

**Biomonitoring des populations de Chièvres, Ath, Beloeil et Leuze exposées
aux PFAS de l'eau potable : recommandations pour réduire la charge
corporelle, la protection du groupe le plus vulnérable et le suivi médical des
personnes contaminées**

Alfred BERNARD

Professeur émérite UCLouvain

Directeur de recherches FNRS honoraire

1. Signification de la concentration des PFAS dans le sang

Les concentrations des PFAS à longue chaîne¹ dans le plasma (partie liquide du sang) sont le reflet de la charge corporelle en PFAS, c'est-à-dire de la quantité totale de PFAS accumulée au fil des années par les personnes ayant consommé de l'eau potable contaminée. Ce test est le seul qui permet d'évaluer le niveau d'imprégnation des populations de Chièvres, Ath, Beloeil et Leuze qui ont été chroniquement exposées aux PFAS pendant une période indéterminée de plus de 5 ans au moins. Ce test, cependant, présente certaines limites dont la plus importante est qu'il ne permet pas de prédire sur une base individuelle les effets sanitaires des PFAS, en particulier les risques d'affections chroniques multifactorielles comme les cancers ou les affections cardiovasculaires (CDC, 2024 ; ATSDR, 2024). C'est tout particulièrement le cas avec l'eau du puits n° 1 de Chièvres dont le profil des PFAS est dominé par le PFHxS, un congénère pour lequel on dispose de très peu de données chez l'homme, les études épidémiologiques ayant été pour la plupart menées sur des populations principalement exposées aux PFOA et PFOS. La prédiction des risques sanitaires à un niveau individuel est d'autant plus aléatoire que la demi-vie² du PFHxS dans le sang présente d'importantes variations entre les études (moyennes comprises entre 2.8 to 8.5 ans) avec des valeurs extrêmes comprises entre 2 et 10 ans. Ces variations sont en partie liées à des facteurs physiologiques dont nous ignorons la nature exacte (Rosato et al., 2024).

A ce jour, seuls le PFOA et le PFOS ont fait l'objet d'une évaluation par le Centre International de Recherche sur le Cancer (IARC) qui en 2023 a classé le PFOA dans le groupe 1 des cancérigènes avérés et le PFOS dans le groupe 2B des cancérigènes possibles pour l'homme (IARC, 2023). Cette classification, cependant, repose uniquement sur des observations chez l'animal et sur des considérations mécanistiques (modifications épigénétiques et immunosuppression) en raison du caractère limité (PFOA) et inadéquat (PFOS) des preuves épidémiologiques reliant ces deux PFAS au cancer du rein et du testicule. Aux Etats-Unis, PFOA et PFOS ont été classés comme cancérigènes probables pour l'homme sur la base de risques accrus de cancers du rein et du testicule chez l'homme et l'animal (U.S. EPA, 2024).

A ce stade de nos connaissances, le biomonitoring des PFAS à longue chaîne¹ permet de **rassurer** lorsque les concentrations des PFAS restent largement en dessous des seuils de toxicité, de **réduire** une charge corporelle trop élevée ou de **prévenir** l'exposition du groupe le plus vulnérable constitué du fœtus et du nourrisson allaité au sein. En 2018, l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA) a établi une dose hebdomadaire tolérable (DHT) pour la somme de quatre PFAS (PFOA + PFOS + PFHxS + PFNA) de 4,4 ng par kg de poids corporel. Cette DHT a été fixée pour prévenir la baisse de la réponse immunitaire à la vaccination chez le nourrisson allaité au sein. A Chièvres, cette DHT, qui ne comporte aucune marge de sécurité, était dépassée d'un facteur 10 chez les femmes enceintes ayant consommé uniquement l'eau du robinet.

¹ PFCAs (PFAS carboxyliques comme le PFOA et PFNA) ≥ 8 atomes de carbone ; PFSAs (PFAS sulfoniques comme le PFOS et le PFHxS) ≥ 6 atomes de carbone. PFAS: substances poly- ou perfluoroalkylées.

<https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/aboutpfass/>.

² La demi-vie est le temps nécessaire pour que la concentration dans le sang soit réduite de moitié.**2.**

Interprétation des concentrations de PFAS dans le plasma

Les différents congénères de PFAS à longue chaîne ne présentent pas le même potentiel toxique. Les études expérimentales ont établi des facteurs d'équivalence toxique en utilisant comme congénère de référence le PFOA. Ces facteurs d'équivalence toxique qui varient entre 0,3 et 10 pour les PFAS à longue chaîne devraient à terme permettre de composer un indice global de toxicité pour évaluer les risques des mélanges de congénères. A défaut d'une pondération pour le potentiel toxique des différents congénères, une évaluation basée sur la simple addition des concentrations plasmatiques ne permet pas une évaluation fiable des risques sanitaires. L'interprétation des résultats doit aussi prendre en considération le fait que notre exposition aux PFOS et PFOA a diminué depuis les années 2000, tant aux États-Unis que dans l'Union européenne. Avant les années 2000, la concentration plasmatique moyenne ou médiane de la somme des 4 PFAS (PFOA + PFOS + PFHxS + PFNA) était proche de 40 ng/ml donc largement au-dessus des concentrations et valeurs limites actuelles (Figure 1).

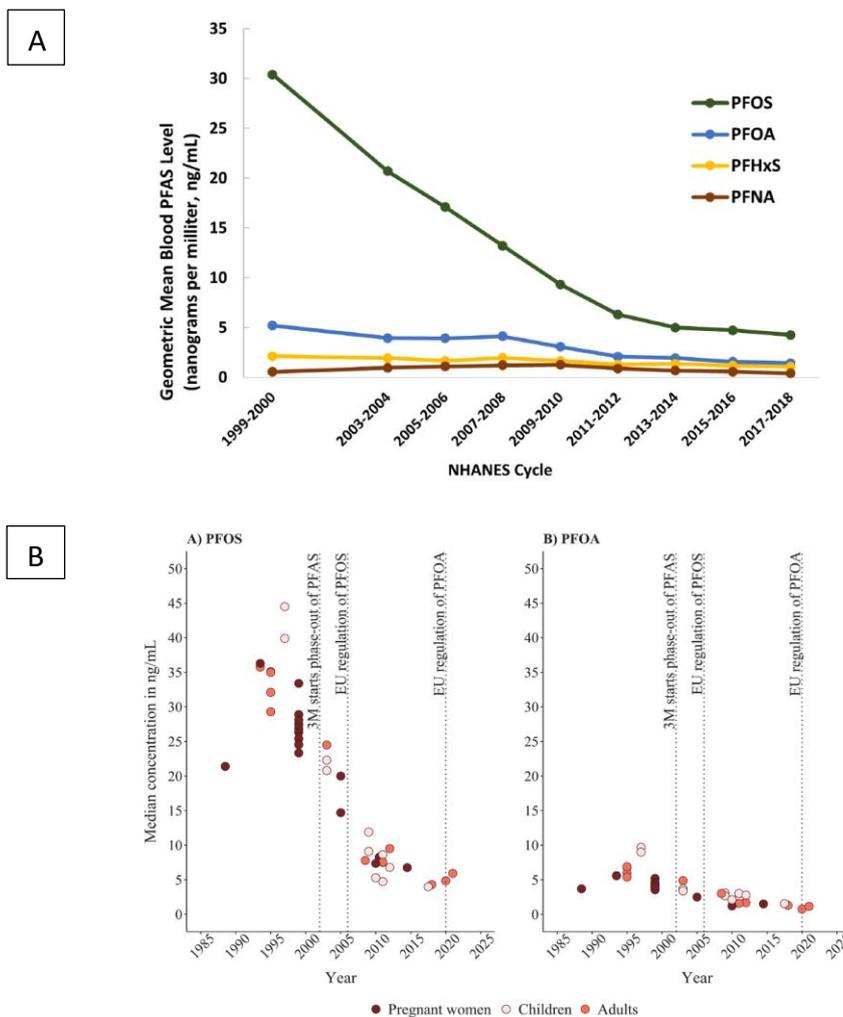


Fig. 1. Median concentration of PFOS and PFOA in ng/mL measured in the Danish population, 1988-2021.

Figure 1. Évolution des concentrations moyennes ou médianes des PFAS dans le plasma aux USA (A, U.S. EPA) et au Danemark (B, Hull et al. 2023) depuis les années 1990.

Le tableau 1 reprend les valeurs limites biologiques HBM-I et HBM-II proposées pour le PFOA et le PFOS par l'Agence Allemande de Protection de l'Environnement (UBA, Schüman et al., 2021). Les valeurs pour le PFHxS sont extrapolées de celles du PFOA en utilisant le facteur d'équivalence toxique dérivé des effets immunosuppresseurs chez l'animal (Bil et al., 2023). Les valeurs HBM-I correspondent aux niveaux d'exposition en dessous desquels il n'existe aucun risque d'effets délétères pour l'ensemble de la population. Les valeurs HBM-II correspondent aux niveaux d'exposition à partir desquels des effets délétères peuvent survenir. Les effets délétères (Tableau 2) les plus précoces sont une diminution de la réponse vaccinale chez l'enfant et une augmentation du cholestérol sanguin chez l'adulte. Ces effets précoces sont des facteurs de risque dans la survenue d'affections respiratoires (enfant) ou le développement de maladies cardio-vasculaires (adulte).

Tableau 1. Valeurs biologiques de référence recommandées par l'Agence Allemande de Protection de l'Environnement (Schüman et al., 2021).

Congénère*	HBM-I	HBM-II	
	ng/ml plasma	ng/ml plasma	
	Ensemble de la population	Ensemble de la population	Femmes en âge de procréer
PFHxS [#]	4	20	10
PFOS	5	20	10
PFOA	2	10	5

*Somme ramifié + linéaire. [#]Les seuils HBM-I et HBM-II du PFHxS ont été établis sur la base du facteur d'équivalence toxique « relative potency factor (RPF) » pour les organes lymphoïdes (PFHxS, 0,5 ; PFOA, 1 ; Bill et coll. 2023).

Tableau 2. Principaux effets sanitaires associés de façon causale à l'exposition chronique aux PFAS.

Exposition périnatale
<ul style="list-style-type: none"> . Diminution de la réponse immunitaire à la vaccination . Baisse du poids à la naissance (50-100 g) . Développement insuffisant de la glande mammaire
Exposition postnatale – 18 ans
<ul style="list-style-type: none"> . Perturbation dans la synthèse des hormones thyroïdiennes . Perturbation dans la synthèse des hormones contrôlant le développement du système reproducteur de l'homme et la femme
Exposition chez l'adulte
<ul style="list-style-type: none"> . Augmentation du cholestérol sanguin (dyslipidémie) . Augmentation du risque de cancer du rein et testicule

En rouge, les effets délétères les plus précoces

3. Interprétation du profil des congénères de PFAS dans le plasma

Les proportions des congénères de polluants organiques persistants comme les PFAS à longue chaîne sont des signatures qui permettent de retracer les sources de contamination. Les signatures des PFAS à longue chaîne sont particulièrement stables dans notre organisme qui est incapable de les métaboliser et donc d'altérer leur profil. La concentration totale des 20 PFAS dans l'eau potable du puits n°1 de Chièvres était en moyenne de 330 ng/l, donc largement au-dessus de la norme européenne de 100 ng/l. Le profil des PFAS à longue chaîne dans l'eau potable de Chièvres était dominé par le PFHxS (51 %), suivi du PFOS (33 %), du PFOA (15 %) et du PFNA (1 %). Un profil identique dans le plasma des participants du biomonitoring permet d'attribuer formellement l'augmentation de la charge corporelle à la consommation d'eau potable du puits n° 1 de Chièvres. Ce profil de PFAS dans le plasma est en effet radicalement différent de celui de la population générale en Région wallonne qui est caractérisé par une prédominance du PFOS (55 %), suivi du PFOA (24 %), du PFHxS (14 %) et du PFNA (7 %) (Pirard et al., 2020). La seule autre source possible de contamination débouchant sur un profil de PFAS dans le plasma correspondant à celui dans l'eau du puits n°1 de Chièvres serait une exposition professionnelle dans un secteur ayant produit ou utilisé des PFAS à longue chaîne.

4. Recommandations en cas de dépassement des valeurs HBM-I et HBM-II

4.1. Concentrations dans le plasma supérieures aux valeurs HBM-II

Des concentrations de PFAS dans le plasma supérieures aux valeurs biologiques de référence HBM-II du Tableau 1 sont le signe d'une surcharge corporelle en PFAS à partir de laquelle il existe des risques d'effets délétères. En pratique cependant, les valeurs HBM-II doivent d'abord être considérées comme des seuils d'intervention pour réduire sa charge corporelle en PFAS et pour prévenir l'exposition des groupes les plus vulnérables. Pour le comité scientifique en charge des HBM-II, il n'existe aucune raison de recommander la détermination de paramètres cliniques lorsque les valeurs HBM-II sont modérément dépassées chez des personnes qui ne présentent pas d'autres facteurs de risque (Schüman et al., 2021). Un dépassement de 10 à 15 % des seuils HBM-II reste d'ailleurs dans la marge d'erreur analytique du biomonitoring. A cette variation analytique, il convient de rajouter les variations intra-individuelles de mesures répétées sur une courte période qui sont très probablement de l'ordre de 10 à 50 % pour les différents congénères de PFAS à longue chaîne (Jia et al., 2022). A moins d'une confirmation d'une valeur anormalement élevée (ce qui est habituellement conseillé), le dépistage d'éventuels effets délétères sur le long terme ne peut être recommandé qu'en cas d'un net dépassement (> 50 %) des valeurs HBM-II. Les recommandations pratiques sont détaillées ci-après par catégorie de groupe à risque :

4.1.1. Ensemble de la population

- ◆ **Réduire la consommation des aliments qui sont une source importante de PFAS** tels que fruits de mer (crustacés et mollusques), viandes et œufs. Éviter de consommer des abats (foie et rognons) qui sont les principaux organes de stockage des PFAS des animaux d'élevage. Éviter de consommer des aliments et boissons contenus dans des emballages alimentaires anti-graisse et imperméabilisés. Maintenir toutefois une consommation régulière (2 fois par semaine) de poissons qui sont une source importante d'iode et d'acides gras oméga 3.

- ◆ **Consommer au moins 5 portions de fruits et légumes par jour** en privilégiant les légumes verts (épinards, haricots, choux de Bruxelles, brocoli), les fruits rouges (fraise, cerise, framboise, groseille, myrtille, mure) et les légumineuses (lentille, fève, haricot rouge) qui sont riches en folate (forme naturelle de l'acide folique, vitamine B9). Des études chez l'homme rapportant des associations négatives entre folate et PFAS dans le sang suggèrent que le folate favorise l'élimination des PFAS en inhibant leur réabsorption rénale et intestinale (Mancini et al., 2020 ; Jain, 2021 ; Tian et al., 2022 ; Zhang et al., 2023a,b). Certains effets délétères des PFAS comme la baisse du poids à la naissance ou la diminution de la réponse vaccinale ne s'observent que chez les personnes avec une déficience en folate (Zhang et al., 2023b,c). A cet effet protecteur du folate, il faut ajouter l'importante réduction (20-30 %) des risques de cancer et de maladies cardio-vasculaires conférée par une consommation régulière de fruits et légumes.

- ◆ **Dépistage d'une dyslipidémie** (dosage du cholestérol total, LDL-cholestérol, HDL-cholestérol et des triglycérides) une fois entre 9 et 11 ans et tous les 4-6 ans à partir de 20 ans en cas d'un net dépassement des valeurs HBM-II pour au moins un PFAS.

- ◆ **Dépistage d'un dysfonctionnement de la thyroïde** à partir de 18 ans (dosage de la thyroid stimulating hormone, TSH).

- ◆ **Dépistage de cancers.** On ne dispose pas de suffisamment de données chez l'homme permettant d'évaluer les risques de cancer associés aux PFHxS et PFOS qui sont les deux principaux congénères dans l'eau potable du puits n° 1 de Chièvres. En revanche on dispose d'une méta-analyse prédisant une augmentation de 3 % et de 16 % du risque de développer, respectivement, un cancer du testicule et un cancer du rein et pour une augmentation de 10 ng/ml de la concentration plasmatique du PFOA (Bartell and Vieira, 2021). Selon les données expérimentales, les potentiels toxiques du PFHxS et du PFOS au niveau du foie et du système immunitaire sont inférieurs à celui du PFOA. Néanmoins pour déterminer dans quelle mesure un dépistage de cancer est réellement justifié et ne représente pas une source d'inquiétude et de stress inutile, on peut dans une approche très prudente estimer le risque

absolu de cancer en postulant que le PFHxS et le PFOS ont le même potentiel cancérigène que le PFOA.

Cancer du testicule. On estime à 1/250 (0,40 %) le risque de cancer du testicule sur toute une vie³. En admettant que le risque de cancer du testicule augmente de 3% pour chaque augmentation de 10 ng/ml de PFHxS ou PFOS dans le plasma, un homme avec une concentration de 30 ng/ml encourrait un risque de cancer du testicule sur toute une vie de 1/230 (0,44 %). En d'autres termes, à la concentration plasmatique de 30 ng/ml de PFHxS ou de PFOS, le risque de cancer sur toute une vie ne serait accru que de 0,04 %, soit moins d'un cas pour deux mille hommes. Ces estimations basées sur un scénario très prudent rendent improbable un accroissement du risque de cancer testiculaire parmi les participants du biomonitoring à Chièvres ou ailleurs.

Cancer du rein. Le risque de cancer du rein sur toute une vie est estimé à 1/43 (2,33 %) chez l'homme et à 1/73 (1,40 %) chez la femme³. En admettant une augmentation du 16 % du risque de cancer du rein pour chaque élévation de 10 ng/ml du PFHxS ou du PFOS dans le plasma, un homme avec une concentration de 30 ng/ml aurait un risque de cancer de 1/29 (3,44 %), soit une augmentation de 1,1 % (11 cas pour mille). Pour une femme avec une concentration 30 ng/ml de PFHxS ou de PFOS, le risque serait de 1/48 (2,07 %) soit une augmentation 0,67 % (7 cas pour mille). En cas d'un net dépassement des valeurs HBM-II pour au moins un PFAS, un dépistage du cancer du rein après 45 ans est recommandé tout particulièrement aux personnes cumulant une surcharge corporelle en PFAS à d'autres facteurs de risque du cancer du rein (tabagisme, surpoids, antécédents familiaux ou insuffisance rénale).

Cancer du sein. Les études épidémiologiques sur les PFAS ne permettent pas à ce stade de conclure formellement que les PFAS augmentent le risque de cancer du sein. Toutefois, trois études épidémiologiques suggèrent que le PFOA pourrait favoriser le risque de cancer du sein chez les femmes avec une prédisposition génétique (Ghisari et al., 2017 ; Tsai et al., 2020 ; Mancini et al., 2020). En cas d'un net dépassement des valeurs HBM-II pour au moins un PFAS, il est recommandé de consulter son médecin pour mettre en évidence une éventuelle prédisposition génétique ou familiale au cancer du sein. Dans l'affirmative, il est vivement conseillé de pratiquer une mammographie de dépistage tous les deux ans à partir de 50 ans.

Ces recommandations de dépistage de cancer limitées au cancer du rein et au cancer du sein en cas de prédisposition génétique ou familiale sont confortées par les observations dans la ville de Ronneby en Suède où la population a été exposée pendant de nombreuses années à des concentrations

³Ces estimations de risque de cancer sur toute une vie (lifetime cancer risk) proviennent de l'*American Cancer Society*. Elles sont comparables à celles de *Cancer Research UK* : cancer du testicule, 1/220 ; cancer du rein, 1/52 pour l'homme et 1/87 pour la femme.

extrêmement élevées de PFHxS (1.700 ng/l) et PFOA (8.000 ng/l) dans l'eau potable. Les concentrations plasmatiques moyennes du PFHxS et du PFOA étaient 100 fois supérieures à celles de la population générale en Suède. Malgré cette extrême contamination, les risques de cancers du sein et du testicule n'étaient pas augmentés contrairement au risque de cancer du rein qui était significativement plus élevé dans le groupe le plus exposé (Li et al., 2022).

- ◆ **Un biomonitoring des concentrations des PFAS dans le plasma** après 2-3 ans est recommandé afin de s'assurer de la bonne diminution de la charge corporelle. Ce biomonitoring devrait idéalement faire appel au même laboratoire que celui qui a effectué le biomonitoring organisé par l'ISSeP.

4.1.2. Femmes enceintes ou avec un projet de grossesse

- ◆ **Supplémentation d'acide folique** (400 µg/jour) trois mois avant le début de la grossesse et pendant toute la durée de celle-ci. Un apport adéquat d'acide folique pendant la grossesse est en effet crucial pour garantir la santé de la mère, la croissance et le développement du fœtus. L'acide folique devrait aussi protéger le fœtus des méfaits des PFAS en réduisant sa charge corporelle (voir 4.1.1.) et en agissant au niveau épigénétique (Ondičová et al., 2022 ; Morales et al., 2024).
- ◆ **Suivi médical de la grossesse.** Accorder une attention toute particulière aux risques d'hypertension, de dyslipidémie et de diabète de type II qui sont décrits en cas de surcharge corporelle en PFAS.
- ◆ **Réduire la consommation des aliments qui sont une source importante de PFAS** en maintenant toutefois la consommation de poissons (2 fois par semaine) qui sont une source important d'iode et d'acides gras oméga 3 (voir 4.1.1.).
- ◆ **Consommer au moins 5 portions de fruits et légumes** par jour en privilégiant les légumes verts, les fruits rouges et les légumineuses qui sont riches en folate (voir 4.1.1.).

4.1.3. Femmes allaitantes

- ◆ **L'allaitement au sein** comporte de nombreux effets bénéfiques tant pour l'enfant que pour la maman. L'OMS recommande une durée d'allaitement

au sein minimale de 6 mois. Si la maman présente au moins un PFAS avec une concentration supérieure aux valeurs HBM-II, il est recommandé, en fonction de l'importance du dépassement des valeurs HBM-II, de ne pas allaiter au sein pendant plus de 6 mois, de réduire davantage la durée d'allaitement voire de s'abstenir d'allaiter au sein.

- ◆ **Réduire la consommation des aliments qui sont une source importante de PFAS** (voir 4.1.1.).
- ◆ **Consommer au moins 5 portions de fruits et légumes** par jour en privilégiant les légumes verts, les fruits rouges et les légumineuses qui sont riches en folate (voir 4.1.1.).

4.1.4. Femmes en âge de procréer

- ◆ **Réduire la consommation des aliments qui sont une source importante de PFAS** (voir 4.1.1.).
- ◆ **Consommer au moins 5 portions de fruits et légumes** par jour en privilégiant les légumes verts, les fruits rouges et les légumineuses qui sont riches en folate (voir 4.1.1.).

4.2. Concentrations dans le plasma comprises entre les seuils HBM-I et HBM-II

Des concentrations de PFAS dans le plasma comprises entre les seuils HBM-I et HBM-II sont le signe d'une surcharge corporelle en PFAS débutante qui n'est pas associée à un risque accru d'effets délétères dans l'état actuel de nos connaissances. Pour réduire cette surcharge corporelle en PFAS et éviter qu'elle ne progresse davantage, il est recommandé de :

- ◆ **Réduire la consommation des aliments** qui sont une source importante de PFAS (voir 4.1.1.).
- ◆ **Consommer au moins 5 portions de fruits et légumes** par jour en privilégiant les légumes verts, les fruits rouges et les légumineuses qui sont riches en folate (voir 4.1.1.).

5. Références

ATSDR, 2024. <https://www.atsdr.cdc.gov/pfas/health-effects/blood-testing.html>

Bartell and Vieira, 2021. Critical Review on PFOA, Kidney Cancer, and Testicular Cancer. Journal of the Air and Waste Management Association 71(6):663-679.

Bil et al., 2023. Internal relative potency factors based on immunotoxicity for the risk assessment of mixtures of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in human biomonitoring. *Environ Int* 171:107727.

CDC, 2024. <https://abcnews.go.com/Health/cdc-now-encouraging-doctors-blood-testing-forever-chemicals/story?id=106485712#:~:text=Potential%20health%20effects%20associated%20with,enzymes%2C%20according%20to%20the%20CDC.>

Ghisari et al., 2017. Polymorphism in xenobiotic and estrogen metabolizing genes, exposure to perfluorinated compounds and subsequent breast cancer risk: a nested case-control study in the Danish National Birth Cohort. *Environ Res* 154:325-333.

Hull et al., 2023. Time trends in per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) concentrations in the Danish population: a review based on published and newly analyzed data. *Environ Res* 15;237(Pt 2):117036.

IARC, 2023. Volume 135: Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS). Lyon.

Jain, 2021. Impact of the increasing concentrations of selected perfluoroalkyl acids on the observed concentrations of red blood cell folate among US adults aged ≥ 20 years. *Environ Sci Pollut Res Int* 28(37):52357-52369.

Jia et al., 2022. Emerging and legacy per- and polyfluoroalkyl substances in an elderly population in Jinan, China: the exposure level, short-term variation, and intake assessment. *Environ Sci Technol* 56: 7373-9146.

Li et al., 2022. Cancer incidence in a Swedish cohort with high exposure to perfluoroalkyl substances in drinking water. *Environ Res* 204(Pt C):112217.

Mancini et al., 2020. Perfluorinated alkylated substances serum concentration and breast cancer risk: evidence from a nested case-control study in the French E3N cohort. *Int J Cancer* 146(4):917-928.

Morales et al., 2024. Maternal non-compliance with recommended folic acid supplement use alters global DNA methylation in cord blood of newborns: A cohort study. *Clin Nutr* 43(6):1191-1198.

Ondičová et al., 2022. Folic acid intervention during pregnancy alters DNA methylation, affecting neural target genes through two distinct mechanisms. *Randomized Controlled Trial Clin Epigenetics* 14(1):63.

Pirard et al., 2020. Background contamination of perfluoroalkyl substances in a Belgian general

population. *Toxicology Letters* 333:13–21

Rosato et al., 2024. Estimation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) half-lives in human studies: a systematic review and meta-analysis. *Environ Res* 1:242:117743

Tian et al., 2022. Associations of single and multiple perfluoroalkyl substances exposure with folate among adolescents in NHANES 2007-2010. *Chemosphere*. 307(Pt 3).

Tsai et al., 2020. A case-control study of perfluoroalkyl substances and the risk of breast cancer in Taiwanese women. *Environ Int* 142:105850.

Schüman et al., 2021. Human biomonitoring (HBM)-II values for perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) - Description, derivation and discussion. *Regul Toxicol Pharmacol* 121:104868.

U.S. EPA., 2024. Maximum contaminant level goals for perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) in drinking water. United States Environment Protection Agency.

Zhang et al., 2023a. Folate concentrations and serum perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substance concentrations in adolescents and adults in the USA (National Health and Nutrition Examination Study 2003-16): an observational study. *Lancet Planet Health* 7(6):e449-e458.

Zhang et al., 2023b. Association of early pregnancy perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substance exposure with birth outcomes. *JAMA Netw Open* 6(5):e2314934.

Zhang et al., 2023c. Red blood cell folate modifies the association between serum per- and polyfluoroalkyl substances and antibody concentrations in U.S. Adolescents. *Environ Sci Technol* 14;57(6):2445-2456.