

LIMA

UMR 7042 Unistra - CNRS - UHA

LABORATOIRE D'INNOVATION
MOLÉCULAIRE ET APPLICATIONS



Université

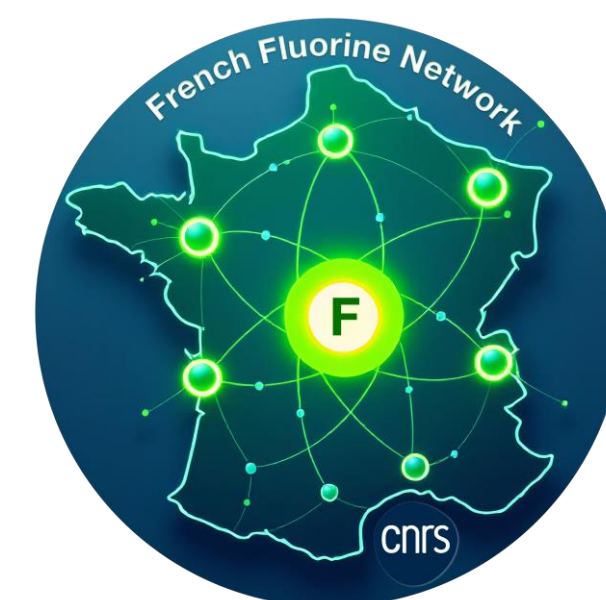
de Strasbourg

Les PFAS – Quelques notions pour mieux les comprendre

Vendredi 10 octobre 2025

Armen PANOSSIAN

armen.panossian@unistra.fr



Introduction: L'importance du Fluor

Les halogènes

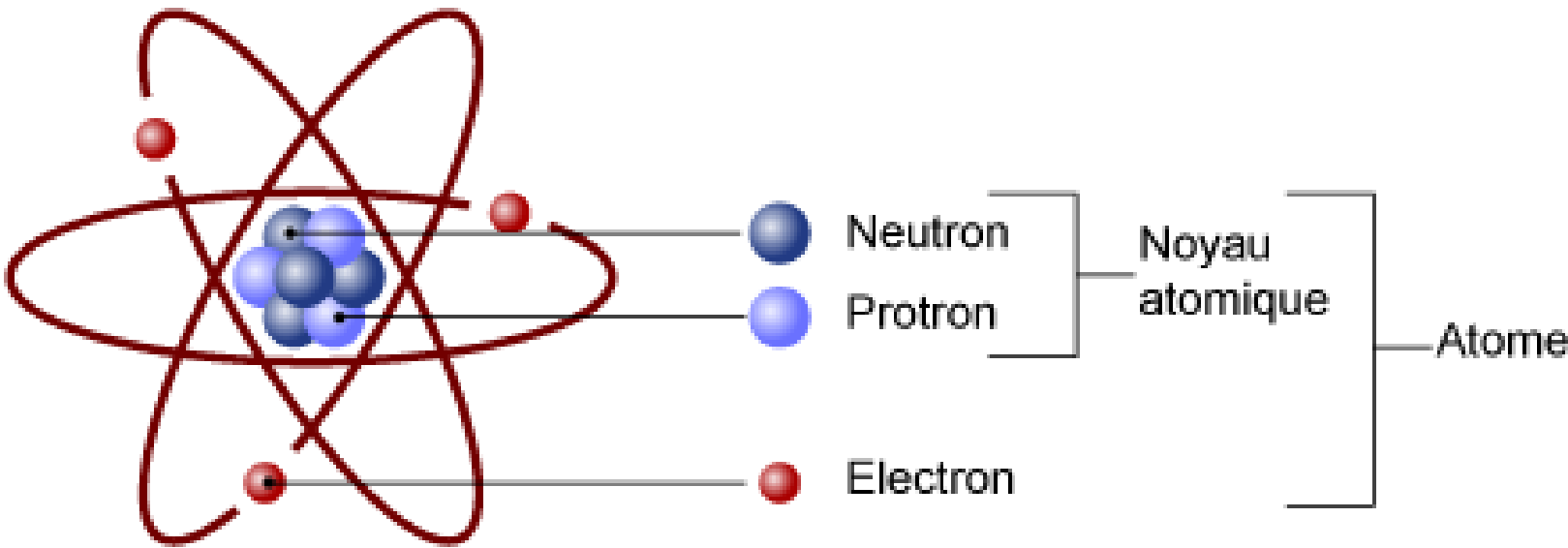
L'atome est la plus petite unité de base de la matière, à l'état électriquement neutre, susceptible d'entrer dans les combinaisons chimiques, c'est-à-dire des molécules.

Un élément est une substance composée d'une seule sorte d'atomes que l'on ne peut pas séparer

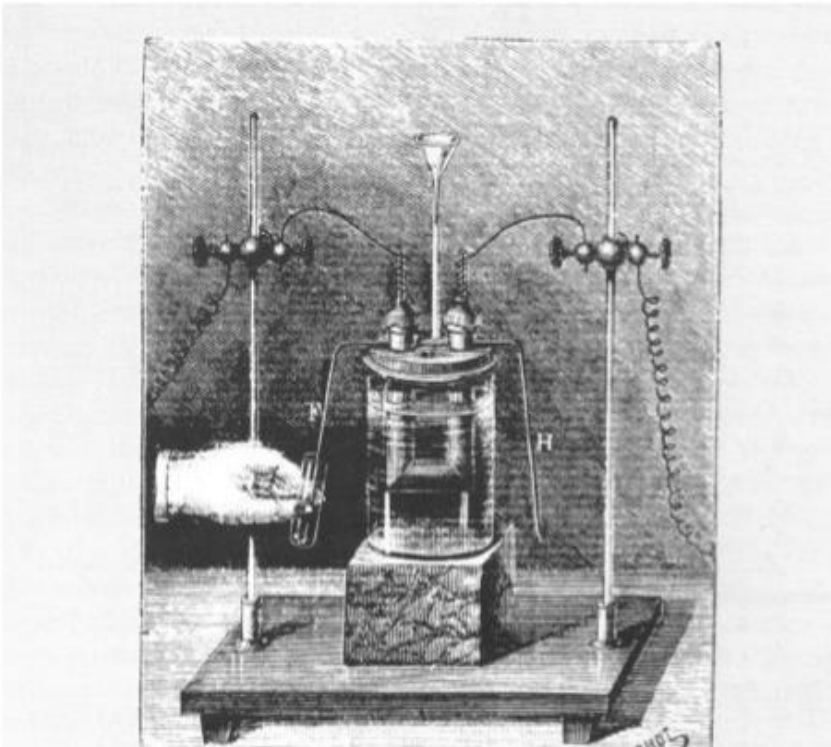
Un élément est donc un atome unique ou des atomes identiques liés chimiquement ensemble

Il existe 112 éléments, 92 naturels et 20 artificiels.

ATOME



🦊 26 juin 1886 : Henri Moissan isole F_2 !

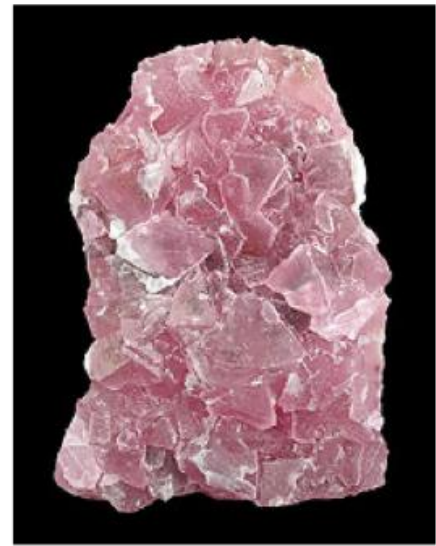


Halogens

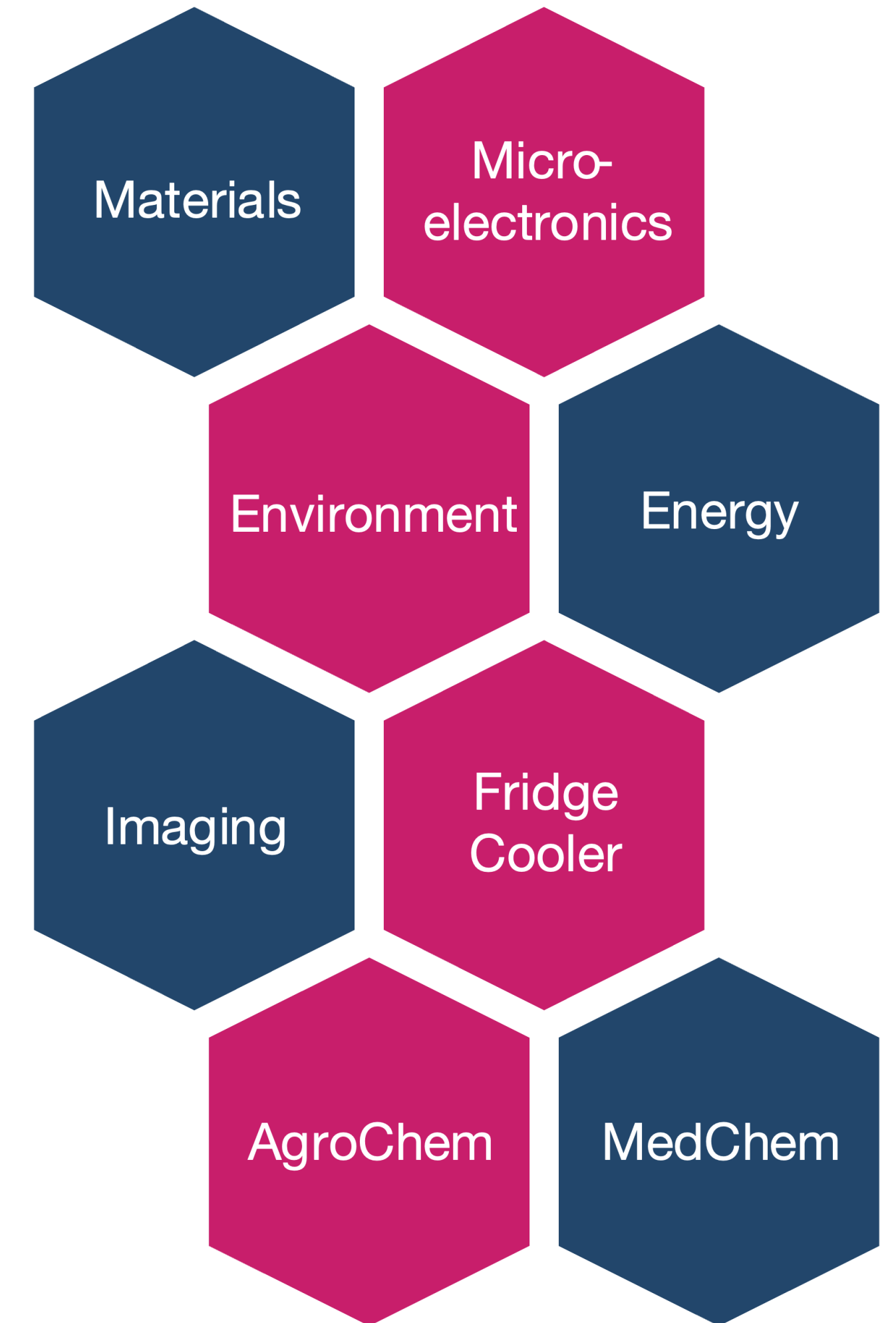
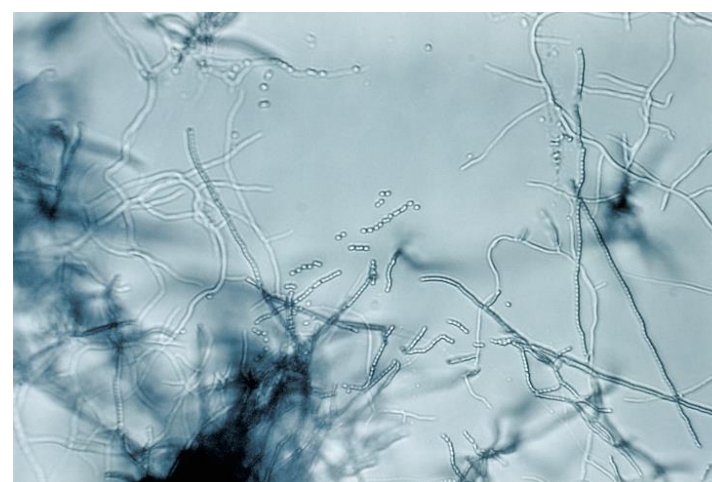
1 H Hydrogen																	2 He Helium														
3 Li Lithium	4 Be Beryllium															5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon										
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium															13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon										
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton														
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon														
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57 La Lanthanum	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	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														
																		58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	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 Lutetium
																		90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

Fluor : *nec pluribus impar* parmi les éléments

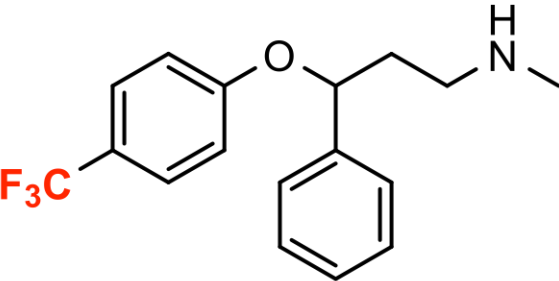
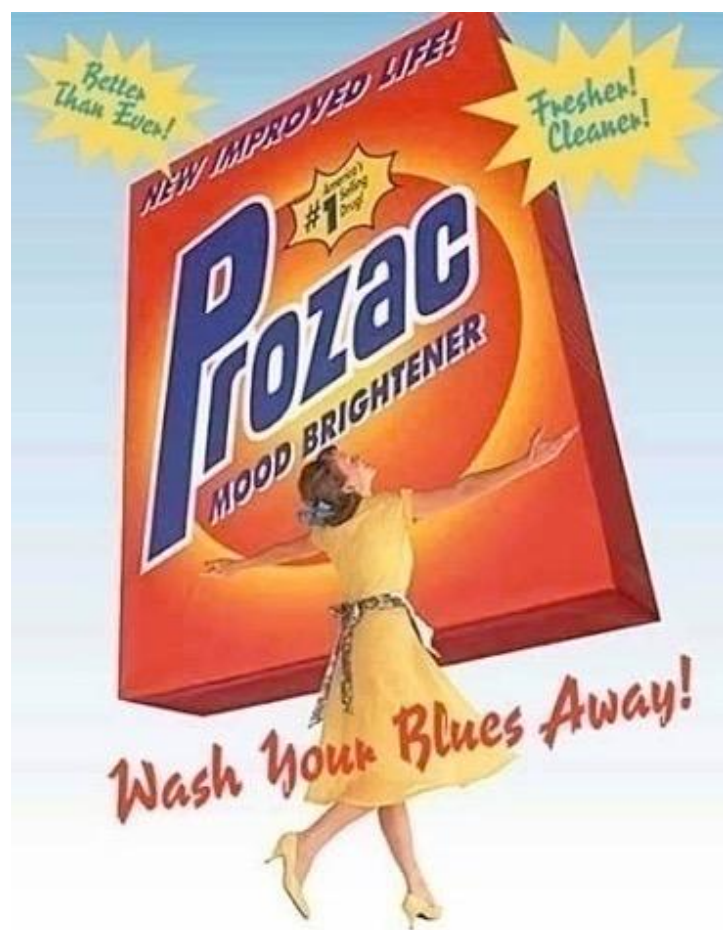
- Deuxième plus petit atome après l'hydrogène
- Élément le plus électronégatif
- Liaison la plus forte que le carbone puisse former
- Le fluor est le 13e élément le plus abondant ($\geq C$, $> Cl$ $\gg N$) dans la croûte terrestre
- Largement répandu dans la biosphère (flore et faune)



- Seulement 12 composés naturels (non-minéraux) du fluor, contre >3500 composés halogénés



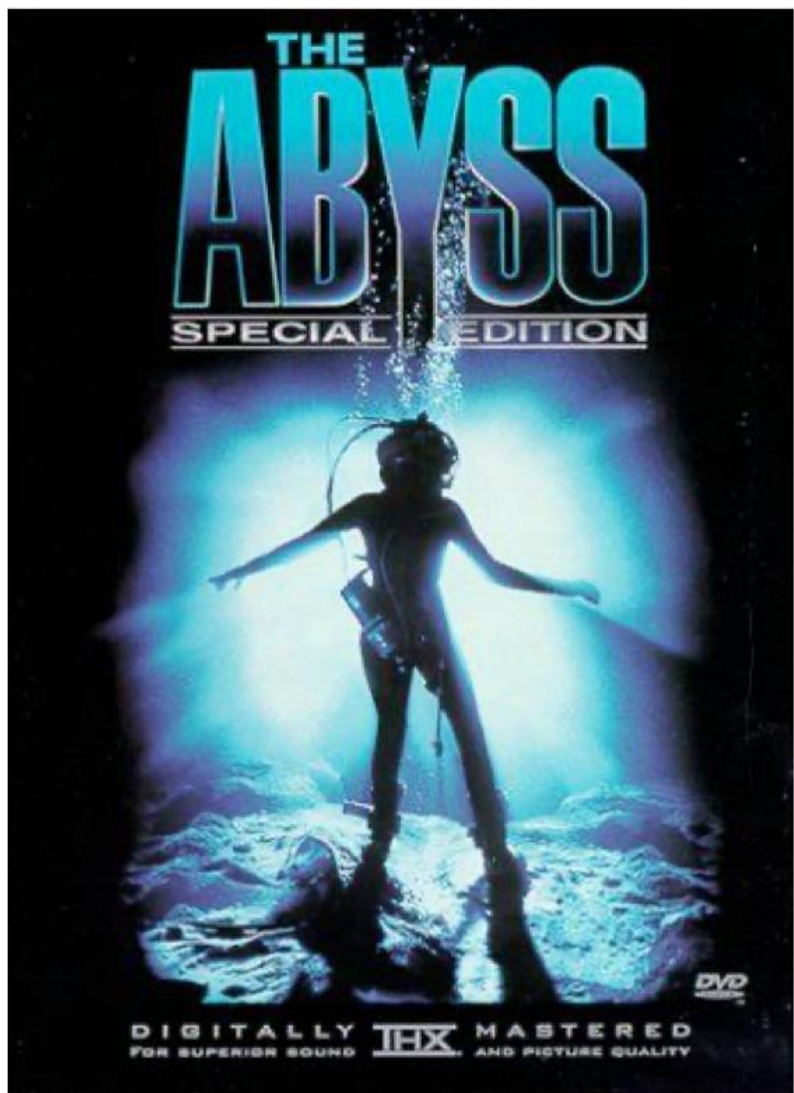
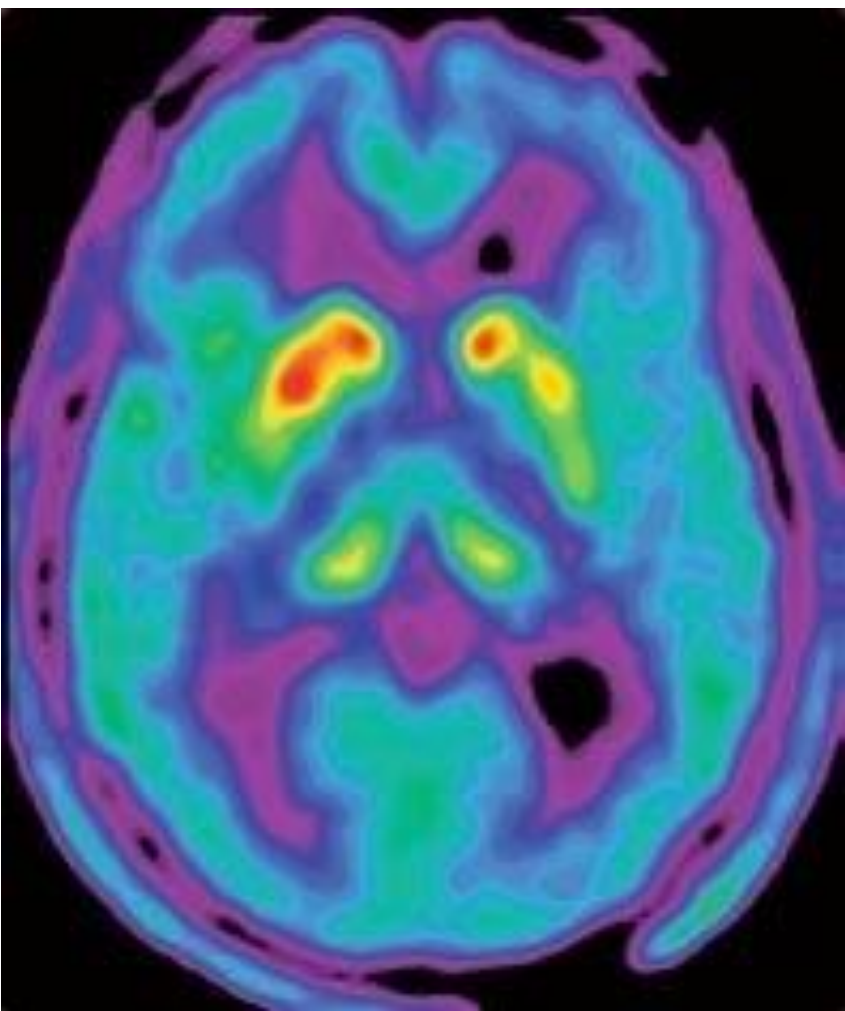
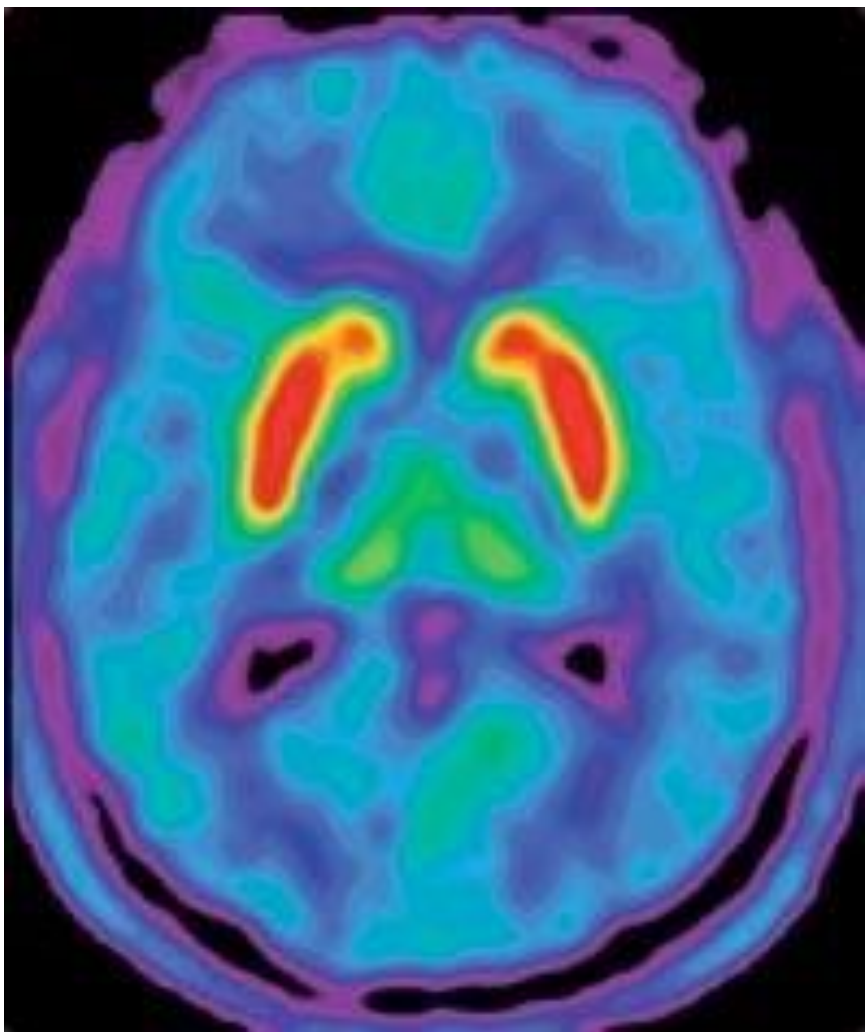
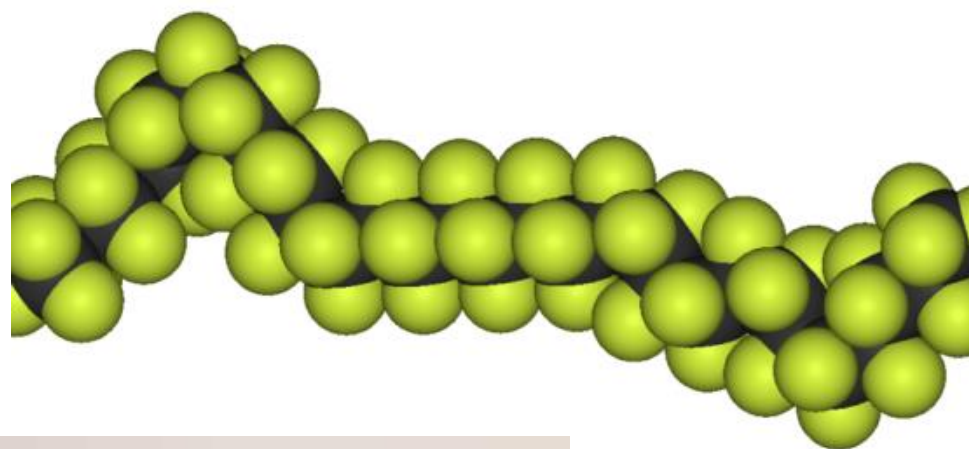
Quelques applications du fluor dans notre vie



Fluoxetine (Prozac)



Teflon by R.J. Plunkett, 1938



Quelques applications du fluor dans notre vie



Sources naturelles de fluor

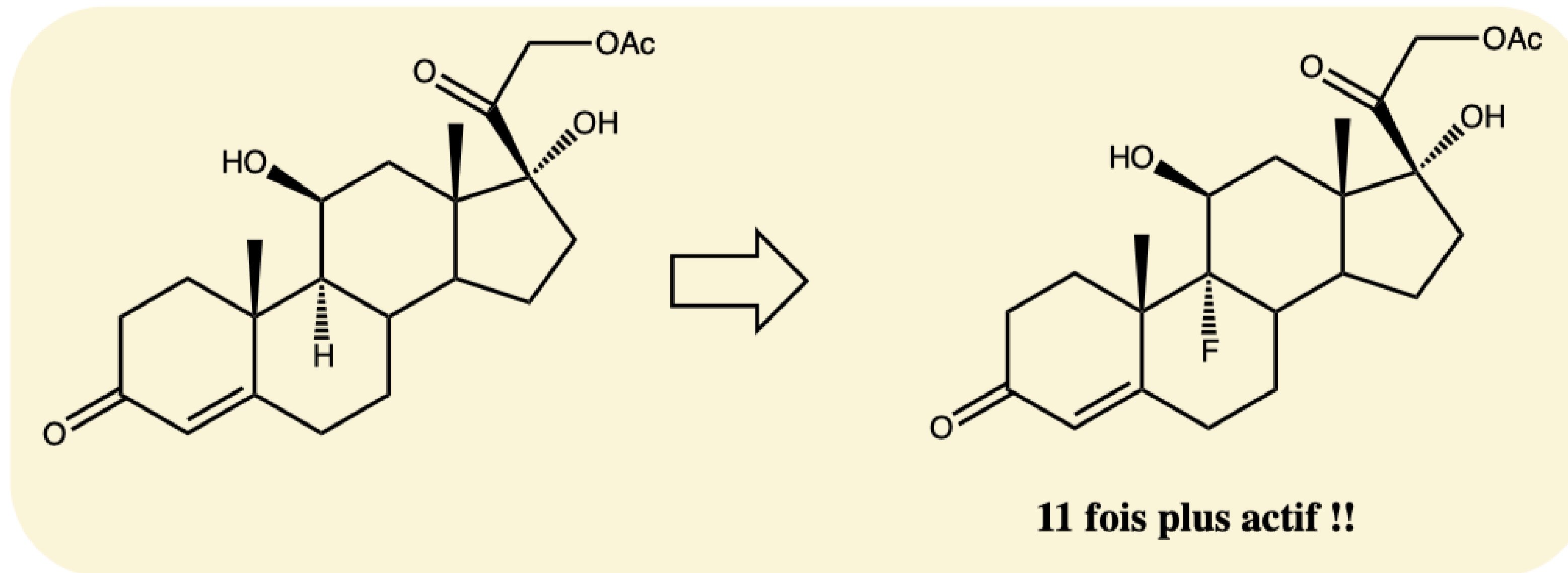


Volcan Kilauea (Hawaï) : 180 tonnes de HF / jour

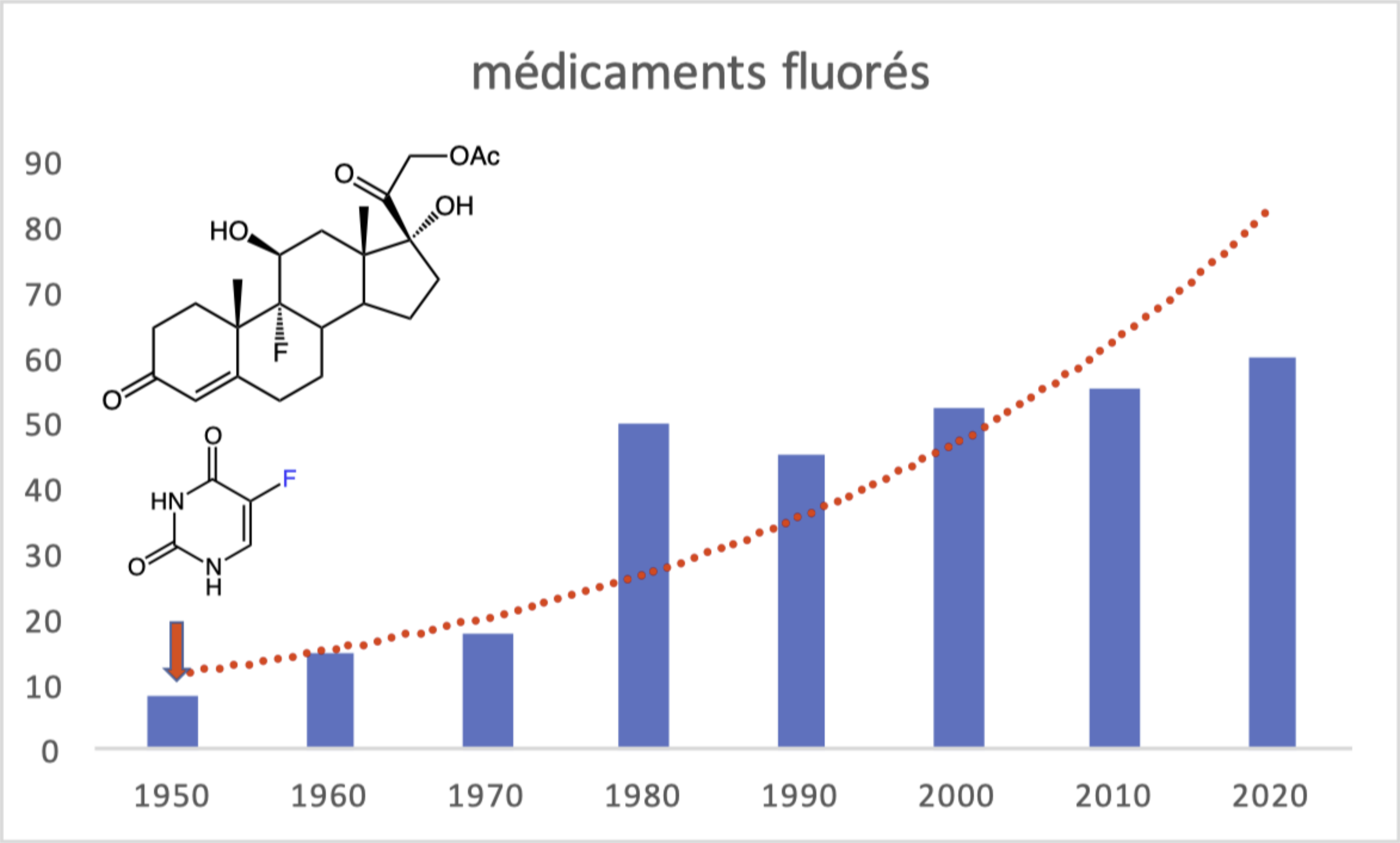
+ $CF_2=CF_2$ + $CF_3-CF=CF_2$ + $CF_2=CFCl$ + CF_2Cl_2 + CF_3Cl + CHF_3 + Teflon...

Un des premiers exemples en chimie thérapeutique

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



Evolution du nombre de composés fluorés en chimie thérapeutique : croissance exponentielle !

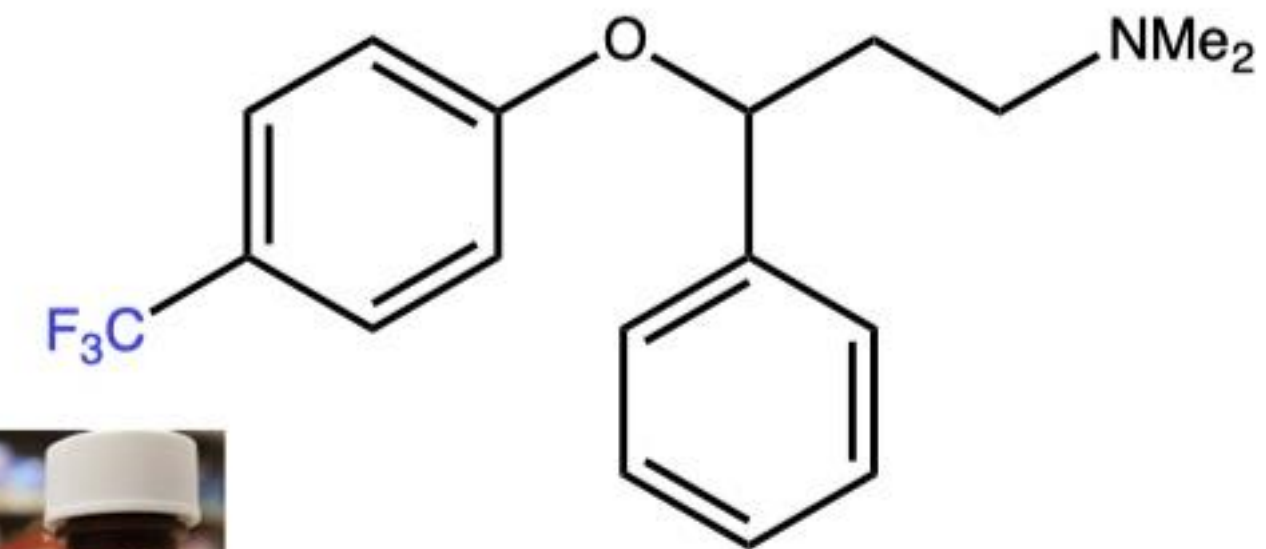


Quelques exemples de composés fluorés commerciaux

Depuis...Importance des composés fluorés en chimie thérapeutique

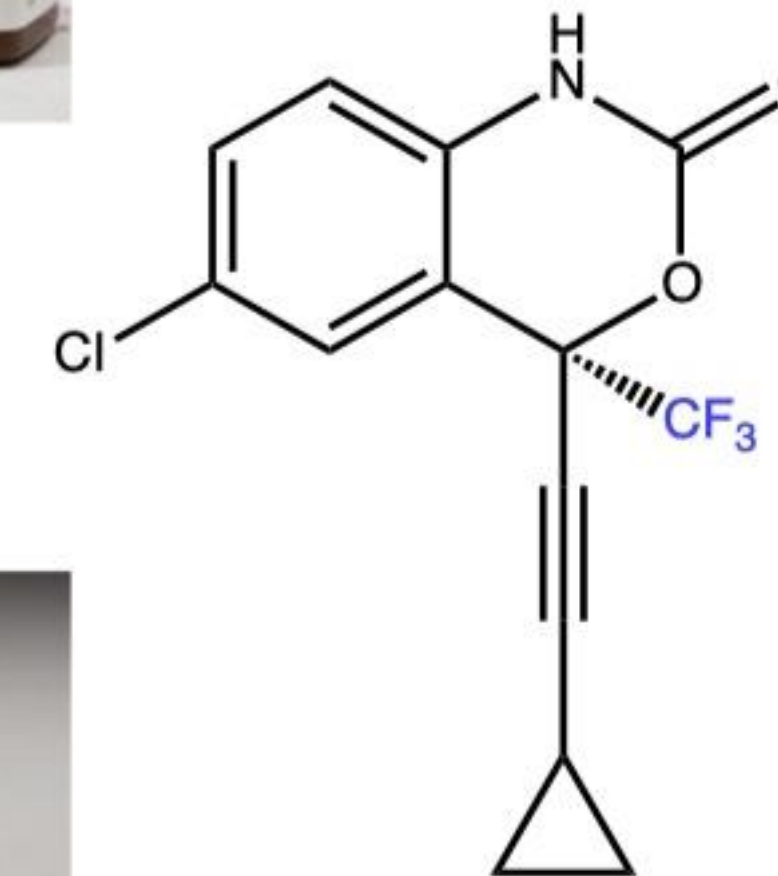
- Environ 25% des médicaments comportent un atome de fluor
- Traitement cancers, virus, bactéries

Antidépresseur : la Fluoxétine (Eli Lilly) sous forme racémique commercialisé sous le nom de Prozac®



Prozac®

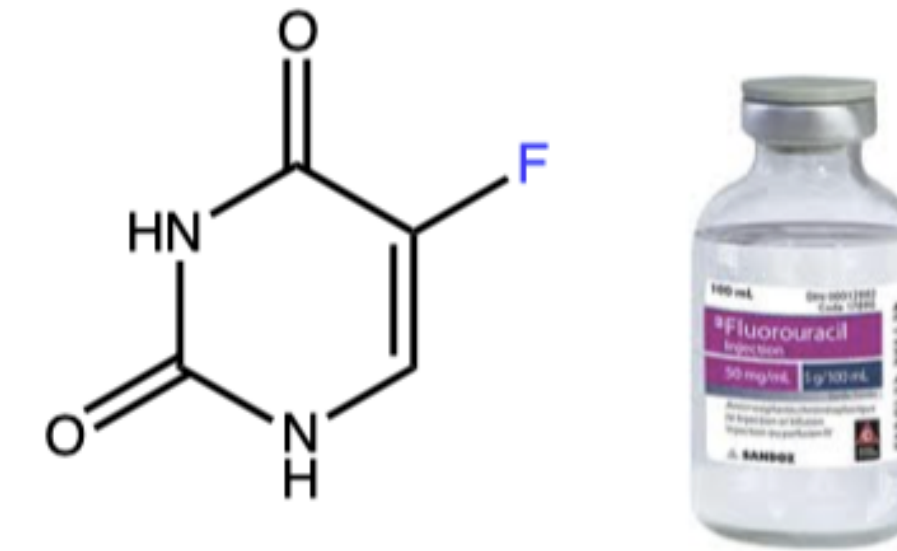
Antiviral : l'Efavirenz (Bristol-Myers) est un inhibiteur de la transcriptase inverse utilisé dans le traitement des patients atteints par le SIDA. Commercialisé sous le nom Sustiva 1.



Efavirenz

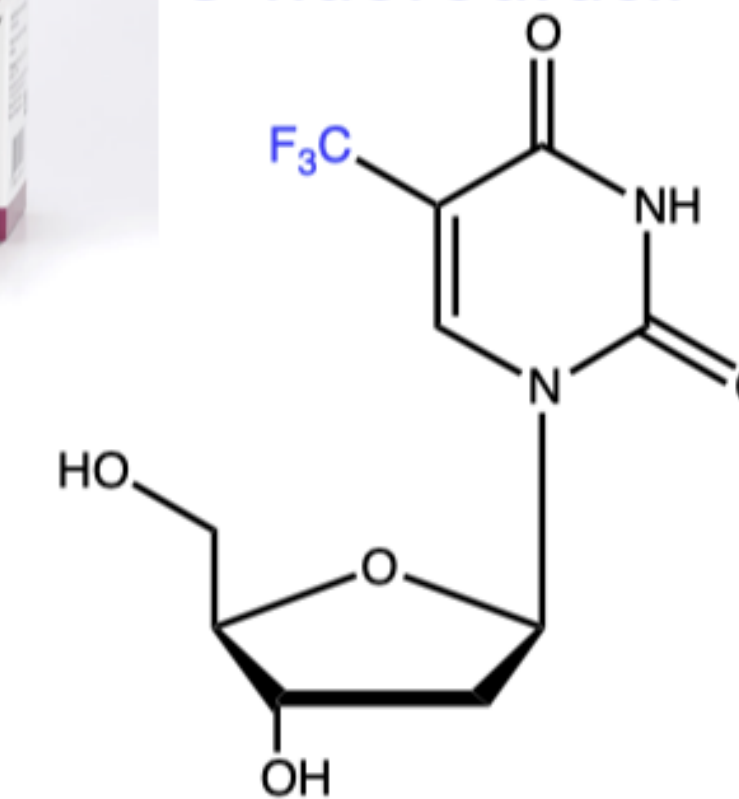
Quelques exemples de composés fluorés commerciaux

Anticancéreux : Le 5-fluorouracil utilisé dans le traitement de cancers, tels le cancer du sein ou du colon. Développé dans les années 1960.



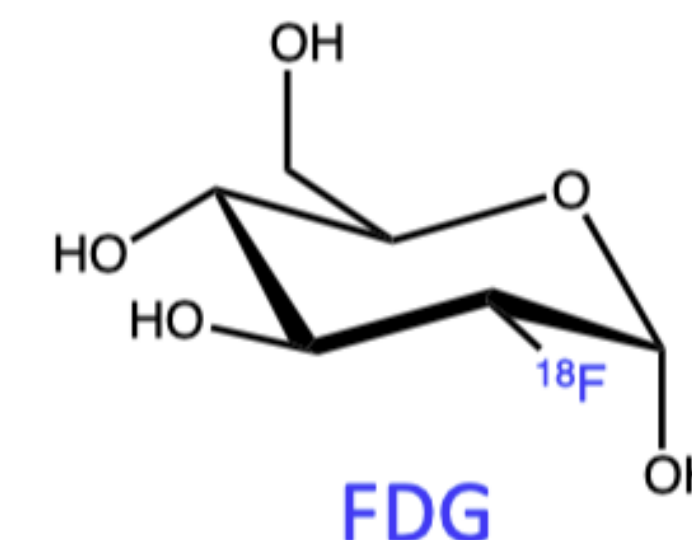
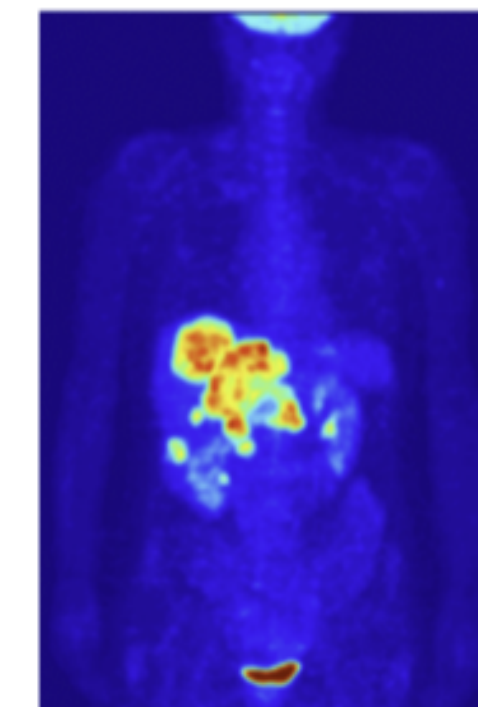
5-fluorouracil

Antiherpes : la Trifluridine composé antiviral en particulier anti-herpétique utilisé dans le traitement des infections oculaires, mais aussi contre le cancer.



Trifluridine

Diagnostic : le FDG, 2-désoxy-2-fluoro-D-glucose, est un composé radiomarqué par un émetteur de positons (¹⁸F). Trouve de nombreuses application en oncologie pour la détection de cancers ou métastases.

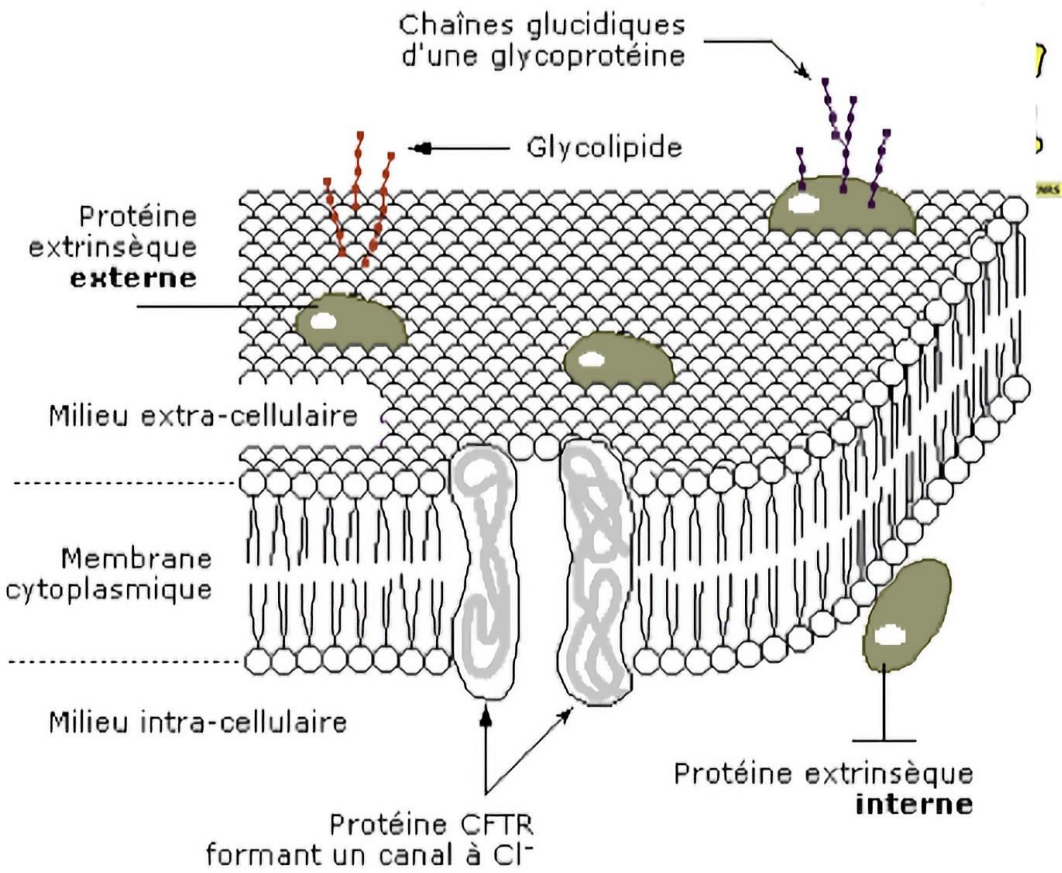


FDG

Sur quoi agir pour augmenter l'efficacité d'un médicament ?

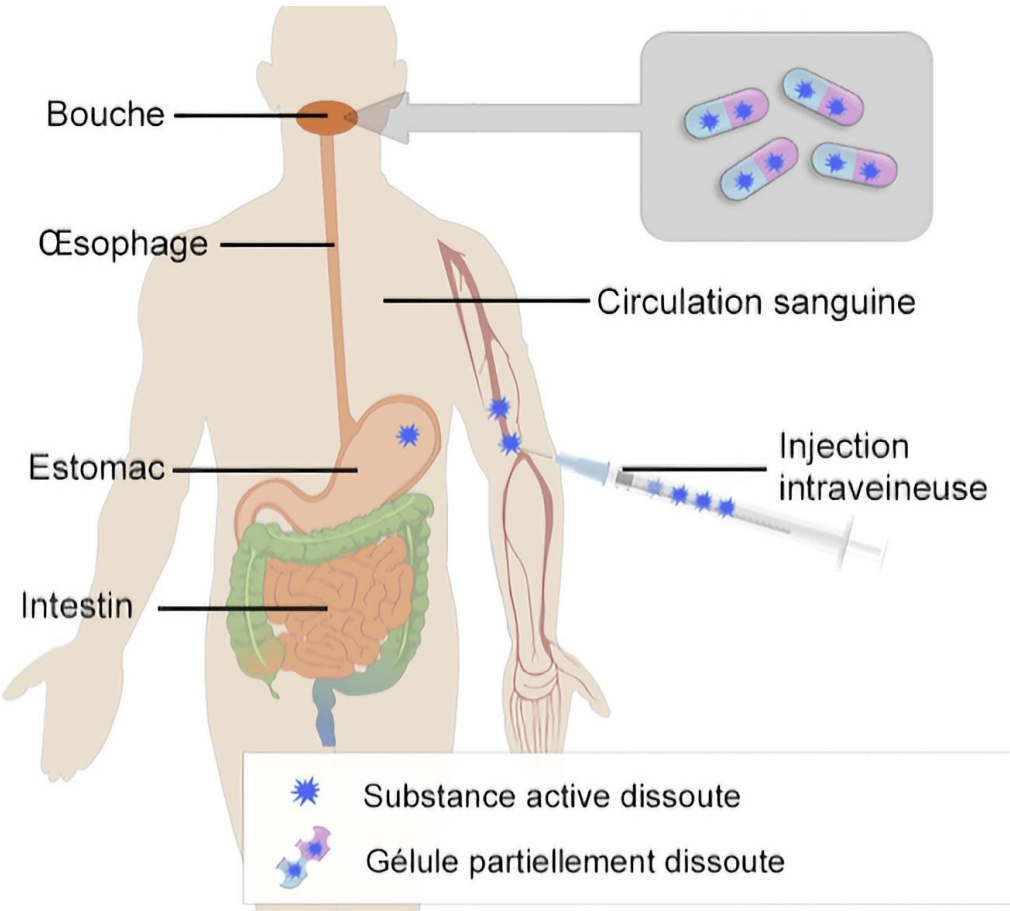


➡ Pénétration cellulaire



Pas transformé
Pas d'élimination

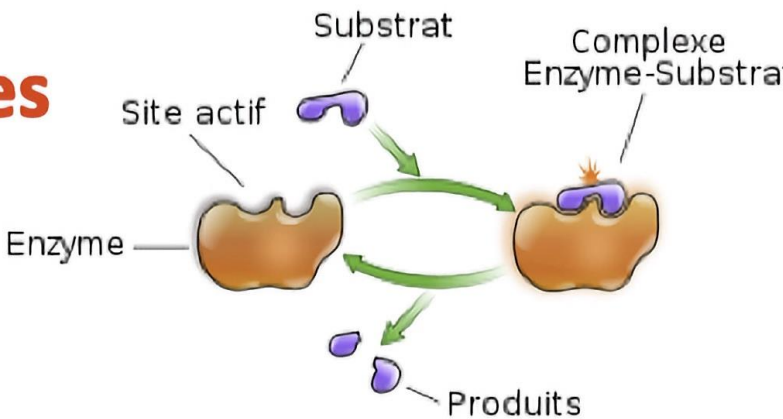
➡ Biodisponibilité



➡ Stabilité métabolique

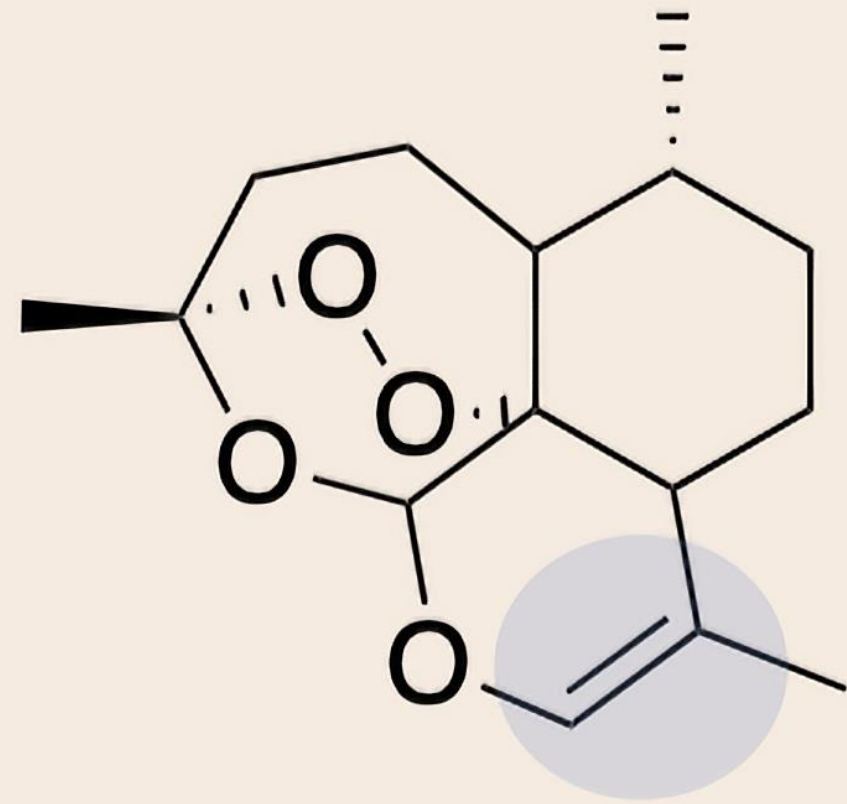
Pas dégradé ou éliminé, stabilité des liaisons

➡ Interaction avec protéines



*Complexe avec l'enzyme très stable
État de transition stable*

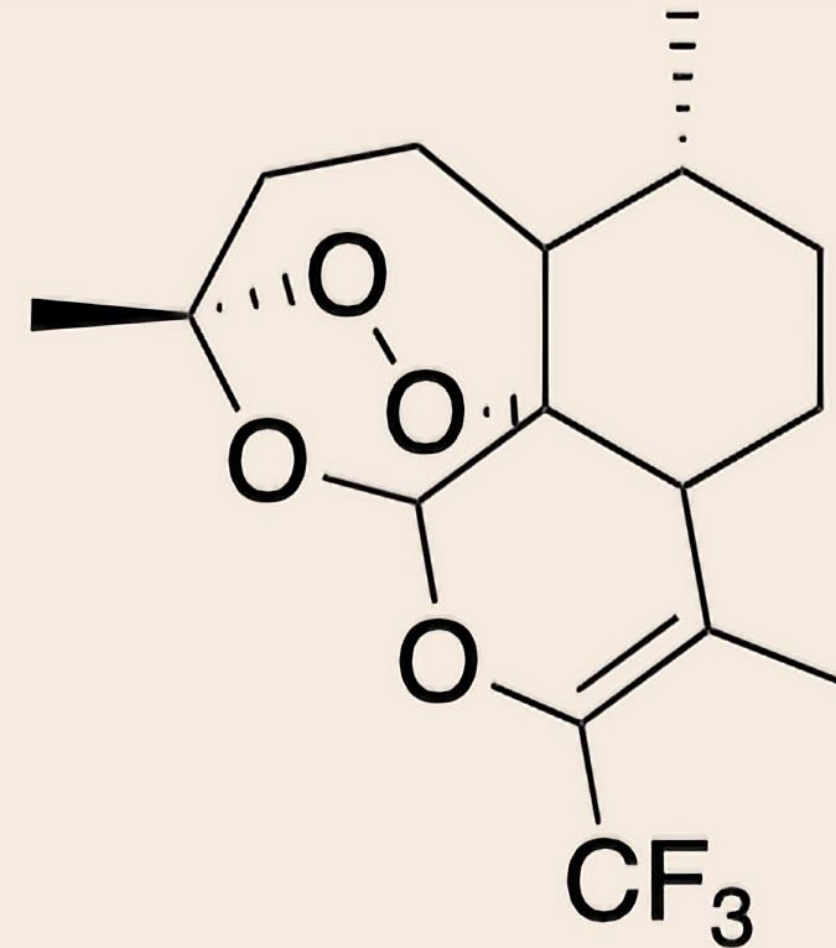
Un exemple pour l'impact du fluor



désoxoartémisinine

IC_{50} 20 nM

Pas de survivant



CF₃-désoxoartémisinine

IC_{50} 6.3 nM

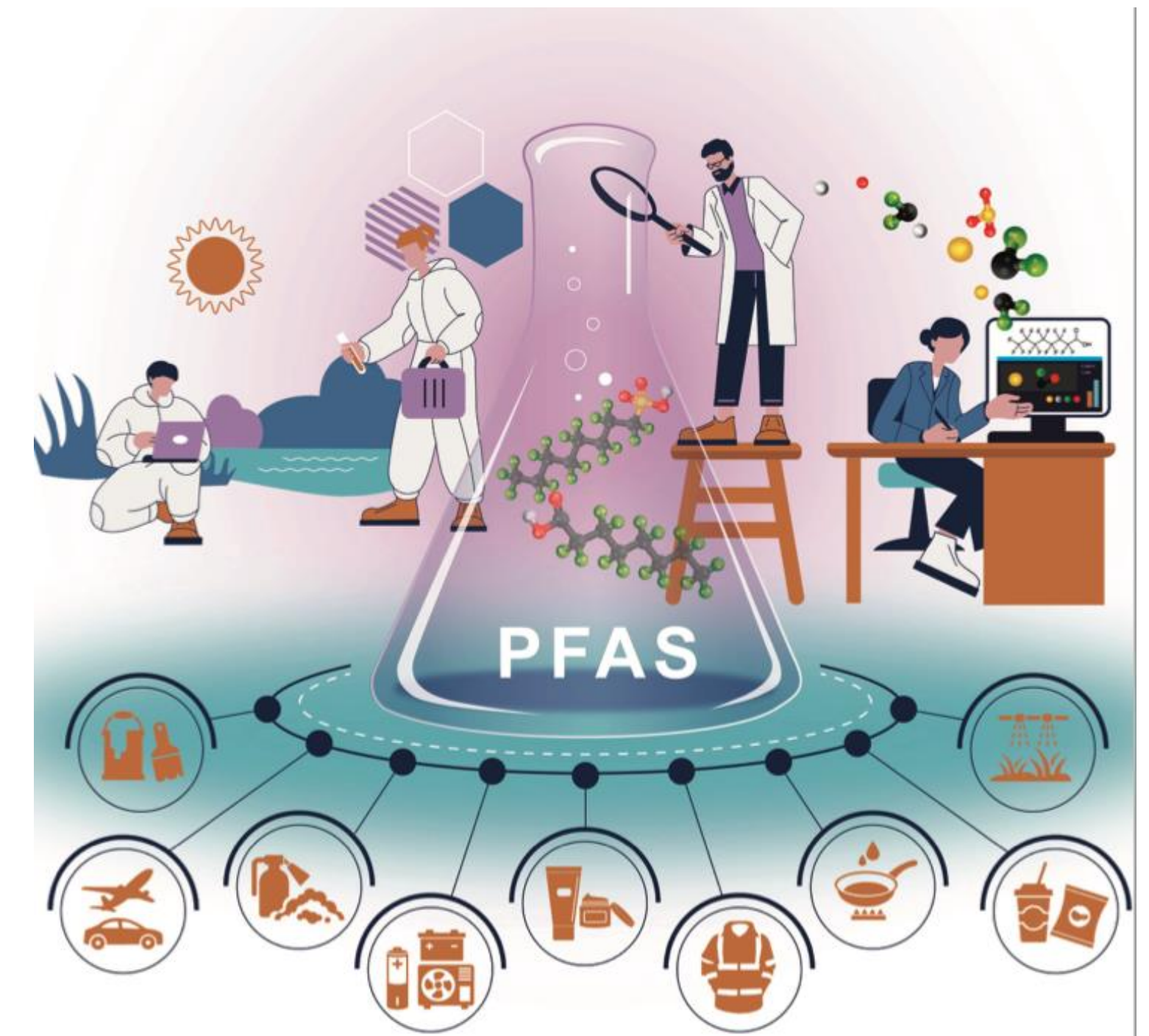
90% de survivant

Comprendre la chimie et les sources des PFAS

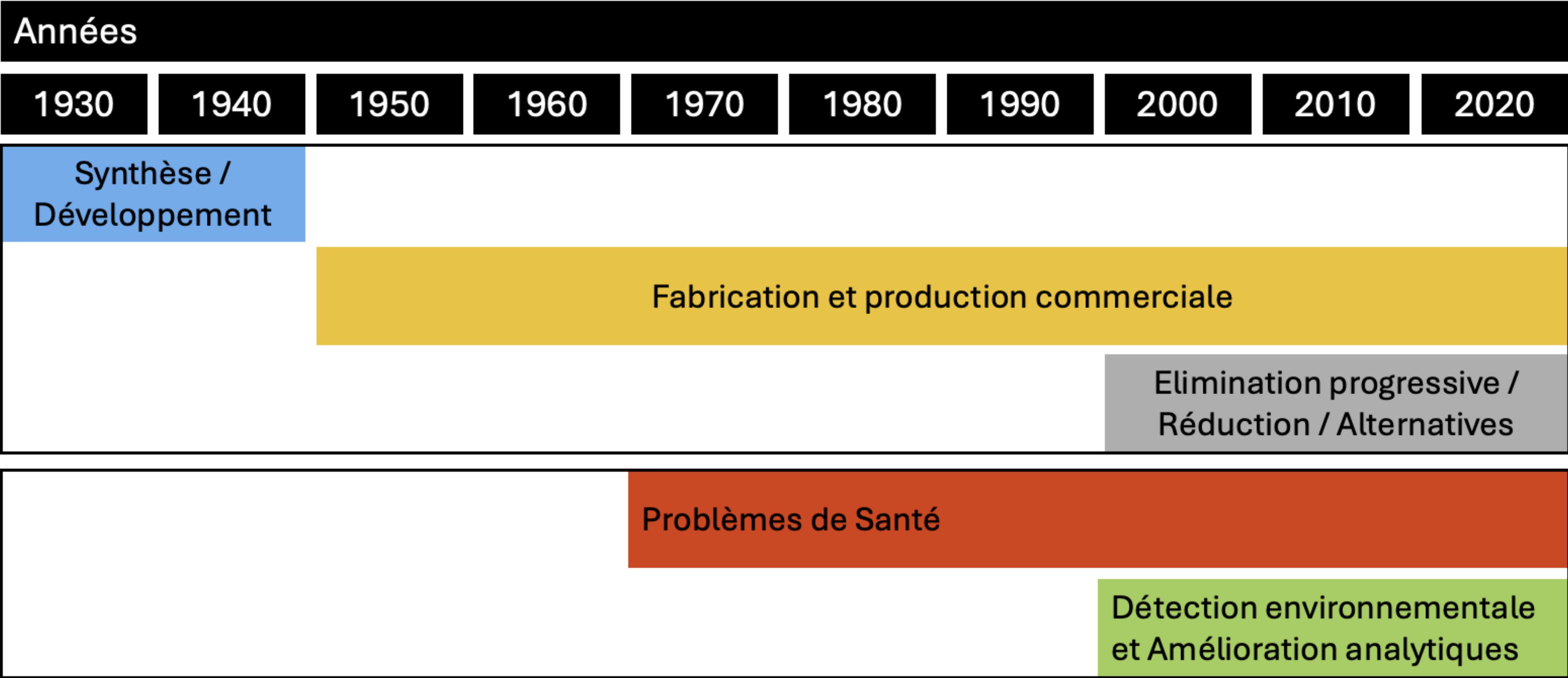
Que sont les PFAS: Substances per- et polyfluoroalkylées

Famille de molécules dotées d'une chaîne d'atomes de carbone et comportant au moins un groupement fluoré.

- Produits chimiques synthétiques, très stables.
- Des milliers de composés disponibles sur le marché.
- Utilisation répandue dans les processus industriels et les produits de consommation.
- S'adsorbent sur les roches et les sédiments.
- Mobiles via divers chemins : air, eau.
- De nombreuses substances perfluoroalkylées (PFAS) sont reconnues pour être :
 - Persistantes dans l'environnement.
 - Bioaccumulables dans les organismes vivants.



Les grandes phases de l'émergence des PFAS et de la sensibilisation associée

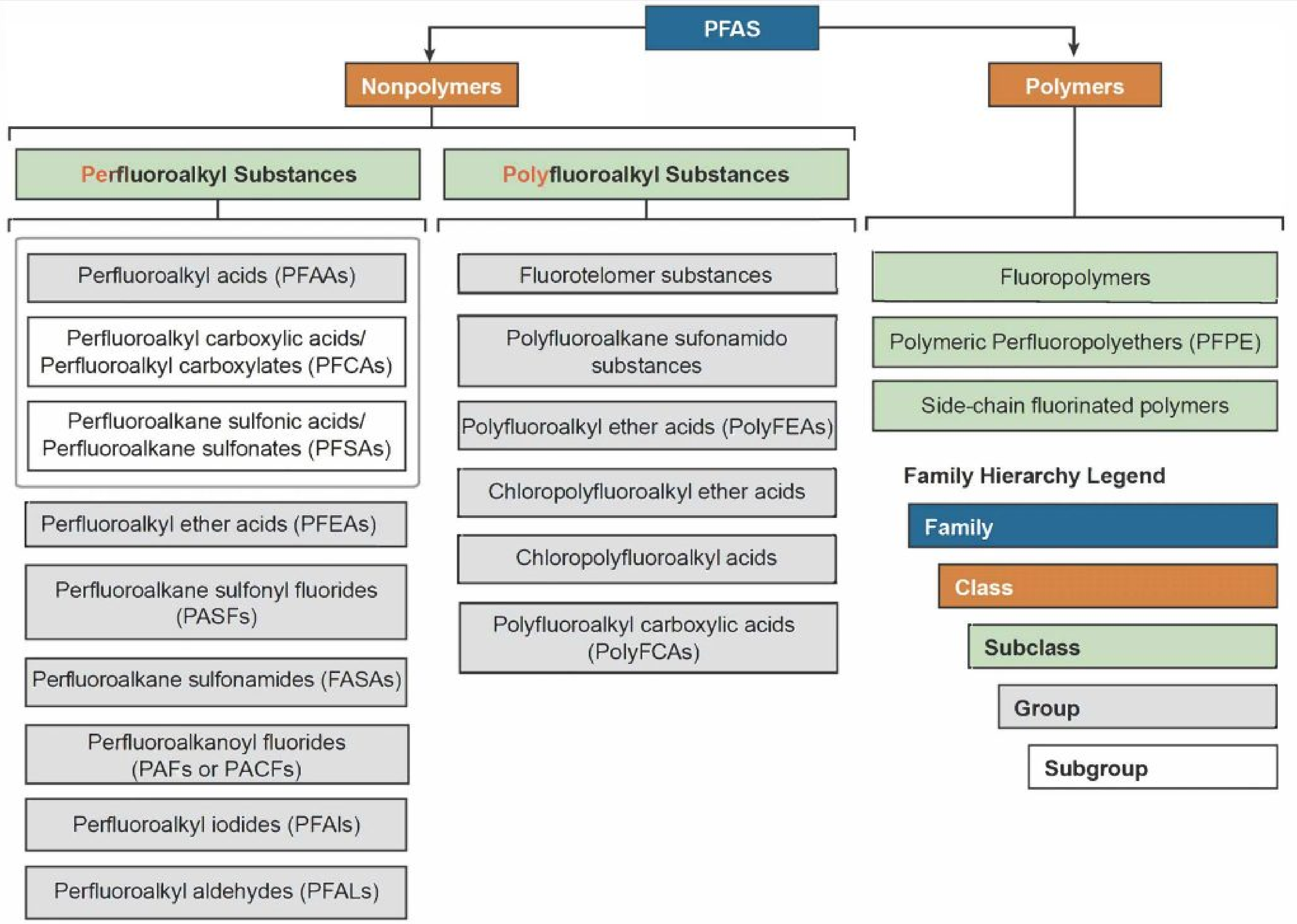




-  CARBONE
-  FLUOR
-  SOUFRE
-  OXYGÈNE
-  HYDROGÈNE



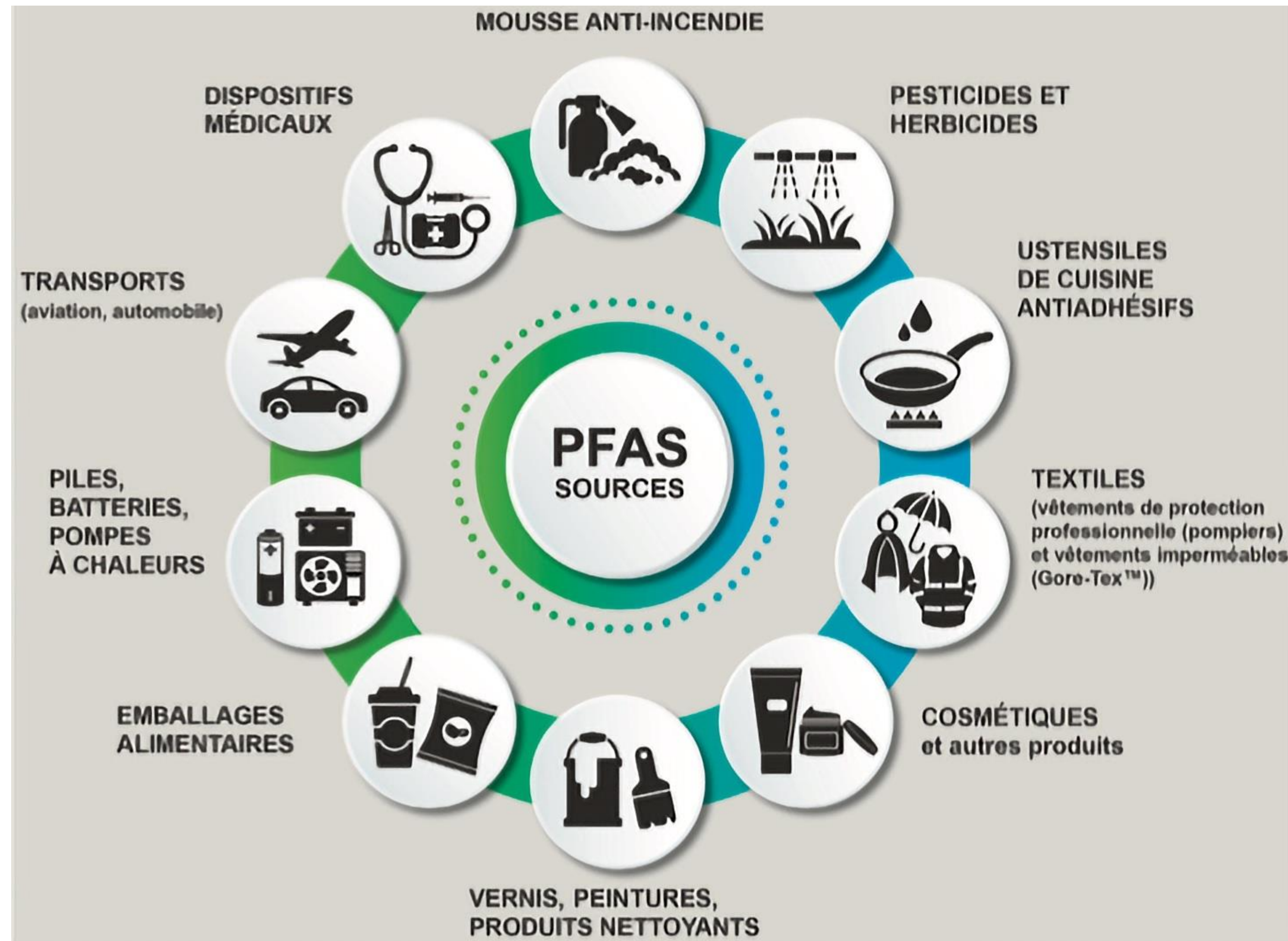
Vue d'ensemble des groupes de PFAS utilisés pour l'évaluation d'impact



Quelques PFAS, leurs propriétés et exemples d'utilisations

Acronyme	Nom complet	Exemples de propriétés et d'utilisations
PFOA	Acide perfluorooctanoïque	Utilisé dans la fabrication de revêtements antiadhésifs (ex. Teflon™)
PFOS	Sulfate de perfluorooctane	Présent dans les mousses anti-incendie, les textiles aux propriétés hydrofuges et les produits de nettoyage
PFNA	Acide perfluorononanoïque	Utilisé dans certains revêtements industriels et dans la fabrication de polymères
PFHxS	Sulfate de perfluorohexane	Utilisé dans des traitements hydrofuges pour les textiles et les tapis
GenX	Nom commercial du 2,3,3,3-tetrafluoro (heptafluoro-propoxy) propanoate d'ammonium et sa forme acide	Substitut chimique moderne du PFOA dans la fabrication de fluoropolymères haute performance
PFBA	Acide perfluorobutyrique	Utilisé dans les produits agricoles et dans certaines applications médicales

Quelques exemples de sources de PFAS issues de nos vie quotidienne ou d'usage industriel et professionnel



Voici quelques exemples de PFAS dans la vie quotidienne

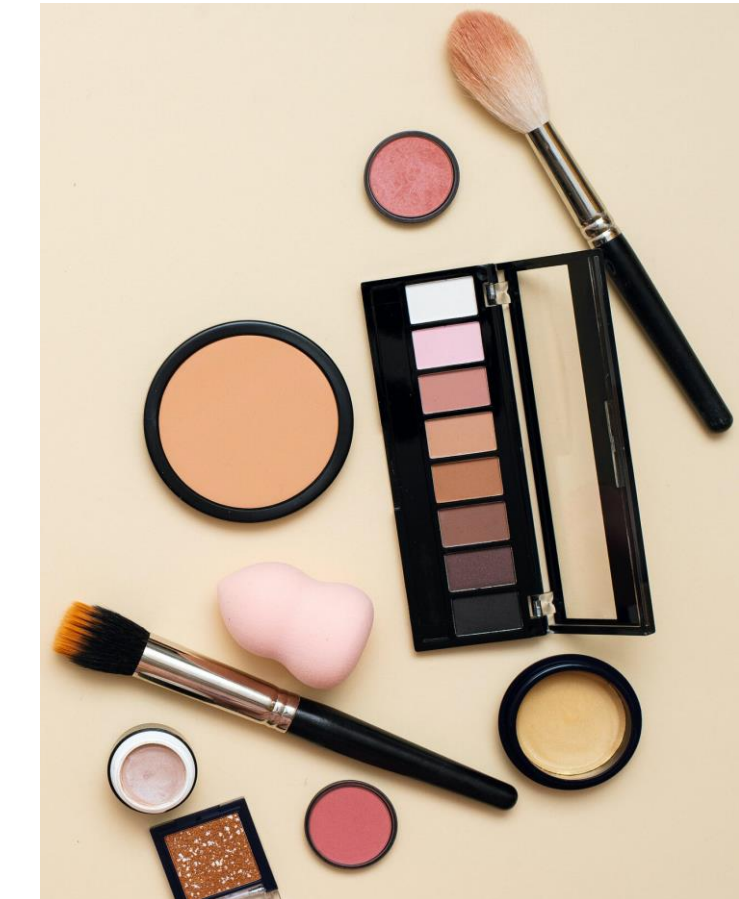
Emballages alimentaires



Ustensiles de cuisine antiadhésifs



Cosmétiques



Vêtements imperméables



Cires de glisse pour ski



Mobilier résistant aux taches



Indispensable ?

Les PFAS sont désormais omniprésents

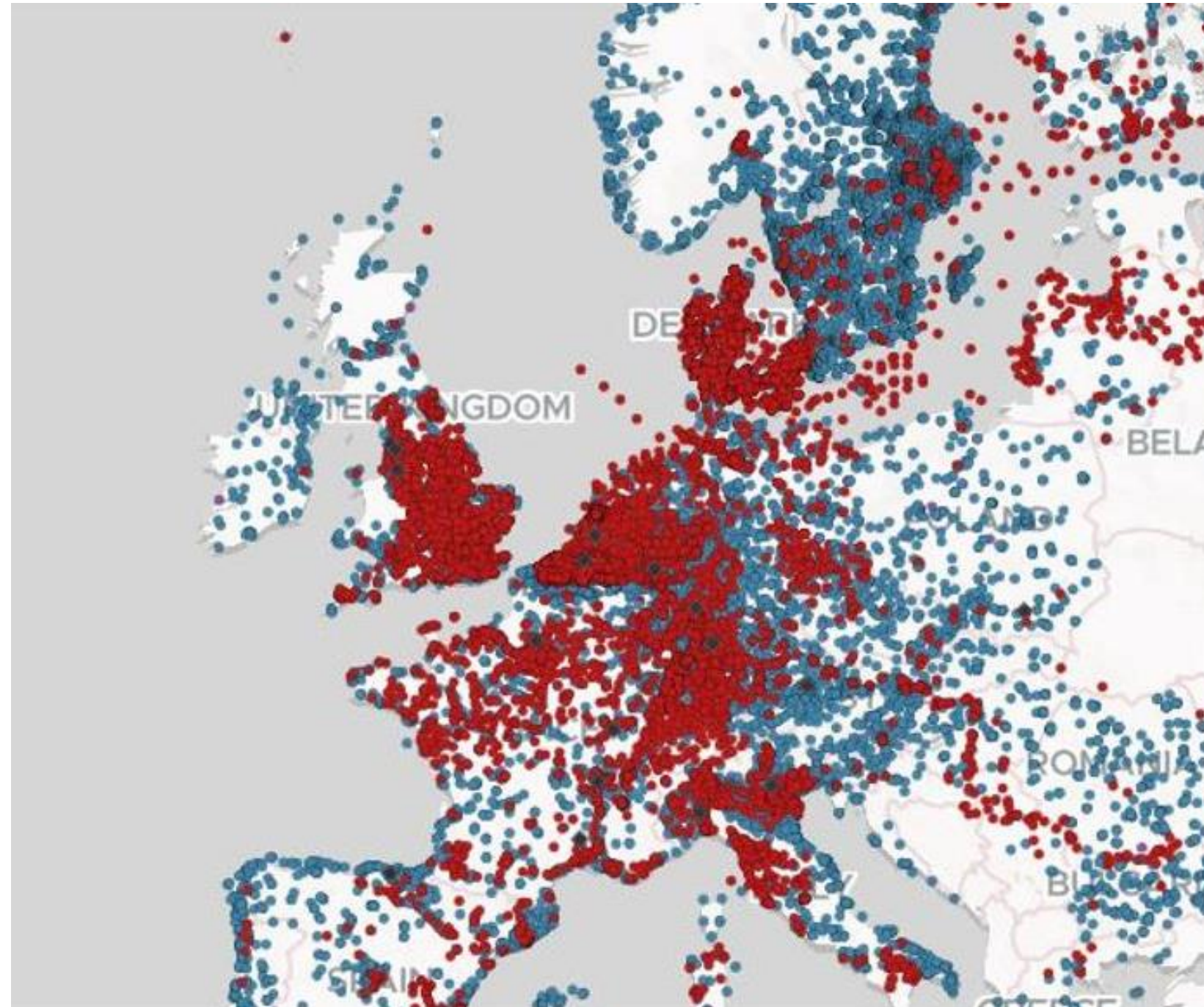


IMPACT MONDIAL :

*Présence détectée sur tous les continents,
dans divers environnements naturels et urbains.*

Impact des PFAS

Carte de la Contamination en Europe *Le Monde* [Forever Pollution Project](#), 23/02/2023

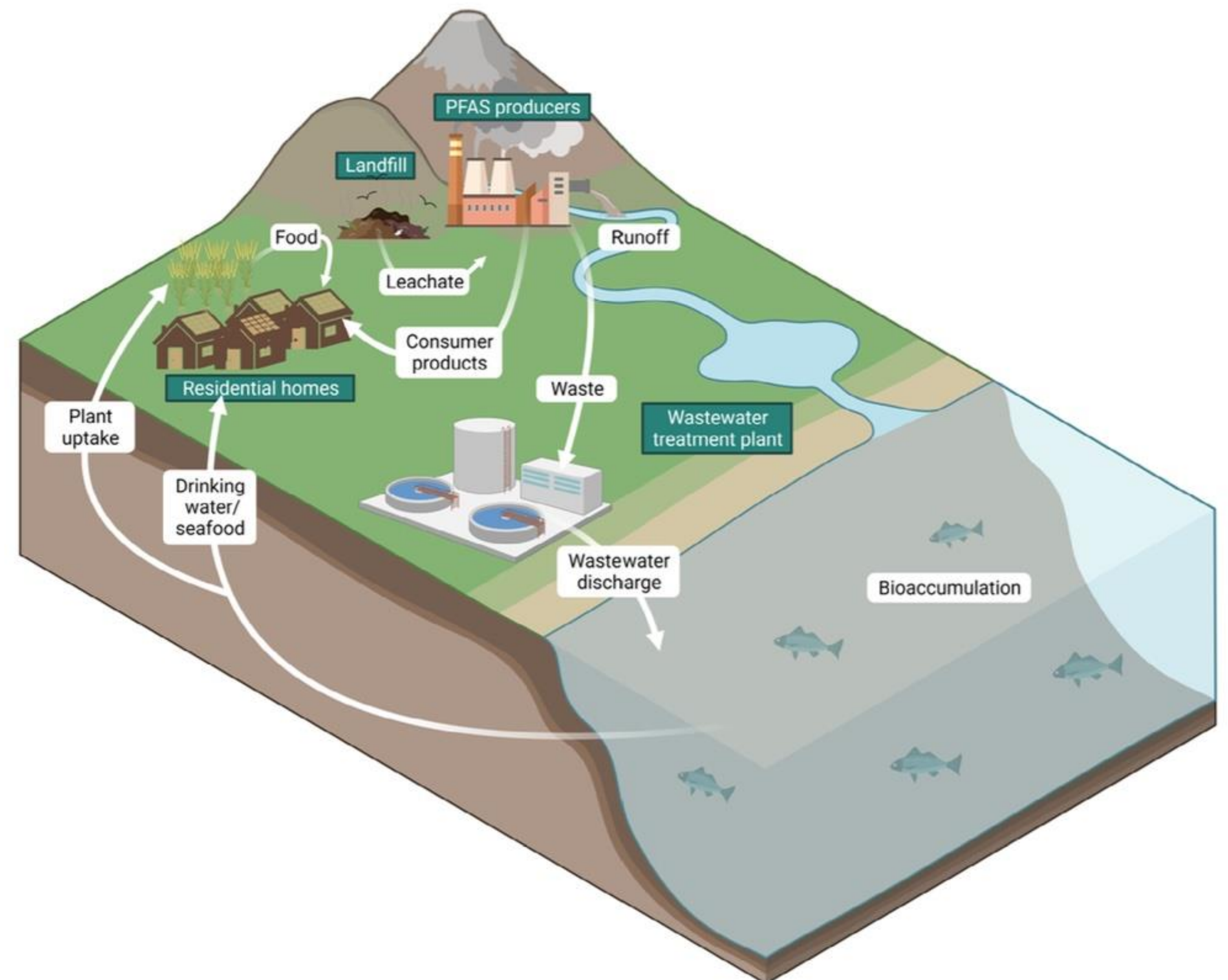


Contamination détectée
Contamination présumée

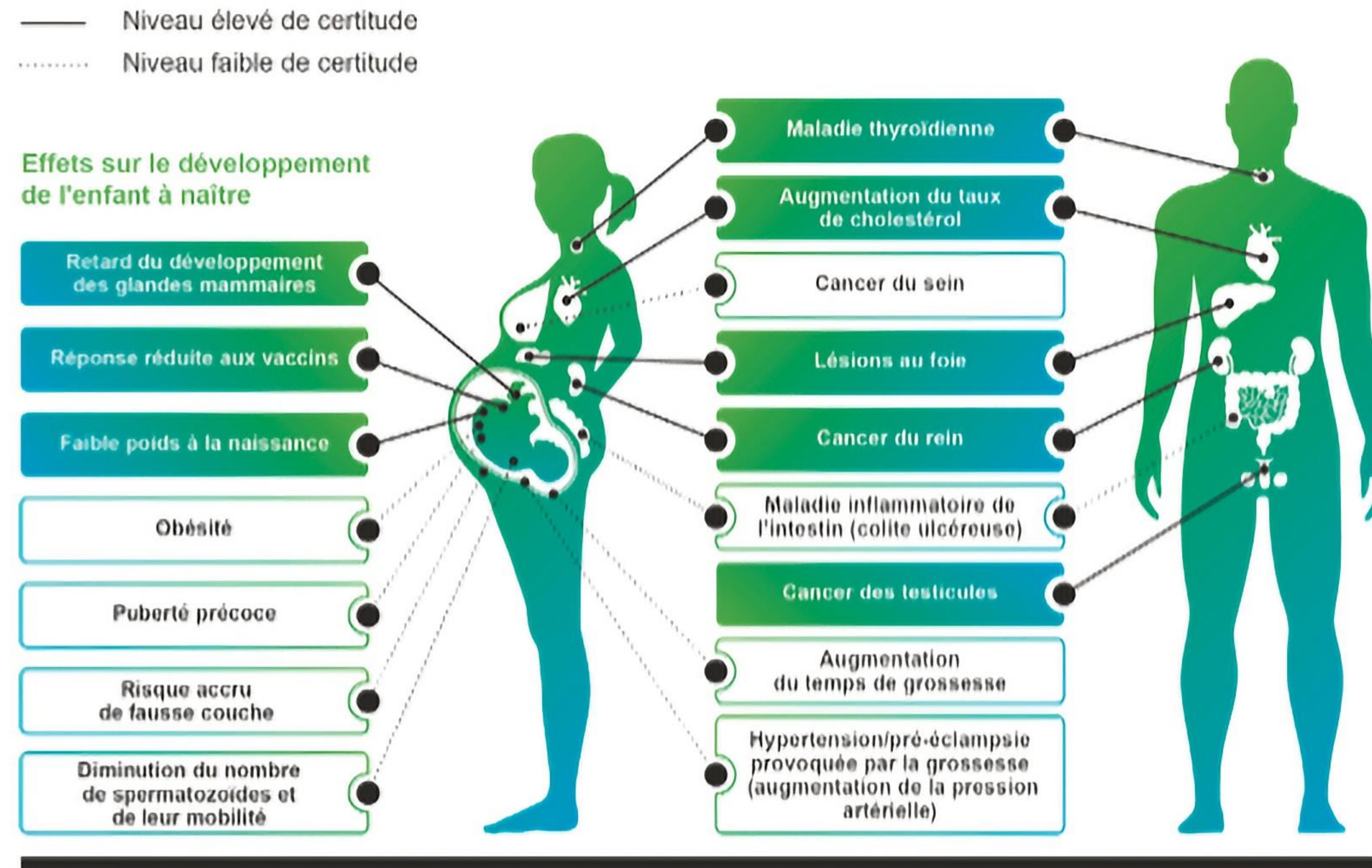
Utilisateurs de PFAS
Producteur de PFAS

- *20 PFAS producteurs
- *232 PFAS utilisateurs
- *23000 sites où une contamination a été détectée avec conc. > 10 ng/L
- *21500 sites présumés contaminés
- *>2300 "Hot spots" conc. > 100 ng/L

Schéma représentant le devenir des PFAS.



Les risques suspectés et avérés de certains PFAS sur la santé humaine

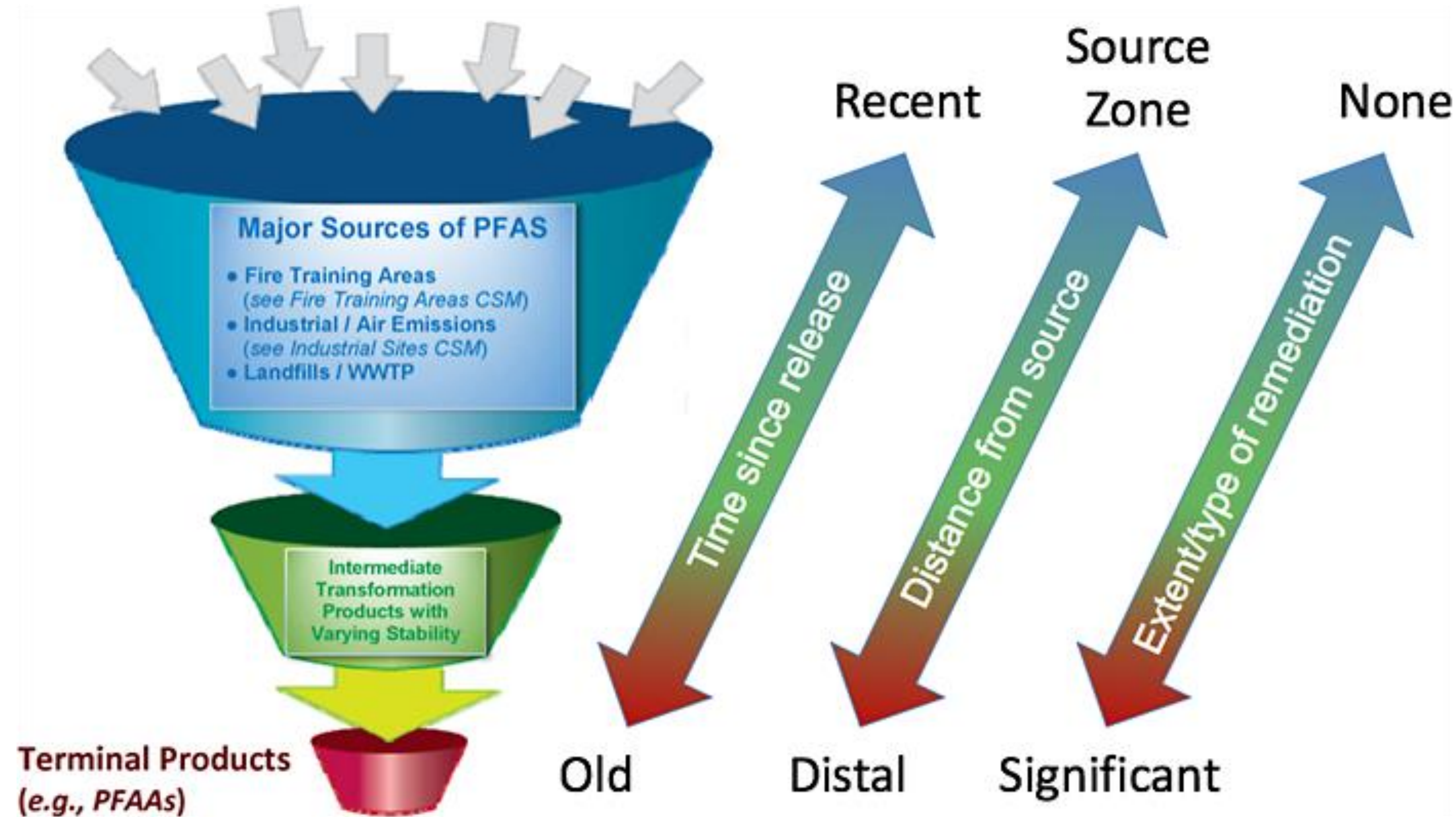


Il est très important de noter que ces risques ont été évalués :

- Pour un **très petit nombre de PFAS**, moins d'une dizaine, parmi lesquels figurent le PFOA et le PFOS désormais interdits,
- À partir de la **très faible quantité de données toxicologiques disponibles à ce jour**.

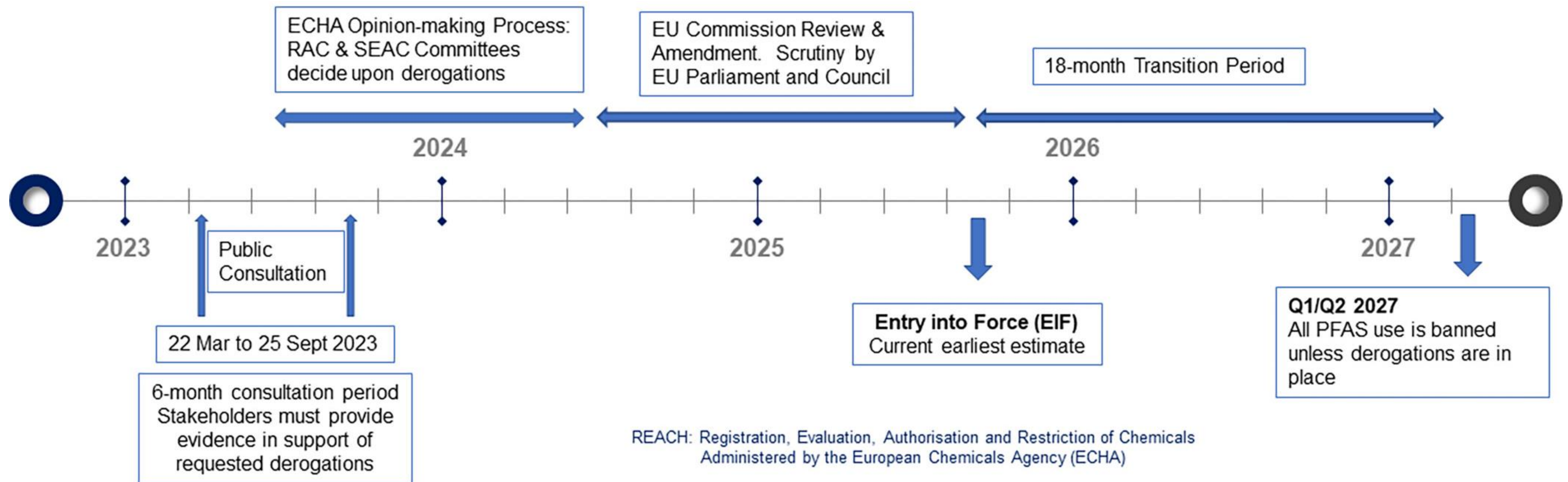
Les études concernant la toxicité des PFAS restent très insuffisantes et doivent être complétées par un effort de recherche conséquent.

Transformation des précurseurs aboutissant à la formation de PFAA



Comprendre les réglementations de l'UE concernant les PFAS

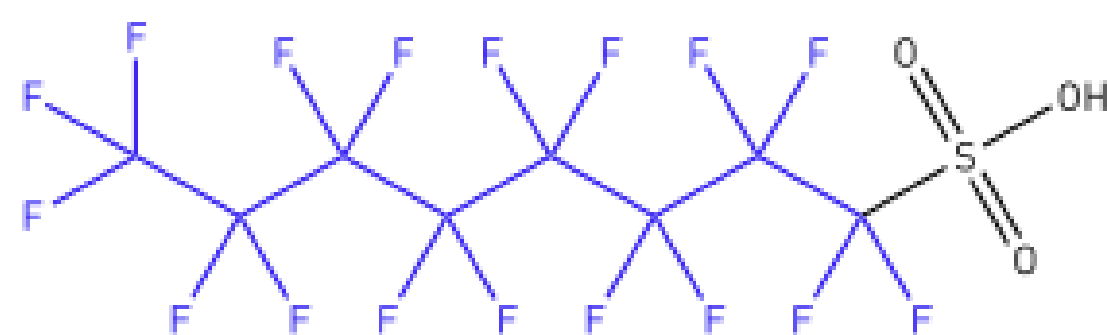
Règlementation européenne



OECD (2021 version) definition of PFAS: “PFASs (*per- and polyfluoroalkyl substances*) are defined as fluorinated substances that contain at least one fully fluorinated methyl or methylene carbon atom (without any H/Cl/Br/I atom attached to it), *i.e. with a few noted exceptions, any chemical with at least a perfluorinated methyl group ($-CF_3$) or a perfluorinated methylene group ($-CF_2-$) is a PFAS*”.

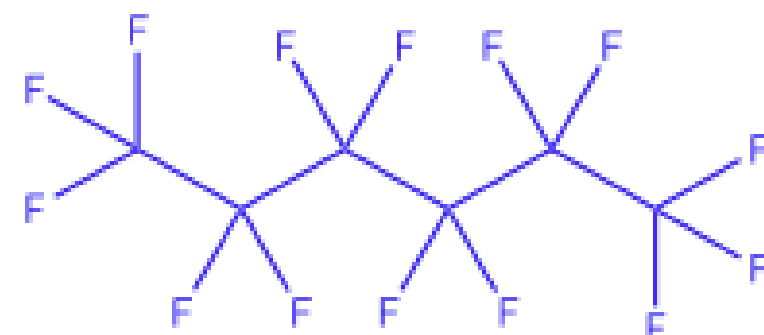
Exemples de PFAS

Examples of PFASs that already meet the definition by Buck et al. (2011)*



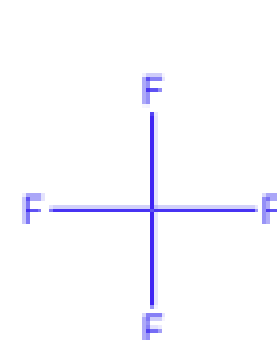
perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)

Chemical Abstracts Service Registry Number (CASRN) 1763-23-1



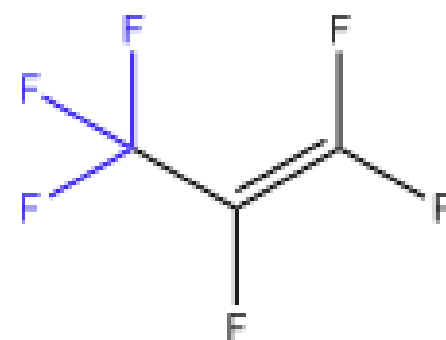
perfluorohexane

CASRN 355-42-0



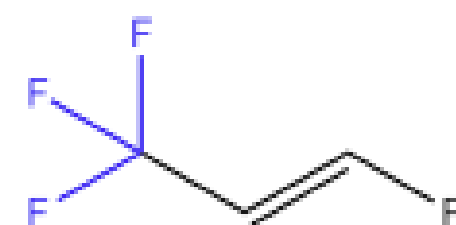
perfluoromethane

CASRN 75-73-0



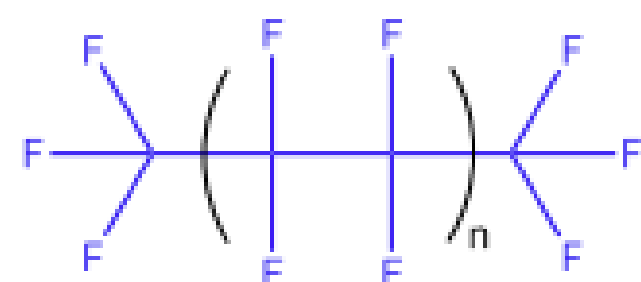
hexafluoropropylene (HFP)

CASRN 116-15-4



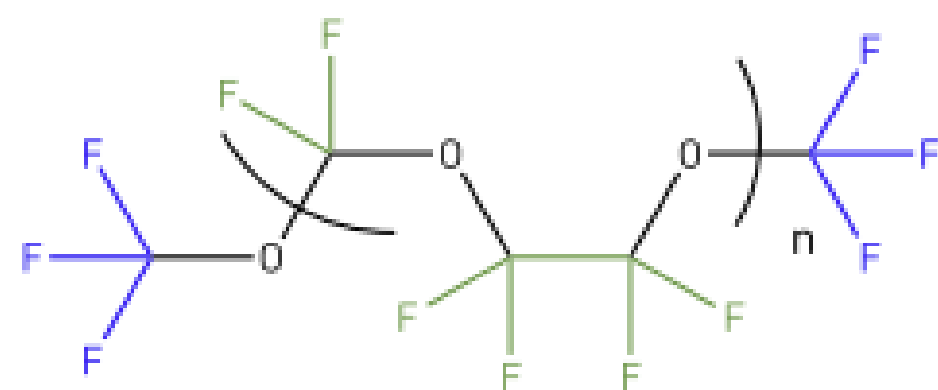
HFO-1234ze

CASRN 29118-24-9

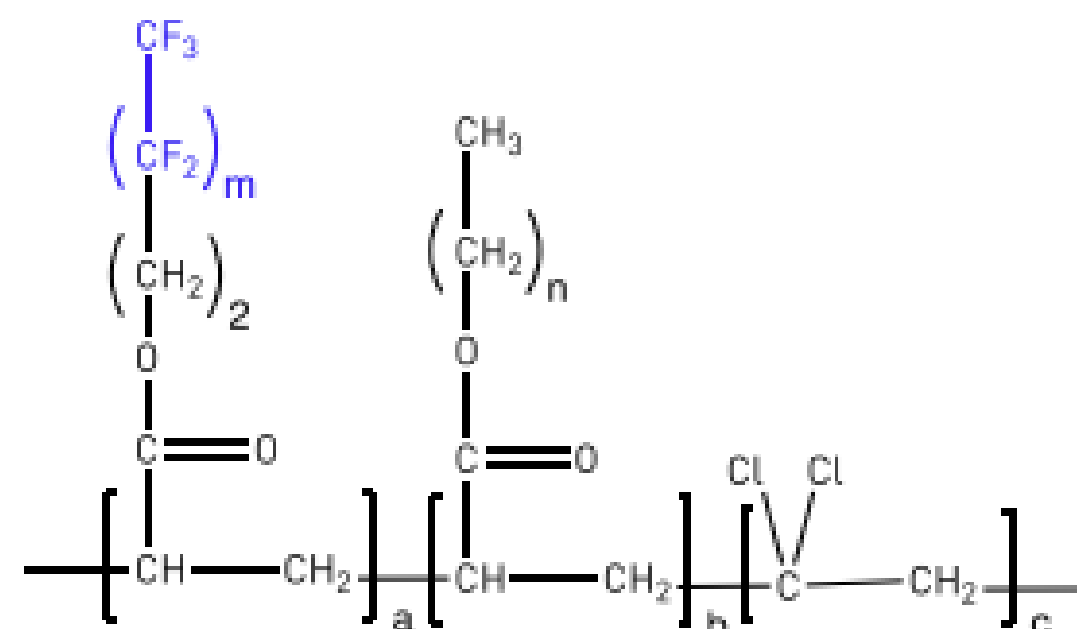


an example of
polytetrafluoroethylene (PTFE)

CASRN 9002-84-0

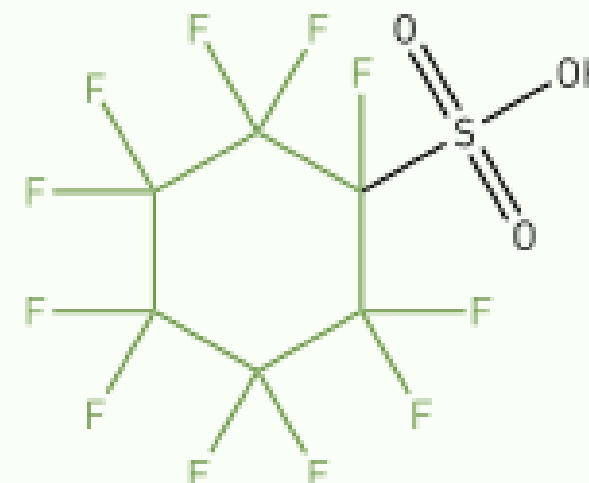


an example of perfluoropolyethers (PFPEs)



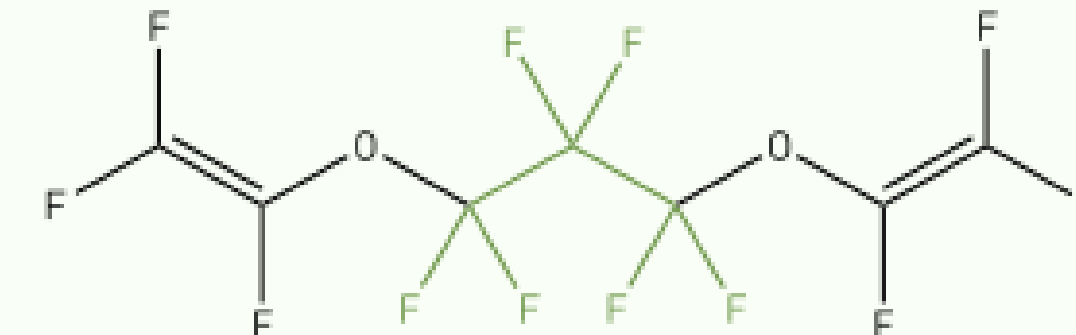
an example of side-chain
fluorinated polymers (SCFPs)

Examples of PFASs that are added under the new OECD definition*

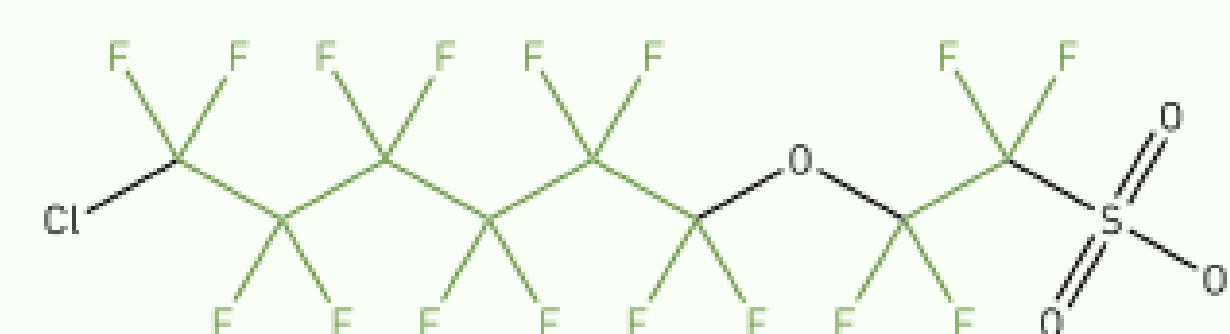


perfluorocyclohexanesulfonic acid

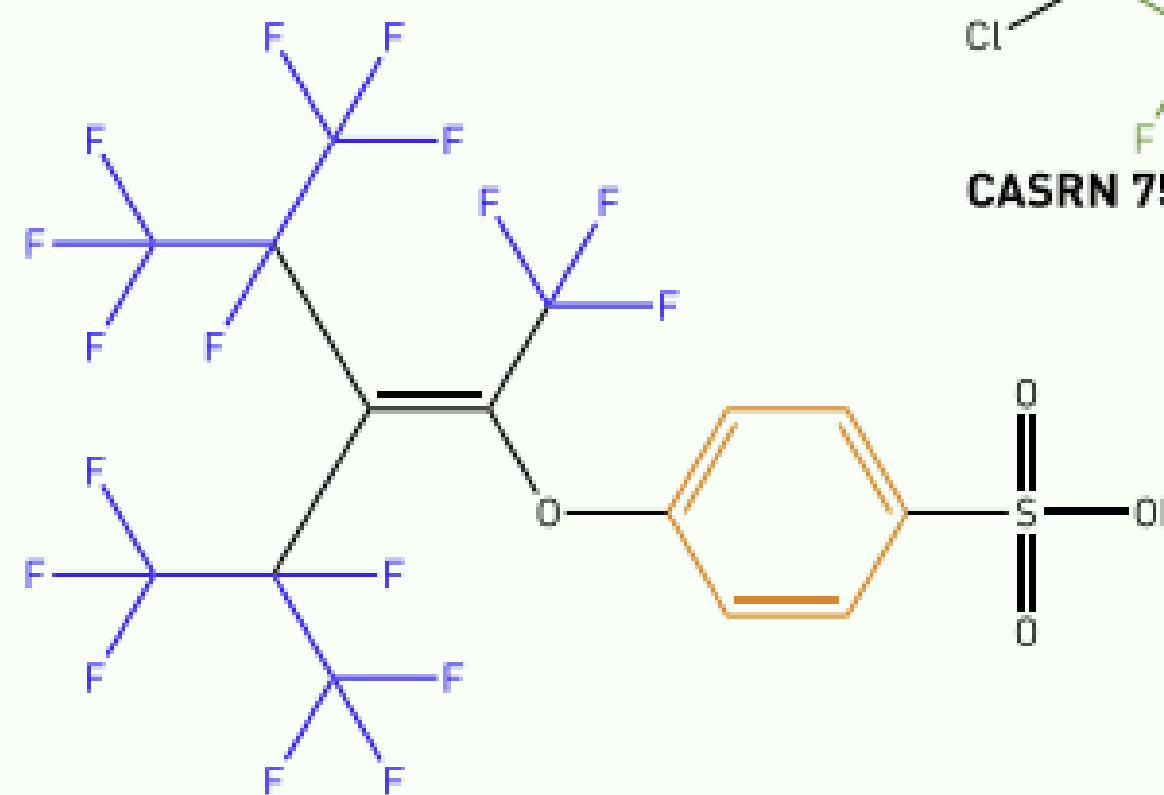
CASRN 2106-55-0



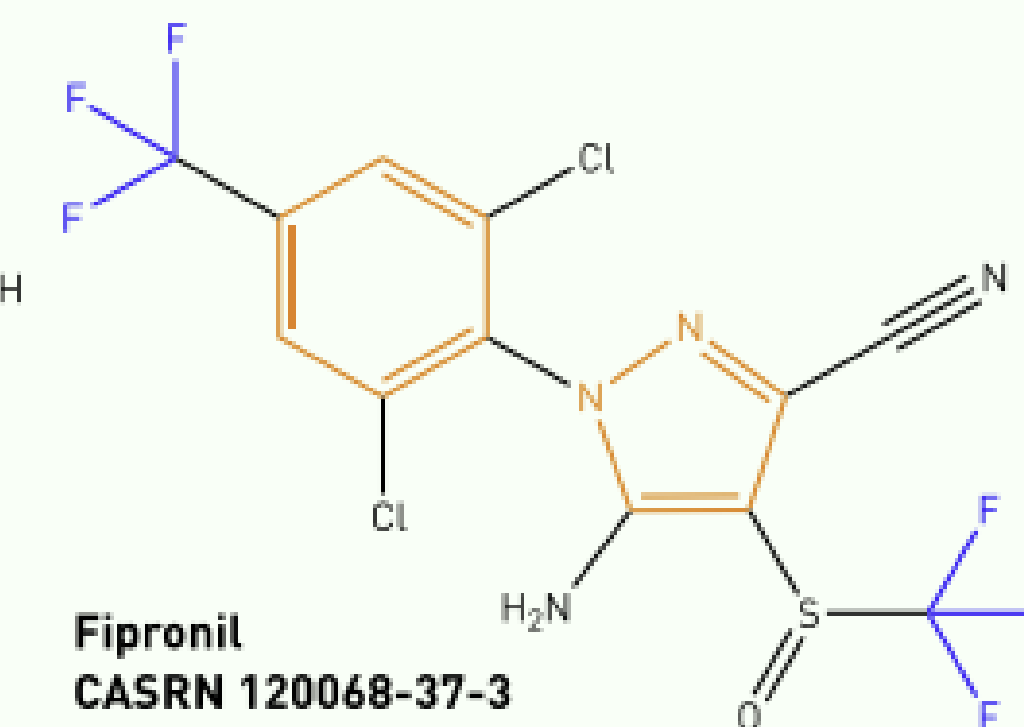
CASRN 13846-22-5



CASRN 756426-58-1

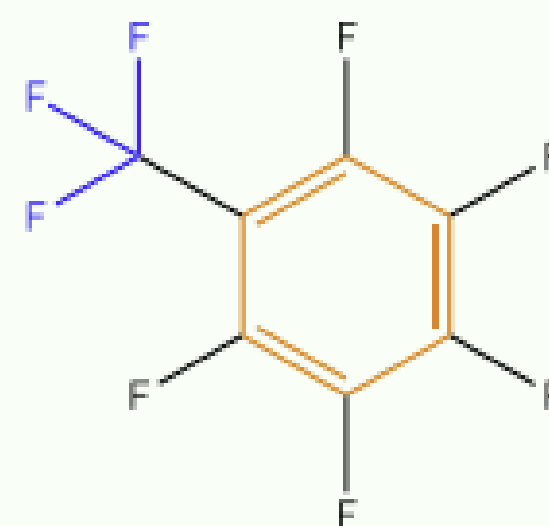


CASRN 271794-15-1



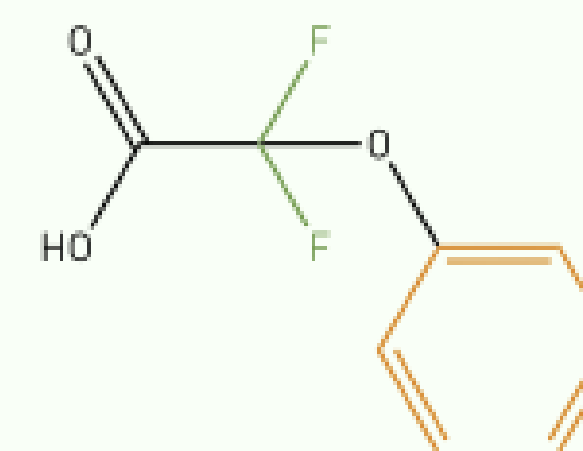
Fipronil

CASRN 120068-37-3

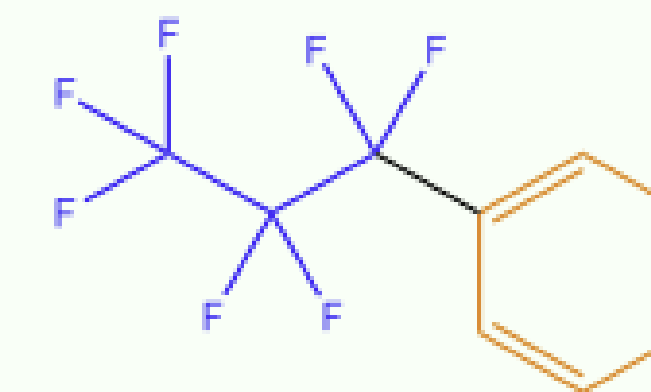


perfluorotoluene

CASRN 434-64-0



CASRN 24210-45-5



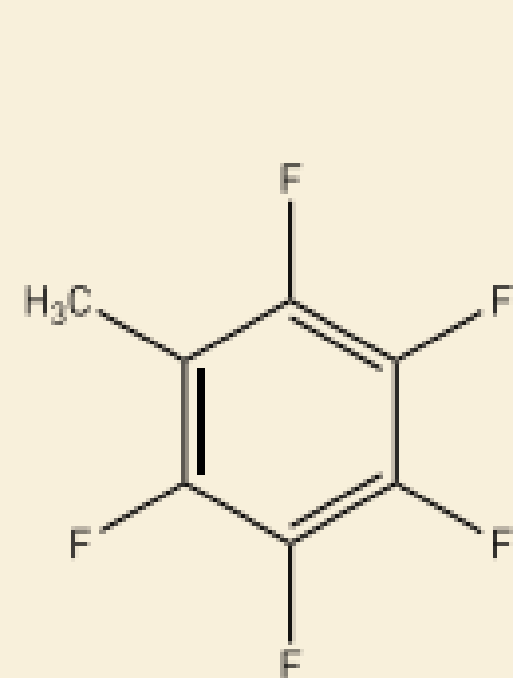
(perfluoropropyl)benzene

CASRN 378-98-3

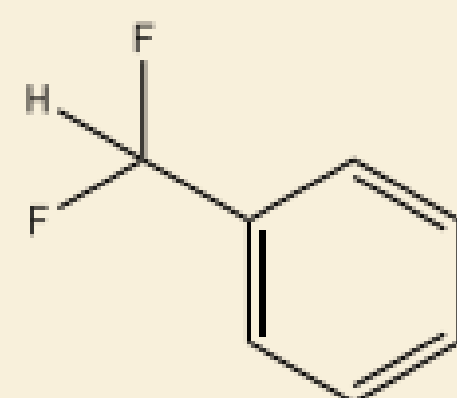
* **Blue** moieties = fully fluorinated alkyl moieties that already meet the definition by Buck et al. (2011); **green** moieties = fully fluorinated alkanediyl moieties that are added under the new OECD definition; **orange** moieties = aromatic rings

Exemples de PFAS

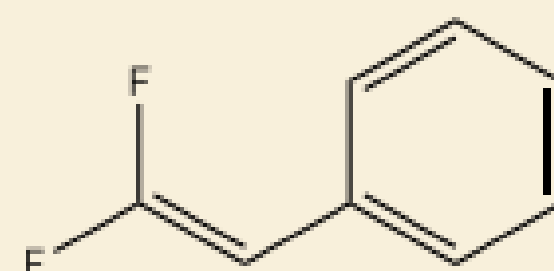
Examples of substances that are NOT PFASs



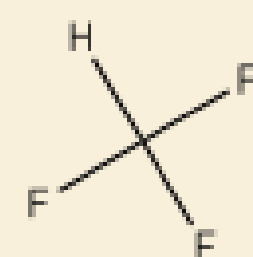
CASRN 771-56-2



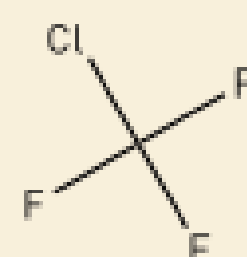
CASRN 455-31-2



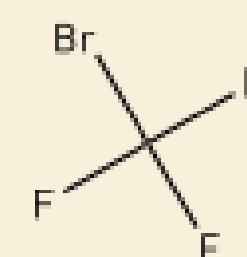
CASRN 405-42-5



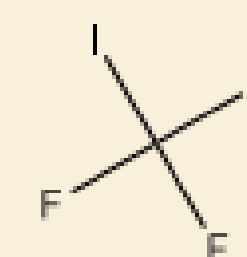
trifluoromethane
CASRN 75-46-7



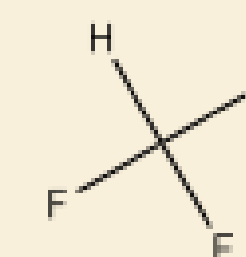
CASRN 75-72-9



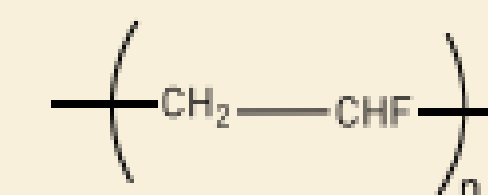
CASRN 75-63-8



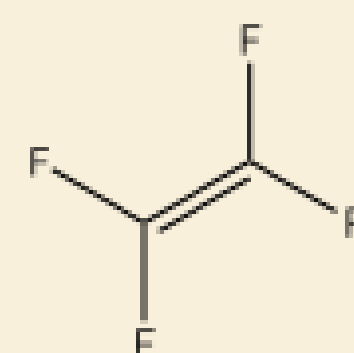
CASRN 2314-97-8



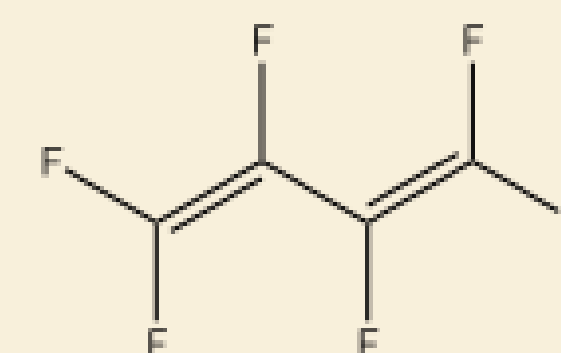
difluoromethane
CASRN 75-10-5



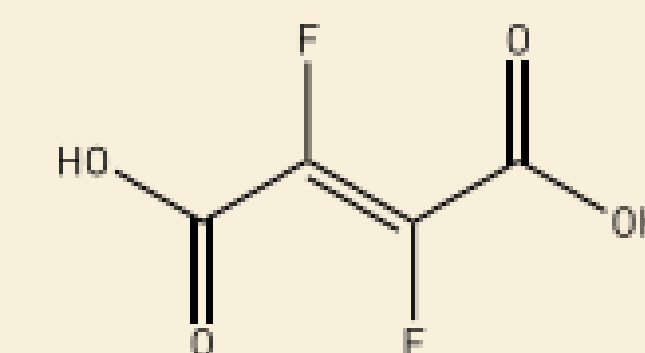
polyvinyl fluoride (PVF)



tetrafluoroethylene (TFE)
CASRN 116-14-3



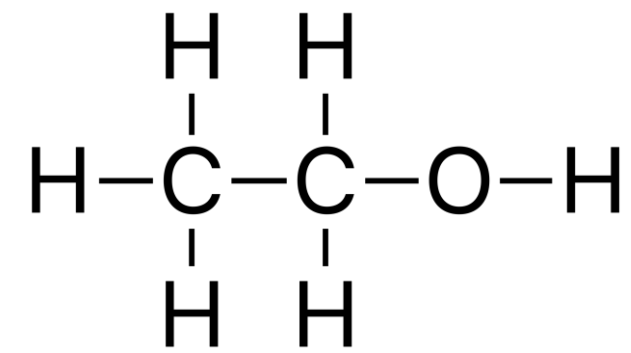
hexafluorobutadiene
CASRN 685-63-2



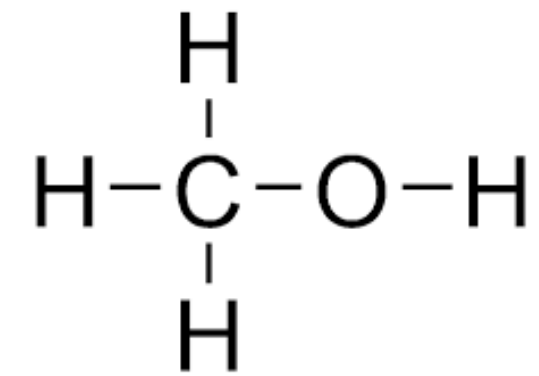
CASRN 685-64-3

Impossible de généraliser le risque d'un composé à partir d'une liaison chimique

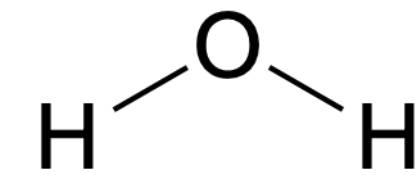
Ethanol



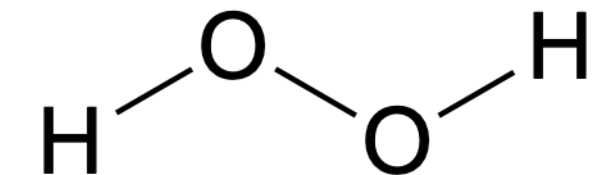
Methanol



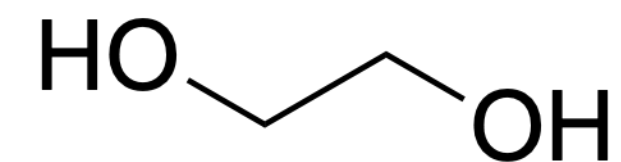
Eau



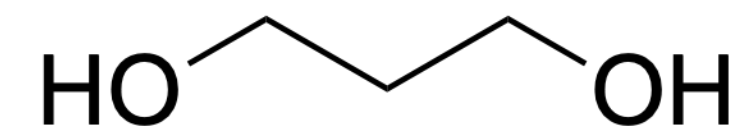
Peroxyde d'hydrogène



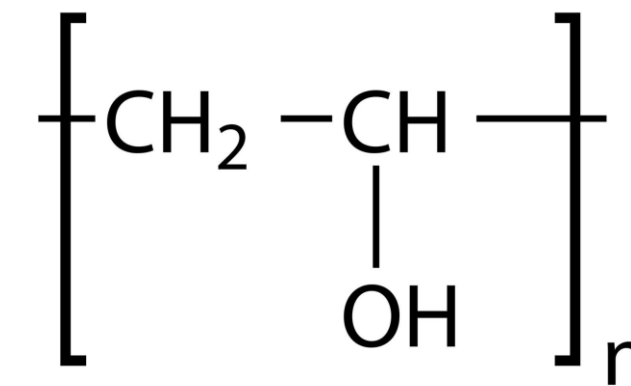
Ethyleneglycol



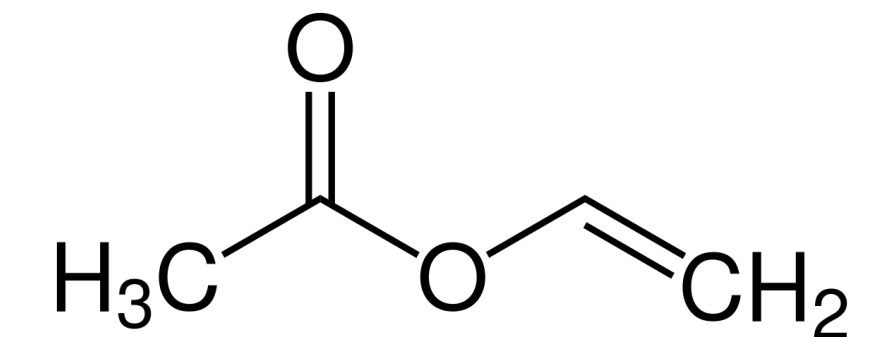
Propyleneglycol



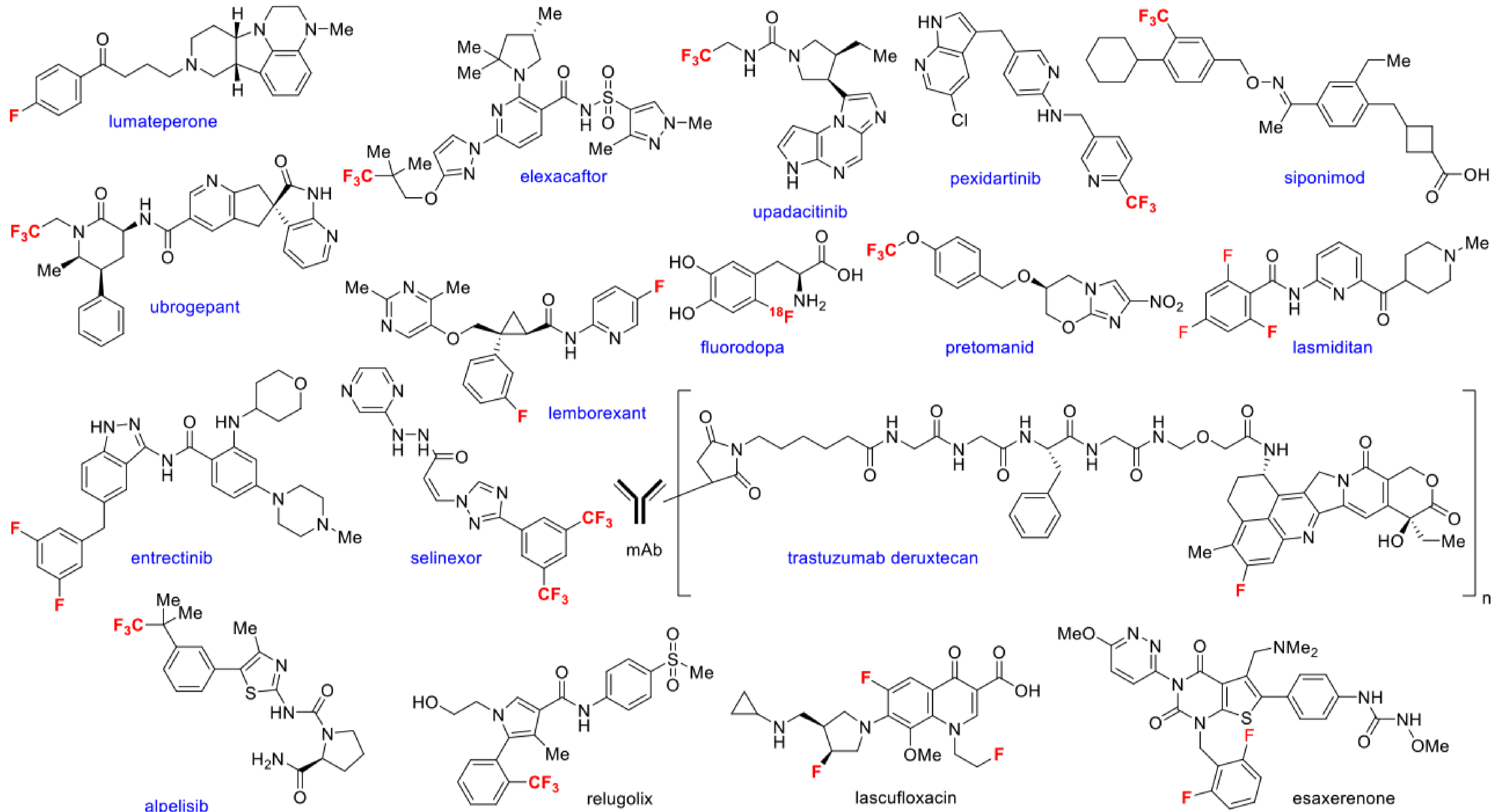
Polyvinyl Alcohol (PVA)



Vinyl Acetate



Composés fluorés utilisés dans les médicaments



Interdiction des PFAS : Impact sur les médicaments

Proposed restriction - Annex XVII entry PFASs (Restriction Option 2)

Column 1

Designation of the substance, of the group of substances or of the mixture

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) defined as:

Any substance that contains at least one fully fluorinated methyl (CF_3 -) or methylene ($-\text{CF}_2-$) carbon atom (without any H/Cl/Br/I attached to it).

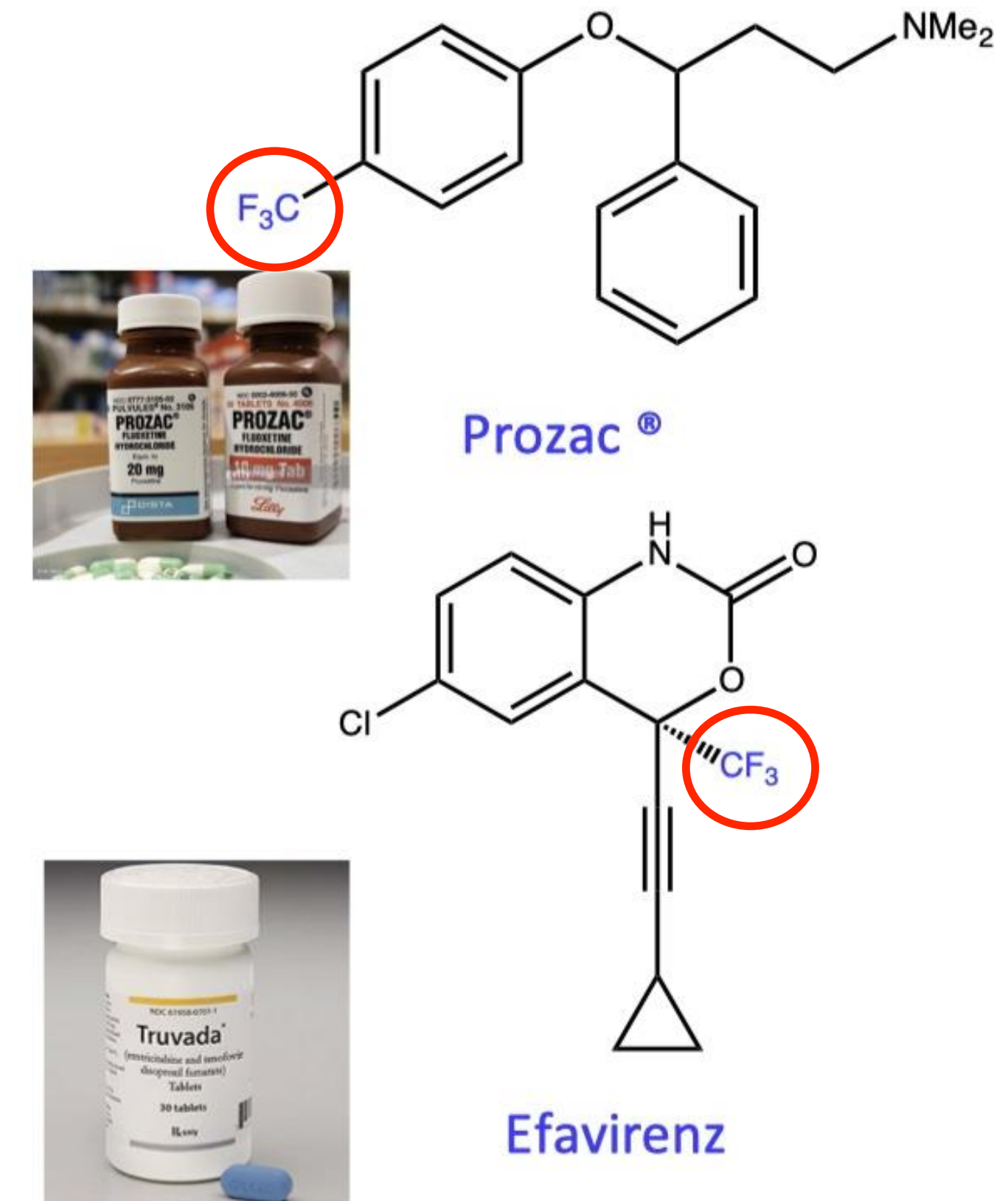
A substance that only contains the following structural elements is excluded from the scope of the restriction:

$\text{CF}_3\text{-X}$ or $\text{X-CF}_2\text{-X}'$,

where $\text{X} = -\text{OR}$ or $-\text{NRR}'$ and $\text{X}' = \text{methyl } (-\text{CH}_3)$, methylene ($-\text{CH}_2-$), an aromatic group, a carbonyl group ($-\text{C}(\text{O})-$), $-\text{OR}''$, $-\text{SR}''$ or $-\text{NR}''\text{R}'''$;

and where $\text{R/R}'/\text{R}''/\text{R}'''$ is a hydrogen ($-\text{H}$), methyl ($-\text{CH}_3$), methylene ($-\text{CH}_2-$), an aromatic group or a carbonyl group ($-\text{C}(\text{O})-$).

4. By way of derogation, paragraphs 1 and 2 shall not apply to
 - a. active substances in biocidal products within the scope of Regulation (EU) 528/2012
 - b. active substances in plant protection products within the scope of Regulation (EC) 1107/2009
 - c. **active substances in human and veterinary medicinal products** within the scope of Regulation (EC) No 726/2004, Regulation (EU) 2019/6 and Directive 2001/83/EC



- Les AIs/APIs sont explicitement considérés comme hors du champ d'application.
- Mais les intermédiaires et métabolites correspondants semblent être inclus dans le champ d'application.

Où en est la réglementation



La [convention de Stockholm](#) (2001), accord international visant à **encadrer certains polluants organiques persistants**, réglemente plusieurs composés de la famille des PFAS au niveau mondial.

La production et l'utilisation du **PFOS** sont restreintes depuis 2009 à une liste d'usages spécifiques.

Le **PFOA** est interdit à l'import, l'export, à la production et à l'utilisation, sauf exemptions particulières, depuis 2020.

Dossier déposé par les Pays-Bas, l'Allemagne, la Norvège, le Danemark et la Suède via le [règlement REACH 1907/2006](#), est [en cours d'examen](#) par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA).

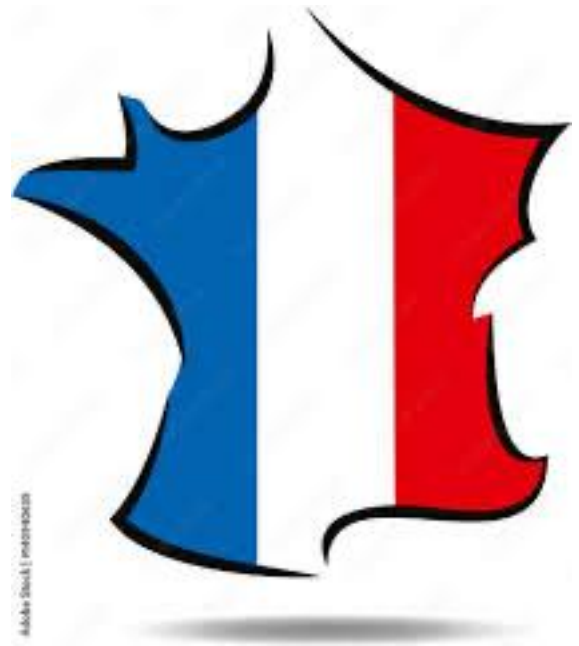
Champ de la restriction : tous les PFAS, y compris les polymères.

Proposition :

- Si des alternatives sont connues et faciles à mettre en œuvre : pas de période de transition supplémentaire, soit **18 mois**.
- S'il n'existe aucune alternative techniquement ou économiquement réalisable mais que des alternatives possibles ont été identifiées et sont en phase de développement : le consortium a proposé 5 ans supplémentaires, soit **6,5 ans** au total.
- En l'absence totale d'alternative techniquement ou économiquement réalisable et pour les usages nécessitant une autorisation ou une certification : le consortium a proposé 12 ans supplémentaires, soit **13,5 ans** au total.
- Pour quelques rares usages, le consortium a proposé une dérogation d'une durée illimitée.

Où en est la réglementation

Plan d'action 2023-2027 ministériel sur les PFAS



- Axe 1 : acquérir des connaissances sur les méthodes de mesures des émissions, sur la dissémination et les expositions
- Axe 2 : améliorer, renforcer la surveillance et mobiliser les données qui en sont issues pour agir
- Axe 3 : réduire les risques liés à l'exposition aux PFAS
- Axe 4 : innover en associant les acteurs économiques et soutenir la recherche
- Axe 5 : informer pour mieux agir

L'Assemblée nationale a définitivement adopté, 20 février 2025, une proposition de loi interdisant dès 2026 les "substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées"

- cosmétiques,
- produits de fart pour les skis,
- produits d'habillement,
- chaussures,
- agents imperméabilisants de produits textiles d'habillement.

Discussions