination from floating photovoltaic systems: the need for comprehensive analytical monitoring"	26
4.2 Études analysant l'impact des PFAS polymères sur l'agriculture	29
4.2.1 Potentiel de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire	29
4.2.2 Accumulation de substances perfluorées alkylées (PFAS) dans les plantes agricoles : une revue	31
4.2.3 Analyse exploratoire de fruits et légumes en exploitations agricoles	32
4.2.4 Les substances perfluorées alkylées affectent la croissance, la physiologie et le protéome racinaire des plants de maïs cultivés en hydroponie	32
4.3 Extraits d'une contribution au Sénat australien	32
5. La tentative européenne de réglementation des PFAS	35
5.1 Polymères PFAS : L'Agence Européenne de l'Environnement alerte sur les dangers de ces polluants éternels	35
5.2 Mais les producteurs de PFAS et les industriels de la filière font de la résistance	36
5.2.1 Chemours	37
5.2.2 3M	37
5.2.3 EVOLIS sur le projet de restriction des PFAS dans le cadre du règlement REACH	38
5.3 Loi PFAS de février 2025 et décret d'application de janvier 2026 : des engagements a minima	39
6. Pourtant, non, les PFAS ne sont pas nécessaires pour stopper le changement climatique	41
Conclusion	42
Sélection de références	44
Annexe	45

Introduction

Les PFAS sont utilisés depuis longtemps dans une vaste gamme de biens de consommation, notamment les emballages alimentaires à emporter, les vêtements de pluie, les poêles à frire, les mousses anti-incendie, et beaucoup de produits industriels. Le futur scandale environnemental et sanitaire des PFAS et des pesticides (dont beaucoup sont des PFAS ou se décomposent en PFAS) se profile.

Le paradoxe qui consiste à encourager l'utilisation de substances chimiques PFAS nocives afin de créer des technologies capables de lutter contre le changement climatique suscite logiquement l'incompréhension.

Les scientifiques environnementaux affirment que les fluoropolymères qu'on retrouve dans les panneaux photovoltaïques, les éoliennes et les batteries nuisent à l'environnement tout au long de leur cycle de vie, et que la transition vers une énergie propre ne fera que perpétuer ce problème si elle repose sur les fluoropolymères.

Les industriels sont vent debout contre toute réglementation : « *Les PFAS sont extrêmement utiles car ils assurent une excellente étanchéité et une protection optimale contre les intempéries* », explique Jeffrey Dintzer, avocat spécialisé en droit de l'environnement au sein du cabinet Alston & Bird. « *Il n'existe pas vraiment d'alternatives chimiques aussi efficaces.* » ⁽¹⁾

Mais alors même qu'une dynamique émerge (trop) lentement pour remplacer les PFAS dans les énergies renouvelables aux États-Unis, dans l'UE et ailleurs, un acteur clé du secteur est à la traîne : la Chine produit actuellement plus de 80 % des panneaux solaires mondiaux et une part presque équivalente des batteries pour véhicules électriques.

¹ *The Newledge*, Septembre 2024, <https://www.thenewledge.org/2024/09/debate-grows-over-whether-some-pfas-chemicals-have-a-place-in-clean-energy/>

1. Que sont les PFAS et les dangers associés ?

Cette courte introduction est un rapide résumé de la page Wikipedia, très complète ⁽²⁾ et des articles de l'association Générations futures, très active ⁽³⁾.

Les PFAS ou « substances per- et polyfluoroalkylées » sont des molécules extrêmement résistantes qui ne se dégradent presque pas, d'où leur surnom de *polluants éternels*.

Éléments clés à retenir :

- Les PFAS sont largement utilisées depuis les années 1950 et désormais présentes dans l'air, l'eau, les sols et la chaîne alimentaire.
- On les retrouve dans de nombreux produits comme les textiles, les ustensiles de cuisine, les cosmétiques, les emballages et beaucoup de produits industriels.
- Leur présence pose des risques pour la nature et la santé, et entraîne un renforcement des réglementations partout dans le monde, avec des interdictions et des contrôles accrus.

On en compte aujourd'hui plus de 10.000. Leur famille est vaste :

- **Polymères** ;
- Non-polymères ;
- Sulfonates de perfluorooctane (PFOS) ;
- Acides perfluorooctanoïque (APFO), etc.

Les PFAS ont d'exceptionnelles qualités : antiadhésifs, imperméabilisants, résistants aux hautes températures, excellents tensio-actifs, etc. De quoi attirer la plupart des secteurs industriels.

Ils sont présents, par exemple, dans :

- Les emballages alimentaires anti-gras (hamburgers, pizzas, kebabs...);
- Les revêtements antiadhésifs des poêles et ustensiles de cuisine (dont le Téflon) ;
- Les textiles déperlants et vêtements imperméables ;
- Certains cosmétiques ;
- Certains produits phytosanitaires ;
- Des substances pharmaceutiques ;
- Certaines mousses anti-incendie ;
- et **dans beaucoup de produits industriels** (électricité, électronique, énergies renouvelables, batteries,...).

Après **70 ans** de production de PFAS, sans réelle remise en question, la situation est catastrophique car une étude européenne montre que 69 % des poissons analysés, 55 % des abats et mollusques, 39 % des œufs et 23 % du lait contiennent au moins un PFAS réglementé

² <https://fr.wikipedia.org/wiki/PFAS>

³ <https://www.generations-futures.fr/?s=pfas>

(⁴). Les PFAS se dispersent doucement, mais sûrement. Ils s'accumulent dans les milieux aquatiques, s'invitent dans les organismes des poissons, puis des prédateurs, puis de ceux qui mangent les prédateurs. Grâce à leur stabilité à toute épreuve, rien ne les arrête vraiment, ni le temps, ni la lumière, ni les saisons.

Résultat, une pression diffuse, mais permanente, sur les écosystèmes, qui finit par bousculer les équilibres biologiques. Les PFAS entraînent ainsi une pollution de tous les milieux : l'eau, l'air, les sols et les sédiments.

Concernant les impacts sur la population, les PFAS sont associés à :

- des maladies thyroïdiennes,
- des perturbations du foie et du métabolisme des lipides,
- des effets immunitaires, dont une réduction de la réponse vaccinale,
- des troubles endocriniens,
- des impacts sur la fertilité,
- un faible poids de naissance et des risques de pré-éclampsie,
- des suspicions de rôle dans certaines maladies inflammatoires,
- et des risques de cancers. Le PFOA est classé cancérigène pour l'humain, le PFOS possiblement cancérigène.

Cartographie des pollutions

Le site <https://www.generations-futures.fr/icpe/> propose une **carte interactive des 225 sites industriels responsables de la quasi-totalité des rejets de PFAS** en France. Cette cartographie est basée sur l'analyse des données recueillies par les DREAL auprès de près de 2700 installations classées. Les données présentées proviennent des déclarations officielles transmises aux services de l'État et seront régulièrement mises à jour.

La carte <https://dansmoneau.fr/#map> **visualise la pollution des eaux sanitaires en France**, résultats des analyses officielles réalisées dans le cadre du contrôle sanitaire de l'eau potable mené par les Agences Régionales de Santé (ARS).

Génération futures, décembre 2025 (⁵) :

“En décembre 2025, l'Anses a publié les résultats de sa dernière campagne exploratoire de mesures des PFAS dans l'eau potable (⁶). Cette campagne a permis de rechercher au cours de la période 2023-2025 les 20 PFAS de la directive eau potable ainsi que 15 autres substances PFAS

⁴ <https://www.generations-futures.fr/actualites/pfas-alimentation/rapport-pfas-alimentation-vf/>

⁵ <https://www.generations-futures.fr/actualites/anses-tfa-eau-potable/>

⁶

<https://www.anses.fr/fr/content/pfas-les-resultats-de-la-campagne-nationale-de-mesure-dans-leau-destinee-la-consommation>

susceptibles d'être présentes dans l'eau, notamment des PFAS à chaîne ultra courtes comme le TFA.

(...)

Le plus grand enseignement de ces travaux est la confirmation, enfin officielle, de l'omniprésence du TFA dans les eaux naturelles et traitées. **Dans l'eau brute ou distribuée, le TFA a été retrouvé à plus de 100 ng/L dans 92% des cas! Si la limite réglementaire pour les métabolites de pesticides pertinents (dont fait partie le TFA) était appliquée, l'eau potable en France serait ainsi "non conforme" à la réglementation dans 92% des situations.** Le TFA est retrouvé à des teneurs médianes de 780 ng/L, avec un maximum mesuré à 25000 ng/L en aval d'une usine dont le nom n'est pas mentionné mais que nous supposons être l'usine de Solvay à Salindres dans le Gard."

"Ces résultats alarmants doivent conduire à des mesures de gestion fortes, ce que l'Anses se refuse pourtant à proposer."

Le coût de dépollution va être exorbitant

Génération Futures, janvier 2026 (⁷)

" (...) la Commission européenne a commandé une étude (...) concernant **les coûts à prévoir face à la pollution PFAS pour l'Europe**. Les conclusions de cette **étude (⁸)** (...) explicitent les fortes variabilités selon les hypothèses concernant les coûts en termes de soins de santé, de dépollution de l'eau et des sols ainsi que des effets des PFAS sur les écosystèmes.

Elle définit 4 scénarii :

- inaction face à la pollution PFAS ;
- dépollution des PFAS pour atteindre les seuils actuels définis par la réglementation européenne pour l'eau potable à savoir 100 ng/L pour la somme de 20 PFAS et 500 ng/L pour l'ensemble des PFAS ;
- dépollution des eaux souterraines et eaux de surface pour atteindre l'objectif proposé par la Commission de 4,4 ng/L (équivalent PFOA) pour la somme de 24 PFAS ;
- interdiction complète des PFAS avec une exposition aux PFAS déjà présents dans l'environnement.

Le scénario le moins coûteux est le dernier, à savoir un arrêt définitif de la production et de l'utilisation des PFAS. Dans ce scénario, les coûts sont estimés entre 73 à 4 573 milliards d'euros sur 25 ans avec une estimation centrale à 333 milliards d'euros.

⁷ <https://www.generations-futures.fr/actualites/cout-pfas-janv26/>

⁸ <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2bcea765-fbf8-11f0-8da5-01aa75ed71a1/language-en>

En cas d'inaction, les coûts estimés sont de 78 à 5 828 milliards d'euros sur 25 ans avec une estimation centrale à 438 milliards d'euros. A noter néanmoins que les coûts relatifs aux frais de santé sont largement sous estimés dans tous les scénarii et notamment dans celui-ci où les émissions de PFAS sont plus que doublées d'ici 2050.

Les coûts estimés des scénarii 2 et 3 sont plus élevés car la dépollution de l'eau et des sols (notamment la dépollution du TFA) coûte extrêmement cher."

Le poids des PFAS dans l'UE

Un rapport commandé par l'UE et publié en octobre 2025 précise ⁽⁹⁾ :

"En l'absence d'une interdiction à l'échelle de l'UE, les émissions de PFAS dans l'Union européenne atteindront 4,7 millions de tonnes au cours des 30 prochaines années, selon les chiffres officiels".

"Cela représente en moyenne 157.000 tonnes par an, soit 350 grammes de PFAS par personne dans l'UE. Cela équivaut à un gramme par personne et par jour, soit le poids d'une myrtille."

"[Or] l'apport hebdomadaire tolérable fixé par l'UE pour les quatre principaux PFAS chez un adulte en bonne santé est de 4,4 ng par kilogramme de poids corporel. Ainsi, pour un homme adulte, cela représente environ 0,000000176 gramme."

"Soudain, la myrtille ne paraît plus si petite."

Malheureusement, la situation est pire encore. Comme les PFAS sont des "polluants éternels", selon les mêmes calculs, *"l'UE utilisera 27 millions de tonnes de PFAS au cours des 30 prochaines années"*. En effet, les PFAS sont utilisés sans contrôle depuis plus de 50 ans et se maintiennent dans les milieux pendant des centaines d'années !

Nous fonçons tête baissée vers de nouveaux scandales sanitaires.

9

<https://www.kemi.se/download/18.43415f2e19a0f60356220f8/1761224887540/What%20you%20need%20to%20know%20about%20the%20updated%20PFAS%20restriction%20dossier-Updated-2025-10-23-2.pdf>

Où sont utilisés ces PFAS mortifères ?

Le même rapport commandé par l'union européenne décrit les diverses utilisations des PFAS en Europe (9) :

*“Un pourcentage stupéfiant de **42 % de tous les PFAS utilisés en Europe** au cours des 30 prochaines années sera destiné au secteur de l'énergie [et il s'agit d'hypothèses prudentes...].”*

“Cela comprend :

- Production d'énergie renouvelable (éolienne et solaire)*
- Technologie de l'hydrogène (piles à combustible et électrolyseurs)*
- Batteries*
- Réseaux électriques (appareillage de commutation et disjoncteurs)*
- Fabrication de produits chimiques par électrolyse”.*

Par comparaison, les textiles interviennent seulement pour 14%.

Il est inacceptable que les technologies susceptibles de lutter contre le changement climatique exploitent sans retenue et sans contrôle, les pires substances chimiques PFAS, toxiques pour l'environnement et la santé humaine.

2. Des PFAS dans les panneaux photovoltaïques ?

L'utilisation des PFAS dans les panneaux est variée. Malgré les assurances contraires de l'industrie, de nombreuses recherches indiquent systématiquement que les PFAS sont utilisés dans la fabrication et l'installation de panneaux solaires. Les PFAS sont présents dans les **revêtements des fils électriques, les circuits électroniques, les rubans adhésifs, les colles, les revêtements antireflets et anti-salissures de la face verrée, et sur la face arrière des panneaux pour repousser l'eau.**

La plupart des PFAS utilisés dans les modules solaires sont des **fluoropolymères**, dont les plus fréquents sont les PVF, les PVDF et les PTFE (voir encadré ci-dessous et l'annexe). Leur utilité est multiple :

- résistance à la chaleur (point de fusion élevé) ;
- transparence ;
- conductivité électrique permettant d'isoler la structure de la carcasse du panneau ;
- propriétés antireflet et anti-encrassement sur la vitre solaire ;
- propriétés hydrophobes sur les feuilles de fond des modules PV.

Initialement, lors des premières centrales photovoltaïques “vertes”, les constructeurs étaient fiers des produits qu’ils utilisaient pour protéger les panneaux et améliorer leurs performances, mais depuis qu’on parle régulièrement de PFAS et des risques sanitaires associés, les constructeurs ne communiquent plus sur l’utilisation des PFAS. C’est dorénavant difficile d’obtenir de l’information complète et détaillée (quels produits sont utilisés et en quelles quantités,...).

Méta-analyse de Preeti Nain et Annick Anctil, juin 2025 ⁽¹⁰⁾ :

“Une recherche documentaire préliminaire approfondie a d’abord été effectuée afin de comprendre l’état actuel de l’utilisation des PFAS dans les modules solaires et de définir le problème et la portée de l’analyse documentaire. Nous avons analysé 45 études publiées entre 2012 et 2024, dont 17 articles de synthèse, 15 études expérimentales et 13 livres blancs ou rapports.

(...)

*“L’analyse systématique de la littérature ne permet qu’une compréhension partielle de l’utilisation des PFAS dans le photovoltaïque. Parmi les PFAS recensés, les **fluoropolymères** sont les plus fréquemment identifiés dans les faces avant et arrière des cellules photovoltaïques. **Cependant, des détails essentiels**, tels que les caractéristiques des modules, l’épaisseur du revêtement en fluoropolymère et les concentrations, **restent flous**. Une évaluation complète des risques potentiels associés aux PFAS dans le photovoltaïque nécessite des données précises sur leurs quantités, leurs formes, les composants hôtes et leurs applications.”*

INERIS, avril 2025 ⁽¹¹⁾ :

“ (...) Les fluoropolymères (comme le PTFE : polytétrafluoroéthylène), (...) sont considérés comme stables, mais (...) font néanmoins polémique. Certains auteurs (Korzeniowski et al., 2023) considèrent que ces composés remplissent les critères d’évaluation correspondant à des polymères peu préoccupants (Polymères of Low Concern), tandis que d’autres pensent que les preuves sont insuffisantes (Lohmann et al., 2020 ¹²). En effet, ce classement ne porte que sur l’usage et la mise en œuvre des produits, mais pas sur la phase de production, ni sur celle de la fin de vie. Or, la production de certains polyfluoromères nécessite des auxiliaires de polymérisation, comme historiquement des sels d’acides perfluoroalkylés (comme le PFOA), qui sont non dégradables, et elle peut s’accompagner de rejets de ces sels ou de sous-produits sous forme de monomères non polymérisés (qui n’ont pas réagi) dans l’environnement.”

¹⁰ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032125002357>

¹¹

<https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/Ineris-229253-2808401-Plan%20PFAS%20-%20Action%20%20v2.pdf>

¹² <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33043667/> “Compte tenu de l’extrême persistance des fluoropolymères, des émissions associées à leur production, leur utilisation et leur élimination, et de la forte probabilité d’exposition humaine aux PFAS, leur production et leurs utilisations devraient être limitées, sauf en cas d’utilisations essentielles.”

3. Pollutions aux PFAS à la fabrication, à l'exploitation et à l'élimination des panneaux

3.1 Points clés

Extraits d'un article de l'European Environment Agency (EEA), avril 2025 ⁽¹³⁾.

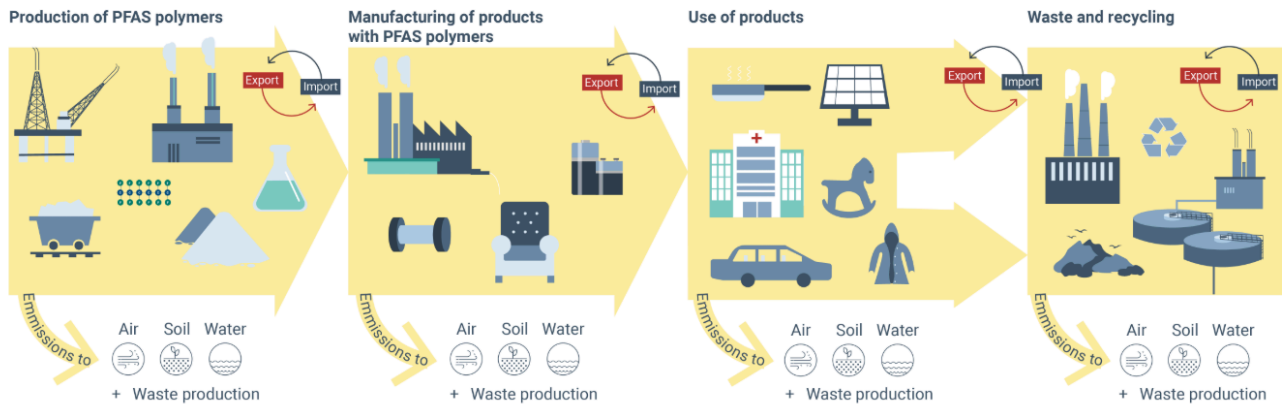
- *“Les PFAS peuvent être classés en formes polymères et non polymères ⁽¹⁴⁾. **Les polymères de PFAS représentent une part importante, soit 24 à 40 %, du volume total de PFAS sur le marché de l'UE.***
- *Les polymères PFAS sont largement utilisés dans les produits de consommation, la production industrielle **et, de plus en plus, dans les technologies vertes.***
- *Les polymères PFAS peuvent avoir des impacts graves et irréversibles tout au long de leur cycle de vie. **Ces impacts incluent des effets toxiques ainsi que des conséquences sur le changement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone. Ils peuvent également compromettre le recyclage des produits.** Cependant, nombre de ces impacts restent encore mal compris.*
- *Une restriction proposée dans le cadre du règlement REACH ⁽¹⁵⁾ pourrait réduire considérablement l'utilisation des PFAS au sein de l'UE. Cela concerne notamment les polymères PFAS.*
- ***Il est essentiel d'adopter une perspective globale du cycle de vie des polymères PFAS lors de l'évaluation de leurs impacts et de la décision concernant leur utilisation future.”***

¹³ <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-polymers-in-focus>

¹⁴ Voir l'annexe.

¹⁵

<https://echa.europa.eu/fr/regulations/reach/understanding-reach#:~:text=REACH%20est%20un%20r%C3%A8glement%20de,industrie%20chimique%20de%20l'UE.>



Pollutions au cours du cycle de vie des polymères fluorés PFAS

3.2 Production des polymères fluorés PFAS

Extraits d'un article de l'European Environment Agency (EEA), avril 2025 ⁽¹⁶⁾

“La production de polymères PFAS se déroule généralement en « systèmes clos ». Cependant, des cas répétés de forte pollution des travailleurs, de l'environnement et des communautés riveraines des usines par des PFAS s'échappant de ces systèmes clos sont constatés. L'expression « grippe du téflon » est utilisée par les travailleurs pour décrire les symptômes ressentis après une forte exposition aux émanations du polytétrafluoroéthylène (PTFE), un polymère PFAS. En Europe et aux États-Unis ⁽¹⁷⁾, des cas de contamination des sols, de l'eau potable, des aliments et les populations vivant à **proximité des usines** par des auxiliaires de polymérisation, tels que le PFOA et le GenX ⁽¹⁸⁾, ainsi que par divers sous-produits de synthèse, ont été recensés .”

¹⁶ Op.cit.

¹⁷

<https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cm/products/etc-cme-and-etc-wmge-report-9-2021-fluorinated-polymers-i-n-a-low-carbon-circular-and-toxic-free-economy>

¹⁸ “Les **GenX** sont des molécules générées par Chemours pour remplacer le PFOA interdit depuis 2020. “ Les produits chimiques GenX sont un sous-groupe des PFAS développés pour remplacer certains composés PFAS plus anciens, mais ils partagent des propriétés chimiques similaires (...). Selon le ministère américain de la Santé et des Services sociaux (HHS), ces produits chimiques sont souvent appelés « produits chimiques éternels » car ils ne se décomposent pas facilement dans l'environnement et peuvent s'accumuler dans le sol, l'eau et les organismes vivants. Des études sanitaires ont établi un lien entre les PFAS et les produits chimiques GenX et divers problèmes de santé, notamment

- Augmentation du taux de cholestérol
- Modifications des enzymes hépatiques
- Réduction de la réponse immunitaire aux vaccins
- Risque accru d'hypertension artérielle ou de prééclampsie chez les femmes enceintes
- Risque accru de cancer du rein ou des testicules

Pour plus d'informations, notamment les dernières recherches et recommandations sur les effets des PFAS et des produits chimiques GenX sur la santé, consultez le site web du ministère américain de la Santé et des Services sociaux : <https://www.atsdr.cdc.gov/pfas/>.” J.W Thomson, novembre 2024

(...)

“A titre d’exemple, un bilan massique réalisé sur le GenX utilisé dans une usine produisant des fluoropolymères, au Pays-Bas, a montré que sur 50 tonnes entrantes, environ 55% étaient éliminés en tant que déchets (pour être incinérés), 40% étaient recyclés, 4% étaient rejetés dans les eaux (soit 2000 kg) et 1 % dans l’air, soit 500 kg. Par ailleurs, environ 0,5% n’était pas éliminé du fluoropolymère produit et se retrouvait dans le produit final”.

“Un problème moins étudié concerne le rejet de substances fluorées volatiles. Ces substances, qui contribuent fortement au changement climatique, peuvent également détruire la couche d’ozone.”⁽¹⁹⁾

3.3 Fabrication des panneaux

Extrait d’un article de l’European Environment Agency (EEA), avril 2025⁽²⁰⁾

*“Lors de la fabrication des produits [les panneaux], les polymères PFAS sont incorporés à ces produits ou appliqués sous forme de films ou mélangés à d’autres produits. **À ce stade, des polymères ou des additifs PFAS, des impuretés, des sous-produits de synthèse ou des produits de dégradation peuvent être libérés.** Des émissions peuvent survenir lors de l’application des polymères PFAS, par exemple sous forme de revêtements de surface, exposant ainsi les travailleurs, ou encore par ventilation naturelle, via des eaux usées insuffisamment traitées ou des déversements accidentels.”*

3.4 Utilisation des panneaux avec polymères fluorés PFAS

3.4.1 Le rôle des revêtements dans les modules PV et les conséquences

Extraits de J.W Thomson, novembre 2024⁽²¹⁾ et de Saving Green, collectif, New York, 2021⁽²²⁾

https://www.facebook.com/groups/539367322070061/?multi_permalinks=546257558047704&hoisted_section_header_type=recently_seen

Voir aussi :

<https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/GenX-Toxicity-Assessment-factsheet-March-2023-update.pdf>

¹⁹ Les gaz à effet de serre fluorés (PFC, SF₆, et HFC) sont responsables du réchauffement climatique, après le dioxyde de carbone CO₂, le méthane CH₄ et le protoxyde d’azote NO₂. Ces gaz sont également néfastes pour la couche d’ozone.

²⁰ Op.cit.

²¹ J.W Thomson, novembre 2024

https://www.facebook.com/groups/539367322070061/?multi_permalinks=546257558047704&hoisted_section_header_type=recently_seen

²² Saving Green, collectif, New York, 2021

“Les panneaux PV modernes sont souvent dotés de trois types de revêtements qui améliorent leurs performances :

- *Les revêtements antireflets (ARC) contribuent à réduire la réflexion de la lumière solaire sur la surface du panneau, permettant ainsi de convertir davantage de lumière en énergie. (23)*
- *Les revêtements antisalissures (ASC) empêchent la poussière et la saleté d'adhérer à la surface du panneau, ce qui permet de maintenir l'efficacité dans les zones où la poussière est fréquente. (24)*
- *Les revêtements anti éblouissants réduisent les réflexions brillantes, rendant les installations solaires plus compatibles avec divers environnements.*

Si ces revêtements améliorent la longévité et l'efficacité des panneaux, certains contiennent des composés PFAS ou GenX, appréciés pour leur résistance à l'eau, à l'huile et à l'usure environnementale.

*Ces qualités rendent les PFAS et le GenX adaptés aux revêtements des panneaux photovoltaïques, car ils résistent aux conditions climatiques difficiles et prolongent la durée de vie utile des panneaux. **Cependant, avec le temps, à mesure que les revêtements se dégradent, ces produits chimiques peuvent lentement s'infiltrer dans le sol et les sources d'eau environnantes, affectant potentiellement les eaux souterraines dans les zones qui dépendent de l'eau [des nappes phréatiques].***

(...)

“Voici un bref aperçu de la durée de vie de divers revêtements avant leur dégradation :

<https://documents.dps.ny.gov/public/Common/ViewDoc.aspx?DocRefId=%7BC0A8A29D-275C-45FD-97DB-F8BA66E80800%7D>

²³ *“Les revêtements anti reflets (ARC) sont utilisés pour augmenter la productivité des panneaux solaires en ajoutant un revêtement diélectrique sur la surface du verre. Ce revêtement texturise la surface du verre, ce qui permet de piéger certaines bandes de longueurs d'onde à l'intérieur du panneau, où elles peuvent générer de l'électricité supplémentaire en entrant en contact avec les cellules photovoltaïques.”*

²⁴ *“Les propriétés hydrophobes des revêtements ASC créent une surface antiadhésive qui favorise l'écoulement de l'eau, ce qui permet d'obtenir des panneaux solaires « autonettoyants ». Ce revêtement est appliqué sur la surface vitrée avant au moment de la fabrication. La surface hydrofuge favorise la cohésion de l'eau, permettant aux gouttelettes de se former complètement avec un contact minimal avec la surface. Cela améliore l'écoulement des gouttelettes d'eau et, ce faisant, élimine la poussière et la saleté de la surface du panneau. **Les ASC sont généralement fabriqués à partir de nanoparticules de dioxyde de silicium (SiO₂) ou de dioxyde de titane (TiO₂) combinées à de longues chaînes de fluoropolymères.** (...) Les préoccupations concernant l'impact négatif du TiO₂ sur l'environnement et la santé humaine sont de plus en plus vives. En décembre 2020, la Californie a annoncé la révision de la classification des nanoparticules de dioxyde de titane dans le cadre de sa proposition 65.29 relative à la loi sur la sécurité de l'eau. Le livre de Gohar Dar intitulé TiO₂ Nanoparticles, publié en février 2020, comprend un chapitre sur la « Toxicité des nanoparticules de TiO₂ ». Cette recherche indique que des tumeurs pulmonaires ont été observées chez des souris exposées à long terme au TiO₂”.*

- *Revêtements anti reflets : durent environ 15 à 20 ans, pouvant libérer des composés PFAS ou GenX à mesure qu'ils s'usent.*
- *Revêtements anti-salissures : durent généralement environ 10 à 15 ans et, exposés à la poussière et au vent, les PFAS et GenX peuvent progressivement s'échapper.*
- *Revêtements anti-éblouissement : ont une durée de vie similaire de 15 à 20 ans et se dégradent sous l'effet des contraintes environnementales.”*

*“L'utilisation des PFAS dans les revêtements antireflets et anti-salissures (...) est particulièrement préoccupante. Les fiches de données de sécurité détaillent le contenu des produits fabriqués aux États-Unis. Cependant, à l'heure actuelle, la Chine est le principal fournisseur de panneaux solaires et de batteries en polysilicium. La responsabilité et la transparence concernant les matériaux et les produits fabriqués en dehors des États-Unis sont discutables. **En juin 2021, l'administration Biden a interdit l'importation et l'utilisation de certains matériaux et produits liés à l'énergie solaire provenant de Chine en raison du recours au travail forcé et au génocide dans les mines de polysilicium de ce pays.**” (25)*

*“Les revêtements ARC et ASC peuvent résister à des contraintes environnementales difficiles telles que la chaleur humide et le gel, mais ils sont susceptibles d'être endommagés par l'exposition aux UV. [Selon les études menées en laboratoire] (...), les revêtements ont commencé à se dégrader rapidement, et l'effet était clair après seulement deux semaines d'exposition. (...) **La dégradation a été causée par un certain nombre de mécanismes, notamment la libération de solvants, la perte de fluor, l'amincissement du revêtement et l'augmentation de la macro-rugosité de la surface.***

(...)

Il est logique de supposer que les produits chimiques lessivés par l'eau de pluie se déposent dans le sol sous-jacent, les eaux souterraines et les aquifères. L'effet cumulatif de dizaines de milliers de panneaux solaires pendant 35 ans ou plus contaminerait très probablement de manière permanente les eaux souterraines, le sol et les eaux de ruissellement du site. (...)

²⁵ EcoWatch, Septembre 2021, <https://www.ecowatch.com/china-solar-panels-ban-biden-2654961710.html>

“Selon [CNN](#), la région chinoise du Xinjiang est devenue, au cours des deux dernières décennies, un important centre de production de composants pour panneaux solaires destinés au reste du monde. (...), le rapport « [En plein jour : Travail forcé des Ouïghours et chaînes d'approvisionnement mondiales du solaire](#) », publié en mai dernier par l'Université Sheffield Hallam, suggère qu'une grande partie de la fabrication de ces composants repose sur le travail forcé. Ce rapport indique que les entreprises exploitent la population ouïghoure de la région, ainsi que d'autres minorités ethniques et religieuses, pour produire des biens destinés à la chaîne d'approvisionnement mondiale des panneaux solaires.”

Une élimination inappropriée des panneaux solaires cassés et mis hors service peut contaminer de manière permanente les décharges et les aquifères voisins. (...)

Bien qu'il existe quelques alternatives potentiellement plus sûres [que ces molécules], ces produits sont plus coûteux et fabriqués en quantités plus limitées. Les centrales solaires à grande échelle nécessitent des centaines de milliers, voire des millions, de panneaux photovoltaïques au moment de leur installation. Seuls les plus grands fournisseurs, pour la plupart basés en Chine, sont en mesure de fabriquer et de livrer de telles quantités. **Or, les fiches techniques et les fiches de données de sécurité sont rares dans ce pays et, lorsqu'elles sont fournies, leur fiabilité est discutable.**"

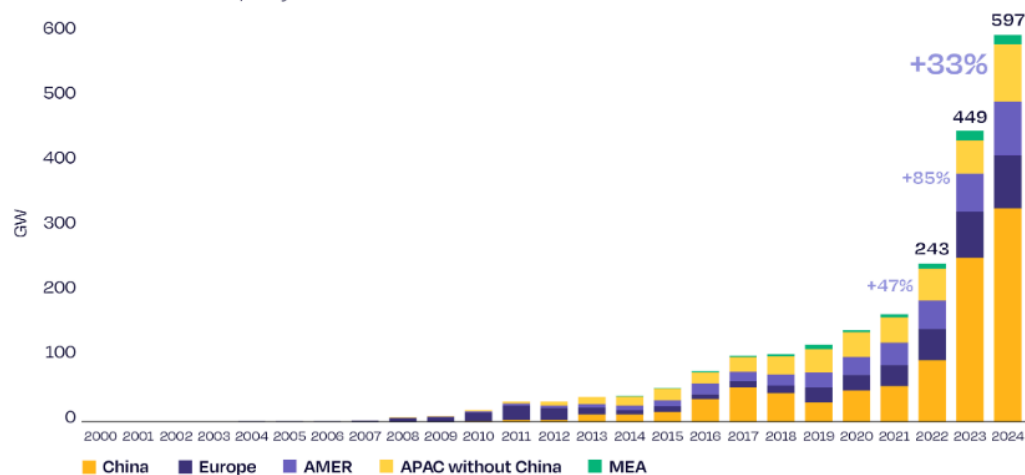
3.4.2 Quel est le volume de panneaux concernés ?

Pour juger de la pollution engendrée lors de la fabrication, de l'utilisation des panneaux et de leur élimination, il faut disposer du nombre de panneaux concernés.

Le dernier rapport de SolarPower Europe 2025 - 2030 ⁽²⁶⁾ révèle que le monde a installé un record de 597 GW d'énergie solaire en 2024, soit une augmentation de 33 % par rapport à 2023.

Record 597 GW of global solar capacity added in 2024; slower but steady 33% annual growth

Annual solar PV installed capacity 2000-2024



SolarPower Europe

© SolarPower Europe

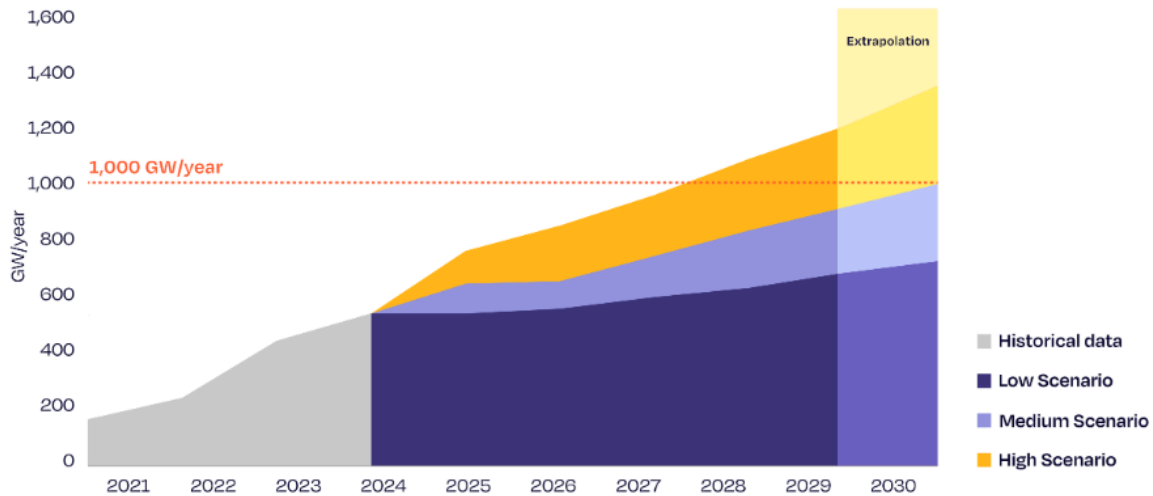
Après que le monde a franchi le cap des 2 térawatts (TW) d'énergie solaire totale installée à la fin de 2024, **le rapport annuel prévoit que le monde pourrait installer 1 TW d'énergie solaire par an d'ici la fin de la décennie.**

²⁶ <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2025-2029/detail>

“D’ici 2030, nous prévoyons que la capacité solaire photovoltaïque installée dans le monde dépassera 7 TW.” SolarPower Europe 2025 - 2030

Annual TW solar market likely to be reached by 2030

Global cumulative solar PV market scenarios 2025-2030



© SolarPower Europe

Concrètement, au niveau mondial, on installe environ **1,5 milliards de panneaux chaque année. En 2030, il y en aura au total 14 milliards dans le monde !**

En France, il y a environ 60 millions de panneaux (pour 29 GW installés fin 2025), pour un objectif de 150 millions en 2035 (pour 75 GW installés selon la PPE 3).

Au vu des volumes concernés, on comprend mieux l’importance de prendre en compte des risques de pollution de ces installations qui se concentrent sur des espaces naturels, agricoles et forestiers.

3.5 La fin de vie des panneaux

Cette pollution prend une dimension catastrophique dès qu'on envisage la fin de vie des panneaux.

3.5.1 Deux chiffres clés

1. **Concernant les couches externes dopées au PFAS, au moins 80% des panneaux en sont pourvus.**

Interview de Huib van den Heuvel, directeur commercial de Solarge, entreprise néerlandaise qui produit des panneaux avec couches externes sans PFAS (juillet 2024 ²⁷).

“« (...) La plupart de ces produits ne présentent aucune caractéristique permettant le recyclage ou une autre utilisation circulaire des matériaux », explique Huib van den Heuvel, (...)”

“En 2022, la part de marché des matériaux contenant des PFAS dans ces couches externes avoisinait les 80 %, tandis que les alternatives sans PFAS ne représentaient qu'un cinquième du marché.”

Plusieurs sociétés européennes proposent des panneaux sans PFAS.

“Cependant, le marché européen des panneaux solaires est minuscule, ne représentant que 2 % du marché total. Ailleurs dans le monde, les vieux panneaux solaires finissent dans des décharges, où des substances (...) PFAS toxiques s'infiltrent dans les sols et les nappes phréatiques, engendrant des risques importants pour la santé humaine et la faune sauvage.”

²⁷ Chemsec, Juillet 2024,

<https://chemsec.org/pfas-waste-from-solar-panels-this-is-something-that-people-in-the-sector-dont-like-to-talk-about/>

“C’est un sujet que les acteurs du secteur préfèrent éviter. Il existe bien un système de collecte des déchets, mais en réalité, on ne réutilise pas les matériaux ; on se contente de les jeter. Peu d’utilisateurs finaux en sont conscients.”

*« L’accent a été mis sur la promotion de l’énergie solaire comme alternative propre, mais nous ne pouvons ignorer l’impact environnemental des matériaux utilisés pour fabriquer les panneaux solaires. **La contamination par les PFAS est un problème grave qui nécessite une attention immédiate.** »*

2. Au niveau mondial, seulement 10% des panneaux sont recyclés !

Il faut bien se rendre compte de l’importance de cette information : l’industrie du photovoltaïque est opérationnelle dans le monde depuis 20 ans ; en 2025, cette industrie a installé 1,5 milliards de panneaux, et nous constatons en 2026 que seulement 10% de ces panneaux potentiellement toxiques sont recyclés !

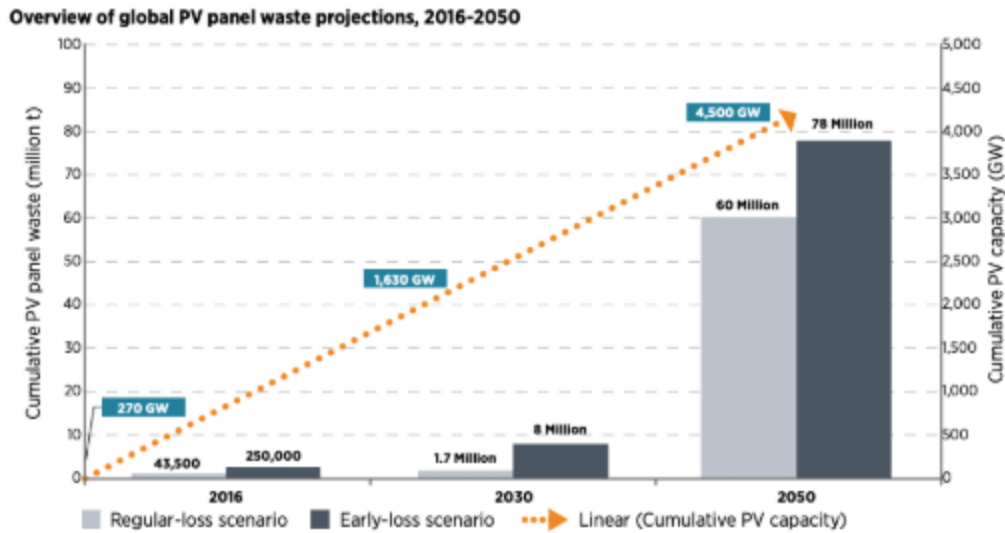
Les années 2030 vont être cruciales pour le recyclage, car des centaines de millions de panneaux vont arriver en fin de vie, et que vont-ils devenir ?

Je reprends ici des extraits de l’étude **“How to tackle the looming challenge of solar PV panel recycling”** (Comment relever le défi imminent du recyclage des panneaux photovoltaïques) de Siyou Xia , Yu Yang et Jessie PH Poon, juillet 2025 ⁽²⁸⁾.

*“Actuellement, seulement **10 % environ des panneaux PV sont recyclés, la majorité étant jetée, incinérée ou enfouie.**”*

*“On prévoit que la quantité cumulée mondiale de déchets de panneaux photovoltaïques atteindra **1,7 million de tonnes d’ici le début des années 2030.** D’ici les années 2050, ce niveau pourrait atteindre **60 millions de tonnes**”. Et il pourrait s’agir d’une sous-estimation. Il est possible que les panneaux dégradés soient remplacés plus tôt que prévu. Dans ce scénario de « pertes précoces », l’augmentation des déchets photovoltaïques surviendra plus rapidement : **au début des années 2030, la quantité cumulée mondiale de déchets photovoltaïques devrait atteindre 8 millions de tonnes, et d’ici les années 2050, ce niveau pourrait atteindre le chiffre impressionnant de 78 millions de tonnes.**”*

²⁸ <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2417921122>



Remarque importante : ces données sont celles de l’IRENA (International Renewable Energy Agency) et datent de 2016 ⁽²⁹⁾. A ce moment, les objectifs étaient de 4,5 TW de puissance photovoltaïque installée en 2050. **Actuellement, les objectifs sont plutôt de 7 TW en 2030 et 75 TW en 2050 ⁽³⁰⁾ ! Cela correspond à multiplier par 30 la puissance installée actuelle... On peut avoir de sérieux doutes sur la faisabilité de ces objectifs, mais c’est bien la stratégie défendue par les spécialistes de la filière.**

*“La capacité photovoltaïque installée dans le monde dépasse désormais les 2 térawatts. Avec une croissance prévue de 25 %, cette capacité pourrait atteindre 75 térawatts d’ici 2050. À terme, chacun de ces panneaux devra être mis hors service, et la quantité de déchets augmentera rapidement **au point de saturer les installations de recyclage.**”*

“Les panneaux photovoltaïques contiennent des ressources potentiellement réutilisables, comme le verre, l’aluminium, le plastique, le silicium, le cuivre et l’argent. Malheureusement, ces matériaux sont difficiles à extraire des panneaux usagés, composés de plusieurs couches liées entre elles pour assurer leur durabilité. Cette complexité rend leur séparation difficile pour les technologies de recyclage actuelles, qui reposent principalement sur le broyage et le traitement

29

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf

³⁰ Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option NM Haegel, P Verlinden, M Victoria, P Altermatt, H Atwater, T Barnes, C Breyer, C Case... Science, 2023•science.org
<https://www.science.org/stoken/author-tokens/ST-1121/full>

thermique. **De plus, s'ils ne sont pas traités correctement, les panneaux mis au rebut peuvent libérer des métaux lourds toxiques, tels que le plomb et le cadmium, dans les sols et les eaux.**"

"Des défis économiques se posent également. (...) De nombreux fabricants de panneaux hésitent également à adapter leurs systèmes pour intégrer l'approvisionnement en composants recyclés, préférant souvent les matériaux vierges. En clair, si les coûts de recyclage des panneaux sont trop élevés, il n'y a aucune incitation financière à le faire."

*"Par ailleurs, les subventions et autres incitations au recyclage des panneaux photovoltaïques sont rares. On constate également un manque de sensibilisation des consommateurs et des entreprises, ainsi qu'une pénurie d'installations industrielles capables d'éliminer ces panneaux de manière durable et responsable. **De ce fait, la plupart des panneaux photovoltaïques sont jetés sans précaution : enfouis dans des décharges ou entassés sur des terrains vagues ou dans des champs.**"*

*"En 2012, l'Union européenne (UE) a instauré une réglementation relative à l'élimination des déchets électroniques, qui concerne notamment les panneaux photovoltaïques. Cette directive responsabilise les fabricants de panneaux en matière de recyclage et fixe des objectifs progressifs pour accroître le taux de recyclage. (...) Toutefois, **leur capacité combinée de 40 000 tonnes en 2023 représente moins d'un tiers de la production totale de déchets de panneaux actuellement réalisée et ne pourra manifestement pas absorber l'augmentation prévue dans les années à venir.**"*

(...)

"Les technologies émergentes offrent des perspectives considérables pour améliorer l'efficacité du démantèlement. L'intelligence artificielle (IA), combinée aux plateformes de gestion des déchets photovoltaïques, a le potentiel de simplifier et de rentabiliser le recyclage de ces déchets. Par exemple, l'utilisation conjointe de l'IA et de robots pourrait faciliter le démontage, la séparation, le broyage et le tri des modules photovoltaïques mis hors service, renforçant ainsi l'automatisation et l'intelligence des activités de gestion des déchets. De tels systèmes d'IA pourraient également contribuer à la planification du démantèlement en analysant les données historiques afin de prédire la durée de vie des composants et de constituer une base de données permettant de suivre l'intégralité du cycle de vie des modules." ⁽³¹⁾

³¹ **C'est l'auto-accroissement de la technique comme l'avait déjà décrit Jacques Ellul en 1954** : chaque technique apporte ses problèmes techniques qui amènent de nouvelles solutions techniques qui apportent à leur tour de nouveaux problèmes. Toute amélioration d'une technique ne peut être que technique. Et voilà que l'IA s'en mêle ! Les industriels justifient l'IA parce qu'elle aide au développement d'un photovoltaïque "propre" qui à son tour alimente les datacenters de l'IA. La boucle est bouclée !

L'avis de l'European Environment Agency (avril 2025 ³²)

“Le recyclage de matériaux contenant des PFAS peut entraîner une exposition prolongée. Par exemple, lors du recyclage de textiles, des PFAS peuvent se retrouver dans de nouveaux produits pour lesquels ils n'étaient pas destinés. Les produits en fin de vie contenant des PFAS peuvent ainsi provoquer une exposition incontrôlée chez l'homme et des rejets dans l'environnement lors du recyclage. Par ailleurs, ils peuvent constituer un obstacle au recyclage en détournant les matériaux du circuit de recyclage et en les envoyant en décharge ou incinérés.

La mise en décharge de produits contenant des polymères PFAS peut entraîner la contamination des lixiviats par ces substances. Tous les polymères PFAS sont extrêmement persistants dans l'environnement. À ce jour, leur dégradation potentielle en molécules plus petites reste mal comprise. Cependant, il est probable que l'un des principaux types de polymères PFAS — les polymères fluorés à chaîne latérale — puisse se dégrader et former des PFAS non polymériques dans l'environnement (OCDE, 2022 ³³). Même les fluoropolymères, pourtant très résistants, se fragmentent en molécules plus petites sous l'effet des intempéries et des contraintes physiques, ce qui peut accroître l'absorption des PFAS par les organismes vivants (Lohmann et al., 2020 ³⁴).”

L'avis du Secrétariat chimique international Chemsec (juin 2024 ³⁵)

Concernant les couches polymères dopées au PFAS :

“Risques pour la santé et l'environnement liés à la production de polymères de base.

- **Impossibilité de réutiliser les chutes (après production) par recyclage mécanique à faible coût.**
- **Risques pour la santé et l'environnement liés aux déchets en fin de vie en cas de mise en décharge (non contrôlée).**
- **Triplement du coût d'incinération (déchets fluorés).**
- **Aucune solution de recyclage chimique efficace à ce jour.”**

³² <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-polymers-in-focus>

³³ OCDE, 2022, *Rapport de synthèse sur la compréhension des polymères fluorés à chaîne latérale et de leur cycle de vie*, Série OCDE sur la gestion des risques liés aux produits chimiques, Éditions OCDE, Paris ([https://one.oecd.org/document/ENV/CBC/MONO\(2022\)35/en/pdf](https://one.oecd.org/document/ENV/CBC/MONO(2022)35/en/pdf))

³⁴ Lohmann R., et al., 2020, « Les fluoropolymères sont-ils réellement peu préoccupants pour la santé humaine et environnementale et distincts des autres PFAS ? » *Environmental Science & Technology* 54 (20), pp. 12820-12828 (<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03244>)

³⁵ https://chemsec.org/app/uploads/2024/06/240625_ChemSec-webinar-slides_Solar-panels.pdf

3.5.2 Extraits de l'étude "Recycling of solar panels - Comparison of scenarios for a more circular and safe economy"

(Recyclage des panneaux solaires - Comparaison de scénarios pour une économie plus circulaire et plus sûre)

Institut national de la santé publique et de l'environnement, RIVM, Pays bas, 2024 ⁽³⁶⁾

A plus de 90% sur le marché, les panneaux photovoltaïques sont de type silicium cristallin dont voici la structure (figure, page suivante) :

- Un cadre d'aluminium
- Une plaque de verre
- Une couche de protection devant et une derrière le panneau, l'EVA (éthylène-acétate de vinyle)
- La plaque arrière

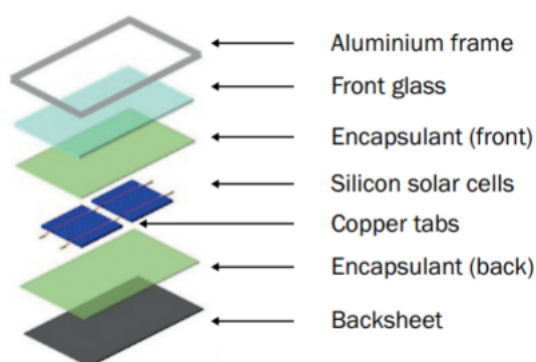


Figure 2.2 Cross section of a contemporary crystalline silicon panel (TNO, 2022).

"Diverses technologies de recyclage des panneaux solaires sont en cours de développement. Le RIVM a détaillé quatre options pour le recyclage du verre, des cellules solaires et des feuilles arrière des panneaux solaires. Les matériaux récupérés à partir des panneaux solaires peuvent être réutilisés comme matières premières pour diverses applications."

"Nous avons comparé ces quatre options à la situation actuelle (la situation de référence [aux Pays-Bas]), dans laquelle les panneaux solaires sont broyés, le verre est concassé et utilisé comme abrasif dans l'industrie métallurgique, et le reste est ensuite transformé pour diverses applications, telles que la construction de routes."

³⁶ <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2023-0442.pdf>

“La conception actuelle des panneaux solaires n'est pas encore optimisée pour le recyclage. L'utilisation **d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) comme encapsulant** rend la séparation des matériaux difficile. Le développement d'autres matériaux encapsulants est nécessaire pour faciliter le démantèlement. Il est recommandé de stimuler ce développement.”

“Certaines substances préoccupantes sont présentes dans les panneaux solaires. **Le plomb appartient au groupe des substances très préoccupantes (STP) et doit être éliminé lors du recyclage des panneaux solaires.** (...) Par rapport aux cellules solaires, elles [les concentrations de plomb] peuvent être supérieures à 0,1 %. Lors du recyclage, le plomb peut se retrouver dans le verre, la poussière ou les cendres de fond. **D'autres substances préoccupantes sont l'antimoine et les PFAS.**”

“L'antimoine n'est pas une STP, mais il est préoccupant car il est auto-classé comme « toxique connu pour la reproduction humaine (...) » et fait l'objet de réglementations existantes en matière d'exposition dans l'environnement. On peut donc en conclure que le verre doit au moins rester dans un circuit de recyclage fermé ou être remplacé.”

“Au cours du processus d'incinération, les PFAS sont dégradés en PFAS à chaîne plus courte. La dégradation thermique des polymères fluorés peut entraîner la libération de composés fluorés **toxiques** (par exemple, fluorure d'hydrogène, fluoroalcanes, etc.) . **Des gaz à effet de serre très puissants peuvent également se former lors de la combustion.** Il convient donc d'apporter un soin particulier à l'incinération des panneaux photovoltaïques et/ou des feuilles arrière photovoltaïques contenant du PVF ou du PVDF, par exemple en les traitant dans des usines d'incinération spécialisées.”

“À partir des feuilles arrière contenant du fluor, **les PFAS peuvent être émis dans l'air lors de l'incinération de la couche d'encapsulation EVA et de la feuille arrière.** Cela limite les scénarios de recyclage possibles (la pyrolyse ⁽³⁷⁾ des feuilles arrière contenant des polymères PFAS n'est pas réalisable)”.

L'EEA a mis en avant une étude qui établit que l'incinération des polymères PFAS pourrait représenter jusqu'à 14% des émissions de TFA (très petit PFAS connu pour être un produit de dégradation de nombreux autres PFAS) dans l'eau de pluie. ⁽³⁸⁾. L'Anses l'a confirmé en décembre 2025 pour la France ⁽³⁹⁾

³⁷ Pyrolyse : processus physico-chimique à haute température : une fois chauffés à haute température et dans une atmosphère privée d'oxygène, les déchets sont décomposés en gaz et en sous-produits solides.

³⁸ <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-polymers-in-focus>

³⁹

<https://www.anses.fr/fr/content/pfas-les-resultats-de-la-campagne-nationale-de-mesure-dans-leau-destinee-la-consommation>

“Recommandations

Premièrement, nous recommandons de poursuivre le développement et l'optimisation de la technologie de **délamination** ⁽⁴⁰⁾. Les fractions pures permettent de recycler le verre solaire en nouveau verre solaire, ce qui permet un recyclage en boucle fermée.

Deuxièmement, nous recommandons de poursuivre le développement des technologies de recyclage permettant de recycler les cellules solaires **en silicium de qualité solaire de haute qualité**. Cela permettra de réduire la demande en énergie, car cela évite la production énergivore de silicium vierge.

Troisièmement, nous recommandons de mettre fin au broyage des panneaux solaires complets en calcin de verre mélangé à des cellules solaires et des polymères, **et de stocker temporairement les panneaux jusqu'à ce que des techniques de délamination soient disponibles.** (...)"

Nous en concluons que non seulement 10% des panneaux sont recyclés, mais que les processus de recyclage sont loin d'être au point : les couches EVA, les PFAS et les métaux posent actuellement des problèmes insurmontables.

3.5.3 Le recyclage en France

En France, le recyclage des panneaux solaires est strictement encadré par la réglementation européenne sur les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE). Cette directive impose aux producteurs et détenteurs d'assurer la collecte et le recyclage des panneaux en fin de vie. En France, la Responsabilité Élargie des Producteurs (REP) oblige les fabricants et importateurs de panneaux photovoltaïques à financer leur collecte et leur recyclage. Ces obligations sont gérées par l'éco-organisme agréé Soren ⁽⁴¹⁾. En 2025, Soren a récolté 5.200 tonnes de panneaux usagés et **“l'objectif, lui, est d'au moins 40.000 tonnes à horizon de 2030, de 150.000 en 2040, et, « sans doute », de 300.000 en 2050”** ⁽⁴²⁾

⁴⁰ Délamination : séparation de la couche de verre par une lame chauffée ou par jet d'eau. Les autres couches sont ensuite chauffées et subissent un traitement chimique pour séparer le silicium de l'argent. Mais quid des PFAS, de la couche EVA, et des autres métaux ?

⁴¹ <https://www.soren.eco/> Les associés actuels de SOREN sont EDF Renouvelables Technologies, EDF ENR PWT, ENGIE, NEOEN, Total Energies, Urbasolar, PV CYCLE Association, le Syndicat des Energies Renouvelables, Voltec Solar et Photosol.

⁴² Les Echos, juin 2024, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/panneaux-solaires-la-filiere-du-recyclage-prise-de-vitesse-par-lexplosion-des-ventes-2099354>

1er souci : « **40 % des panneaux désinstallés en France nous échappent car ils sont donnés, revendus ou exportés via des filières de réemploi plus ou moins contrôlées, en particulier vers les pays en développement** », déplore Nicolas Defrenne, directeur général de SOREN. ⁽⁴³⁾

2ème souci : comme expliqué ci-dessous, le taux de recyclage annoncé de 94% par Soren, n'est pas correct : **c'est plutôt 85%, et de plus les PFAS et les métaux en faible quantité ne sont pas traités.**

La méthode principalement utilisée par SOREN est le **broyage puis la séparation des composants**. Une méthode alternative émergente est la délamination (décrite ci-dessus).

La figure page suivante issue de la documentation de SOREN précise les composants qui sont récupérés.

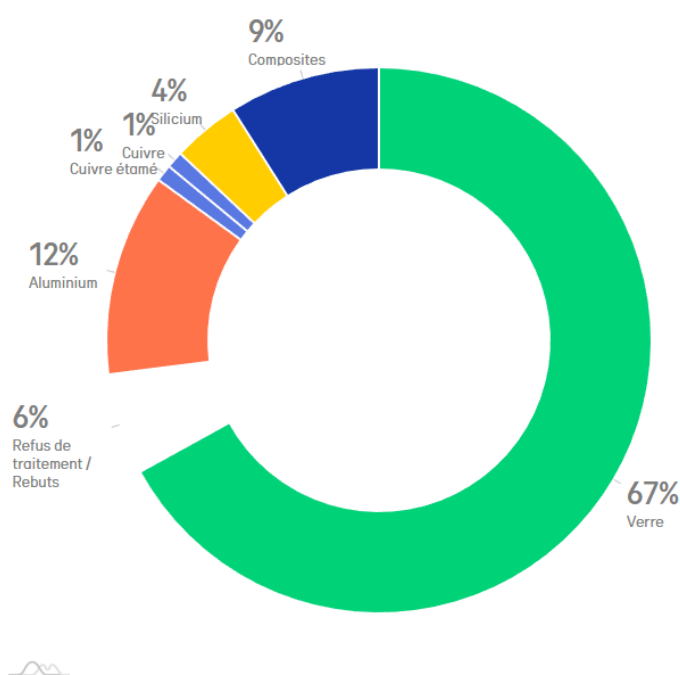
Nous pouvons constater :

- Que 6% de rebuts, c'est du déchet pur, mais quelle en est la composition ?
- Que 9%, ce sont les polymères qui deviennent des combustibles, ils sont donc brûlés !
- Quid des métaux en faible quantité : antimoine, cadmium, plomb, magnésium, étain,... ?
- Quid des PFAS et autres molécules toxiques ?

Peut-on en déduire que les procédés mis en œuvre par SOREN ne sont pas encore conformes aux recommandations de l'étude néerlandaise ci-dessus ? (cf. 3.5.2).

⁴³ PV Magazine, juin 2024

<https://www.pv-magazine.fr/2024/06/05/leco-organisme-soren-met-en-garde-contre-les-filieres-non-controlees-de-reemploi-des-panneaux/>



Fraction verre

67% de la composition moyenne pour un module photovoltaïque à base de silicium cristallin avec un cadre en aluminium



Fraction aluminium

12 % de la composition moyenne pour un module photovoltaïque à base de silicium cristallin avec un cadre en aluminium. L'aluminium est envoyé chez un affineur de métaux afin d'être fondu et réutilisé.



Fraction cuivre étamé

1 % de la composition moyenne pour un module photovoltaïque à base de silicium cristallin avec un cadre en aluminium. Il est envoyé chez un affineur de métaux afin d'être fondu et réutilisé.



Fraction cuivre

1 % de la composition moyenne pour un module photovoltaïque à base de silicium cristallin avec un cadre en aluminium. Il est envoyé chez un affineur de métaux afin d'être fondu et réutilisé.



Fraction silicium

4 % de la composition moyenne pour un module photovoltaïque à base de silicium cristallin avec un cadre en aluminium. Un traitement aval est nécessaire afin de séparer l'argent du silicium.



Fraction composite (plastiques)

9 % de la composition moyenne pour un module photovoltaïque à base de silicium cristallin avec un cadre en aluminium. Elle est composée de polymères qui sont transformés en combustible solide de récupération (CSR) afin d'être valorisée énergétiquement.

Répartition moyenne des composants recyclés d'un panneau silicium cristallin (info SOREN⁴⁴)

4. Impacts des centrales photovoltaïques sur les écosystèmes

4.1 Extraits de l'étude "Addressing chemical contamination from floating photovoltaic systems: the need for comprehensive analytical monitoring"

(Gestion de la contamination chimique des systèmes photovoltaïques flottants : la nécessité d'une surveillance analytique complète)

de Aline Reis De Carvalho, Emeline Hanozin, Griet Jacobs, Jan Jordens et Stefan Voorspoels
GOAL – Institut flamand de recherche technologique (VITO), Mol, Belgique, juin 2025 (⁴⁵)

"(...) la contamination chimique potentielle des systèmes photovoltaïques flottants (FPV) exige une étude approfondie. Des métaux comme le plomb, l'argent et le chrome peuvent être libérés

⁴⁴ <https://www.soren.eco/re-traitement-panneaux-solaires-photovoltaïques/>

⁴⁵ https://www.kmae-journal.org/articles/kmae/full_html/2025/01/kmae240105/kmae240105.html

par les structures photovoltaïques. Les matériaux de la couche arrière et du revêtement, composés de (fluoro)polymères, peuvent introduire des substances per- ou polyfluorées (PFAS) dans l'eau. De plus, les flotteurs en plastique peuvent se dégrader avec le temps, libérant ainsi des particules de plastique et des additifs polymères tels que des stabilisateurs UV et des antioxydants. **L'impact environnemental à long terme des matériaux des systèmes FPV, y compris les produits de transformation susceptibles d'apparaître au cours de leur longue durée de vie, reste encore mal connu.**

“Une revue de la littérature récente a mis en évidence plusieurs applications potentielles des PFAS dans les modules PV, notamment les revêtements autonettoyants et antireflets, les matériaux de la face avant et de la face arrière, les câbles et fils isolants, ainsi que leur utilisation comme liant. Cette revue a également souligné **un manque important d'informations concernant les types spécifiques de PFAS utilisés, leurs quantités, l'épaisseur des couches et les caractéristiques des composants dans lesquels ils sont incorporés** (⁴⁶).”

“Après leur déploiement, les systèmes FPV sont soumis à divers facteurs de stress, notamment environnementaux, tels que le rayonnement solaire incident, la température, l'humidité, les contraintes mécaniques et l'encrassement. Ces facteurs de stress accélèrent la dégradation des différents composants des modules photovoltaïques, entraînant la corrosion des éléments métalliques, la dégradation des revêtements et la photo-oxydation (⁴⁷).”

[Concernant les métaux]

“Les panneaux solaires contiennent des métaux précieux et cancérigènes, tels que le cadmium, le chrome, le plomb, l'argent, le sélénium et le tellure (Sica et al. , 2018). Le lessivage de ces métaux est réduit par l'encapsulation en laminié de verre, mais l'altération et la dégradation peuvent entraîner une détérioration de l'encapsulant et, par conséquent, la libération de métaux. (Fig. 2). Cette préoccupation a été initialement soulevée dans le contexte de la fin de vie des modules PV et de leur élimination dans les décharges (Sharma et al. , 2021 ; Sica et al. , 2018 ; Weckend et al. , 2016). Lors d'expériences de lixiviation utilisant de l'eau de pluie simulée, la lixiviation des métaux à partir de cellules photovoltaïques à base de silicium s'est avérée particulièrement importante après un an, l'argent, **le plomb et le chrome étant libérés jusqu'à 27 % de leur teneur initiale** (Nain et Kumar, 2020). **La probabilité calculée de dépassement des limites réglementaires pour les eaux de surface atteignait 92 % pour plusieurs technologies photovoltaïques testées, notamment pour l'aluminium dans les modules multi-Si et mono-Si** (Nain et Kumar, 2020). Dans une autre étude sur la lixiviation des métaux dans des conditions simulant l'élimination des déchets, il a été démontré que les taux de lixiviation augmentaient avec l'âge du module photovoltaïque. **Des métaux tels que le plomb, l'aluminium, le zinc et le cuivre atteignaient des concentrations jusqu'à trois fois supérieures dans les systèmes photovoltaïques à base de silicium**

⁴⁶ Nain et Anctil, 2025 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032125002357>

⁴⁷ Aghaei et al. , 2022 https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5124940

vieillis (soit une durée de vie de 30 ans), comparativement aux systèmes neufs (Sharma et al. , 2021). La présence d'une encapsulation en verre laminé réduisait la lixiviation du plomb, tandis qu'en son absence, la concentration de plomb dépassait les limites réglementaires pour l'eau potable dans toutes les conditions testées (10 ou 15 µg/L) (Sharma et al. , 2021). Cette constatation est très préoccupante compte tenu de ses implications sur la santé, notamment les dommages au système nerveux, au cerveau et aux reins, qui peuvent dégénérer en affections potentiellement mortelles. Wani et al. , 2015).”

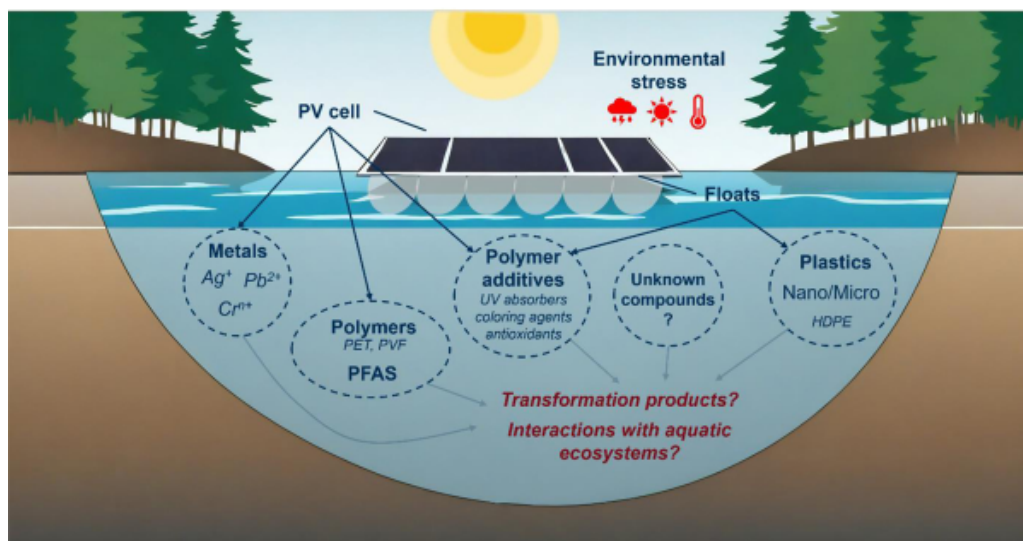


Figure 2. Représentation graphique de la contamination chimique potentielle résultant de la mise en place de panneaux photovoltaïques flottants (FPV).

[Concernant les PFAS]

(...)

“Les sous-produits de la synthèse des PFAS ne sont pas liés de manière covalente aux polymères et peuvent être libérés dans l'environnement lors de la fabrication, du traitement et de l'élimination, ainsi que pendant la durée de vie des systèmes FPV une fois installés (Fig. 2). La quantité de lixiviation des fluoropolymères dépend significativement du type de polymère, de leurs procédés de production et des traitements ultérieurs (Lohmann et al. , 2020). Par exemple, l'émission de PFAS de faible poids moléculaire, tels que les acides polyfluoroalkylcarboxyliques différant par des unités 1,1-difluoroéthène (CF_2CH_2), a été observée en aval des installations de fabrication de PVDF près de Decatur en Géorgie (Newton et al. , 2017). Une étude de dégradation à l'échelle de plusieurs décennies utilisant des microcosmes a démontré la dégradation des polymères à base de fluorotélomères par des processus abiotiques (par exemple , l'hydrolyse) et biotiques (par exemple , la dégradation microbienne), libérant divers PFAS tels que les alcools fluorotélomères (FTOH), l'acide perfluorooctanoïque (PFOA) (⁴⁸) et les acides carboxyliques perfluorés à chaîne plus courte (Lohmann et al. , 2020 ;Washington et al. , 2015).”

(...)

“Cependant, d'autres revêtements hydrophiles et hydrophobes, tels que le polydiméthylsiloxane (PDMS) et le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), sont également disponibles. Syafiq et al. , 2022 ;Zahedi et al. ,

⁴⁸ Interdit à la production, à l'import et à l'export depuis 2020, classé cancérigène en 2023

2021). Bien que ces revêtements contribuent au maintien de l'efficacité des modules, ils peuvent devenir une source de contamination environnementale au fil du temps, notamment en raison de leur dégradation sous l'effet des UV et des intempéries. À mesure que leur surface se détériore, ces revêtements perdent en efficacité et s'encrassent davantage, et peuvent également libérer des produits de dégradation et des résidus chimiques susceptibles de contaminer les cours d'eau avoisinants et de menacer les écosystèmes aquatiques (Zahedi et al. , 2021).”

“Malgré la présence de matériaux dangereux et dégradables dans les systèmes FPV, la plupart des études de dégradation disponibles se concentrent sur des composants individuels testés dans des conditions contrôlées ou exposés à des facteurs de stress uniques, ciblant souvent des contaminants spécifiques (Aghaei et al. , 2022 ; Mathijssen et al. , 2020 ; Nain et Kumar, 2020). Ces études abordent rarement le risque de contamination environnementale en conditions réelles, où de multiples facteurs de stress interagissent au fil du temps, ni n'évaluent le comportement de lixiviation de l'ensemble du système FPV et son impact sur les bassins versants. Comprendre et surveiller la lixiviation dans des conditions aussi complexes et variables exige un cadre analytique complet et adapté (...).”

Cette étude détaille ce cadre analytique.

4.2 Études analysant l'impact des PFAS polymères sur l'agriculture

Il existe des dizaines d'études qui analysent les impacts des PFAS sur la structure des sols, sur la faune microbienne, sur l'accumulation dans les plantes et la chaîne alimentaire, et sur une éventuelle diminution des rendements agricoles. Les PFAS analysés sont soit des pesticides PFAS, soit des PFAS qui s'échappent des infrastructures industrielles (usines de fabrication, centrales PV, usines de recyclage,...).

A un moment où des dizaines de milliers d'hectares sont en cours d'artificialisation par l'agrivoltaïsme en France, il me semble important de donner quelques informations sur les impacts, toujours ignorés par les industriels, les chambres d'agriculture et l'Etat.

4.2.1 Potentiel de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire

Ineris, avril 2025 (⁴⁹)

(...)

“Les PFAA (⁵⁰) peuvent présenter un potentiel de bioconcentration élevé dans les végétaux et les produits d'origine animale.

49

<https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/Ineris-229253-2808401-Plan%20PFAS%20-%20Action%20%20v2.pdf>

⁵⁰ Voir l'annexe

(...)

Les produits d'origine végétale

(...) La contamination des plantes semble principalement liée au transfert à partir du sol par le flux de transpiration. Dans les parties aériennes des végétaux où l'accumulation semble être plus importante, les PFAA à chaîne courte [GenX, ADONA] ont tendance à s'accumuler davantage que les PFAA à chaîne longue [PFOS et le PFOA].⁽⁵¹⁾

(...)

Les produits d'origine animale

(...)

Dans les organismes animaux, les PFAA se bioaccumulent surtout dans le foie, le sang et les reins. Les muscles paraissent moins contaminés que les abats.

(...)

D'après les études recensées, qui portent essentiellement sur les PFAA ayant de 4 à 14 atomes de carbone (mais le plus souvent sur un nombre plus limité de substances, voire uniquement sur le PFOS et le PFOA), l'exposition de la population générale et celles des communautés vivant près de sources de contamination apparaît principalement liée à l'alimentation (incluant l'eau de boisson)."

Cette excellente méta-analyse décrit également les impacts sur l'air, les sols, les eaux souterraines et superficielles, le lait maternel, et plus généralement sur les populations.

"D'après les connaissances actuelles sur les PFAS, l'alimentation, incluant l'eau de boisson, apparaît comme la principale voie d'exposition aux PFAA pour la majorité de la population. D'après l'EFSA, ce sont les aliments bruts qui contribueraient essentiellement à cette exposition [par rapport aux PFAS des revêtements des instruments de cuisine dont on a beaucoup parlé]" ⁽⁵²⁾

⁵¹ Pour rappel, La production des PFOA et le PFOS à chaîne longue a été progressivement remplacée par celle de PFAA à chaîne plus courte, puis depuis une dizaine d'année par des composés à chaîne courte comme le GenX) ou l'ADONA pour la fabrication des fluoropolymères. Ces produits peuvent être relâchés au cours du temps par les polymères. Voir les points 3.2, 3.3 et 3.4 ci-dessus.

⁵² "les produits de la mer ressortent dans une majorité d'études comme le vecteur principal d'exposition. (...) D'autres aliments beaucoup moins consommés, comme la viande de gibiers, les abats et les poissons d'eau douce présentent des concentrations moyennes élevées, voire très élevées."

Voies d'exposition des populations habitant près des sources de PFAS

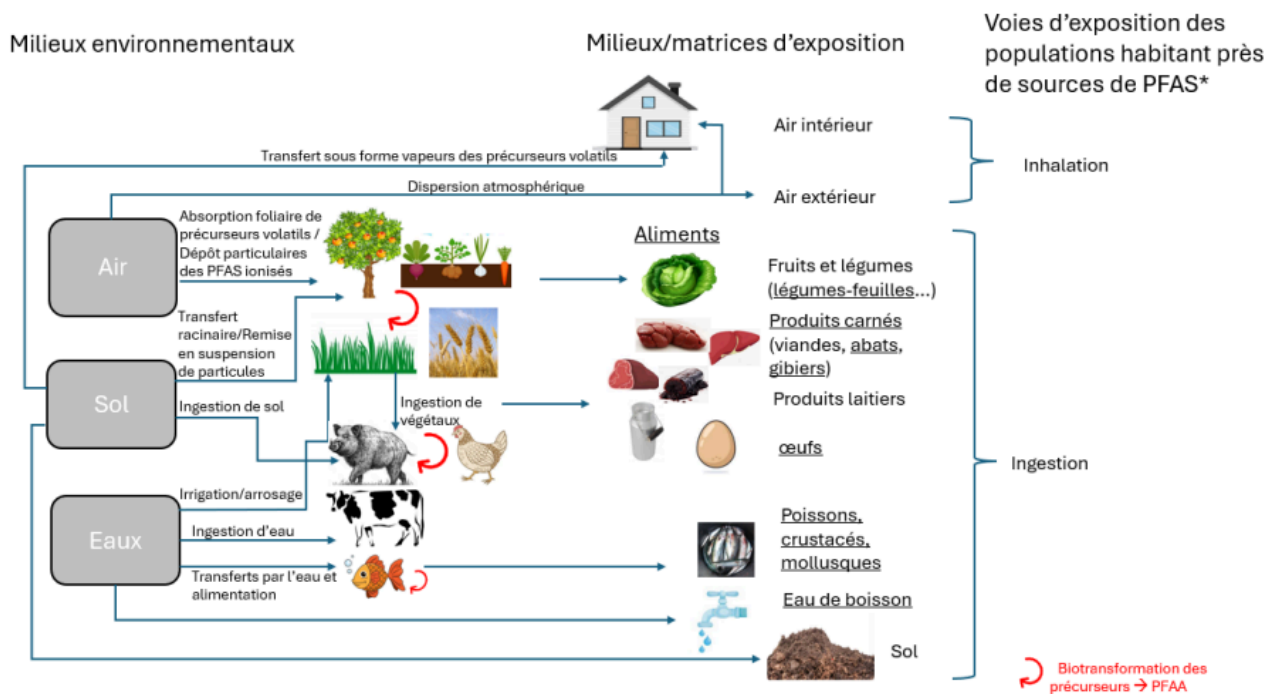


Figure 5 : Mécanismes potentiels de transferts des milieux environnementaux aux populations habitant près de sources de PFAS et voies d'exposition (les termes soulignés correspondent aux matrices alimentaires sensibles à une contamination par les PFAA)

* L'exposition par inhalation est très peu documentée. La contribution de l'exposition par contact cutané, non représentée sur cette figure, est négligeable par rapport aux autres voies dans ce contexte

4.2.2 Accumulation de substances perfluorées alkylées (PFAS) dans les plantes agricoles : une revue

Rossella Ghisi, Théofilo Vamerali, Sergio Manzetti, octobre 2018 ⁽⁵³⁾

“(…) l'absorption par les plantes varie considérablement en fonction de la longueur de la chaîne, du groupe fonctionnel, de l'espèce végétale et de l'organe. De faibles accumulations d'acide perfluorooctanoïque (PFOA) et d'acide perfluorooctanesulfonique (PFOS) ont été observées dans les pommes de terre pelées et les graines de céréales, tandis que les composés à chaîne courte peuvent s'accumuler en grande quantité dans les légumes-feuilles et les fruits. Des variations significatives de l'accumulation de PFAS dans les plantes en fonction des amendements du sol ont également été constatées, suggérant une interaction particulière avec la matière organique du sol. Nous identifions ici une série de défis que les PFAS posent au développement d'une agriculture sûre pour les générations futures.”

⁵³ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30502744/>

4.2.3 Analyse exploratoire de fruits et légumes en exploitations agricoles

ARS AURA, janvier 2026 (⁵⁴)

La Direction régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF) AURA a mené à partir de l'automne 2022 un plan de surveillance exploratoire sur des fruits et légumes prélevés en exploitations agricoles au sud de Lyon, suite aux rejets industriels de la plate-forme industrielle de Pierre-Bénite, constituée du site Arkema classé Seveso seuil haut et du site Daikin Chemical soumis à autorisation, au titre de la réglementation ICPE. Les 2 sociétés produisent des polymères fluorés et manipulent à ce titre des PFAS. L'étude porte aussi sur les analyses de l'eau, des sols, les jardins potagers et l'eau d'arrosage.

Extrait des conclusions :

“Afin de limiter autant que possible l'exposition aux PFAS des populations, la Préfecture recommande, dans un périmètre de 500 mètres autour du panache de dispersion des rejets de la plate-forme industrielle Arkema-Daikin de Oullins-Pierre-Bénite :

- *de ne pas consommer les fruits et légumes produits dans les jardins potagers des particuliers dans ce secteur*
- *de ne pas utiliser l'eau des puits privés, ni les eaux pluviales, et ce quel qu'en soit l'usage.”*

4.2.4 Les substances perfluorées alkylées affectent la croissance, la physiologie et le protéome racinaire des plants de maïs cultivés en hydroponie

Léonard Barnabas Ebinezer et al., juillet 2022 (⁵⁵)

“(…) Analyse de la combinaison de onze PFAS différents (à 100 µg L⁻¹ chacun) afin d'étudier leur bioaccumulation et leurs effets sur la croissance, la physiologie et le protéome racinaire.”

4.3 Extraits d'une contribution au Sénat australien

Dr Anne S. Smith, Rainforest Reserves Australia, décembre 2024 (⁵⁶).

NB : je signale cet article intéressant qui concerne les impacts des PFAS en Australie, mais il y a manifestement un problème avec les sources citées...

⁵⁴ <https://www.auvergne-rhone-alpes.ars.sante.fr/pfas-focus-sur-la-situation-au-sud-de-lyon>

⁵⁵ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35999737/>

⁵⁶ Anne S. Smith, docteure en sciences, est bénévole auprès de Rainforest Reserves Australia et a généreusement offert son temps et son expertise pour soumettre des propositions visant à protéger la biodiversité.
<https://www.aph.gov.au/DocumentStore.ashx?id=377ea7f1-bd90-46ff-8234-5f927c7e924f&subId=775890>
(2023 puis décembre 2024)

“Cette soumission décrit les défis environnementaux et sanitaires omniprésents posés par les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) dans les infrastructures d'énergie renouvelable, telles que les panneaux solaires, les éoliennes et les batteries.”

*“Les PFAS, souvent qualifiées de « produits chimiques éternels » en raison de leur extrême résistance à la dégradation environnementale, **représentent une crise mondiale croissante**. Ces produits chimiques, essentiels à certaines applications industrielles, sont de plus en plus reconnus pour leur rôle dans la contamination environnementale à long terme, la bioaccumulation et la bioamplification dans les chaînes alimentaires.”*

“Impact sur l'agriculture :

- *La contamination du sol par les PFAS modifie sa composition chimique, réduisant sa fertilité et le rendement des cultures. (...) [⁵⁷ et ⁵⁸] ont démontré que les PFAS **perturbent la structure du sol et la disponibilité des nutriments, ce qui a un impact négatif sur la productivité agricole**. Les agriculteurs des régions contaminées sont souvent confrontés à une baisse de leur production économique et à la perte de leurs moyens de subsistance en raison des restrictions imposées à l'utilisation des terres contaminées pour la culture.*

- *Menace pour les aquifères : les PFAS s'infiltrant dans les systèmes d'eau souterraine, contaminant les aquifères qui constituent des sources d'eau potable essentielles. Les réserves d'eau contaminées représentent un risque direct pour la santé humaine et l'environnement. Les aquifères présentant des niveaux élevés de PFAS peuvent devenir inutilisables pendant des décennies, car les technologies d'assainissement telles que la filtration au charbon actif sont coûteuses et nécessitent beaucoup de main-d'œuvre.*

- *Effets disproportionnés sur les communautés rurales : les communautés rurales qui dépendent fortement des aquifères locaux pour leur approvisionnement en eau potable et l'irrigation sont touchées de manière disproportionnée. Les populations autochtones, en particulier, sont confrontées à des risques accrus en raison de leurs liens culturels et économiques étroits avec la terre. O'Neill et al. (2019) soulignent les inégalités dans la gestion des PFAS, les communautés rurales et autochtones bénéficiant souvent d'un soutien tardif et de mesures d'assainissement inadéquates.”*

“Impact sur la flore et la faune

Les PFAS perturbent des processus écologiques essentiels, affectant à la fois les espèces végétales et animales dans les environnements terrestres et aquatiques.

⁵⁷ La source citée dans l'article est introuvable, je cite donc deux études récentes qui concernent le même sujet.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016424000379>

⁵⁸ https://sehydrogeology.com/understanding_long_term_effects_pfas_soil_health/

- *Impact sur les plantes : l'exposition aux PFAS modifie la chimie des sols, ce qui a un impact négatif sur la croissance des plantes et les cycles nutritifs. Navarro et al. (2021) ont découvert que les PFAS interfèrent avec les communautés microbiennes essentielles à la fixation de l'azote et à la décomposition des matières organiques . Cette perturbation réduit les rendements agricoles et augmente la salinité des sols, ce qui nuit encore davantage à la productivité agricole.*

- *Impact sur la faune sauvage : les PFAS s'accumulent dans les espèces aquatiques et terrestres, avec des conséquences importantes sur leur reproduction, leur croissance et leur survie. Hansen et al. (2020) ont démontré que l'exposition aux PFAS chez les amphibiens et les poissons entraînait des anomalies du développement et une diminution du succès reproductif. Les prédateurs apicaux, tels que les ours polaires et les rapaces, sont particulièrement vulnérables en raison de la bioamplification, qui augmente les concentrations de PFAS aux niveaux trophiques supérieurs.*

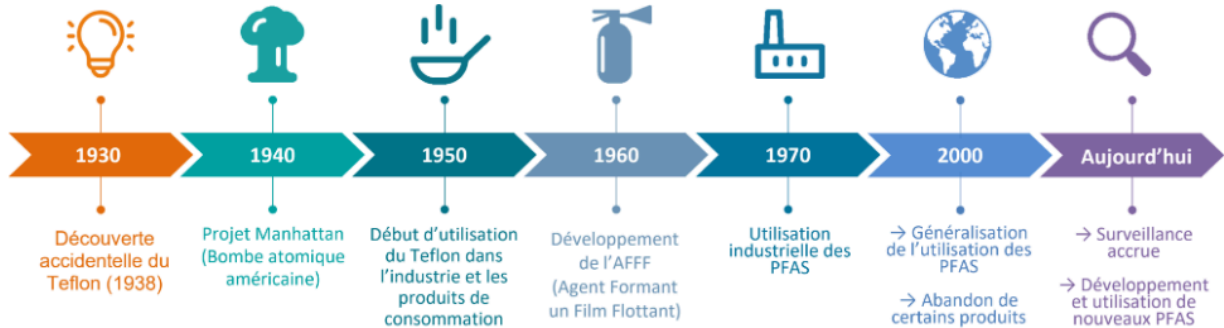
- *Conséquences au niveau de l'écosystème : la contamination par les PFAS affecte des écosystèmes entiers en perturbant les réseaux trophiques et en réduisant la biodiversité. Les espèces prédatrices connaissent un déclin en raison de la réduction de la disponibilité des proies et des difficultés de reproduction, ce qui entraîne des déséquilibres dans la dynamique des écosystèmes.”*

“Conclusions

*L'utilisation des PFAS dans les énergies renouvelables, bien que avantageuse en termes de durabilité et de performances, **entraîne des compromis inacceptables.** (...) l'élimination inappropriée des panneaux solaires (...) libèrent des composés PFAS toxiques dans l'environnement. Ces risques compromettent les objectifs de durabilité que les énergies renouvelables cherchent à atteindre.”*

5. La tentative européenne de réglementation des PFAS

L'utilisation des PFAS a plus de 75 ans, Eurofins (⁵⁹).



“Les chimistes 3M et DuPont ont sciemment caché la toxicité des PFAS, présents dans les poêles, emballages, vernis... Ils savaient pourtant dès les années 1970 que ces polluants éternels étaient très dangereux, révèle une étude.” (⁶⁰)

Le premier scandale sanitaire de grande ampleur relatif aux PFAS date de 2001 aux Etats-Unis : la firme DuPont est accusée d'avoir contaminé avec le PFOA (acide perfluorooctanoïque) plus de 70 000 personnes. Une affaire relatée en 2019 dans le film Dark Waters de Todd Haynes. Lorsque le PFOA est interdit en 2020, DuPont développe les molécules GenX qui posent autant de problèmes (Voir le ¹⁶ et aussi l'annexe). Ce n'est seulement que depuis quelques années que les autorités légifèrent, trop tard et trop lentement.

5.1 Polymères PFAS : L'Agence Européenne de l'Environnement alerte sur les dangers de ces polluants éternels

Génération futures, avril 2025 (⁶¹)

L'agence européenne de l'environnement (EEA) a publié le 29 avril 2025 une note importante concernant la dangerosité des polymères PFAS (⁶²). Ils représentent entre 24 à 40% du volume de PFAS sur le marché européen, mais leurs identités et leurs volumes sont mal connus car il n'y

⁵⁹

<https://solutionsdurables.eurofins.fr/blog/lhistoire-des-pfas/#:~:text=Des%20scandales%20sanitaires%20C3%A0%20partir,plus%20de%2070%20000%20personnes.>

⁶⁰ <https://reporterre.net/Toxicite-des-polluants-eternels-les-industriels-savaient-depuis-50-ans>

⁶¹

[https://www.generations-futures.fr/actualites/polymeres-pfas/#:~:text=L'agence%20europ%C3%A9enne%20de%20l'environnement%20\(EEA\)%20publie,de%20leur%20cycle%20de%20vie.](https://www.generations-futures.fr/actualites/polymeres-pfas/#:~:text=L'agence%20europ%C3%A9enne%20de%20l'environnement%20(EEA)%20publie,de%20leur%20cycle%20de%20vie.)

⁶² <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-polymers-in-focus>

a actuellement pas d'obligation de déclaration au niveau de la réglementation REACH ⁽⁶³⁾ concernant les polymères.

*“L’EEA met en évidence la nécessité de considérer les impacts des polymères PFAS **sur l’ensemble de leur cycle de vie.**”*

“Au cours de la phase de production de polymères PFAS, plusieurs cas d’exposition de travailleurs et de riverains aux PFAS ont été reportés. (...) L’agence alerte également sur les rejets de substances fluorées volatiles potentiellement nocives pour le climat et susceptibles de dégrader la couche d’ozone.”

“Les polymères PFAS peuvent également constituer une source importante de PFAS non polymère via l’élimination des produits usagés en décharge ou en incinération. (...) L’EEA met en avant une étude qui établit que l’incinération des polymères PFAS pourrait représenter jusqu’à 14% des émissions de TFA (...) dans l’eau de pluie.”

*“Par ailleurs, la présence de composants en polymères PFAS (matière non recyclable) rend **le tri et le recyclage des produits concernés difficiles et coûteux.**”*

“L’agence rappelle (...) la demande de restriction déposée en 2023 par le Danemark, l’Allemagne, les Pays Bas, la Norvège et la Suède pour interdire au niveau européen tous les PFAS, incluant les polymères PFAS. Cette restriction prévoit des dérogations limitées dans le temps pour certains usages essentiels sans alternative identifiée à ce jour. La proposition est actuellement évaluée par les comités scientifiques de l’ECHA et sera ensuite adressée à la Commission Européenne.”

5.2 Mais les producteurs de PFAS et les industriels de la filière font de la résistance

Face à la volonté de l’UE d’encadrer l’usage des PFAS, les industriels ont fortement réagi. Les 12 principaux producteurs mondiaux de PFAS sont 3M, Chemours, Honeywell, Solvay, Merck, BASF, Bayer, Arkema, Archroma, AGC, Daikin et Dongyue Federation ⁽⁶⁴⁾.

63

<https://echa.europa.eu/fr/regulations/reach/understanding-reach#:~:text=REACH%20est%20un%20r%C3%A8glement%20de,industrie%20chimique%20de%20l'UE.>

64

<https://chemsec.org/reports/the-top-12-pfas-producers-in-the-world-and-the-staggering-societal-costs-of-pfas-pollution/>

Ils affirment que ces composants chimiques sont indispensables dans la lutte contre le changement climatique, pour le solaire, l'éolien, les batteries et les piles à combustibles.

5.2.1 Chemours

La filiale de DuPont est on ne peut plus claire sur son site ⁽⁶⁵⁾ :

“Les fluoropolymères accélèrent la transition énergétique.

Les fluoropolymères font partie intégrante des technologies qui favorisent la durabilité. Avec l'augmentation de la consommation d'énergie, le monde aura besoin de passer à des solutions énergétiques plus propres et plus efficaces. Les fluoropolymères sont un élément essentiel de ces solutions.”

“À mesure que les réseaux intelligents se développent et que les besoins en matière de stockage d'énergie augmentent, l'utilisation des fluoropolymères dans la production et le stockage des énergies renouvelables, comme les installations solaires, les éoliennes, les systèmes de stockage d'énergie et l'hydrogène, devrait augmenter d'au moins 20 % par an au cours des dix prochaines années. Les fluoropolymères jouent un rôle essentiel dans la lutte contre les changements climatiques en favorisant une transition énergétique pour un monde plus propre et plus prospère pour tous.”

*“Les fluoropolymères sont un matériau essentiel et **irremplaçable** dans les secteurs d'utilisation des énergies renouvelables.”*

*“Il est important de noter que les fluoropolymères **ne présentent pas de risque considérable pour la santé humaine ou l'environnement** lorsqu'ils sont utilisés aux fins prévues. Leur combinaison unique de propriétés les rend **indispensables** à la fabrication des produits pour lesquels ils sont destinés. Il n'existe aucun autre matériau qui possède toutes ces propriétés uniques tout en offrant le même niveau de performance élevé.”*

5.2.2 3M

PFASProjetLab écrit sur son site ⁽⁶⁶⁾ :

“Sur son site web, 3M a déclaré que les produits à base de PFAS sont essentiels à la fabrication des voitures et des avions (...) dans les panneaux solaires, les éoliennes et les piles à combustible (...).

⁶⁵ <https://www.chemours.com/fr/pfas-advocacy/solar-wind-energy>

⁶⁶ <https://pfasproject.com/2024/01/04/jersey-shore-towns-join-suit-over-toxic-chemicals-in-drinking-water/>

L'entreprise a annoncé qu'elle cesserait la production de PFAS d'ici fin 2025 et qu'elle privilégierait des alternatives dans ses produits lorsque celles-ci seraient disponibles. Elle a toutefois précisé qu'un usage limité et continu de PFAS pourrait s'avérer nécessaire dans certaines circonstances.

(...)

Sur son site web, 3M indique que les ventes nettes de PFAS sont évaluées à environ 1,3 milliard de dollars, soit 4 % de son chiffre d'affaires annuel.”

5.2.3 EVOLIS sur le projet de restriction des PFAS dans le cadre du règlement REACH

Extrait de la position d'Evolis concernant le projet de restriction des secteurs qui utilisent des composés perfluoroalkylés et polyfluoroalkylés ⁽⁶⁷⁾ :

“Les fluoropolymères ne sont pas considérés comme des produits chimiques à « chaîne courte » ou à « chaîne longue », mais plutôt comme des polymères à faible risque, ce qui signifie qu'ils sont stables dans l'environnement et ne se dégradent pas. Ils ne se dissolvent pas et ne contaminent pas l'eau, ne peuvent pas pénétrer ou s'accumuler dans la circulation sanguine d'une personne et ne présentent pas de risque considérable pour la santé humaine ou l'environnement. Ils ne sont ni biodisponibles, ni toxiques, ni même mobiles. Ils répondent donc aux critères de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) pour les « polymères peu préoccupants », car ils ne présentent pas de problèmes de toxicité importants et ne peuvent pas se dégrader en d'autres PFAS.

Ces groupes de « PFAS » doivent être exclus de l'interdiction. Une approche tenant compte des profils de risque spécifiques nous apparaît la plus proportionnée et réaliste.

La restriction proposée par l'ECHA ne fait pas de réelle distinction entre les fluoropolymères (...), les fluoroélastomères (...) et les autres PFAS. Bien que les fluoropolymères rentrent dans la catégorie des PFAS, des études scientifiques démontrent qu'ils répondent, également, aux critères de l'OCDE sur les polymères dits peu préoccupants ou « PLC » (Polymer of Low Concern). **Par conséquent, les fluoropolymères ne devraient pas entrer dans cette restriction sur les PFAS.”**

“Seulement grâce à l'utilisation de fluoropolymères, nos industriels peuvent répondre aux exigences techniques assurant, en même temps, une haute fiabilité mécanique, une adéquate résistance thermique et un niveau d'étanchéité sûr. Cette combinaison de caractéristiques rend impossible, à ce jour, leur substitution par d'autres alternatives (...).”

“N'ayant pas de matériaux de remplacement disponibles, il faudra un nombre imprévisible d'années pour la recherche et le développement de tels matériaux. Aucune étude n'existe car, jusqu'à présent, ces substances n'étaient pas considérées comme dangereuses et leurs avantages prouvés en ce qui concerne fiabilité et sécurité. La recherche d'alternatives est un processus risqué sans garantie, coûteux et susceptible de nécessiter de nombreuses années. Ces études peuvent durer jusqu'à 10 ans, voire plus.

⁶⁷ “EVOLIS représente les fabricants de machines et de biens d'équipement qui contribuent activement à la compétitivité et à l'efficacité de l'industrie française par la modernisation, la digitalisation et la décarbonation de la production dans les principales filières industrielles”. <https://www.evolis.org/fr/lorganisation#object-10003>

Une estimation plus précise n'est pas possible à ce stade, mais l'expérience passée dans la recherche s'est avérée très longue et souvent infructueuse. Et enfin, après qu'une alternative appropriée soit disponible, la validation dans le processus de normalisation et son implémentation dans l'industrie peuvent prendre plusieurs années. "

Conséquence

Page Wikipedia sur les PFAS ⁽⁶⁸⁾ :

"Malgré les efforts de cinq pays européens (Allemagne, Danemark, Norvège, Pays-Bas, Suède) pour développer une "restriction universelle" des PFAS dans le cadre du règlement REACH, l'industrie a mené une campagne de lobbying massive pour retarder et affaiblir ce projet."

"Les lobbyistes ont inondé l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) de plus de 5 600 commentaires, submergeant les fonctionnaires. Ils ont aussi ciblé les décideurs politiques, notamment en Allemagne où le gouvernement semble avoir cédé aux pressions de l'industrie chimique."

Stéphane Horel dans Le Monde ⁽⁶⁹⁾ :

"Malgré les efforts des agences pour maintenir le projet de restriction, l'ECHA a finalement évoqué des "options alternatives" qui permettraient de préserver la production de certaines PFAS, notamment les fluoropolymères, sous prétexte d'éviter des "conséquences socio-économiques disproportionnées" .

5.3 Loi PFAS de février 2025 et décret d'application de janvier 2026 : des engagements a minima

Après une forte mobilisation citoyenne et associative, la loi PFAS n°2025-188 a été définitivement adoptée en février 2025 et prévoit notamment :

- L'adoption d'une trajectoire de réduction vers le zéro PFAS dans les rejets aqueux industriels ;
- L'intégration des PFAS dans le contrôle sanitaire de l'eau potable au 1er janvier 2026 ;
- L'interdiction de la fabrication, importation, exportation et mise sur le marché de produits de fart, cosmétiques, textiles, chaussures et leurs imperméabilisants contenant des PFAS ;
- L'instauration d'une redevance concernant les industriels qui émettent des PFAS dans leurs rejets aqueux (100 € / 100g).

⁶⁸ <https://fr.wikipedia.org/wiki/PFAS>

⁶⁹ Stéphane Horel, « PFAS : comment l'industrie chimique fait dérailler l'interdiction des polluants éternels », *Le Monde*, 15 janvier 2025

Hélas, cette loi ne va pas assez loin.

Génération futures, janvier 2026 ⁽⁷⁰⁾ :

“Premièrement, il faut noter que les PFAS polymères n’ont malheureusement pas été pris en compte dans ce travail tout comme les pesticides, les biocides et les médicaments appartenant à la famille des PFAS. Pourtant, plus de 2300 tonnes de pesticides PFAS ont été achetés en 2023 et vraisemblablement disséminés dans l’environnement et Génération Futures avait déjà alerté les pouvoirs publics ⁽⁷¹⁾ à ce sujet en 2023.

Deuxièmement, le travail de l’ANSES met en évidence, sans surprise, que les données disponibles sont plus nombreuses quand une réglementation est en place : c’est notamment le cas pour les milieux aquatiques et l’alimentation. Dans les compartiments où il n’y a pas de surveillance obligatoire, les données sont parcellaires, ce qui est notamment le cas pour l’air et les poussières.”

En outre, les récents décrets d’applications ne sont pas à la hauteur :

- la liste des PFAS qui seront contrôlés dans l’eau sanitaire est limitée et le TFA ⁽⁷²⁾ ne sera contrôlé qu’en 2027.
- le décret concernant la redevance des pollueurs n’est toujours pas paru
- le décret concernant les interdictions de production, importation et exportation est arrivé très tardivement avant Noël 2025, de sorte que les industriels pourront écouler tout leur stock potentiellement toxique de 2025.

“Génération Futures s’inquiète de constater que le gouvernement agit a minima sur la gestion et la prévention des pollutions aux PFAS. Malgré un plan interministériel publié en avril 2024 et la promulgation en février 2025 d’une loi ambitieuse soutenue par l’opinion, la mise en œuvre est extrêmement poussive et loin des enjeux de santé publique”. ⁽⁶⁷⁾

⁷⁰ <https://www.generations-futures.fr/actualites/decrets-dec25/>

⁷¹ <https://www.generations-futures.fr/actualites/pesticides-pfas-revelation/>

⁷² “**L’acide trifluoroacétique** aussi appelé TFA est un tout petit PFAS, extrêmement stable et donc particulièrement persistant dans l’environnement. Comme il est **très mobile et très soluble dans l’eau, il se retrouve dans tous les milieux**. En outre, les procédés habituels de traitement de l’eau potable ne peuvent pas éliminer le TFA.” <https://www.generations-futures.fr/fag/tfa/>

6. Pourtant, non, les PFAS ne sont pas nécessaires pour stopper le changement climatique

Extraits du site du Secrétariat international des produits chimiques Chemsec (⁷³) :

“L’industrie se mobilise pleinement sur ce sujet – et comment lui en vouloir ? Le changement climatique est l’un des enjeux les plus urgents de notre époque et une priorité absolue pour l’UE. Jouer la carte du changement climatique semble une stratégie efficace pour inciter les décideurs politiques à reconsidérer l’interdiction des PFAS.

Cette déclaration de l’[American Chemistry Council](#), une association professionnelle de l’industrie chimique américaine, n’est qu’un exemple parmi tant d’autres de cet argument :

« Les substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS) sont utilisées dans de nombreuses technologies qui contribueront à notre transition vers un avenir énergétique propre, comme les panneaux solaires, les éoliennes, l’hydrogène vert et les batteries pour véhicules électriques et stockage d’énergie. Elles sont essentielles à la réalisation des objectifs en matière d’énergie propre. »

Examinons maintenant une à une les technologies mentionnées ci-dessus, et ajoutons-en une autre pour le plaisir. Dans chacun de ces cas, nous constaterons que de nombreuses alternatives commerciales aux PFAS sont déjà disponibles ou en cours de développement.”

(...)

Panneaux solaires

Les PFAS, sous forme de fluoropolymères, sont actuellement utilisés dans les films protecteurs avant et arrière des panneaux solaires contre les intempéries. Cependant, lorsque ces panneaux arrivent en fin de vie et sont incinérés ou mis en décharge, ces substances PFAS se retrouvent dans l’environnement , sans compter celles utilisées et émises lors de la fabrication même des fluoropolymères.”

Quelques firmes produisent des panneaux sans PFAS, comme Endurance Solar (Etats-Unis, couches arrière), Crown Solar Energy (Pakistan), Solarge (Pays-Bas), FuturaSun (Italie), ou encore BioViet (Vietnam).

Il semble que la Chine ne s’est pas encore engagée dans l’industrie des panneaux sans PFAS (⁷⁴).

⁷³ “Chemsec - le Secrétariat international des produits chimiques (Suède) – est une organisation indépendante à but non lucratif qui milite pour le remplacement des produits chimiques toxiques par des alternatives plus sûres.”
<https://chemsec.org/reports/busted-five-industry-myths-about-the-pfas-ban/>

⁷⁴ <https://chemsec.org/is-china-about-to-declare-war-on-pfas/>

“Pour les panneaux arrière, les alternatives au PFAS occupent 15 - 20 % du marché.” (75)

“Batteries

Les PFAS peuvent remplir plusieurs fonctions dans les batteries lithium-ion, mais RECHARGE, l'association professionnelle européenne du secteur, a elle-même reconnu l'existence d'alternatives (76). En effet, des entreprises produisent déjà des batteries lithium-ion sans PFAS, notamment Leclanché et GRST, tandis que Nanoramic fabrique des matériaux d'électrode.

L'argument principal est plutôt que l'industrie a besoin de plus de temps pour s'adapter, ce que le dossier sur les PFAS semble confirmer, du moins en partie, en concluant qu'il est incertain que les PFAS puissent être rapidement substitués dans certaines applications de batteries. Compte tenu du manque d'alternatives commercialisées pour ces usages, il est probablement nécessaire de reporter l'interdiction pendant une période déterminée. Mais il n'y a certainement pas lieu d'accorder une dérogation générale aux batteries lithium-ion.”

Conclusion

Nos sociétés et les écosystèmes sont envahis de produits industriels toxiques : pesticides, PFAS, plastiques, métaux, particules fines, résidus médicamenteux. Nous fonçons tête baissée vers de nouveaux scandales sanitaires.

Il est inacceptable que les technologies susceptibles de lutter contre le changement climatique exploitent sans retenue et sans contrôle, les pires substances chimiques PFAS, toxiques pour l'environnement et la santé humaine.

Le premier scandale est celui-là : les industriels créent et utilisent depuis plus de 70 ans des milliers de substances chimiques de type PFAS, tout en connaissant parfaitement les périls encourus pour la santé des humains et des écosystèmes. De façon tout à fait naturelle et sans aucune remise en question, ils ont exploité ces mêmes molécules toxiques dans les technologies prétendues vertes, et notamment dans les 1,5 milliards de panneaux produits en 2025.

Le deuxième scandale réside dans l'absence presque totale de recyclage des panneaux, car seulement 10% de ces artefacts sont recyclés, les autres sont enfouis ou incinérés. Et lorsque le recyclage est organisé, il n'est pas propre et il n'est pas complet : en France, seuls 60% des panneaux sont collectés et 15% de ces panneaux sont brûlés ou mis en déchetterie. Et bien sûr, le recyclage est lui-même énergivore.

⁷⁵ https://chemsec.org/app/uploads/2024/06/240625_ChemSec-webinar-slides_Solar-panels.pdf

⁷⁶ <https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2023/09/FINAL-SECOND-SUBMISSION-.pdf>

Les premières vagues importantes de panneaux à recycler vont arriver au début des années 2030, et manifestement l'industrie du recyclage n'est pas prête.

La Chine n'est pas encore engagée dans la production de panneaux sans PFAS, ce qui rend impossible tout recyclage propre. L'Europe et les Etats-Unis tentent bien de réglementer la diffusion des PFAS, quelques entreprises européennes et américaines produisent des PV sans PFAS, mais cette industrie représente moins de 5% de la production mondiale.

Il est utile de rappeler ici que plus de 70% des mines de quartz (pour le silicium) sont situées en Chine, et environ 80 % des panneaux photovoltaïques sont fabriqués en Chine, avec un mix énergétique avant tout basé sur les énergies fossiles (la part du charbon en 2025 est encore de 55,5 %).

La France ne produit que 3% du silicium mondial, l'Europe produit moins de 2% des panneaux photovoltaïques (11 GW en 2025 alors qu'on a installé 600 GW au niveau mondial), **donc l'Europe ne pèse pas malgré quelques velléités de modifier le cours des choses.**

Les PFAS polymères exploités dans les panneaux solaires ne font pas l'objet de contrôle ni de restrictions, car réputés à tort comme ayant peu d'impacts. Non seulement, ils sont peu étudiés, mais il est avéré qu'ils se décomposent sur la durée de vie des panneaux (25 à 35 ans), sous l'influence de l'eau, du vent, des contraintes climatiques, en molécules plus petites dont les impacts sur les écosystèmes sont avérés. **C'est le troisième scandale de cette industrie.**

La pollution des sols, de l'eau, de l'air est avérée pendant toute la durée du cycle de vie : fabrication des polymères, fabrication des panneaux, exploitation des centrales, élimination en fin de vie.

Sous la puissante influence des lobbies industriels, la récente réglementation européenne et française n'est que partielle et ne concerne pas les PFAS polymères (ni d'ailleurs les pesticides). Les industriels ont donc encore un boulevard devant eux pour de nombreuses années.

Sélection de références

Le site de Générations futures : <https://www.generations-futures.fr/>

Le site de l'Agence Européenne de l'environnement : <https://www.eea.europa.eu/fr>

Le site de Chemsec : <https://chemsec.org/>

Le site de Chemtrust : <https://chemtrust.org/>

Le rapport de l'INERIS :

<https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/Ineris-229253-2808401-Plan%20PFAS%20-%20Action%20%20v2.pdf>

Le rapport du CNRS : https://miti.cnrs.fr/wp-content/uploads/2024/12/Synthese_PFas_web.pdf

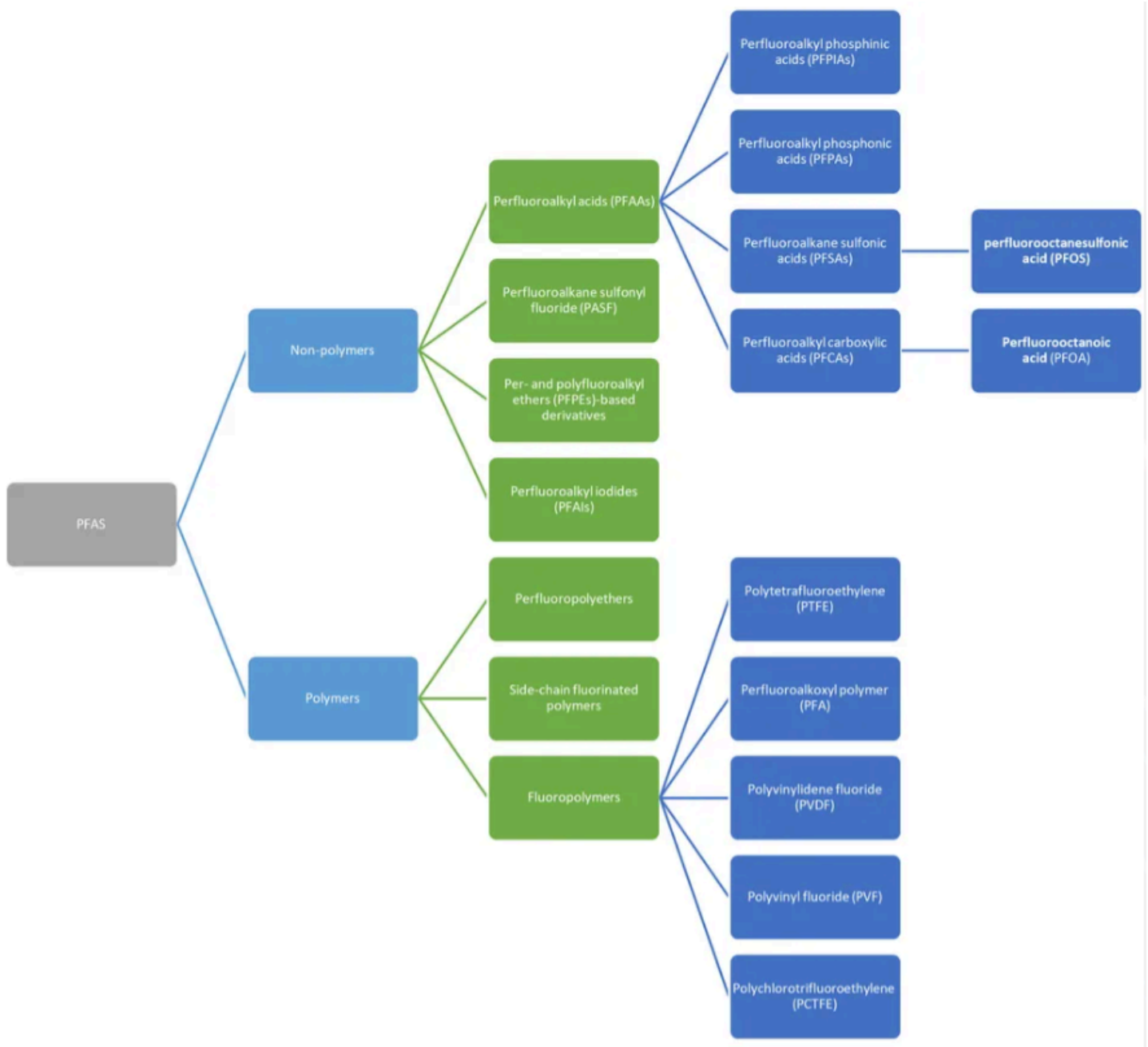
Le rapport de l'Anses : <https://www.anses.fr/system/files/ERCA2022-SA-0198-RA.pdf>

Le rapport du député Isaac-Sibille :

<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-43441-rapport-cyrille-isaac-sibille-pfas-mission.pdf>

Annexe

Classification simplifiée des PFAS (77)



⁷⁷ <https://getenviropass.com/fr/les-pfas-dans-lelectronique/>

PFAS molecules	Applications
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Electronic components like cables and computer parts</u> • Non-stick cookware such as Teflon • Water-resistant clothing • <u>Stain-resistant and grease-resistant coatings</u> • Fire-fighting foam
Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)	<ul style="list-style-type: none"> • Same as above • Photographic film
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Electrical insulation</u> • Medical Devices • Aerospace • Non-stick cookware • Seals and gaskets • Textile coatings
Perfluorobutane sulfonic acid (PFBS)	<ul style="list-style-type: none"> • Surfactant • Emulsifier • Dispersive

Les panneaux photovoltaïques sont susceptibles de contenir des PFOA, des PFOS et des PTFE.

Les PFOA sont interdits de fabrication, importation et exportation en Europe depuis 2020, mais DuPont (Chemours) les a remplacés par des GenX.

Les produits chimiques GenX sont un sous-groupe des PFAS développés pour remplacer certains composés PFAS plus anciens, mais ils partagent des propriétés chimiques similaires. Selon le ministère américain de la Santé et des Services sociaux, ces produits chimiques sont également appelés « produits chimiques éternels » car ils ne se décomposent pas facilement dans l'environnement et peuvent s'accumuler dans le sol, l'eau et les organismes vivants. Des études sanitaires ont établi un lien entre les produits chimiques GenX et divers problèmes de santé, notamment

- Augmentation du taux de cholestérol
- Modifications des enzymes hépatiques
- Réduction de la réponse immunitaire aux vaccins
- Risque accru d'hypertension artérielle ou de prééclampsie chez les femmes enceintes
- Risque accru de cancer du rein ou des testicules

Pour plus d'informations, notamment les dernières recherches et recommandations sur les effets des PFAS et des produits chimiques GenX sur la santé, consultez le site web du ministère américain de la Santé et des Services sociaux : <https://www.atsdr.cdc.gov/pfas/>."

Voir aussi :

<https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/GenX-Toxicity-Assessment-factsheet-March-2023-update.pdf>