

## PFAS et fluor :

# comment un élément clé de l'industrie devient un enjeu sociétal

09 avril 2026



Frederic LEROUX  
frederic.leroux@cnrs-dir.fr

## Introduction

# Le fluor, un élément à part

26 juin 1886 : Henri Moissan isola F<sub>2</sub>

Prix Nobel en 1906

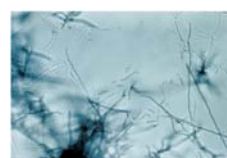


1 H Hydrogène																	2 He Hélium																												
3 Li Lithium	4 Be Béryllium																	10 Ne Néon																											
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium																	18 Ar Argon																											
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton																												
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Paladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon																												
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	57 La Lanthanum	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungstène	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon																												
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessine	118 Og Oganesson																												
<table border="1"> <tr> <td>58 Ce Cérium</td> <td>59 Pr Praseodyme</td> <td>60 Nd Néodyme</td> <td>61 Pm Prométhée</td> <td>62 Sm Samarium</td> <td>63 Eu Europium</td> <td>64 Gd Gadolinium</td> <td>65 Tb Terbium</td> <td>66 Dy Dysprosium</td> <td>67 Ho Holmium</td> <td>68 Er Erbium</td> <td>69 Tm Thulium</td> <td>70 Yb Ytterbium</td> <td>71 Lu Lutétium</td> </tr> <tr> <td>90 Th Thorium</td> <td>91 Pa Protactinium</td> <td>92 U Uranium</td> <td>93 Np Neptunium</td> <td>94 Pu Plutonium</td> <td>95 Am Americium</td> <td>96 Cm Curium</td> <td>97 Bk Berkélium</td> <td>98 Cf Californium</td> <td>99 Es Einsteinium</td> <td>100 Fm Fermium</td> <td>101 Md Mendelevium</td> <td>102 No Nobelium</td> <td>103 Lr Lawrencium</td> </tr> </table>																		58 Ce Cérium	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhée	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutétium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium
58 Ce Cérium	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhée	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutétium																																
90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium																																

## Propriétés exceptionnelles du fluor



- Deuxième plus petit atome après l'hydrogène
- Élément le plus électronégatif ( $\chi = 4$ )
- Très forte liaison avec le carbone (C-F)
- 13<sup>ème</sup> élément le plus abondant dans l'écorce terrestre
- Largement répandu dans la biosphère (flore et faune)
- Seulement 12 composés naturels du fluor, contre >3500 composés halogénés



- Grande stabilité chimique et thermique
- Lipophile
- Superhydrophobie
- Lipophobie

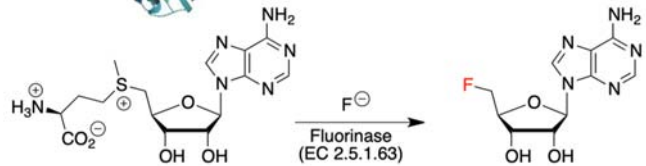
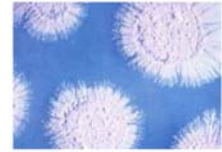
- Propriétés mécaniques, optiques et électriques uniques
- Ininflammabilité
- Propriétés interfaciales
- Films auto-assemblés robustes

# Cycle biogéochimique



Les volcans émettent 6 millions de tonnes de HF (acide fluorhydrique) par an.

Isolée de *Streptomyces cattleya*



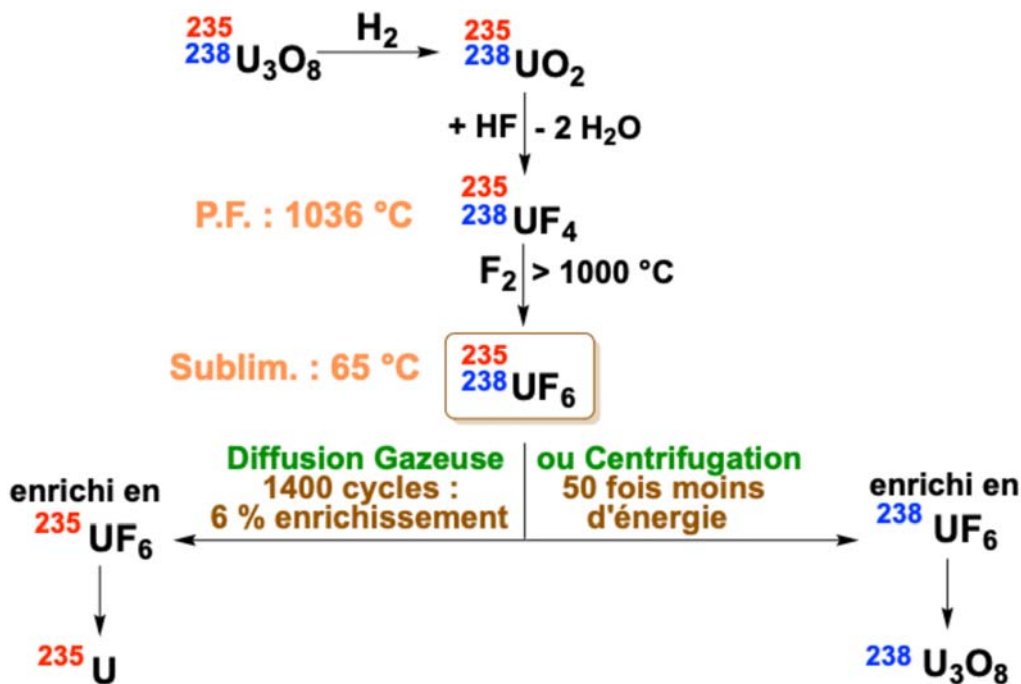
K. K. J. Chan, D. O'Hagan, *Methods Enzymol.* **2012**, 516, 219–235

## Le fluor : un élément aux multiples facettes

# Le fluor : un élément clé aux défis sociétaux

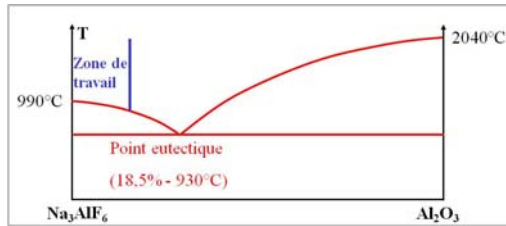
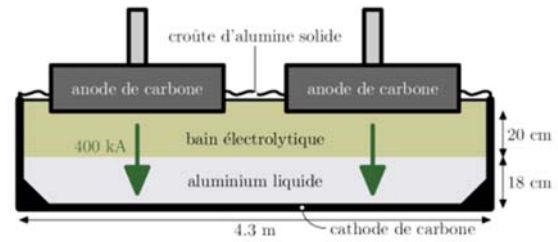


# Énergie nucléaire : Enrichissement de l'uranium



# Métallurgie : Production d'aluminium

Le fluor est utilisé sous forme de cryolithe ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) pour abaisser le point de fusion de l'alumine dans le procédé Hall-Héroult, permettant la production d'aluminium métallique.



Trimet electrolysis plant, Saint-Jean de Maurienne, Savoie



Qatium electrolysis plant, Qatar

	1900	1940	2000	2015
Production mondiale	8 000 t	500 000 t	20 Mt	43 Mt

60 % de l'aluminium produit en France est recyclé.

# Santé

**Fluoruration de l'eau et des dentifrices :** Le fluorure de sodium ( $\text{NaF}$ ) ou d'autres composés fluorés sont ajoutés à l'eau potable et aux produits dentaires pour prévenir les caries.

Apport conseillé en mg/jour		Taux de fluorures dans les eaux minérales	
Enfants de 0 à 6 mois	0,1	Quézac	2,2
Enfants de 6 mois à 1 an	0,2	Badoit	1,2
Enfants de 1 à 3 ans	0,5	Saint-Yorre	1
Enfants de 4 à 8 ans	1	Vichy Célestins	0,5
Enfants de 9 à 13 ans	1,5	San Pellegrino	0,5
Adolescents de 14 à 18 ans	2	Wattwiller	< 0,5
Femmes	2	Hépar	0,4
Hommes	2,5	Contrex	0,36
Femmes enceintes ou allaitantes	2	Perrier	< 0,2
		Vittel	0,16
		Evian	0,12

Erteilt auf Grund des Ersten Überleitungsgesetzes vom 8. Juli 1949

(WIGB. S. 173)

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

AUSGEGEBEN AM  
15. JANUAR 1959



DEUTSCHES PATENTAMT

PATENTSCHRIFT

Nr. 971 375

KLASSE 30h GRUPPE 1310

INTERNAT. KLASSE A 61k

K 2227 IV a / 30h

Dr. med. Oskar Eichler, Heidelberg,  
Dr. phil. habil. Kurt Kraft, Heidelberg,  
und Dr. phil. Dr.-Ing. e. h. Philipp Zutavern, Heidelberg  
sind als Erfinder genannt worden.

Knoll A.-G., Chemische Fabriken, Ludwigshafen/Rhein

Verfahren zur Herstellung einer alkalischen, seifenfreien,  
reagibles Fluor neben Calciumcarbonat enthaltenden Zahnpasta

Patentiert im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland vom 26. August 1951 an  
Patentanmeldung bekanntgemacht am 5. März 1953  
Patenterteilung bekanntgemacht am 31. Dezember 1958



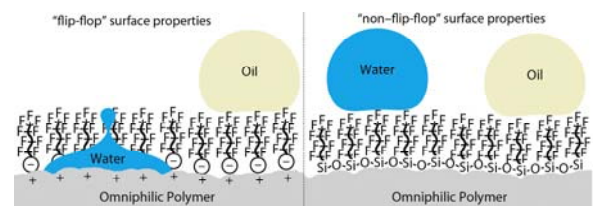
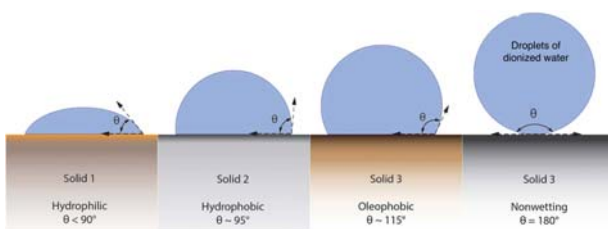
# Industrie chimique

**Fluoropolymères** : Le polytétrafluoroéthylène (PTFE), connu sous le nom de Teflon®, est utilisé pour ses propriétés antiadhésives, sa résistance à la chaleur et aux produits chimiques.



1. **Protection et imperméabilisation** (Textiles, Bâtiment),
2. **Secteur médical et pharmaceutique** (Dispositifs médicaux : Cathéters, implants),
3. **Électronique et énergie** (Isolation électrique),
4. **Industrie chimique et pétrochimique** (Tuyaux et joints, Stockage),
5. **Transport et aérospatial** (Revêtements aéronautiques, Automobile),
6. **Applications optiques et antifogging** (Verres et écrans),
7. **Environnements extrêmes** (Équipements pompiers, militaires),
8. **Exploration spatiale** (Composants résistants aux radiations et aux températures extrêmes).

# Traitement des surfaces : Hydrophobie / Oléophobie



## Composés fluorés

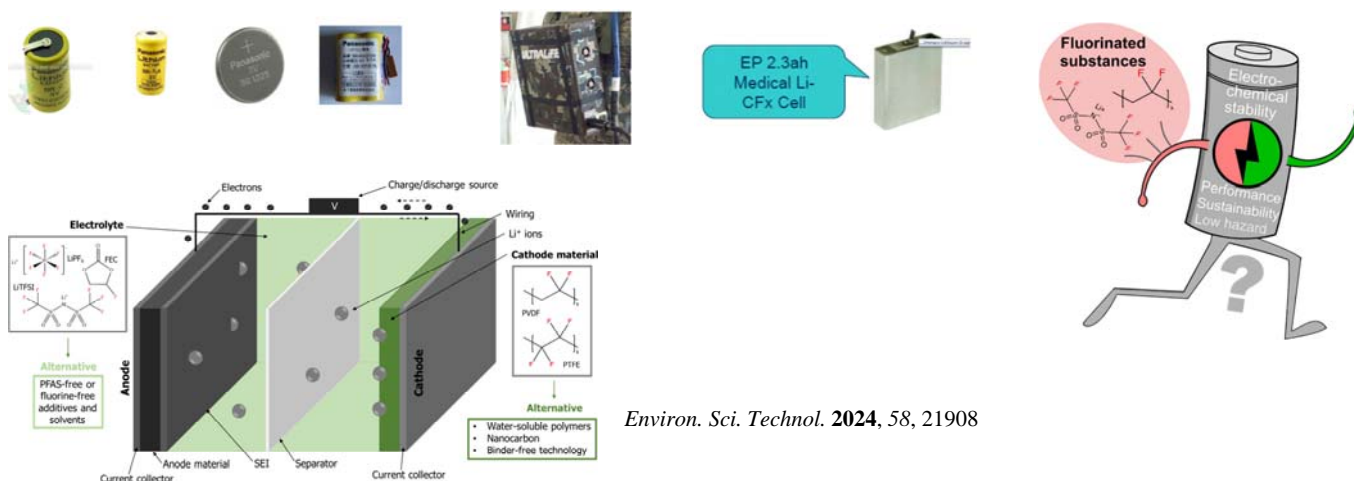
→ **Les revêtements hydrophobes/oléophobes :**

- Nature lisse et résistante à la graisse, « auto-nettoyante »
- Réduisent le besoin de nettoyer la surface
- Suffisamment transparents sur le plan optique
- Résistants
- Évacuent l'eau
- Antibuée

**Lentilles de contact RGP (Rigid Gas Permeable)**  
**Verres optiques**



# Batteries



*Environ. Sci. Technol.* **2024**, *58*, 21908

## Batteries

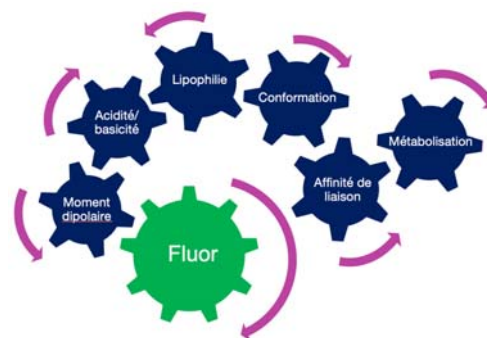
→ Fluoropolymères

- au niveau des électrodes (liants) : PVDF (polyfluorure de vinylidène) et PTFE (polytétrafluoroéthylène),
- au niveau des cellules/batteries : revêtements de séparateurs, additifs dans l'électrolyte, joints d'étanchéité, tuyaux, vannes et systèmes d'étanchéité (par exemple FEP et PTFE).

13

# Médicaments et produits phytosanitaires

- Le fluor peut être très utile dans les composés pharmaceutiques et agrochimiques.
- Un seul ou quelques atomes dans une molécule organique peuvent modifier radicalement sa nature **chimique et biologique**, y compris sa **stabilité**, sa **lipophilie** et sa **biodisponibilité**.
- On estime que **50% des produits agrochimiques** et **20% des produits pharmaceutiques** commercialisés contiennent du fluor, car la substitution du fluor confère des propriétés pharmacologiques spécifiques qui sont nécessaires pour obtenir une **efficacité contre les maladies**.
- **“Smuggling fluorine into a lead structure enhances the probability of landing a hit almost 10-fold” \***



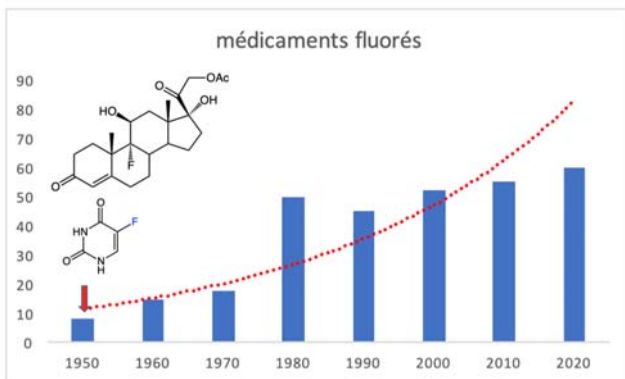
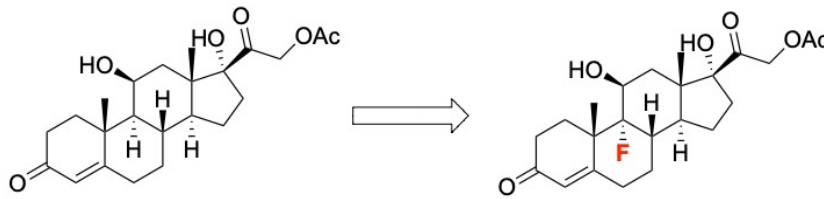
**L'introduction du fluor n'est pas sans raison.  
Cela implique généralement un coût supplémentaire.**

cited from C&E **2006**, *84*, (23), 15-24

14

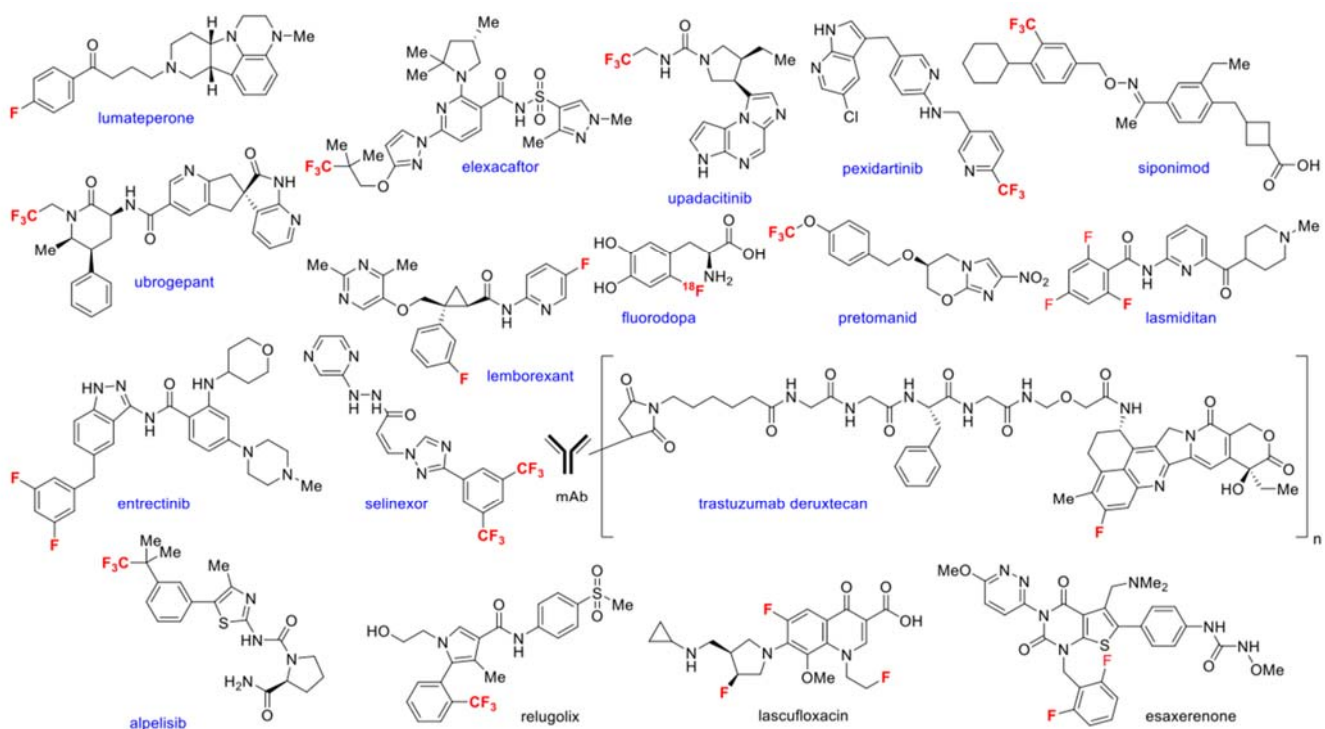
# Un des premiers exemples en chimie thérapeutique

=> 1954 Fluorocortisone l'acétate de la 9-fluoro-dihydrocortisone comme anti-inflammatoire **11 fois plus actif !!**



15

# Composés fluorés utilisés dans les médicaments



16

# Imagerie médicale : PET

Most common  $\beta^-$  emitting isotopes

$^{18}\text{F}$	$^{15}\text{O}$	$^{11}\text{C}$	$^{13}\text{N}$
T: 109 min.	2 min.	20 min.	10 min.

Radioactive decay

Fast syntheses ( $< 3\text{ T}$ )

$^{18}\text{F} \rightarrow ^{18}\text{O} + \beta^- + \bar{\nu}$

$^{18}\text{F}$	$^{15}\text{O}$	$^{11}\text{C}$	$^{13}\text{N}$
5 h	5 min.	50 min.	25 min.



$^{18}_8\text{O} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^{18}_9\text{F} + ^1_0\text{n}$

$\omega_c = \frac{|q|B}{m}$  (pulsation cyclotron)

$R_n = \frac{mv_n}{qB}$

$f = \frac{|q|B}{\pi m}$

$v_n = \sqrt{\frac{2|q|U}{m} \left( n + \frac{1}{2} \right)}$

$^{18}\text{F}$ FDG

axial image through one of the bony vertebral metastases

Multiple body metastatic deposits

Images : Thierry Billard, Lyon.

# Les PFAS : l'autre visage du fluor



# Définition des PFAS

**PFAS** : Substances per- et polyfluoroalkylées

<https://echa.europa.eu/fr/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>

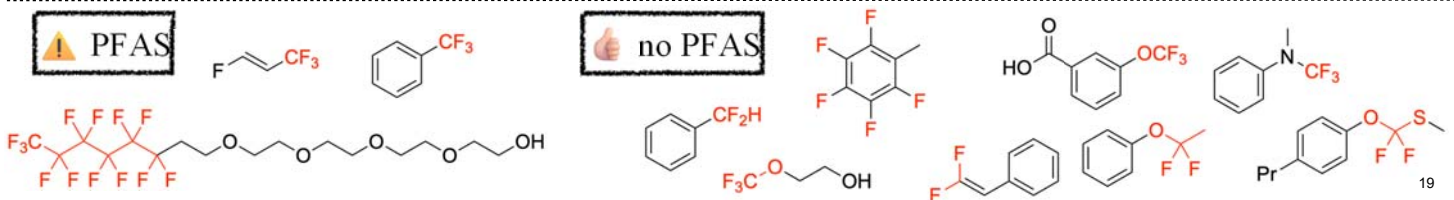
## Définition retenue par ECHA :

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) defined as: **Any substance that contains at least one fully fluorinated methyl (CF<sub>3</sub>-) or methylene (-CF<sub>2</sub>-) carbon atom (without any H/Cl/Br/I attached to it).**

A substance that only contains the **following structural elements is excluded** from the scope of the proposed restriction:



where X = -OR or -NRR' and X' = methyl (-CH<sub>3</sub>), methylene (-CH<sub>2</sub>-), an aromatic group, a carbonyl group (-C(O)-), -OR'', -SR'' or -NR''R''',  
and where R/R'/R''/R''' is a hydrogen (-H), methyl (-CH<sub>3</sub>), methylene (-CH<sub>2</sub>-), an aromatic group or a carbonyl group (-C(O)-).



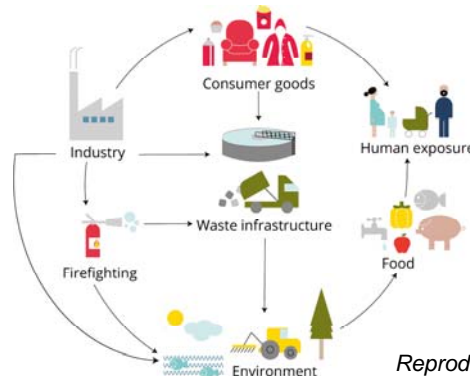
## Où est-ce qu'on trouve des PFAS ?



Rapport de l'Académie des sciences - 25 mars 2025

### Propriétés de grande résistance

- ➔ Intérêt pour les applications
- ➔ Très lente destruction
- ⇒ biodégradation très lente ⇒ bioaccumulation



Reprod., Fertil. Dev. 2024, 36, RD24034

### PFAS Emergence Timeline

1930s	1940s	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
Synthesis / Development									
Manufacturing and Commercial Production									

# PFAS : Enjeux sociétaux et environnementaux

- 1** **Persistence environnementale**
  - PFAS appelés « polluants éternels ».
  - Persistence dans les sols, les eaux et l'atmosphère pendant des années.
- 2** **Émissions atmosphériques**
  - Les PFAS volatils peuvent se déplacer sur de longues distances via l'atmosphère.
  - Dépôts via la pluie ou la neige ⇒ contamination zones éloignées.
- 3** **Bioaccumulation**
  - Accumulation dans les organismes vivants (poissons, oiseaux, mammifères).
  - Concentration accrue à mesure qu'ils montent dans la chaîne alimentaire.
- 4** **Contamination de l'eau**
  - Contamination des eaux souterraines, des rivières, des lacs
  - Difficulté de traitement dans les stations de traitement des eaux usées.
- 5** **Contamination des sols**
  - Accumulation dans les sols (impact sur qualité des cultures et écosystème).
  - Propagation possible via les boues d'épuration utilisées comme engrais.
- 6** **Impact sur la faune**
  - Toxicité pour les espèces aquatiques (perturbation reproduction et croissance).
  - Effets hormonaux chez les animaux.
- 7** **Pollution des décharges**
  - PFAS présents dans les déchets industriels et domestiques.
  - Lessivage dans les eaux environnantes, augmentant leur dispersion.

Carte de la Contamination en Europe  
**Le Monde** *Forever Pollution Project*, 23/02/2023



Contamination détectée Utilisateurs de PFAS  
Contamination présumée Producteur de PFAS

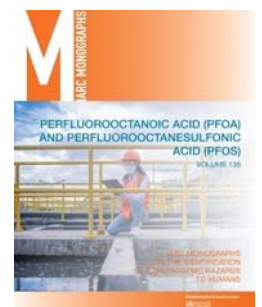
21

# PFAS : défis sociétaux et environnementaux

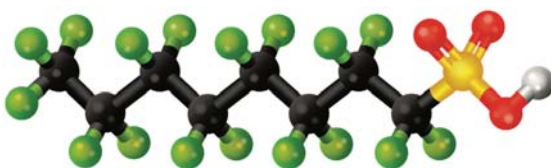
International Agency for Research on Cancer



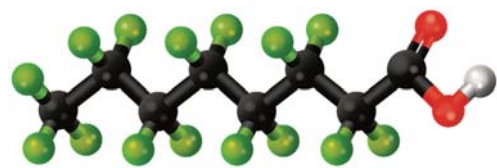
**2023** Un groupe de travail sur du CIRC a examiné les données issues d'études épidémiologiques, de tests de toxicité cancérigène sur des animaux de laboratoire et d'études mécanistiques afin d'évaluer le risque cancérigène pour l'homme lié à l'exposition à ces agents, et a conclu que :



- **Le PFOA est cancérigène pour l'homme (groupe 1) ;**
- **Le PFOS est potentiellement cancérigène pour l'homme (groupe 2B).**



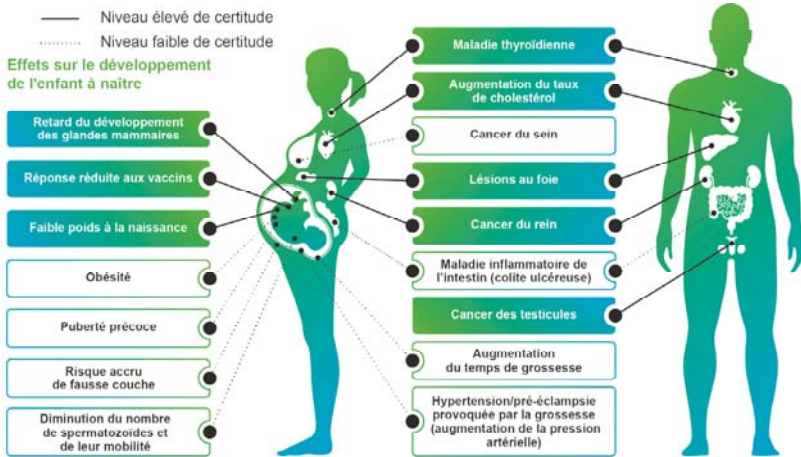
PFOS



PFOA

22

# Effets sur la santé



European Environment Agency (EEA)  
Rapport de l'Académie des sciences - 25 mars 2025

## Mode(s) d'action ?? ... quelques pistes

- PFAAs à longue chaîne imitent les acides gras essentiels dans l'organisme.
- Incorporation erronée des PFAAs dans les membranes lipidiques, entraînant un dysfonctionnement cellulaire.
- Perturbation de l'homéostasie lipidique ; activation de plusieurs récepteurs nucléaires liés.
- Traitement des lipides (potentiellement impliqué dans la toxicité hépatique et les retards de développement).
- Absorption intestinale initiale et clearance biliaire médiées par des transporteurs d'acides gras (polypeptides transporteurs d'anions organiques (OATPs), transporteurs d'anions organiques (OATs)).
- Distribution systémique via les sites de liaison des acides gras sur l'albumine.
- Foie : protéines de liaison aux acides gras.
- Clearance rénale facilitée par les OATs.

23

# Substitutions ?

Catégorie	Définition	Exemples d'utilisation	Remarques et recommandations
<b>Non essentielle</b>	Utilisations non essentielles pour la santé, la sécurité ou le fonctionnement de la société et principalement motivées par des opportunités de marché.	Produits de soin personnel et cosmétiques, farts pour skis, ustensiles de cuisine, textiles déperlants et antitaches, vêtements de loisirs.	Certaines de ces utilisations (cosmétiques, farts, vêtements de loisirs) sont concernées par la loi du 20 février 2025 et d'autres n'y sont pas mentionnées. Certains états des USA et certains pays (Danemark dans l'UE) ont déjà pris, depuis plusieurs années, des mesures visant à interdire leur présence dans les emballages alimentaires.
<b>Substituable</b>	Utilisations ayant des fonctions importantes, mais pour lesquelles <b>des alternatives avec des performances adéquates ont été développées.</b>	Mousse anti-incendie de classe B.	Substituer dès que possible.
<b>Essentielle</b>	Utilisations considérées comme <b>essentielles</b> pour la santé, la sécurité et le fonctionnement de la société et pour lesquelles des alternatives ne sont pas encore établies.	<b>Transition énergétique</b> : Batteries lithium-ion. Membranes pour piles à combustible (type Nafion™). Fluides caloporteurs des pompes à chaleur et climatisations. <b>Santé et protection</b> : Dispositifs médicaux, vêtements de protection professionnelle.	Investir dans la recherche pour mieux connaître ses molécules et dans la recherche d'alternatives. Réglementer les usages, exiger une grande transparence vis-à-vis des (i) molécules utilisées, (ii) risques encourus et (iii) mesures de précaution nécessaires.

24

# Merci pour votre attention



Depuis 2004 : **GIS CNRS Réseau Fluor** (CNRS Chimie)

Depuis 2026 : **RT PFAS**  
CNRS Chimie, Ecologie & Environnement,  
Biologie, Ingénierie, SHS, Terre & Univers