



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,  
de l'énergie et de la communication DETEC

**Office fédéral de l'environnement OFEV**  
Division protection de l'air et produits chimiques

---

# Utilisation des farts de ski fluorés en Suisse

---

Auteurs : Harold Bouchex-Bellomie, Andreas Buser, Urs von Arx, Henry Wöhmschimmel (Section produits chimiques industriels)

OFEV, Janvier 2025



## Résumés

Les farts de ski fluorés ont été introduits sur le marché en 1987. Leur utilisation a entraîné des émissions dans l'environnement de substances fluorées persistantes, bioaccumulatives et toxiques (substances per- et polyfluoroalkylées, PFAS). Bien que des farts fluorés contenant des PFAS moins toxiques aient été développés depuis, des inquiétudes subsistent en raison de leur extrême persistance dans l'environnement et de leur grande mobilité dans les sols et les eaux.

Fin 2019, il avait été annoncé que l'utilisation de farts de ski fluorés allait être interdite dans toutes les épreuves de la Fédération internationale de ski (FIS) et dans les manifestations sportives de l'Union internationale de biathlon (IBU) et cette interdiction est effective depuis le début de la saison 2023/2024.

En raison de ces exigences, plusieurs grands fabricants et fournisseurs de farts de ski ont décidé, en application du contrôle autonome que leur impose la législation suisse sur les produits chimiques, de ne proposer plus que des produits sans fluor. Parallèlement à la législation européenne, de nouvelles restrictions sont en cours d'élaboration dans la législation sur les produits chimiques en Suisse, qui concerneront également les farts de ski contenant des PFAS. À titre d'exemple, un projet de réglementation de l'acide perfluorohexanoïque et de ses précurseurs, ainsi que des produits contenant des microplastiques tels que les poudres de polytétrafluoroéthylène, a été mis en consultation en décembre 2024.

Le présent rapport contient, en plus d'un aperçu des bases légales et des mesures volontaires, des informations approfondies sur l'impact des sports d'hiver de loisir, sur la consommation de farts de ski ainsi que sur leur apport et la présence de leurs composants dans l'environnement. Ce rapport s'appuie pour cela sur des données issues de la littérature récente ainsi que sur les réponses à une enquête menée auprès des acteurs du marché suisse des farts de ski. Certaines recommandations sont aussi énoncées, notamment à l'intention des fabricants de farts de ski et des amateurs de sports d'hiver.

Fluorhaltige Skiwachse wurden im Jahr 1987 auf dem Markt eingeführt. Mit der Verwendung solcher Wachse gingen Umwelteinträge von langlebigen, bioakkumulierenden und toxischen Fluorverbindungen (per- und polyfluorierten Alkylverbindungen, PFAS) einher. Obwohl seitdem Fluorwachse mit weniger toxischen PFAS entwickelt wurden, bestehen auch hinsichtlich der heute eingesetzten Alternativen Bedenken aufgrund deren extremer Langlebigkeit in der Umwelt und hoher Mobilität in Böden und Gewässern.

Der internationale Skiverband FIS kündigte deshalb Ende 2019 ein Verbot der Verwendung fluorhaltiger Skiwachse an, das seit der Saison 2023/2024 bei allen FIS-Rennen und Veranstaltungen der Internationalen Biathlon Union gilt. Aufgrund der Vorgaben der FIS haben namhafte Anbieter von Skiwachsen ihre Pflicht zur Selbstkontrolle, die ihnen das Schweizer Chemikalienrecht auferlegt, wahrgenommen und ihr ganzes Sortiment auf fluorfreie Wachse umgestellt. Im Einklang mit in der EU verabschiedeten Erlassen sind in der Schweiz weitere chemikalienrechtliche Beschränkungen in Vorbereitung, von denen auch PFAS enthaltende Skiwachse betroffen sind. So wurde im Dezember 2024 ein Regulierungsvorschlag zur Perfluorhexansäure und ihrer Vorläuferverbindungen und zu Mikrokunststoffe wie Polytetrafluorethylen enthaltenden Produkte publiziert.

Der vorliegende Bericht enthält neben einem Überblick über die rechtlichen Grundlagen und freiwilligen Massnahmen auch vertiefte Informationen zur Relevanz des Freizeit-Wintersports, den Verbrauch von Skiwachsen sowie deren Eintrag und Vorkommen in der Umwelt. Er stützt sich dabei auf Daten aus der jüngeren Literatur sowie auf Rückmeldungen zu einer Umfrage unter Schweizer Akteuren. Daraus ergeben sich Empfehlungen unter anderem an Herstellerinnen von Skiwachsen sowie an Freizeitsportlerinnen und -sportler.

Le scioline contenenti fluoro sono state introdotte sul mercato nel 1987. L'uso di queste scioline ha comportato l'immissione nell'ambiente di composti del fluoro persistenti, bioaccumulabili e tossici (sostanze per- e polifluoroalchiliche, PFAS). Sebbene da allora siano state sviluppate scioline fluorurate con PFAS meno tossici, le alternative utilizzate attualmente destano ancora preoccupazione a causa della loro estrema persistenza nell'ambiente e dell'elevata mobilità nel suolo e nelle acque.

Alla fine del 2019 la Federazione internazionale di sci (FIS) ha quindi annunciato il divieto di utilizzare scioline contenenti fluoro, che dalla stagione 2023/2024 si applica a tutte le gare FIS e agli eventi dell'Unione Internazionale di biathlon. In seguito alle prescrizioni della FIS, noti fornitori di scioline hanno adempiuto l'obbligo di controllo autonomo imposto loro dalla legislazione svizzera in materia di prodotti chimici. In linea con le normative emanate dall'UE, in Svizzera si stanno preparando ulteriori restrizioni relative ai prodotti chimici, che riguardano anche le scioline contenenti PFAS. Nel dicembre 2024 è stata ad esempio pubblicata una proposta di regolamentazione concernente l'acido perfluoroesanoico e i suoi precursori e le microplastiche contenenti politetrafluoroetilene.

Oltre a una panoramica sulle basi legali e sulle misure volontarie, il presente rapporto contiene anche informazioni approfondite sulla rilevanza degli sport invernali ricreativi, sul consumo di scioline e sulla loro immissione e presenza nell'ambiente. Si basa sui dati della letteratura più recente e sui riscontri di un'indagine condotta tra gli operatori svizzeri del settore. Ne risultano raccomandazioni in particolare per i produttori di scioline e per gli sportivi amatoriali.

Fluorinated ski waxes were introduced to the market in 1987. The use of such waxes has been associated with environmental releases of persistent, bioaccumulative and toxic organofluorine compounds (per- and polyfluorinated alkyl substances, PFASs). Although fluorinated waxes with less toxic PFASs have since been developed, concerns remain about the alternatives used today due to their extreme persistence in the environment and high mobility in soil and water.

In response, the International Ski Federation (FIS) announced a ban on the use of fluorinated ski waxes at the end of 2019, which has been in force at all FIS races and International Biathlon Union events since the 2023/2024 season. As a result of the FIS requirements, leading ski wax suppliers have fulfilled their obligation to self-regulate, which is imposed by the Swiss chemicals legislation, and have switched their entire product range to fluorine-free waxes. In line with legislation recently adopted in the EU, further restrictions under chemicals legislation are in preparation in Switzerland, which will also affect ski waxes containing PFASs. For example, a regulatory proposal on perfluorohexanoic acid and its precursors as well as on products containing microplastics such as polytetrafluoroethylene was published in December 2024.

In addition to an overview of the legal requirements and voluntary measures, this report also contains in-depth information on the relevance of recreational winter sports, the consumption of ski wax and its entry and occurrence in the environment. It is based on data from recent literature and on feedback from a survey of Swiss stakeholders. The report concludes with recommendations for ski wax manufacturers and recreational athletes, among others.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Obligations selon la législation sur les produits chimiques</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Normes environnementales volontaires</b> .....	<b>6</b>
	3.1 L'écolabel Nordic Swan.....	6
	3.2 Interdiction d'utilisation de la FIS.....	6
	3.3 Le concept de Swiss-Ski .....	6
<b>4</b>	<b>Impact des sports d'hiver de loisir</b> .....	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Types de farts de ski et consommation</b> .....	<b>7</b>
	5.1 Évolution de la consommation.....	7
	5.2 Chiffre d'affaires et distribution .....	8
	5.3 Consommation et utilisation .....	8
	5.4 Composition des farts de ski .....	8
	5.4.1 Farts contenant du fluor.....	8
	5.4.2 Farts sans fluor.....	11
<b>6</b>	<b>Émissions dans l'environnement</b> .....	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Présence dans l'environnement</b> .....	<b>11</b>
<b>8</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>12</b>
<b>9</b>	<b>Abréviations utilisées</b> .....	<b>13</b>
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b> .....	<b>14</b>
	<b>Annexe: Présence dans l'environnement de PFAS provenant des farts de ski (étude bibliographique)</b> .....	<b>16</b>

## 1 Introduction

Les farts de skis ont pour objectif de réduire la friction entre le ski et la neige. Le fart fluoré réduit particulièrement la mouillabilité de la semelle. Des essais en plein air avec des skieurs de fond ont montré que les performances de glisse augmentaient de 4 % après l'application d'un fart fluoré [1]. Une partie des substances per- et polyfluoroalkylés (PFAS), très persistantes, contenues dans les farts se retrouve ensuite dans l'environnement par abrasion : l'expérience mentionnée a ainsi permis de constater qu'après avoir parcouru une distance d'environ 30 km, la friction de la semelle du ski augmentait de manière significative, en même temps que la teneur en fluor de la semelle diminuait.

Fig. 1 : Gouttes d'eau perlant sur une semelle traitée avec un fart fluoré [2].



La consommation de PFAS dans les farts de ski dans l'Espace Économique Européen (EEE) est estimée, dans un rapport commandé par l'Agence norvégienne pour l'environnement, à 1,6 tonne par an [3]. En comparaison à la consommation annuelle estimée entre 24 000 et 73 000 tonnes de PFAS sous forme de polymères à chaînes latérales fluorées pour le traitement des textiles ou à la consommation de 100 à 560 tonnes de tensioactifs fluorés dans les émulseurs d'extinction des feux de liquides inflammables [4], les farts de ski représentent en Europe une application de niche des PFAS. Néanmoins, en raison de leur extrême persistance dans l'environnement, leur utilisation devrait être limitée à des applications considérées comme indispensables pour la société. Les utilisations qui entraînent des rejets directs dans l'environnement doivent faire l'objet d'un examen particulièrement critique. C'est dans cette optique que s'inscrivent les projets de restriction de l'utilisation des PFAS dans la législation sur les produits chimiques de l'UE et de la Suisse.

Les développements qui suivent résument les connaissances sur l'utilisation des farts de ski en Suisse. Ils s'appuient sur les données de la littérature scientifique et sur une enquête menée auprès des acteurs suisses, dont les fabricants, les grands importateurs de farts de ski, certains commerçants d'articles de sport, ainsi que la fédération Swiss-Ski (qui regroupe onze disciplines de sports d'hiver) et les organisateurs du marathon de ski de l'Engadine (la deuxième plus grande course de ski de fond au monde avec quelque 14 000 participants après la course *Vasaloppet* en Suède). Ce rapport ne traite pas de l'exposition aux PFAS par inhalation des professionnels du fartage de skis lors de l'application des produits fluorés, telle qu'elle est documentée dans la littérature scientifique [34], [35]. En ce qui concerne l'exposition des sportifs amateurs lors du fartage de leurs skis, nous renvoyons à une fiche d'information de l'Office fédéral de la santé publique (OFSP), qui recommande l'utilisation de produits sans fluor [36].

## 2 Obligations selon la législation sur les produits chimiques

Conformément aux dispositions de l'ordonnance sur les produits chimiques ([OChim, RS 813.11](#)), un fabricant de farts de ski doit s'assurer que tout produit qu'il met sur le marché ne met pas en danger la santé humaine ou l'environnement. Dans le cadre du contrôle autonome, un importateur doit quant-à-lui s'assurer que le fabricant étranger a respecté cette obligation.

Les farts de ski sont des préparations au sens de la législation sur les produits chimiques et doivent être classés, emballés et étiquetés conformément aux dispositions de l'OChim. Dans certains cas, une fiche de données de sécurité doit être établie à l'intention de l'utilisateur professionnel (art. 19-20) et certaines données concernant le fart de ski doivent être communiquées à l'organe de réception des notifications (art. 48).

Aussi, un fabricant doit s'assurer que les farts de ski ne contiennent pas de substances réglementées dans l'Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques ([ORRChim, RS 814.81](#)). Celle-ci contient actuellement les restrictions suivantes :

- Depuis le 1er juin 2021, les farts de ski ne doivent pas contenir plus de 0,025 ppm d'acide perfluorooctanoïque (PFOA) et 1 ppm de précurseurs de PFOA.
- Depuis le 1er octobre 2022, les farts de ski ne doivent pas contenir d'acides perfluoro-

carboxyliques à longue chaîne (C<sub>9</sub>-C<sub>14</sub>-PFCA) et leurs précurseurs ; des teneurs maximales de 0,025 ppm pour la somme des PFCA réglementés ou de 0,26 ppm pour la somme de leurs précurseurs sont tolérées.

- Les farts de ski ne doivent pas non plus contenir de composés organiques fluorés ayant une pression de vapeur  $\geq 0,1$  mbar (à 20 °C) ou un point d'ébullition  $\leq 240$  °C (conditions normales) et dont la durée de vie moyenne dans l'atmosphère est de deux ans ou plus.

Déjà en 2009, les parties à la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP), dont fait partie la Suisse, ont décidé de mettre fin à la production et à l'utilisation de PFOS et de leurs dérivés au niveau mondial. Les principaux fabricants de farts de skis affirment que les PFOS et leurs dérivés n'ont jamais été ajoutés intentionnellement dans les farts [18]. Dans le cadre de la mise à jour régulière de la Convention de Stockholm, il est prévu qu'en 2025, l'interdiction actuelle du PFOA (C<sub>8</sub>-PFCA) et de ses précurseurs soit étendue aux acides perfluorocarboxyliques ayant une longueur de chaîne allant jusqu'à 21 atomes de carbone (C<sub>9</sub>- C<sub>21</sub>-PFCA).

Aussi, les fabricants de farts de ski devraient tenir compte des restrictions de l'UE énoncées ci-dessous, qui ont été récemment adoptées. En décembre 2024, le Conseil fédéral a mis en consultation un projet de modification de l'ORRChim qui prévoit des restrictions similaires en Suisse :

- La mise sur le marché de préparations destinées au grand public et contenant de l'acide perfluorohexanoïque (PFHxA) et ses précurseurs sera interdite dans l'UE à partir du 10 octobre 2026. Les farts de ski basés sur la technologie C<sub>6</sub> sont notamment concernés.
- La première mise sur le marché de préparations contenant des microplastiques – à l'exception des microplastiques biodégradables – est interdite dans l'UE depuis le 17 octobre 2023. Sont notamment concernés les farts de ski contenant des polymères fluorés en poudre dans une matrice de cire.

De plus, l'UE prévoit à moyen terme de nouvelles mesures de restriction afin d'éliminer progressive de tous les PFAS dans toutes les applications, à moins qu'elles ne soient indispensables pour la société.

### 3 Normes environnementales volontaires

Parmi les normes environnementales volontaires qui vont au-delà des exigences légales, on peut citer, dans le domaine des farts de ski, l'écolabel Nordic Swan (Cygne blanc) ainsi que l'interdiction d'utiliser des farts fluorés édictée par la Fédération internationale de ski (FIS).

#### 3.1 L'écolabel Nordic Swan

Les labels de qualité tels que l'écolabel européen, l'écolabel allemand ("*Blauer Engel*"), l'écolabel autrichien ou l'écolabel nordique ("Nordic Swan") informent les consommateurs de façon fiable sur la compatibilité environnementale des produits certifiés. Selon nos informations, seul l'écolabel Nordic Swan présente des critères pour les farts de ski et ceux-ci ont été adoptés par le Conseil nordique des ministres [5]. Selon ces critères, un fart ne doit pas contenir de PFAS et les composés organiques doivent, entre autres, être facilement biodégradables selon les tests pertinents de l'OCDE 301 A-F ou OCDE 310 ou être au moins intrinsèquement biodégradables selon le test 302 A-C. En outre, les critères d'attribution exigent qu'un fart portant ce label "Nordic Swan" possède de bonnes propriétés de glisse, soit résistant aux salissures et à l'abrasion et présente des performances équivalentes à celles d'un produit fluoré équivalent.

Jusqu'à présent, seul un produit d'un fabricant allemand a obtenu la certification de l'écolabel Nordic Swan. Selon le fabricant, il s'agit d'un fart à chaud pour tous les types de neige et toutes les températures. Ce fart est également disponible en Suisse par l'intermédiaire d'un importateur général.

#### 3.2 Interdiction d'utilisation de la FIS

Fin 2019, la direction de la FIS a annoncé qu'à partir de la saison 2020/2021, l'utilisation de farts de ski fluorés serait interdite dans toutes les épreuves FIS et celles de l'Union internationale de biathlon (IBU). En raison d'un travail important de mise en œuvre des procédures de contrôle, l'interdiction est entrée en vigueur avec un certain retard, soit pour la saison 2023/2024 [6]. Dès lors, si une utilisation est constatée, elle entraîne une disqualification, conformément au règlement des compétitions.

#### 3.3 Le concept de Swiss-Ski

En tant que fédération membre de la FIS et de l'IBU, Swiss-Ski a accepté de mettre en œuvre leur norme environnementale volontaire et a signé les attestations demandées. La réglementation de Swiss-Ski pour la saison 2023/24 pour les compétitions en Suisse contient une interdiction des farts fluorés pour les

compétitions organisées sous l'égide de la FIS / IBU. Afin de réduire les contrôles dans les disciplines nordiques (ski de fond, biathlon, combiné nordique, saut à ski), un fart unique était utilisé dans les séries de compétitions nationales « Helvetia Nordic Trophy », « Swiss Cup Ski de fond » et « Swiss Biathlon Cup ». Pour les compétitions nécessitant une licence Swiss-Ski, par exemple dans le domaine du ski alpin et du freestyle pour les catégories des moins de 16 ans, c'est le règlement national des compétitions qui s'appliquait. Selon ce règlement, l'interdiction des farts fluorés n'était pas encore appliquée pour la saison 2023/24 en raison du manque de capacité de contrôle à disposition. Pour garantir un déroulement équitable des compétitions, tous les farts de ski disponibles à la vente pouvaient alors encore être utilisés. À partir de la saison 2024/25, Swiss-Ski applique l'interdiction du fluor dans toutes les séries de compétitions [6]. Enfin, le marathon de Ski de l'Engadin, en tant que course FIS, est également soumis au règlement de la FIS. Selon les organisateurs, des contrôles étendus ne sont pas réalisables avec un nombre de participants d'environ 14'000 ; et comme pour le dopage, seuls des contrôles aléatoires peuvent être réalisés et surtout pour les athlètes de haut niveau.

#### 4 Impact des sports d'hiver de loisir

Les sports d'hiver tels que le ski alpin, le snowboard et le ski de fond sont très appréciés de la population suisse. Selon une étude de l'Office fédéral du sport sur l'activité et l'intérêt sportifs de la population suisse âgée de 15 ans et plus, environ 35 % des 12'120 personnes interrogées ont déclaré pratiquer le ski. La pratique du ski se monte en moyenne à huit jours par an. Le ski de fond et le snowboard sont pratiqués chacun par 5,3 % des personnes interrogées et à hauteur de six jours par an en moyenne [7]. Extrapolé à l'ensemble de la population, cela donne environ 24 millions de jours d'activité de sports d'hiver, dont 80 % pour le ski et 10 % pour le snowboard et le ski de fond (1 % des personnes interrogées, correspondant à environ 70'000 personnes parmi la population totale).

Les amateurs de sports d'hiver disposent en Suisse d'infrastructures bien développées. Selon les rapports annuels des remontées mécaniques suisses, vingt domaines skiables ont accueilli 65 % des skieurs alpins durant la saison 2021/2022 [8] et la longueur des pistes de ces stations se situe entre 60 et 650 km, soit 4'070 km au total [9]. L'association de branche des remontées mécaniques évalue la surface totale des pistes de ski suisses à 22'500 ha [10].

Les principales régions suisses de ski de fond sont l'Engadine et Davos dans le canton des Grisons, la Vallée de Joux dans le canton de Vaud et la vallée de Conches dans le canton du Valais. Les parcours de ski nordique sont aménagés en pistes classiques avec deux traces parallèles et en pistes de skating de 3 à 5 m de large.

Fig. 2 : Piste préparée pour le ski de fond style classique et skating [11].



Selon le site Internet pour le tourisme de montagne et les sports alpins "bergfex.ch", on compte en Suisse environ 170 domaines de ski de fond, dans lesquels près de 4'000 km de pistes sont préparées pour le style classique ou skating.

#### 5 Types de farts de ski et consommation

L'enquête de l'OFEV auprès des fabricants et des importateurs généraux de farts de ski, des commerçants d'articles de sport et de l'association Swiss-Ski donne une image relativement précise de la consommation et de l'utilisation des farts de skis en Suisse. En ce qui concerne la nature des composés fluorés utilisés par le passé ou actuellement, les fabricants et les importateurs suisses ont confirmé les données que l'on trouve dans la littérature scientifique.

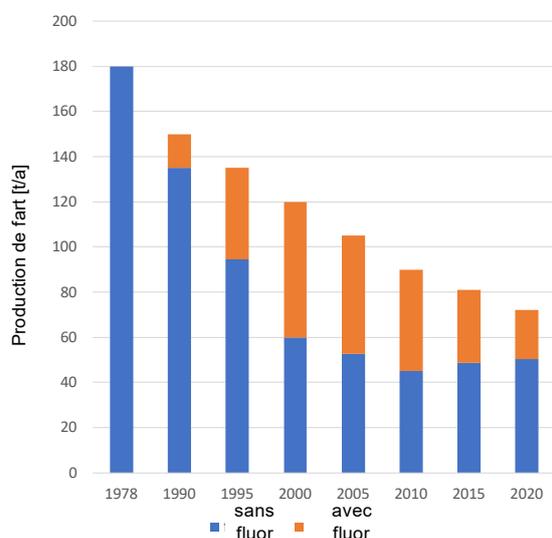
##### 5.1 Évolution de la consommation

Dans un rapport publié par l'Agence norvégienne pour l'environnement, on estime qu'environ 60 % de la production mondiale de fart de ski est réalisée dans l'espace économique européen (EEE). En 2020, la production dans l'EEE était d'environ 70 tonnes, soit 40 % de la quantité produite en 1978. Il est plausible de supposer que les fabricants établis dans l'EEE fournissent avant tout le marché européen et que l'évolution des quantités produites reflète l'évolution de la consommation de fart de ski en Suisse entre 1978 et 2020.

Les produits contenant du fluor sont présents sur le marché depuis 1987. Leur part de marché était déjà de 10 % en 1990 et a atteint un maximum de

50 % entre 2000 et 2010. Depuis 2015, elle est en baisse et est aujourd'hui estimée à moins de 30 % (fig. 3).

Fig. 3: Evolution de la production de fart de ski dans l'EEE entre 1978 et 2020 [3].



## 5.2 Chiffre d'affaires et distribution

Selon les personnes interrogées, ce sont essentiellement les produits de 15 fabricants européens qui se partagent le marché suisse, celui-ci étant dominé par trois fabricants possédant quatre marques différentes. Le chiffre d'affaires par saison généré par les ventes de farts de ski en Suisse est estimé par trois distributeurs d'articles de sport entre 4 et 6 millions de CHF. Les acteurs qui sont passés à des alternatives sans fluor enregistrent un léger recul de leur chiffre d'affaires ou font remarquer qu'il est encore trop tôt pour faire des déclarations à ce sujet. Les acteurs qui fournissent le sport de compétition avec des produits contenant du fluor s'attendent à une baisse de leur chiffre d'affaires à l'avenir.

Les farts de ski sont vendus par les magasins de sport mais aussi dans le commerce en ligne. Les farts y sont disponibles sans restriction, qu'il s'agisse de produits destinés à la compétition ou aux sports de loisirs. Un vendeur fait cependant remarquer que le prix élevé des farts hautement fluorés et des produits constitués entièrement de composés fluorés, dissuaderait les sportifs amateurs d'en acheter : En effet, un produit fluoré pur de 30 g, qui permet de préparer quatre fois une paire de skis de fond, coûterait entre 100 et 150 CHF. Ces coûts sont certes importants, mais ils doivent être relativisés dans la mesure où une personne en Suisse dépense en moyenne environ 2'000 CHF par année pour la pratique du sport [7].

## 5.3 Consommation et utilisation

En se basant sur la production actuelle de fart de ski des fabricants de l'EEE, qui est d'environ 70 tonnes par an (voir ch. 5.1) et du nombre de journées de ski dans l'EEE (en tant qu'indicateur pour l'utilisation des farts de ski), on peut estimer la consommation nationale de fart à environ 10'000 kg par saison, étant donné que le nombre de journées de ski en Suisse représente environ 15 % de celui de l'EEE [12]. Les informations fournies par les acteurs interrogés par l'OFEV permettent d'estimer l'utilisation annuelle entre 1400 et 8000 kg. Les personnes interrogées indiquent que sur cette quantité, 65 à 75 % sont consacrés au fartage des skis alpins et 25 à 35 % au fartage des skis de fond. La part relative du sport de compétition dans la consommation de fart est évaluée entre 30 et 50 %.

Deux fabricants leaders du marché avec trois marques, proposent depuis 2021 uniquement des farts sans fluor sur le marché Suisse. Deux autres importateurs importants indiquent que la part de fart sans fluor dans leurs ventes est d'environ 90 %. Sur la base de ces informations reçues des acteurs interrogés, l'OFEV estime que la consommation de farts de ski fluorés en Suisse se situe entre 600 et 800 kg par saison ; 500 kg correspondent à des farts utilisés dans les compétitions FIS, 100 kg à des farts utilisés dans d'autres compétitions de ski alpin et 20 à 170 kg à des farts appliqués sur des skis de fond par des sportifs amateurs. L'estimation pour les compétitions de ski alpin qui ne sont pas organisées sous l'égide de la FIS repose sur l'hypothèse de 300 courses de ski alpin avec 100 compétiteurs, une consommation de fart de 15 g par compétiteur et une proportion de produits fluorés de 25 %. Pour le domaine nordique grand public, la proportion de farts fluorés a été estimée à 10 %.

Les farts fluorés étaient donc, avant la saison 2023/2024 utilisés entre 55 et 85 % en compétition, avec un usage de 45 % dans les compétitions de ski alpin et de ski de fond et de 10% dans les autres compétitions. Depuis la saison 2024/2025, tous les athlètes des sports de glisse ne peuvent plus utiliser de farts fluorés suite à l'interdiction décidée par la FIS.

## 5.4 Composition des farts de ski

### 5.4.1 Farts contenant du fluor

Les farts fluorés sont classés par les fabricants en différentes catégories de produits [3], [5]:

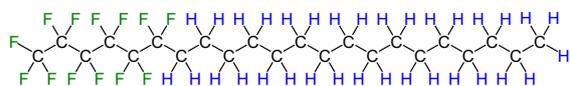
- Les farts ayant une faible teneur en fluor entre 0,5 et 1,5 % (Low Fluor, LF),
- Les farts ayant une forte teneur en fluor entre 4 et 12 % (High Fluor, HF),

- Les farts contenant exclusivement des composés fluorés (Pure Fluorocarbon, FC ou Cera).

Dans des conditions de températures élevées et de neige mouillée, on utilise des farts à haute teneur en fluor et dans des conditions plus froides et de neige dures, des farts moins fluorés. Les produits FC sont des farts de compétition. Un producteur suisse estime que les parts de marché se montent à 50 % pour les produits LF, à 30 % pour les produits HF et à 20 % pour les farts FC.

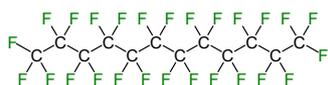
Selon la littérature scientifique, les PFAS principalement utilisés dans les farts LF et HF sont des alcanes semi-fluorés (SFA) de formule  $F(CF_2)_n(CH_2)_mH$  ou, selon un article sur la terminologie des PFAS, aussi abrégée  $F_nH_m$  [13]. Selon un document de brevet [15], la longueur de la chaîne carbonée entièrement fluorée est de six ou huit ( $n = 6, 8$ ). Avec par exemple des longueurs de chaînes alkylées de 16 ou 20 on obtient des substances à la consistance cireuse avec des points de fusion de 31–32 °C ( $F_6H_{16}$ ), 50 °C ( $F_8H_{16}$ ) ou 68–72 °C ( $F_8H_{20}$ ). Les alcanes semi-fluorés sont solubles dans les paraffines liquides (alcanes de formule brute  $C_nH_{2n+2}$ ), la solubilité augmentant avec la part d'alkyle ( $H_m$ )

Fig. 4 : Formule développée d'un alcane semi-fluoré, ici :  $F_6H_{16}$



Les PFAS privilégiés dans les farts FC semblent être les perfluoroalcanes à longue chaîne de formule  $C_nF_{2n+2}$  [14], [16] ; mais selon un document de brevet [17] avec  $n = 12-20$ , le procédé de fabrication proposé par dimérisation du fluorure de perfluorooctane sulfonyle, un dérivé du PFOS, n'est cependant plus autorisé depuis 2011, en raison de l'interdiction totale de ce groupe de substances.

Fig. 5 : Formule structurale d'un alcane perfluoré, ici : Perfluorododécane



Des analyses d'échantillons de trois farts LF et d'un fart HF prélevés en 2010 ont montré que l'on trouvait le plus souvent dans leur composition les alcanes semi-fluorés  $F_6H_{16}$ ,  $F_{10}H_{16}$ ,  $F_{12}H_{16}$ ,  $F_{14}H_{16}$  et  $F_{16}H_{16}$  [16]. Ces alcanes semi-fluorés sont des précurseurs du PFOA et des  $C_9-14$ -PFCA. Selon la législation actuellement en vigueur, les farts de skis ne peuvent pas être mis sur le marché s'ils

contiennent ces précurseurs à des concentrations supérieures à 1000 ppb (voir chap. 2).

Des analyses novatrices de la scientifique Merle Plassmann [16], [18] en 2010 ont en outre montré que les matières premières pour farts de ski étaient contaminées par des acides perfluorocarboxyliques (PFCA) à longue chaîne, les alcanes semi-fluorés (utilisés pour la formulation des farts LF et HF) étant cependant nettement moins contaminés que les perfluoroalcanes (utilisés pour la formulation des farts FC) (tableau 1). Des analyses de farts FC achetés en 2019 dans des magasins de sport norvégiens [19] indiquent qu'entre 2010 et 2019, les procédés de fabrication des producteurs de matières premières n'ont pas changé de manière significative. Tous les farts FC dépassaient nettement les valeurs limites actuellement en vigueur pour le PFOA et pour la somme des  $C_9-C_{14}$ -PFCA qui sont de 25 ppb chacune (tableau 2). Suite à ce constat, onze farts de ski fluorés ont été prélevés en Suisse dans le commerce en 2024, dans le cadre d'une campagne menée par trois cantons. Les teneurs en fluor total, en PFOA et en  $C_9-C_{14}$ -PFCA et leurs précurseurs ont été analysées [37]. Parmi ces échantillons ont été mesurés deux farts en bloc LF avec des teneurs en fluor comprise entre 0,3 et 0,4 %, un stick HF avec une teneur en fluor de 30 %, trois farts en bloc avec des teneurs en fluor d'environ 75 %, deux farts liquides avec des teneurs en fluor de 1 et 5 % et trois farts en poudre avec des teneurs en fluor comprises entre 70 et 85 % (tableau 2). Il s'est avéré que huit des onze produits (73 %) ont dû être retirés du marché parce qu'ils dépassaient les valeurs limites pour les PFAS mentionnés.

On estime que depuis 2020, les farts fluorés sont principalement à base d'alcanes semi-fluorés ou d'autres hydrocarbures partiellement substitués par du fluor, comme les dérivés d'éthane tétrasubstitués [20] avec un maximum de six unités  $CF_2$ . Comme mentionné au chapitre 2, l'UE a récemment édicté une interdiction de mise sur le marché de produits destinés au grand public contenant ces précurseurs de l'acide perfluorohexanoïque (PFHxA) ou du PFHxA lui-même présent en tant qu'impureté. La campagne des cantons mentionnée ci-dessus a montré que deux autres farts seraient prochainement concernés par l'interdiction en Suisse, car ils dépassaient largement la teneur maximale en PFHxA autorisée dans l'UE (25 ppb) [37].

Des recherches menées par un groupe d'experts sur l'utilisation des PFAS ont révélé que les farts de skis peuvent aussi contenir des polymères fluorés en plus des alcanes per- et polyfluorés [21].

Cependant, aucune donnée n'est disponible sur l'utilisation éventuelle d'une plus large gamme de PFAS dans les farts de skis. Des informations issues d'un brevet russe montre néanmoins que quatre amides fluorés pourraient aussi être utilisés (avec pour structure (R'-C=O)-NH-R'', où R'' est un groupe

ionique avec l'unité structurale  $-(CH_2)_3-N^+-R_3$  et R' est soit un groupe perfluoroalkyle, soit un groupe perfluoroalkyléther). Un brevet européen mentionne aussi un alkylsilane polyfluoré et un brevet japonais un dérivé de PFOS, comme autres PFAS pouvant être utilisés dans les farts de ski.

Tab. 1 : Teneurs en acides perfluorocarboxyliques à longue chaîne (PFCA) en microgrammes par kilogramme (ppb) dans les échantillons de matières premières de fart de ski prélevés en 2010 [16], [18].

Produit	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	PFDoDA	PFTTrDA	PFTeDA	C <sub>9</sub> -C <sub>14</sub> -PFCA
Matière première Fart LF et HF	225	135	545	125	380	30	7	1220
Matière première Fart FC	7460	950	5830	770	3750	660	2170	14'130

Tab. 2 : Teneurs des farts de ski en acides perfluorocarboxyliques (PFCA) à longue chaîne en microgrammes par kilogramme (ppb) dans des échantillons prélevés en 2010, 2019 et 2024 [18], [19], [37].

Produit	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	PFDoDA	PFTTrDA	PFTeDA	C <sub>9</sub> -C <sub>14</sub> -PFCA
Farts LF 2010 (n=3)								
- Valeurs extrêmes	12-65	4-120	7-39	5-6	2-10	1-4	1-8	27-135
- Médiane	15	4	11	5	5	1	3	70
Farts LF 2024 (n=2)								
- Valeurs extrêmes	5-17	3-5	5-14	3-5	5-12	4-5	5-9	30-45
Fart HF 2010	235	175	460	225	190	120	100	1'270
Fart HF 2024	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 24
Farts HF bloc 2019 (n=3)								
- Valeurs extrêmes	4-235	1-200	3-3'170	<1-300	4-1'830	1-210	5-940	20-6'650
- Médiane	155	20	15	1	10	1	10	50
Farts FC Bloc 2024 (n=3)								
- Valeurs extrêmes	7-7'000	6-350	20-6'100	55-340	330-11'200	20-1'100	120-48'000	560-67'000
- Médiane	45	13	150	60	390	30	260	900
Fart HF liquide 2019	15	20	25	30	50	300	85	500
Farts HF liquides. 2024 (n=2)								
- Valeurs extrêmes	1-14	1-11	1-120	1-17	1-580	1-20	1-3'200	6-4'000
Farts FC poudre 2019 (n=7)								
- Minimum	300	20	280	15	300	30	260	1'000
- Maximum	30'000	2'600	12'200	2'300	20'000	4'600	42'000	75'000
- Valeur moyenne	5'200	570	5'000	700	8'300	1'200	14'300	30'000
- Médiane	800	110	4'200	350	8'500	700	6'300	26'000
Farts FC poudre 2024 (n=3)								
- Valeurs extrêmes	5-3'000	6-240	40-9'800	7-590	110-16'500	8-1'600	70-50'000	260-79'000
- Médiane	110	9	170	20	130	12	130	450

Dans l'enquête de l'OFEV, les fabricants et les gros importateurs ont confirmé l'utilisation de polymères fluorés tels que le polytétrafluoroéthylène dans les farts de ski, comme mentionné dans plusieurs brevets. Pourtant, l'ajout de polymères fluorés aux farts paraffinés n'est possible que sous forme de micropoudre en raison de leurs propriétés lipophobes [22]. Cette utilisation de polymères fluorés entre donc dans le champ d'application de l'interdiction des microplastiques dans les préparations, dont font partie les farts de ski (voir chapitre 2). Cette interdiction est entrée en vigueur dans l'UE en octobre 2023.

#### 5.4.2 Farts sans fluor

Les avis des personnes interrogées sont partagés quant à la question des performances des farts de ski sans fluor par rapport à ceux qui en contiennent. Tous s'accordent cependant à dire que dans des conditions très froides, les farts sans fluor et les farts fluorés ont les mêmes performances. Mais même dans d'autres conditions de neige et de météo, il existe désormais des farts de ski non fluorés qui présentent de bonnes propriétés de glisse. Swiss-Ski explique néanmoins que les athlètes dont les skis sont préparés avec des produits sans fluor seraient défavorisés en compétition, en particulier dans des conditions de neige humide.

Les fabricants restent discrets sur la nature des substituts aux composés organofluorés et se réfèrent au secret commercial. Les farts de ski sans fluor contiennent généralement une combinaison de différents types de cires dans des proportions variables [3]. Selon les personnes interrogées, les types de cires utilisées dans les farts de ski sont principalement des hydrocarbures non ramifiés ou des hydrocarbures à chaîne linéaire ou ramifiée de différentes longueurs, obtenus au cours du raffinage du pétrole. Les matières premières peuvent également être des cires animales ou végétales composées d'esters d'acides gras et d'alcools à longue chaîne ou des cires synthétiques comme les cires de polyoléfine.

Pour remplacer un fart de compétition fluoré, un importateur général cite un produit qui contient, en plus des cires hydrocarbonées, des polysiloxanes modifiés ainsi que du stéarate de zinc pour la résistance à l'abrasion. Les fournisseurs de farts de ski mentionnent également le graphite et le bisulfure de molybdène comme additifs aux paraffines ; ces substances sont utilisées dans les huiles lubrifiantes comme additifs anti-usure (anti-wear). Les siloxanes ( $R_3Si-[O-SiR]_{2n}-O-SiR_3$ ) sont aussi mentionnés à plusieurs reprises dans la littérature [3], [5], [23] comme substituts des

composés fluorés dans les farts de skis. L'effet de quatre polydiméthylsiloxanes ( $R = CH_3$ ) de différentes viscosités a été récemment étudié à trois températures et dans des conditions allant d'une neige sèche à  $-10\text{ °C}$  à une neige mouillée à  $+5\text{ °C}$  [24]. Sur neige mouillée, l'hydrophobie élevée des huiles de silicone peut réduire les frottements de 10 %, de sorte qu'elles présentent des propriétés de réduction des frottements satisfaisantes dans ces conditions. Enfin, une spécialité développée en Suisse est un fart de ski contenant le colorant indigo [25].

## 6 Émissions dans l'environnement

Selon un rapport sur les farts de ski commandé par l'Agence norvégienne pour l'environnement, seulement environ 20 % de la quantité de fart vendue reste sur les semelles des skis lors du fartage. Environ 80 % du fart est donc perdu lors de l'application et est éliminé comme déchet avec les ordures ménagères. Les experts interrogés par l'OFEV s'accordent aussi à dire que la majeure partie du fart appliqué sur la semelle est retirée après application, et deux d'entre eux indiquent que nettement moins de 20 % du fart appliqué reste sur les semelles des skis et peut donc potentiellement être rejeté dans l'environnement par abrasion.

Une estimation approximative pour la Suisse permet de calculer qu'entre 1987 et 2020, un maximum de 1 à 6 kg d'acides perfluorocarboxyliques à longue chaîne ( $C_8$ - $C_{20}$ -PFCA) ont été libérés dans l'environnement par les pertes dues à l'abrasion des farts de ski. Pour cela, on suppose que les farts étaient 20 fois plus chargés en PFCA entre 1987 et 2005 qu'entre 2006 et 2020. Les farts fluorés purs (produits FC) étaient les principaux responsables des émissions de PFCA dans l'environnement. Les émissions cumulées des alcanes semi-fluorés sont en effet estimées entre 100 et 700 kg et ceux-ci peuvent être dégradés en PFCA dans l'environnement.

## 7 Présence dans l'environnement

En ce qui concerne la pollution de l'environnement par les PFAS provenant des farts de ski, plusieurs études ont été réalisées en Suède, aux USA, en Autriche et en Norvège. Les conclusions de ces études sont synthétisées ci-dessous, une description détaillée des résultats d'analyses se trouve à l'annexe à la fin de ce rapport.

Après l'édition 2010 de la course de ski de fond du Vasaloppet en Suède, des alcanes semi-fluorés utilisés dans les farts LF et HF ont été trouvés dans des échantillons de neige et de sol prélevés le long de la piste de ski de fond [26]. Des  $C_6$ - $C_{22}$ -PFCA ont

également été détectés, ils peuvent être présents dans les farts LF, HF et FC en tant qu'impuretés [18]. Il a été montré que les concentrations diminuaient entre le début à la fin de la course, ce qui suggère que les farts de ski sont rapidement éliminés par les frottements exercés sur la semelle des skis. La présence plus importante des homologues de PFCA à longue chaîne dans la neige et les sols au 3<sup>ème</sup> kilomètre par rapport au 52<sup>ème</sup> kilomètre peut être attribuée à l'abrasion de farts fluorés purs (farts FC) appliqués en couche de finition sur des skis traités avec des farts LF ou HF. On peut alors émettre l'hypothèse que les farts FC contiennent des teneurs élevées en homologues de PFCA avec  $C > 14$  [18].

Des mesures de la présence de PFAS dans des échantillons de neige après une course de ski de fond de très petite taille par rapport à la course du Vasaloppet avec environ 160 compétiteurs ont été effectuées aux États-Unis en 2020 dans une zone exclusivement destinée aux sports de loisirs [28]. Des teneurs élevées en PFCA ( $C_4$ – $C_{14}$ -PFCA) ont ainsi été mesurées dans la zone de départ, répartis en 10 % de PFCA à chaîne courte ( $C_4$ – $C_7$ -PFCA), 5 % de PFOA et 85 à 90 % de PFCA à chaîne longue ( $C_9$ – $C_{14}$ -PFCA). Sur les 14 PFAS trouvés dans la zone de départ, quatre composés ont encore pu être retrouvés au kilomètre 3.9 ; il s'agissait de PFCA à longues chaînes.

Des analyses dans le cadre d'une étude menée récemment en Autriche montrent que l'on trouve également des PFAS dans la neige des domaines skiables alpins et provenant de l'abrasion des farts de ski, avec une prédominance des PFCA à chaîne courte ( $C_4$ – $C_7$ -PFCA). Les niveaux de PFAS varient tant au sein d'un même domaine skiable qu'entre les domaines skiables. Ainsi, dans deux domaines skiables familiaux de taille comparable, des PFAS ont été identifiés sur tous les sites de l'un mais sur aucun site de l'autre. Les analyses de sols à l'endroit d'une piste de ski de fond indiquent que les substances cibles ne permettent d'expliquer que 0,3 à 1,5 % du fluor organiquement lié extractible (EOF).

Afin d'évaluer la contamination par les PFAS du biote terrestre dans une station de ski, des échantillons de sols, de vers de terre (*Eisenia fetida*) et des campagnols des bois (*Myodes glareolus*), omnivores et consommateurs de vers, ont été prélevés entre 2017 et 2018 en Norvège. En résumé, cette étude montre que la répartition des différents homologues de PFCA trouvés dans les sols, les vers de terre et les campagnols forestiers sur le site des sports d'hiver correspondent aux PFCA trouvés dans les farts de ski, où les PFCA à longue chaîne sont majoritaires [30].

En ce qui concerne la présence de PFAS dans les stations de ski suisses, aucune étude similaire à ce qui a été fait en Suède, en Norvège, en Autriche et aux États-Unis n'est connue. En revanche, des échantillons de sol prélevés en Suisse entre 2010 et 2021 ont récemment été analysés pour déterminer leur teneur en PFAS [31]. Sur les 147 échantillons, sept concernaient des sites de sports d'hiver, dont six provenaient de prairies. La comparaison des 90<sup>èmes</sup> percentiles des sites de prairies (non utilisées pour les sports d'hiver) avec ceux des sites de sports d'hiver montre dans ces derniers une pollution par les PFOA et les PFNA supérieure de 30 %. Celle-ci reste cependant légèrement inférieure à la pollution des sols forestiers. Dans les sols de sites de sports d'hiver, le PFDA et le PFUnDA y sont détectés en quantité cinq fois plus élevée que dans les sols de prairies. Comme la présence de ces PFAS y est 2 à 3 fois plus élevée que dans les sols forestiers, la perte de fart de ski par friction pourrait avoir contribué à la contamination constatée pour ces  $C_{10}$ – $C_{11}$ -PFCA.

Certaines craintes d'une contamination des poissons des lacs de l'Engadine par des PFAS dus aux farts de ski ont été émises, car la piste de ski de fond de 42 km du marathon de ski de l'Engadine, qui débute à Maloja, traverse les lacs de Sils, Silvaplana et Champfèr. Selon une analyse commandée par un magazine suisse de protection des consommateurs, des teneurs élevées en PFOA, comprises entre 500 et 2700 µg/kg, ont été trouvées dans les abats de 13 poissons sur un total de 44 prélevés dans les trois lacs. Par la suite, les autorités grisonnes ont fait analyser l'eau des lacs et les poissons en 2021 pour déterminer la présence de PFAS [32]. Selon les auteurs, aucune différence n'a été constatée entre les lacs avec et sans ski de fond à leur surface en ce qui concerne la contamination des poissons par les PFAS

## 8 Conclusion

Pour plusieurs groupes de PFAS, le Conseil fédéral suisse a déjà édicté des interdictions dans l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim, RS 814.81). Ces interdictions concernent les PFAS connus pour représenter des grands risques pour la santé et ceux-ci sont souvent, sans compter l'acide trifluoroacétique, les plus fréquemment retrouvés dans l'environnement. Il s'agit notamment de l'acide perfluorooctane sulfonique (PFOS), de l'acide perfluorooctanoïque (PFOA), des acides perfluorocarboxyliques à longue chaîne ( $C_9$ – $C_{14}$ -PFCA) et de l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), y compris tous les composés précurseurs qui peuvent être dégradés en ces PFAS. Suite à

une modification du règlement européen REACH, des interdictions de mise sur le marché de l'acide perfluorohexanoïque (PFHxA) et de ses précurseurs ont été récemment adoptées dans l'UE, qui concernent également les farts de ski destinés au grand public. En décembre 2024, le Conseil fédéral a lancé une consultation sur la modification de l'ORRChim, qui prévoit l'adoption de ces restrictions en Suisse. La consultation propose également des restrictions pour les produits contenant des microplastiques. Les farts de ski sont concernés s'ils contiennent des polymères fluorés sous forme de micropoudres. Un projet dans l'UE prévoit une interdiction globale des PFAS, dont les détails ont été publiés par l'Agence européenne des produits chimiques le 7 février 2023. La Suisse examinera aussi l'adoption de restrictions similaires. Aussi, depuis la saison 2024/2025, toutes les compétitions de Swiss-Ski sont soumises à une interdiction du fluor dans les farts, à la suite de la mesure édictée par la FIS au niveau international pour protéger l'environnement et la santé humaine.

Des études menées dans des stations de sports d'hiver à l'étranger ont montré que des acides perfluorocarboxyliques à longue chaîne (le PFOA et en particulier les C<sub>9</sub>-C<sub>14</sub>-PFCA), qui sont particulièrement problématiques, ont été libérés par le passé dans l'environnement à cause de l'utilisation des farts de ski. Des analyses de farts effectuées en Norvège en 2019 et en Suisse en 2024 ont montré que certains farts contenaient encore ces substances jusqu'à encore récemment.

Depuis l'entrée en vigueur de l'interdiction de la FIS, on estime qu'environ 100 à 300 kg de farts de ski fluorés sont encore utilisés chaque saison en Suisse, si les fournisseurs de farts de ski et les sportifs amateurs n'ont pas modifié leur comportement. Dans sa réponse à la motion Munz 20.3593 demandant l'interdiction des farts de ski fluorés, le Conseil fédéral a expliqué qu'il souhaitait poursuivre sur la voie de l'harmonisation avec le droit européen des dispositions relatives aux restrictions et aux interdictions dans la législation sur les produits chimiques [33]. Même en l'absence d'interdiction, les fabricants de farts de ski sont tenus, dans le cadre du contrôle autonome, de prendre des mesures pour protéger la santé des utilisateurs de leurs produits et l'environnement, afin d'éviter les risques d'exposition aux PFAS qui ont été identifiés. À la suite des directives de la FIS, de grands fabricants et fournisseurs de farts de ski se sont conformés à cette obligation et ont remplacé l'ensemble de leur gamme par des farts sans fluor. Néanmoins, les sportifs amateurs peuvent également contribuer à la protection de

l'environnement en achetant des farts sans fluor. Cela est d'autant plus facile à réaliser, car tous les fournisseurs de farts indiquent maintenant clairement quels produits contiennent ou non du fluor.

## 9 Abréviations utilisées

6:2 FTS	Acide 6:2-fluorotélomère sulfonique
8:2 FTCA	Acide 8:2-fluorotélomère carboxylique
8:2 FTS	Acide 8:2-fluorotélomère sulfonique
8Cl-PFOS	Acide 8-chloroperfluorooctanesulfonique
10:2 FTS	Acide 10:2-fluorotélomère sulfonique
DONA	Acide perfluoro-4,8-dioxa-3H-nonanoïque
FOSA	Perfluorooctane sulfonamide
FOSAA	Acide perfluorooctane sulfonamidoacétique
HFPO-DA	Acide perfluoro(2-propoxypropanoïque)
N-EtFOSA	N-éthylperfluorooctane-sulfonamide
N-EtFOSAA	Acide N-éthyl perfluorooctane sulfonamidoacétique
N-EtFOSE	N-éthyl perfluorooctane sulfonamidoéthanol
N-MeFOSA	N-méthyl-perfluorooctane sulfonamide
N-MeFOSE	N-méthyl perfluorooctane sulfonamide éthanol
PFAS	Substances per-et polyfluoroalkylées
PFBA	Acide perfluorobutanoïque (C <sub>4</sub> -PFCA)
PFBS	Acide perfluorobutane sulfonique
PFCA	Acides perfluorocarboxyliques
PFDA	Acide perfluorodécanoïque (C <sub>10</sub> -PFCA)
PFDoDA	Acide perfluorododécanoïque (C <sub>12</sub> -PFCA)
PFDS	Acide perfluorodécanesulfonique
PFHpA	Acide perfluoroheptanoïque (C <sub>7</sub> -PFCA)
PFHxS	Acide perfluorohexanesulfonique
PFNA	Acide perfluoronanoïque (C <sub>9</sub> -PFCA)
PFOA	Acide perfluorooctanoïque (C <sub>8</sub> -PFCA)
PFOPA	Acide perfluorooctane phosphonique
PFOS	Acide perfluorooctane sulfonique (PFOS)
PFPeA	Acide perfluoropentanoïque (C <sub>5</sub> -PFCA)
PFTeDA	Acide perfluorotétradécanoïque (C <sub>13</sub> -PFCA)
PFTTrDA	Acide perfluorotridécanoïque (C <sub>13</sub> -PFCA)
PFUnDA	Acide perfluoroundécanoïque (C <sub>11</sub> -PFCA)
SFA	Alcanes semifluorés (F(CF) <sub>2n</sub> (CH) <sub>2m</sub> H ou F <sub>n</sub> H <sub>m</sub> )

## 10 Bibliographie

- [1] Breitschädel, F., Haaland, N., Espallargas, N., 2014 A Tribological Study of UHMWPE Ski Base Treated with Nano Ski Wax and its Effects and Benefits on Performance. *Procedia Engineering*, Volume 72, pp. 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.048>
- [2] Bouchex-Bellomie, H., 2024.
- [3] Wood Group UK Limited, 2021, PFAS in the treatment of skis – Use, Emissions and Alternatives. Report M-2032 for the Norwegian Environment Agency.
- [4] ECHA (Agence européenne des produits chimiques), 8 December 2021. RAC (Committee for Risk Assessment) and SEAC (Committee for Socio-economic Analysis) Background Document to the Opinion on the Annex XV dossier proposing restrictions on Undecafluorohexanoic acid (PFHxA), its salts and related substances.
- [5] Nordic Ecolabeling, 2023. Ski wax – Background document. 106 Ski wax, version 1.2.
- [6] Swiss-Ski, 2023. Nouveau report de l'interdiction totale du fluor – quelles conséquences pour les associations régionales et Swiss-Ski ? Communiqué dans la Newsroom (<https://www.swiss-ski.ch/fr/>) du 30.8.2022.
- Swiss-Ski, 2024. [Update interdiction du fluor](#). Worblaufen, 30 Sept. 2024.
- [7] Lamprecht, M., Rahel Bürgi, R. Stamm, H.P., 2020. Sport Suisse 2020 : Activité et consommation sportives de la population suisse. Office fédéral du sport (OFSP), Macolin.
- [8] Vanat, L., 2022. Bilan de la saison 2021/2022. Fréquentation des domaines skiabiles. Ed. Remontées Mécaniques Suisses (RMS), Berne.
- [9] <https://www.bergfex.ch/>
- [10] RMS (Remontées Mécaniques Suisses), 2022. Faits & chiffres sur la branche des remontées mécaniques suisses.
- [11] Photo du site internet du centre nordique Les Prés-d'Orvin-Chasseral (LLZ). <https://www.loipen.ch/> Avec l'aimable autorisation du LLZ.
- [12] Vanat, L., 2022. International Report on Snow & Mountain Tourism – Overview of the key industry figures for ski resorts. <https://www.vanat.ch>
- [13] Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., de Voogt, P., Jensen, A.A., Kannan, K., Mabury, S.A., van Leeuwen, S.P., 2011. Perfluoroalkyl et polyfluoroalkyl substances in the environment : Terminology, classification, and origins. *Integr Environ Assess Manag*, 7, pp. 513–541. <https://doi.org/10.1002/ieam.258>
- [14] Plassmann, M.M., 2011. Environmental occurrence and fate of semifluorinated n-alkanes and perfluorinated alkyl acids present in ski waxes. Department of Applied Environmental Science Stockholm University.
- [15] Traverso, E., Rinaldi, A., 1995, Ski lubricant comprising a hydrocarbon compound containing a perfluoro segment (US005423994A). United States Patent.
- [16] Plassmann, M.M., Berger, U., 2010. Trace Analytical Methods for Semifluorinated *n-Alkanes* in Snow, Soil, and Air. *Anal. Chem.*, 82, pp. 4551–4557. <https://doi.org/10.1021/ac1005519>
- [17] Gambaretto, G. P., 1984, Solid lubricant and process for preparing it (O 132 879). Office européen des brevets.
- [18] Plassmann, M.M., Berger, U., 2013. Perfluoroalkyl carboxylic acids with up to 22 carbon atoms in snow and soil samples from a ski area. *Chemosphere*. May ; 91(6), pp. 832–837. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.066>
- [19] Fang, S., Plassmann, M.M., Cousins, T., 2020. Levels of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in ski wax products on the market in 2019 indicate no changes in formulation. *Environ. Sci : Processes Impacts*, 22, pp. 2142–2146. <https://doi.org/10.1039/DOEM00357C>
- [20] Gambaretto, G. P., 2000, Lubricant for improving gliding properties of skis and its application in skiing (US006121212A). United States Patent.
- [21] Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I.T., DeWitt, J.C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C.A., Trier, X., Wang, Z., 2020. An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environ Sci Process Impacts*. Dec 1 ; 22(12) : pp. 2345–2373. <https://doi.org/10.1039/DOEM00291G>
- [22] Watschinger, G., 1989, Sliding agent, in particular ski wax (WO 89/10950). Organisation mondiale de la propriété intellectuelle.
- [23] Bützer, P., 2021. Was kommt nach den fluorierten Wachsen? CLB 71e année, cahier 01–02.
- [24] Buene, A.F., Auganæs, S.B., Klein-Paste, A., 2022. Effect of Polydimethylsiloxane Oil Lubrication on the Friction of Cross-Country UHMWPE Ski Bases on Snow. *Front. Sports Act. Living* 4 : 894250. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.894250>
- [25] Bützer, P. ; Brühwiler, D. ; Bützer, M.R. ; Al-Godari, N. ; Cadalbert, M. ; Giger, M. ; Schär, S. Indigo–A New Tribological Substance Class for Non-Toxic and Ecological Gliding Surfaces on Ice, Snow, and Water. *Materials* 2022, 15, 883, pp. 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma15030883>
- [26] Plassmann, M.M., Denninger, A., Berger, U., 2011. Environ-mental occurrence and fate of semifluorinated n-alkanes in snow and soil samples from a ski area.. *Chemosphere*. Nov ; 85(9) : pp. 1458–1463. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.08.028>
- [27] Plassmann, M.M., Meyer, T., Lei Y.D., Wania, F., McLachlan, M.S., Berger, U., 2010. Theoretical and Experimental Simulation of the Fate of Semifluorinated n-Alkanes during Snowmelt. *Environmental Science & Technology* 44 (17), pp. 6692–6697. <https://doi.org/10.1021/es101562w>
- [28] Carlson, G.L., Tupper, S., 2020 Ski wax use contributes to environmental contamination by per- and polyfluoroalkyl substances. *Chemosphere*. Dec ; 261 : pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128078>

- [29] Müller, V., Costa, L.C.A., Rondan, F. S., Matic, E., Mesko, M. F., Kindness, A., Feldmann, J., 2023. Per and polyfluoroalkylated substances (PFAS) target and EOF analyses in ski wax, snowmelts, and soil from skiing areas. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 25, pp. 1926 – 1936. <https://doi.org/10.1039/D3EM00375B>
- [30] Grønnestad, R., Vázquez, B.P., Arukwe, A., Jaspers, V.L.B., Jenssen, B.M., Karimi, M., Lyche, J.L., Krøkje, Å., 2019. Levels, Patterns, and Biomagnification Potential of Per-fluoroalkyl Substances in a Terrestrial Food Chain in a Nordic Skiing Area. *Environ Sci Technol*. Nov 19; 53(22): pp. 13390 – 13397. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02533>
- [31] ZHAW (Haute école zurichoise de sciences appliquées), 2023. Schweizer Böden erstmals auf umweltschädliche PFAS untersucht. Wädenswil.
- [32] Schmid, D., Beckmann, M., Michel, M., 2022. PFAS Analysen Oberengadin. Schlussbericht. ANU-406-51.
- [33] 20.3593 Motion Munz Martina. Pour une interdiction des farts fluorés nocifs dans le sport populaire. <https://www.parlament.ch/fr/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20203593>
- [34] Lucas, K., Gaines, L.G.T., Paris-Davila, T., Nylander-French, L.A., 2023. Occupational exposure and serum levels of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): a review. *Am J Ind Med.*; 66: pp. 379 – 392. <https://doi.org/10.1002/ajim.23454>
- [35] Paris-Davila, T., Gaines, L.G.T., Lucas, K., Nylander-French, L.A., 2023. Occupational exposures to airborne per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) – A review. *Am J Ind Med.*; 66: 393 – 410. <https://doi.org/10.1002/ajim.23461>
- [36] OFSP (Office fédéral de la santé publique), 2020. Les dangers pour la santé des produits de fartage pour le ski ([Fiche d'information fartage de ski](#) Juillet 2020).
- [37] Bleuler, C., Favreau, P., 2024. Analyse de substances Polyfluorées dans les Farts de Ski par LC-MS/MS avec Oxydation des Précurseurs TOP-Assay. Mandat OFEV n° 00.5033.PZ/75854262D du 1er mars au 31 décembre 2024. Office cantonal de l'environnement, République et Canton de Genève.

## Annexe: Présence dans l'environnement de PFAS provenant des farts de ski (étude bibliographique)

En ce qui concerne la pollution de l'environnement par les PFAS provenant des farts de ski, plusieurs études ont été réalisées en Suède, aux USA, en Autriche et en Norvège et les résultats sont présentés ci-dessous.

Dans l'une de ces études concernant la course Vasaloppet, l'une des plus grandes manifestations de ski de fond au monde, des échantillons de neige ont été prélevés en 2010 le long du parcours immédiatement après la course, puis des échantillons de sol deux mois plus tard après la fonte des neiges. Les alcanes semi-fluorés (SFA), acides perfluorocarboxyliques de longueur de chaîne de 6 à 22 ( $C_6-C_{22}$ -PFCA) et quatre acides perfluorosulfoniques (l'acide perfluorobutane sulfonique (PFBS), l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), l'acide perfluorooctane sulfonique (PFOS) et l'acide perfluorodécane sulfonique (PFDS)), ont ensuite été analysés dans les échantillons [18], [26].

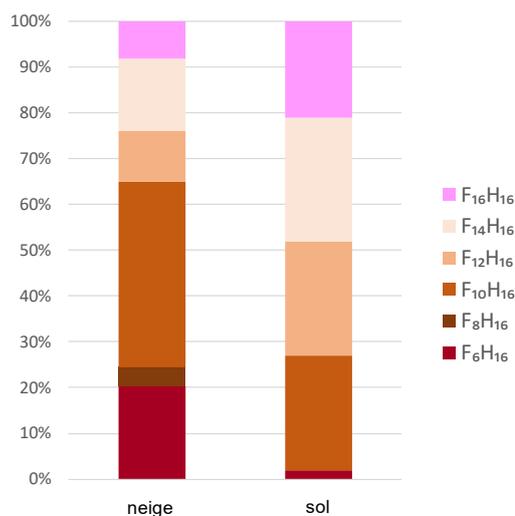
Du PFOS a été trouvés dans les échantillons de neige à des concentrations comprises entre 0,06 et 0,57 ng/L, soit jusqu'à deux ordres de grandeur de moins que celles des PFCA analysés. Dans les sols (à 1 cm de profondeur), on a également constaté une charge en PFOS relativement faible par rapport aux PFCA, avec 0,05–0,27  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (médiane : 0,09  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ). Les PFBS, PFHxS et PFDS n'ont été détectés ni dans la neige ni dans les sols. Cela peut confirmer les déclarations des fabricants de farts de ski selon lesquelles les dérivés des acides perfluoroalcanesulfoniques n'ont jamais été utilisés intentionnellement dans les farts [18].

Des alcanes semi fluorés (SFA), d'aspect cireux à température ambiante et pratiquement insolubles dans l'eau, ont été retrouvés dans les échantillons de neige et de sol après extraction avec du cyclohexane comme solvant. Dans les échantillons prélevés entre les kilomètres 3 et 82 du parcours, entre 370 et 17'000 ng de SFA/L ont été mesurés dans la neige proche de la surface (à 5 cm de profondeur) et entre 0,25 et 33  $\mu\text{g}$  de SFA/kg dans les sols (à 1 cm de profondeur).

La répartition des différents SFA dans la neige était comparable à celle observée dans les farts de ski, ce qui indique une pollution par abrasion. La répartition relative des SFA trouvés dans la neige et dans les sols était significativement différente : les SFA jusqu'à  $F_{10}H_{16}$  étaient plus retrouvés dans la neige, tandis que les SFA à plus longue chaîne ( $F_{12}H_{16}$ ,  $F_{14}H_{16}$ ,  $F_{16}H_{16}$ ) étaient plus concentrés dans

les sols (Fig. 6). Ceci est peut-être dû à une volatilisation des SFA à chaîne plus courte provenant de la neige ou des sols, bien qu'elle soit supposée être faible en raison des propriétés physico-chimiques des SFA [27]. Les SFA du type  $F_8H_{16}$  à  $F_{16}H_{16}$  sont par ailleurs des composés précurseurs des  $C_8-C_{14}$ -PFCA (PFOA et  $C_9-C_{14}$ -PFCA) désormais interdits et ne doivent donc plus être présents dans les farts de ski actuels.

Fig. 6 : Comparaison des échantillons de SFA dans la neige et le sol au kilomètre 3 de la course Vasaloppet 2010.



Les calculs de bilan de masse ont montré que les apports de SFA (au 3<sup>ème</sup> kilomètre) dans la neige étaient plus élevés ou du même ordre de grandeur que les SFA analysés dans les sols deux mois plus tard, ce qui semble indiquer qu'une accumulation de SFA dans les sols en raison des activités de ski de fond sur plusieurs saisons est peu probable.

Les analyses de la présence de  $C_6-C_{22}$ -PFCA dans la neige (à 5 cm de profondeur) et dans les sols (à 1 cm de profondeur) entre le 3<sup>ème</sup> et le 82<sup>ème</sup> kilomètre de la course ont révélé des teneurs dans la neige comprises entre 40 et 1400 ng/L et dans les sols entre 0,06 et 19  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . La présence de PFCA dans la neige et les sols diminue entre le départ et l'arrivée de la course, ce qui indique que les farts sont rapidement éliminés de la semelle des skis par frottement. La présence plus importante des homologues de PFCA à longue chaîne dans la neige et les sols au 3<sup>ème</sup> kilomètre par rapport au 52<sup>ème</sup> kilomètre peut être attribuée à l'abrasion de farts fluorés purs (farts FC) appliqués en couche de finition sur des skis déjà traités avec des farts LF ou HF. On peut alors émettre l'hypothèse que les farts FC contiennent des teneurs élevées en homologues de PFCA avec  $C > 14$  [18]. En effet, sur sept poudres de FC analysées en 2019 (voir tableau 2), plus de 50 % des teneurs en  $C_8-C_{20}$ -PFCA

correspondaient à des homologues avec C = 15 à 20 [19].

Comme pour les SFA, les rapports entre la présence dans le sol et les apports analysés dans la neige au 3<sup>ème</sup> km du parcours de la course Vasaloppet de 2010 ont été aussi calculés pour les PFCA. Ces rapports pour les C<sub>6</sub>-C<sub>15</sub>-PFCA étaient supérieurs à 50, de sorte que l'on peut supposer une accumulation de PFCA due à l'abrasion des farts de ski utilisés lors des compétitions des années précédentes ou par les sportifs amateurs. La dégradation partielle des alcanes semi-fluorés est aussi une autre source de PFCA.

Des mesures de la présence de PFAS dans des échantillons de neige après une course de ski de fond de très petite taille par rapport à la course du Vasaloppet (avec environ 160 compétiteurs) ont été effectuées aux États-Unis en 2020 dans une zone exclusivement destinée aux sports de loisirs [28]. Cette zone comprend une piste de ski de fond d'environ 10 km, utilisée par de nombreux sportifs amateurs et sur laquelle se déroulent également des compétitions d'amateurs. Le programme d'analyse comprenait au total 24 substances ; on a trouvé dans les échantillons les onze PFCA (C<sub>4</sub>-C<sub>14</sub>-PFCA), l'un des sept acides perfluorosulfoniques (PFOS) mais sans aucun des trois amides d'acide perfluorooctane sulfonique (FOSA, N-MeFOSA et N-EtFOSA) et deux des trois fluoro-télomère (6:2 et 8:2 FTS). La limite de quantification (LOQ) se situait aux alentours de 2 ng/L.

Des teneurs élevées en PFCA (C<sub>4</sub>-C<sub>14</sub>-PFCA) de 7300 à 10'600 ng/L ont ainsi été mesurées dans la zone de départ. Parmi celles-ci, 10 % étaient des PFCA à chaîne courte (C<sub>4</sub>-C<sub>7</sub>-PFCA), 5 % des PFOA et 85 à 90 % des PFCA à chaîne longue (C<sub>9</sub>-C<sub>14</sub>-PFCA). Sur les 14 PFAS trouvés dans la zone de départ, quatre composés ont encore pu être retrouvés au kilomètre 3.9 ; il s'agissait de PFCA à longues chaînes avec une teneur totale de 20 ng/L (tableau 3).

Tab. 3 : PFAS détectés dans des échantillons de neige après une compétition de ski de fond en 2020 aux États-Unis, en ng/L

PFAS	Neige après la ligne de départ	Neige avant la ligne de départ	Neige au km 3.9 du parcours
PFBA	95	310	< LOQ
PFPeA	55	95	< LOQ
PFHxA	255	430	< LOQ
PFHpA	170	210	< LOQ
PFOA	330	560	< LOQ
PFNA	130	210	< LOQ
PFDA	580	1180	1.9
PFUnDA	435	605	< LOQ

PFAS	Neige après la ligne de départ	Neige avant la ligne de départ	Neige au km 3.9 du parcours
PFDODA	1530	1800	3.7
PFTTrDA	945	1000	2.4
PFTeDA	2760	4210	13
6:2 FTS	300	100	< LOQ
8:2 FTS	4	7	< LOQ
PFOS	2	< LOQ	< LOQ

Aussi en Autriche, des mesures récentes de la contamination de la neige et du sol par les PFAS ont été effectuées dans quatre stations de sports d'hiver possédant des pistes de ski de fond et de ski alpin [29]. Les échantillons de neige ont été prélevés entre février et mars 2022, les échantillons de sol ont été prélevés sur un site de ski de fond en juin 2021 (à environ 10 cm de profondeur) et sur un site de ski alpin en été 2022 (à environ 5 cm de profondeur). Les échantillons ont été analysés pour détecter la présence de treize acides perfluorocarboxyliques (C<sub>4</sub>-C<sub>14</sub>-PFCA, C<sub>16</sub>- et C<sub>18</sub>-PFCA), huit acides perfluorosulfoniques (C<sub>4</sub>-C<sub>10</sub>-PFSA et C<sub>12</sub>-PFSA), cinq amides d'acides perfluorosulfoniques (FOSA, FOSAA, N-EtFOSA, N-MeFOSE, N-EtFOSE) et sept autres PFAS (8Cl-PFOS, 8:2 et 10:2 FTS, DONA, 8:2-FTCA, HFPO-DA et PFOPA).

Le tableau 4 résume les teneurs en PFAS trouvées dans la neige des domaines skiables alpins de Klippitztörl (six sites), Teichalm (un site) et Schladming (cinq sites). Les échantillons ont été prélevés principalement dans les stations de départ et d'arrivée des téléskis, des télésièges et des télécabines.

Tab. 4 : PFAS trouvés dans la neige sur des sites de ski alpin autrichiens en 2022 en ng/L (P=percentile)

PFAS	12 sites dans trois stations de ski alpin (Klippitztörl, Teichalm et Schladming)				
	Min.	10. P	50. P	90. P	Max.
PFBA	< LOD	< LOD	≈ 1	67	113
PFPa	< LOD	< LOD	< LOD	≈ 5	10
PFHxA	< LOD	< LOD	≈ 10	22	28
PFHpA	< LOD	< LOD	< LOQ	≈ 3	5
PFOA	< LOD	< LOD	< LOD	< LOQ	< LOQ
PFNA	< LOD	< LOD	< LOQ	≈ 3	≈ 6
PFDA	< LOD	< LOD	< LOQ	≈ 16	20
PFUnDA	< LOD	< LOD	< LOD	< LOQ	< LOQ
PFDODA	< LOD	< LOD	< LOD	< LOQ	0.3
PFTTrDA	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOQ
PFOS	< LOD	< LOD	< LOD	≈ 2	≈ 3

Sur un total de 33 substances à analyser, dix PFCA et du PFOS ont été détectés ; tous les autres PFAS étaient en dessous de la limite de détection (LD). Les limites de quantification (LOQ) étaient comprises entre 0,3 et 20 ng/L, en fonction des substances. Sur trois sites situés en dehors des pistes de ski alpin et de ski de fond, aucun PFAS n'a été détecté.

Dans la station de ski familiale de Klippitztörl, en Carinthie, avec trois téléskis, deux télésièges et 28 km de pistes de ski alpin, des PFAS ont été détectés sur ces six sites analysés. Des teneurs en PFAS entre 10 et 140 ng/L ont été mesurées. Sur quatre des six sites, 100% des PFAS étaient des PFCA à chaîne courte en C<sub>4</sub>-C<sub>7</sub>. La plus grande station de ski prise en compte dans le cadre de l'étude était Schladming, en Styrie. Les PFAS y ont été quantifiés sur trois des cinq sites. Les teneurs variaient entre 2 et 45 ng de PFAS par litre. Comme à Klippitztörl, les PFCA en C<sub>4</sub>-C<sub>7</sub> dominaient, avec des teneurs comprises entre 75 et 100 %. Dans la petite station de ski familiale de Teichalm, qui propose des pistes de ski alpin et de ski de fond, 70 ng de PFAS/L ont été mesurés sur le site de ski alpin échantillonné et 110 ng d'PFAS/L sur le site de ski de fond au début de la piste. La proportion de PFCA à longue chaîne en C<sub>8</sub>-C<sub>10</sub> était légèrement plus élevée sur le site de ski de fond (36%) que sur le site de ski alpin (17%), avec une prédominance de PFCA en C<sub>4</sub>-C<sub>7</sub> sur les deux sites (62-83%) ; une petite proportion de PFAS (2%) sur le site de ski de fond était constituée de PFOS. Enfin, dans la station de ski alpin du Lachtal, située en Styrie, où six téléskis et deux télésièges desservent 26 km de pistes, les PFAS n'ont jamais été retrouvés dans les échantillons de neige de sept sites. Ceci n'a pas été pris en compte dans les calculs de centiles présentés dans le tableau 4.

Des échantillons de sol ont aussi été prélevés dans le cadre de l'étude autrichienne dans la station de ski alpin de Klippitztörl ainsi que sur le transect d'une piste de ski de fond du Lachtal. Les teneurs en PFAS du Lachtal étaient comprises entre 0,55 et 5,40 µg/kg. Elles étaient souvent comprises entre 0,7 et 2,1 µg/kg (20ème et 80ème percentiles). Le PFNA dominait, suivi du PFDA et du PFUnDA (tableau 5).

Outre les PFCA, seul le PFOS a pu être quantifié à deux reprises dans le Lachtal à des teneurs de 0,45 et 0,60 µg/kg. Les substances cibles ne permettent d'expliquer que 0,3 à 1,5 % du fluor organiquement lié (EOF) extractible déterminé dans les sols. Souvent, les teneurs en EOF se situent entre 90 et 155 µg/kg (médiane : 115 µg F/kg).

Tableau 5 : PFAS trouvés en 2021 dans le sol (10 cm de profondeur) sur un site de ski de fond en Autriche, en µg/kg de poids sec (P = percentile)

PFAS	20 échantillons de sol (23 analyses) sur le transect d'une piste de ski de fond (Lachtal)				
	Min.	10. P	50. P	90. P	Max.
PFBA	< LOD	< LOD	< LOQ	0.39	1.60
PFPA	< LOD	< LOD	< LOQ	< LOQ	0.21
PFHxA	< LOD	< LOD	< LOQ	< LOQ	< LOQ
PFHpA	< LOD	< LOQ	< LOQ	0.35	0.57
PFOA	< LOD	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1.04
PFNA	0.23	0.30	0.49	0.77	0.90
PFDA	< LOQ	0.18	0.29	0.67	0.72
PFUnDA	0.12	0.14	0.28	0.56	0.72
PFDoDA	< LOD	< LOD	< LOQ	0.18	0.23
PFTTrDA	< LOD	< LOD	< LOQ	< LOQ	< LOQ
PFHxS	< LOD	< LOD	< LOQ	< LOQ	< LOQ
PFOS	< LOD	< LOD	< LOQ	< LOQ	0.60
FOSA	< LOD	< LOD	< LOQ	< LOQ	< LOQ

Dans la station de ski alpin de Klippitztörl dans la région Kärnten, des PFAS ont été trouvés dans deux échantillons de sol prélevés dans les gares de départ et d'arrivée d'un télésiège, ainsi que dans un sol témoin (aire de jeux éloigné du télésiège). Des teneurs en PFOS relativement élevées ont été détectées le long des remontées mécaniques (2,9 et 0,85 µg/kg), le sol de contrôle contenant également beaucoup de PFOS (0,95 µg/kg). Dans les sols situés à proximité des remontées mécaniques, la somme des PFCA en C<sub>9</sub>-C<sub>14</sub> s'élevait à 1,05 µg/kg dans la station aval et à 1,95 µg/kg dans la station amont. D'autres PFAS n'ont pas pu être déterminés.

Les résultats des études menées en Autriche montrent que l'on trouve également des PFAS dans la neige des domaines skiables alpins, qui peuvent être attribués à l'abrasion des farts de ski, les PFCA à chaîne courte (C<sub>4</sub>-C<sub>7</sub>-PFCA) étant prédominants. Les niveaux de PFAS varient à la fois au sein d'un domaine skiable et entre les domaines skiables. Ainsi, dans deux domaines skiables familiaux de taille comparable, des représentants des PFAS ont été identifiés sur tous les sites d'un domaine et sur aucun site de l'autre. De même, les teneurs élevées en PFCA à longue chaîne en C<sub>8</sub>-C<sub>12</sub> dans les sols à l'endroit d'une piste de ski de fond indiquent une abrasion des farts de ski. Ces concentrations élevées sont dues aux impuretés qu'ils contiennent ou à la dégradation partielle de leurs composants, comme les alcanes semi-fluorés. Cependant, l'analyse des homologues de PFCA n'a permis d'expliquer qu'une fraction du fluor organique (EOF) présent dans les sols.

Afin d'évaluer la contamination par les PFAS du biote terrestre dans une station de ski, des vers de terre (*Eisenia fetida*) et des campagnols des bois (*Myodes glareolus*), omnivores et également consommateurs de vers, ont été échantillonnés entre 2017 et 2018 dans la station de ski de Granåsen, située dans une zone de loisirs de la ville norvégienne de Trondheim. Une zone de forêt naturelle également proche de Trondheim et présentant une végétation similaire a servi de site témoin [30]. De plus, dix échantillons de sol ont été prélevés dans chacune de ces zones à une profondeur de 3 à 10 cm. Les vers ont été congelés immédiatement après le prélèvement, de sorte qu'ils ont été analysés avec leur contenu intestinal. Les foies des rongeurs ont été analysés et on a évalué qu'ils contribuaient à 90 % de la charge corporelle totale en PFAS. La gamme des substances analysées comprenait dix PFCA, trois acides perfluorosulfoniques et cinq amides d'acide perfluorooctane sulfonique.

La somme des PFAS mesurée dans les sols du site de sports d'hiver (1,57 µg/kg) et du site témoin (1,54 µg/kg) ne diffère pas. Le PFCA prédominant dans les échantillons du site témoin était le PFBA (C<sub>4</sub>-PFCA), alors que le PFDA (C<sub>10</sub>-PFCA) dominait dans ceux du site de sports d'hiver (tableau 6). Le nombre de valeurs supérieures à la limite de quantification pour les C<sub>12</sub>-C<sub>14</sub>-PFCA était nettement plus élevé dans les échantillons de la station de sports d'hiver que dans ceux du site témoin.

Tab. 6 : Valeurs moyennes et extrêmes des PFAS dans les sols (entre 3 et 10 cm de profondeur) en µg/kg de poids sec

PFAS	Site de sports d'hiver (n = 10)	Site témoin (n = 10)
PFBA	0,15 (< LOQ – 0,56)	0,59 (< LOQ – 1,06)
PFHxA	0,05 (< LOQ – 0,18)	0,06 (< LOQ – 0,18)
PFHpA	0,09 (< LOQ – 0,29)	0,14 (< LOQ – 0,62)
PFOA	0,16 (< LOQ – 0,40)	0,10 (< LOQ – 0,22)
PFNA	0,18 (< LOQ – 0,60)	0,20 (< LOQ – 0,93)
PFDA	0,42 (< LOQ – 1,96)	0,08 (< LOQ – 0,15)
PFUnDA	0,13 (< LOQ – 0,29)	0,07 (< LOQ – 0,12)
PFDoDA	0,16 (< LOQ – 0,40)	< LOQ (< 0,09)
PFTriDA	0,09 (< LOQ – 0,20)	< LOQ (< 0,08)
PFTeDA	0,12 (< LOQ – 0,14)	< LOQ (< 0,01)
PFBS	< LOQ (< 0,01)	0,01 (< LOQ – 0,04)
PFHxS	< LOQ (< 0,03)	< LOQ (< 0,03)
PFOS	0,11 (< LOQ – 0,34)	0,30 (0,08 – 0,64)

Dans les vers de terre, la somme des PFAS était 35 % plus élevée sur ceux du site de sports d'hiver que sur ceux du site témoin (10,5 et 6,9 µg/kg), mais les

valeurs ne différaient pas de manière statistiquement significative en raison des fortes variances dans les résultats de mesure. Comme pour les sols, le PFBA dominait sur le site témoin. Dans la station de sports d'hiver, le PFTeDA (C<sub>14</sub>-PFCA) était prédominant (tableau 7)

Tab. 7 : Valeurs moyennes et extrêmes des PFAS dans les vers de terre en µg/kg de poids frais

PFAS	Site de sports d'hiver (n = 13)	Site témoin (n = 13)
PFBA	tous : < LOQ	3,20 (< LOQ – 15,6)
PFHxA	1,41 (< LOQ – 5,56)	0,87 (< LOQ – 5,55)
PFHpA	< LOQ (< 0,23)	< LOQ (< 0,23)
PFOA	0,63 (< LOQ – 2,47)	< LOQ (< 0,28)
PFNA	0,45 (< LOQ – 1,94)	0,35 (< LOQ – 1,72)
PFDA	0,61 (< LOQ – 2,74)	0,16 (< LOQ – 0,64)
PFUnDA	0,63 (0,06 – 2,46)	0,21 (< LOQ – 0,71)
PFDoDA	1,73 (< LOQ – 8,35)	0,15 (< LOQ – 0,32)
PFTriDA	2,36 (0,29 – 15,70)	0,78 (< LOQ – 2,35)
PFTeDA	3,06 (< LOQ – 24,2)	0,43 (< LOQ – 2,41)
PFBS	< LOQ (< 0,33)	< LOQ (< 0,33)
PFHxS	< LOQ (< 0,35)	< LOQ (< 0,35)
PFOS	0,37 (< LOQ – 1,28)	0,76 (< LOQ – 1,78)
FOSA	< LOQ (< 0,24)	< LOQ (< 0,24)
N-MeFOSA	< LOQ (< 0,83)	< LOQ (< 0,83)
N-EtFOSA	< LOQ (< 0,28)	< LOQ (< 0,28)
N-MeFOSE	< LOQ (< 0,31)	< LOQ (< 0,31)
N-EtFOSE	< LOQ (< 0,40)	< LOQ (< 0,40)

La teneur moyenne en PFAS dans les campagnols des bois sur le site de sports d'hiver était environ 6 fois plus élevée que celles mesurées dans les campagnols du site témoin. Cette différence, tout comme celle concernant les teneurs en C<sub>10</sub>-C<sub>14</sub>-PFCA à longue chaîne, a été considérée comme statistiquement significative (tableau 8).

Tab. 8 : Valeurs moyennes et extrêmes des PFAS chez les campagnols en µg/kg de poids frais

PFAS	Site de sports d'hiver (n = 21)	Site de témoin (n = 31)
PFBA	< LOQ (< 0,44)	< LOQ (< 1,9)
PFHxA	< LOQ (< 5,3)	1,54 (< LOQ – 3,41)
PFHpA	< LOQ (< 3,0)	< LOQ (< 1,4)
PFOA	< LOQ (< 2,2)	< LOQ (< 0,8)
PFNA	0,97 (< LOQ – 7,15)	0,74 (< LOQ – 4,03)
PFDA	1,80 (< LOQ – 11,3)	0,39 (< LOQ – 2,14)
PFUnDA	1,43 (< LOQ – 13,6)	< LOQ (< 1,0)
PFDoDA	2,11 (< LOQ – 30,4)	0,19 (< LOQ – 0,65)
PFTriDA	2,15 (< LOQ – 31,5)	< LOQ (< 0,03)
PFTeDA	2,56 (< LOQ – 48,3)	< LOQ (< 0,48)

PFAS	Site de sports d'hiver (n = 21)	Site de témoin (n = 31)
PFBS	< LOQ (< 1.3)	< LOQ (< 1.9)
PFHxS	1.14 (< LOQ – 6.24)	< LOQ (< 1.8)
PFOS	3.30 (< LOQ – 16.0)	< LOQ (< 2.1)
FOSA	< LOQ (< 0,16)	< LOQ (< 0,17)
N-MeFOSA	< LOQ (< 0,81)	< LOQ (< 3.10)
N-EtFOSA	< LOQ (< 0,28)	< LOQ (< 4.30)
N-MeFOSE	< LOQ (< 2.20)	< LOQ (< 0,30)
N-EtFOSE	< LOQ (< 0,22)	< LOQ (< 1.31)

En résumé, l'étude menée en Norvège montre que la part relative de chaque homologue par rapport à la somme des PFCA dans les sols, les vers de terre et les campagnols des bois sur le site des sports d'hiver ressemble au modèle que l'on trouve dans les farts de ski, où les PFCA à longue chaîne dominant. Seule la présence de PFOS dans les campagnols des bois sur le site des sports d'hiver est surprenante : Alors que le PFOS était présent à des teneurs plus élevées dans les sols et les vers de terre du site témoin, avec 0,3 µg/kg et 0,8 µg/kg respectivement, contre 0,1 µg/kg et 0,4 µg/kg dans ceux du site de ski, on a déterminé une teneur de 3,3 µg/kg dans les campagnols des bois du site de ski, contre une teneur inférieure à la limite de détermination dans le site témoin.

En ce qui concerne la présence de PFAS dans les stations de ski suisses, aucune étude similaire à ce qui a été fait en Suède, en Norvège, en Autriche et aux États-Unis n'est connue. En revanche, des échantillons de sol prélevés en Suisse entre 2010 et 2021 ont récemment été analysés pour déterminer leur teneur en PFAS [31]. Sur les 147 échantillons, sept concernaient des sites de sports d'hiver, dont six étaient des prairies (Oberghoms et Orsières sur deux sites chacun et Evolène avec prélèvement en 2021 et Disentis avec prélèvement en 2013) et un site forestier (Davos avec prélèvement en 2014). Le tableau 9 ci-dessous résume la contamination des sols (0–20 cm de profondeur) par les PFOS ainsi que par les PFCA de longueur de chaîne entre six et onze. Les PFCA avec des longueurs de chaîne plus longues étaient présents au-dessus de la limite de quantification dans dix échantillons de sol pour le PFDoDA et dans deux échantillons pour le PFTeDA. Le PFTrDA n'a pu être quantifié dans aucun sol.

Parmi les sols présentant des traces de PFDoDA, deux se trouvaient dans des stations de sports d'hiver, dont un était également pollué par du PFTeDA. Le PFDA et le PFUnDA ont été détectés dans six (≈ 85 %) et quatre (≈ 60 %) sols des sept sites de sports d'hiver.

La comparaison des 90e percentiles des sites de prairies (non utilisées pour les sports d'hiver) avec ceux des sites de sports d'hiver montre dans ces derniers une pollution par les PFOA et les PFNA supérieure de 30 %. Celle-ci reste cependant légèrement inférieur à la pollution des sols forestiers. Dans les sites de sports d'hiver, en comparaison avec les sites de prairies, le PFDA (0,62 contre 0,13 µg/kg) et le PFUnDA (0,46 contre 0,10 µg/kg) y est détecté en quantité cinq fois plus élevées. De plus, la charge y étant 2 à 3 fois plus élevée que dans les sols forestiers (tableau 9), la perte de fart de ski par frottement pourrait avoir contribué à la contamination constatée pour ces C<sub>10</sub>–C<sub>11</sub>-PFCA.

La médiane des teneurs en PFOS sur les sites de sports d'hiver était de 0,43 µg/kg, proche de celle des sites de prairies (0,39 µg/kg) mais plus basse que celle des sols en forêt (0,69 µg/kg). La valeur très élevée en PFOS de 13 µg/kg sur un site à Oberghoms, correspondant à la deuxième plus forte teneur en PFOS mesurée dans les sols suisses, est étonnante pour deux raisons. D'une part, une teneur en PFOS beaucoup plus faible à 0,12 µg/kg a été mesurée sur un deuxième site dans cette vallée. D'autre part, sur le site en question, on a constaté, outre une teneur élevée en PFOS, des pollutions par un précurseur du PFOS, le perfluorooctane *sulfonamide* (FOSA) et par l'acide *N*-éthyl perfluorooctane sulfonamido-acétique (*N*-EtFOSAA), un métabolite du *N*-éthyl perfluorooctane sulfonamidoéthanol (*N*-EtFOSE). Le FOSA et ses précurseurs n'ont pas été trouvés dans la neige dans des domaines de ski de fond aux États-Unis [28], ni dans les vers de terre et le foie des campagnols des bois en Norvège [29]. Étant donné que des FOSA et la substance apparentée (*N*-MeFOSAA) ont également été trouvés sur un site non influencé par le ski et présentant la plus forte pollution par les PFOS en Suisse, il est à pu être démontré que la cause de la pollution par les PFOS constatée sur le site de sports d'hiver d'Oberghoms ait une autre origine que les farts de ski.

Tab.9 : Teneurs en PFAS dans les sols suisses (entre 0 et 20 cm de profondeur) selon les sites (en µg/kg d.w.). Les teneurs fréquentes correspondent au 20e et 80e percentile. Les sites de sports d'hiver comprennent un site de forêt et six sites de prairies.

Sites	PFOS	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA
<i>Sports d'hiver (n = 7)</i>							
- Valeurs extrêmes	0.12–13.27	N.D.–0,27	N.D.–0,35	0.14–0.91	0.08–0.30	N.D.–1.16	N.D.–0,46
- Teneurs fréquentes	0.19–0.72	N.D.	0.07–0.23	0.18–0.57	0.10–0.26	0.08–0.24	N.D.–0,20
- 50e centile	0.43	N.D.	0.10	0.26	0.25	0.16	0.09
- 90e centile	5.76	0.15	0.23	0.73	0.28	0.62	0.46
<i>Prairies (n = 29)</i>							
- Teneurs fréquentes	0.19–1.13	N.D.–0,12	0.08–0.15	0.17–0.43	0.08–0.18	N.D.–0,09	N.D.–0,08
- 50e percentile	0.39	N.D.	0.09	0.28	0.12	0.06	N.D.
- 90e centile	2.73	0.16	0.18	0.54	0.22	0.13	0.10
<i>Forêts (n = 28)</i>							
- Teneurs fréquentes	0.41–1.67	N.D.–0,28	0.09–0.18	0.42–0.74	0.14–0.30	0.07–0.26	N.D.–0,14
- 50e percentile	0.69	0.20	0.15	0.53	0.19	0.12	0.09
- 90e centile	2.34	0.40	0.24	1.10	0.38	0.31	0.25
<i>Sites urbains (n = 22)</i>							
- Teneurs fréquentes	0.44–1.35	N.D.–0,18	0.09–0.20	0.30–0.65	0.07–0.20	N.D.–0.11	N.D.–0,07
- 50e percentile	0.85	0.13	0.14	0.41	0.12	0.06	N.D.
- 90e centile	2.18	0.26	0.22	0.78	0.21	0.14	0.08
<i>Sites alpins (n = 7)</i>							
- Teneurs fréquentes	0.09–0.24	N.D.	0.10–0.17	0.20–0.32	0.13–0.17	0.06–0.07	N.D.–0,06
- 50e percentile	0.15	N.D.	0.13	0.22	0.14	0.07	N.D.
- 90e centile	0.25	0.06	0.19	0.34	0.18	0.10	0.09

Dans une autre région de Suisse, des craintes d'une contamination des poissons des lacs de l'Engadine par des PFAS dus aux farts de ski ont été émises, car la piste de ski de fond de 42 km du marathon de ski de l'Engadine, qui débute à Maloja, traverse les lacs de Sils, Silvaplana et Champfèr. Selon une analyse commandée par un magazine suisse de protection des consommateurs, des teneurs élevées en PFOA, comprises entre 500 et 2700 µg/kg, ont été trouvées dans les abats de 13 poissons sur un total de 44 prélevés dans les trois lacs. Par la suite, les autorités grisonnes ont fait analyser l'eau des lacs et les poissons en 2021 pour déterminer la présence de PFAS [32]. Dans 35 échantillons d'eau issue de quatre lacs de Haute-Engadine (lacs de Sils, Silvapla, Champfèr et St. Moritz), des PFCA avec des longueurs de chaîne entre six (PFHxA) et huit (PFOA) ont été détectés à des teneurs de 0,1 à 0,4 ng/L. Dans 31 des 35 échantillons, le PFNA a été mesuré à hauteur de 0,1 à 0,2 ng/L, tandis que les PFCA à chaîne plus longue (C<sub>10</sub>–C<sub>12</sub>-PFCA) n'ont pu être quantifiés au-dessus de la limite de détermination de 1 ng/L dans aucun échantillon. Dans 40 poissons (truites de rivière, ombles chevalier, touladis, ombres) du lac de Sils, le PFOA n'a pas été détecté dans la chair musculaire mais détecté dix fois (25 %)

dans le foie à des teneurs comprises entre 1 et 9 µg/kg. Les médianes des teneurs dans le foie étaient de 2,5 µg/kg (truites de rivière), 1,9 µg/kg (ombles chevalier) et 3,7 µg/kg (touladis). La médiane sur l'ensemble des poissons était environ sept fois plus basse pour le PFOA (2 µg/kg) que pour le PFOS (14,5 µg/kg). Selon les auteurs, aucune différence n'a été constatée entre les lacs avec et sans ski de fond à leur surface en ce qui concerne la contamination des poissons par les PFAS.